

# テラヘルツ帯分子で探る 近傍銀河の星形成

$\text{OH}^+$ ,  $\text{H}_2\text{O}^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ を用いた  
分子ガスの電離度の観測

渡邊祥正 (芝浦工業大学)

# 分子ガスの電離

## 分子ガスは電離している

- Diffuse Cloudの場合

$$n = 10 - 100 \text{ cm}^{-3}$$

星間紫外線により電離する ( $[e]/[H_2] \sim 10^{-4} - 10^{-7}$ )

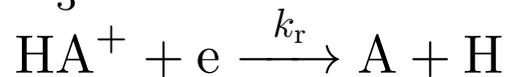
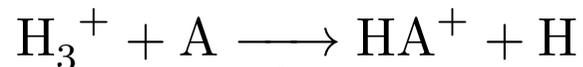
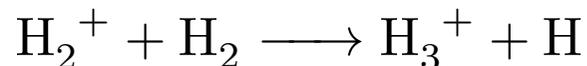
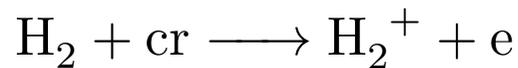
- (Dense) Molecular Cloudの場合

星間紫外線は分子雲を透過できない

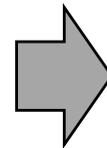
主要な電離源は**宇宙線**

e.g.) 銀河系の典型的な CR ionization rate:  $\zeta \sim 1.2 \times 10^{-17} \text{ s}^{-1}$

## 分子雲の電離度(簡単な推定)



$$k_r \sim 2.5 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$$



$$\frac{[e]}{[H_2]} \sim \sqrt{\frac{\zeta}{k_r [H_2]}}$$

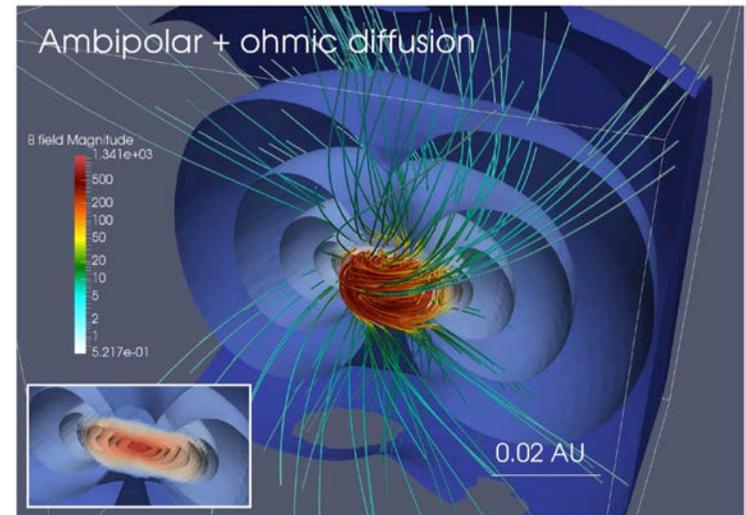
$n \sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$ の分子雲の場合

$$\frac{[e]}{[H_2]} \sim 2 \times 10^{-8}$$

# 分子雲の電離の重要性

## 分子雲のダイナミクス

- 分子雲が電離しているため磁場と分子ガスが相互作用する
  - 分子雲コアから原始星への収縮
  - フィラメント構造の形成
  - 星の初期質量関数への影響



Vaytet et al. 2018

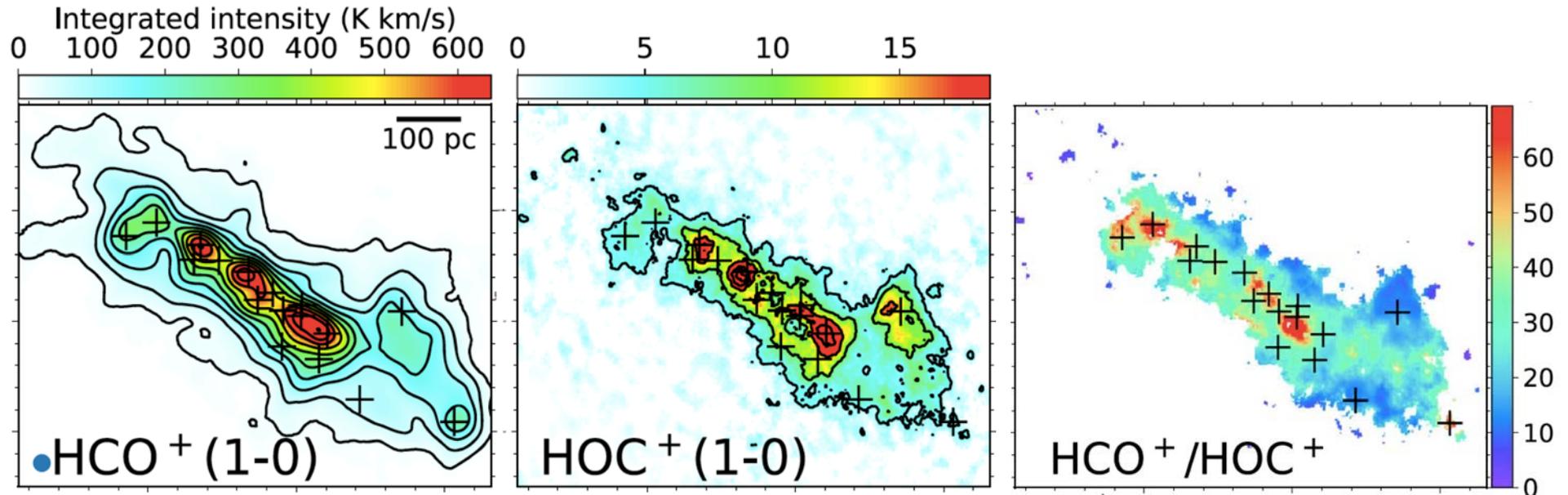
## 分子ガス中の化学反応(イオン-分子反応)

- 気相中ではイオン-分子反応が速く進む
- 反応係数   イオン-分子反応:  $k \sim 10^{-9} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$   
                  中性反応:  $k \sim 10^{-10}-10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$
- $\text{H}_3^+$ を介した反応、重水素濃縮( $\text{H}_2\text{D}^+$ )、etc.

# StarburstのCosmic-ray Dominated Region (CDR)

## Starburst銀河NGC 253

### ALMA Large Project ALCHEMIのデータ



Harada et al. 2021, ApJ, 923, 24

- 高いHCO<sup>+</sup>/HOC<sup>+</sup>比 (HOC<sup>+</sup>が多い): 10 - 150  
c.f. 渦状腕: > 1000  
Superbubbleで特に低い
- 光解離(PDR)による影響 or CDRの影響  
PDRの場合、低いA<sub>v</sub> ~ 5が必要  
CDRの場合はCR ionization rate:  $\zeta > 5 \times 10^{-14} \text{ s}^{-1}$   
=> 太陽近傍の~10<sup>3</sup>程度

# Cosmic-ray (CR) ionization rate

## 宇宙線による分子雲の電離

- 宇宙線は紫外線が届かない分子雲内部を電離

e.g.) 銀河系の典型的な CR ionization rate:  $\zeta \sim 5 \times 10^{-17} \text{ s}^{-1}$

- 分子雲の運動
- イオン中性反応など分子雲中の化学反応の理解に必要
- CDR (Cosmic-Ray Dominated Region)を持つstarburst銀河やULIRGの分子組成の理解にも重要

e.g.) M82, NGC 253 : Acciari et al. 2009; Acero et al. 2009;  
Papadopoulos et al. 2010

## $\text{OH}^+$ , $\text{H}_2\text{O}^+$ , $\text{H}_3\text{O}^+$ を使ったCR ionization rateの推定

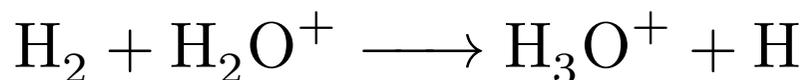
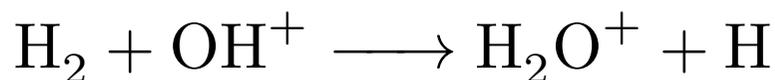
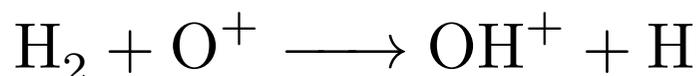
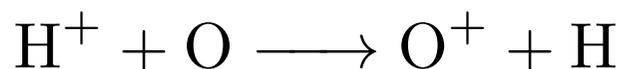
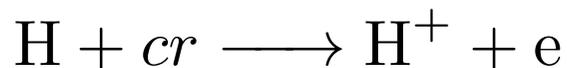
- 酸素は分子雲内では光により電離されない
- イオン化エネルギー: 13.618 eV (> H イオン化エネルギー)
- $\text{OH}^+$ ,  $\text{H}_2\text{O}^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ は $\text{H}^+$ や $\text{H}_3^+$ とOの反応で作られる

# OH<sup>+</sup>, H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>生成-破壊過程

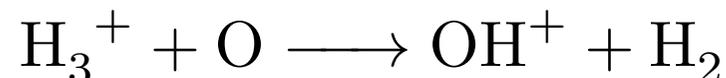
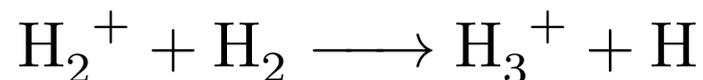
## 宇宙線による電離と酸素の化学反応

※酸素は分子雲内では光により電離されない (IP: 13.618 eV)

### Hから始まる場合



### H<sub>2</sub>から始まる場合

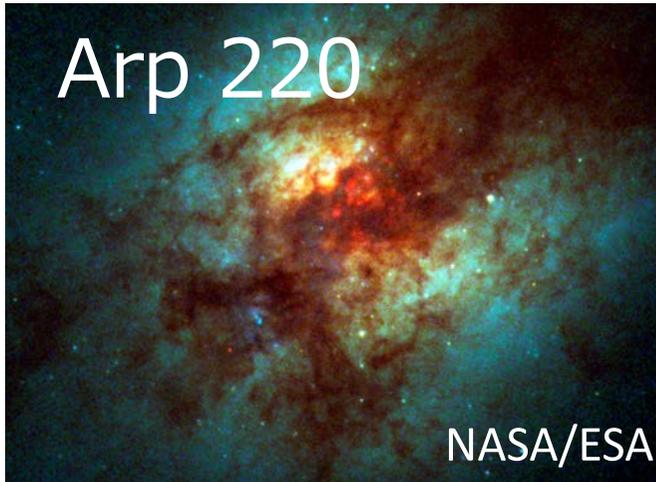


### H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>の破壊



OH<sup>+</sup>, H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>の存在量から宇宙線による分子ガスの電離度を化学反応計算との比較から推定できる

# 観測例: NGC 4418 & Arp220/Herschel PACS



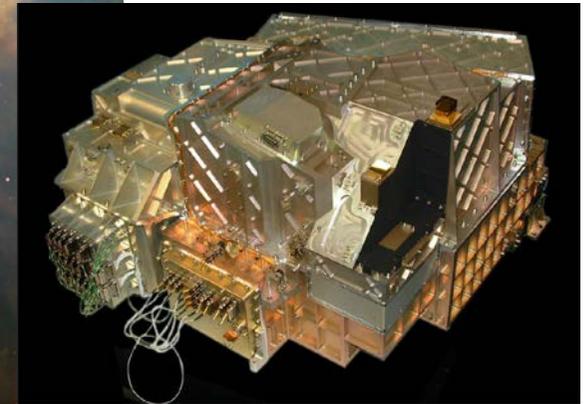
ULIRG,  $d = 77$  Mpc



LIRG/AGN,  $d = 37$  Mpc



PACS



## Wavelength

52.3 - 98  $\mu\text{m}$ , 104.6 - 196  $\mu\text{m}$

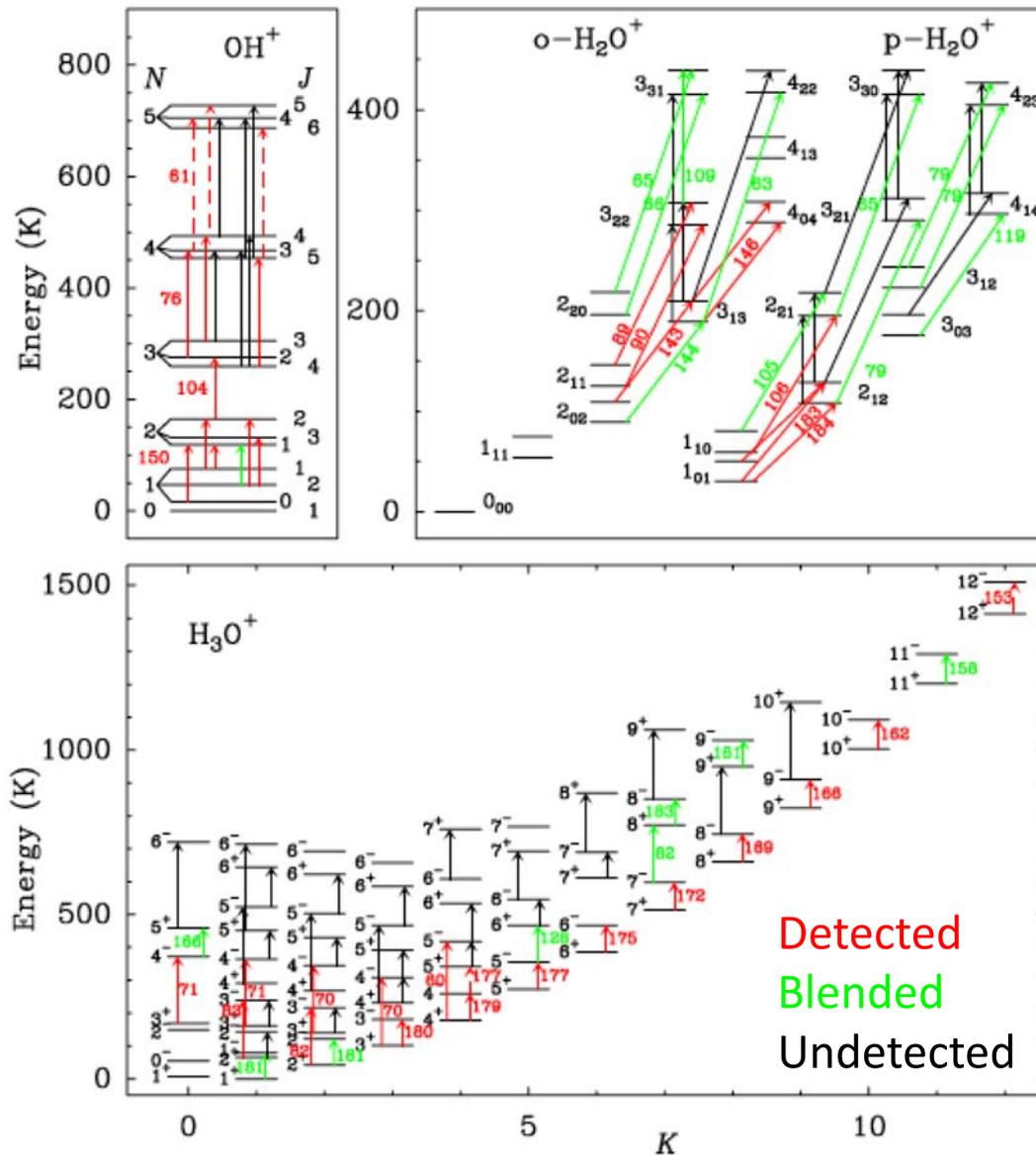
## Velocity Resolutions

$\sim 320$  km/s (105  $\mu\text{m}$ ) – 180 km/s (196  $\mu\text{m}$ )

$\sim 210$  km/s (52  $\mu\text{m}$ ) – 110 km/s (98  $\mu\text{m}$ )

González-Alfonso et al. 2013, A&A, 550, A25

# OH<sup>+</sup>, H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>の回転準位



OH<sup>+</sup>

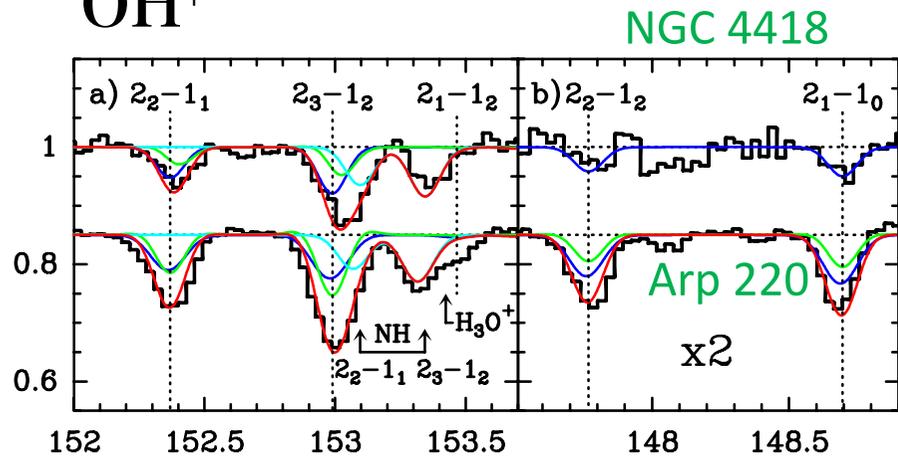
H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>

H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>

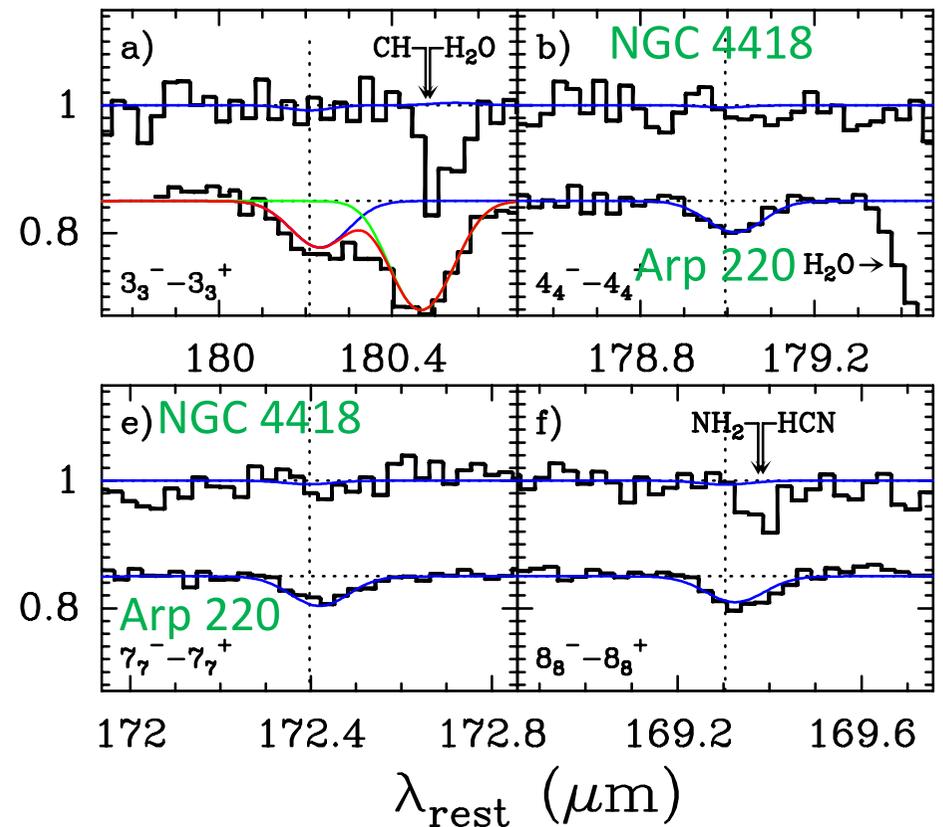
| Line  | $E_{lower}$ (K) | $\lambda$ ( $\mu\text{m}$ ) | $A_{ul}$ ( $\text{s}^{-1}$ ) |
|---|-----------------|-----------------------------|------------------------------|
| OH <sup>+</sup> 2 <sub>1</sub> -1 <sub>0</sub>  | 43.6            | 148.696                     | 0.10                         |
| OH <sup>+</sup> 2 <sub>3</sub> -1 <sub>2</sub>  | 46.6            | 152.989                     | 0.18                         |
| OH <sup>+</sup> 2 <sub>2</sub> -1 <sub>2</sub>  | 46.6            | 147.768                     | 0.048                        |
| OH <sup>+</sup> 2 <sub>2</sub> -1 <sub>1</sub>  | 49.6            | 152.369                     | 0.14                         |
| OH <sup>+</sup> 2 <sub>1</sub> -1 <sub>1</sub>  | 49.6            | 158.437                     | 0.071                        |
| OH <sup>+</sup> 4 <sub>5</sub> -3 <sub>4</sub>  | 281.9           | 76.510                      | 1.6                          |
| OH <sup>+</sup> 4 <sub>3</sub> -3 <sub>2</sub>  | 282.5           | 76.245                      | 1.5                          |
| OH <sup>+</sup> 4 <sub>4</sub> -3 <sub>3</sub>  | 285.5           | 76.399                      | 1.5                          |
| pH <sub>2</sub> O <sup>+</sup> 2 <sub>12</sub> <sup>+</sup> -1 <sub>01</sub> <sup>+</sup>   | 0.0             | 184.339                     | 0.086                        |
| pH <sub>2</sub> O <sup>+</sup> 2 <sub>12</sub> <sup>-</sup> -1 <sub>01</sub> <sup>-</sup>   | 0.1             | 182.915                     | 0.073                        |
| pH <sub>2</sub> O <sup>+</sup> 2 <sub>12</sub> <sup>+</sup> -1 <sub>01</sub> <sup>-</sup>   | 0.0             | 182.640                     | 0.016                        |
| pH <sub>2</sub> O <sup>+</sup> 2 <sub>21</sub> <sup>+</sup> -1 <sub>10</sub> <sup>+</sup>   | 29.1            | 105.742                     | 0.46                         |
| pH <sub>2</sub> O <sup>+</sup> 2 <sub>21</sub> <sup>-</sup> -1 <sub>10</sub> <sup>-</sup>   | 30.4            | 104.719                     | 0.39                         |
| oH <sub>2</sub> O <sup>+</sup> 3 <sub>13</sub> -2 <sub>02</sub>                             | 89.1            | 143.813                     | 0.18                         |
| oH <sub>2</sub> O <sup>+</sup> 3 <sub>13</sub> -2 <sub>02</sub>                             | 89.3            | 143.270                     | 0.17                         |
| oH <sub>2</sub> O <sup>+</sup> 3 <sub>22</sub> <sup>+</sup> -2 <sub>11</sub> <sup>+</sup>   | 125.0           | 89.590                      | 0.59                         |
| oH <sub>2</sub> O <sup>+</sup> 3 <sub>22</sub> <sup>-</sup> -2 <sub>11</sub> <sup>-</sup>   | 125.9           | 88.978                      | 0.57                         |
| oH <sub>2</sub> O <sup>+</sup> 4 <sub>04</sub> <sup>+</sup> -3 <sub>13</sub> <sup>+</sup>   | 189.2           | 145.917                     | 0.16                         |
| oH <sub>2</sub> O <sup>+</sup> 4 <sub>04</sub> <sup>-</sup> -3 <sub>13</sub> <sup>-</sup>   | 189.8           | 146.217                     | 0.15                         |
| oH <sub>3</sub> O <sup>+</sup> 3 <sub>3</sub> <sup>-</sup> -3 <sub>3</sub> <sup>+</sup>     | 102.0           | 180.209                     | 0.083                        |
| pH <sub>3</sub> O <sup>+</sup> 4 <sub>4</sub> <sup>-</sup> -4 <sub>4</sub> <sup>+</sup>     | 179.0           | 178.994                     | 0.091                        |
| pH <sub>3</sub> O <sup>+</sup> 5 <sub>5</sub> <sup>-</sup> -5 <sub>5</sub> <sup>+</sup>     | 273.4           | 177.272                     | 0.097                        |
| oH <sub>3</sub> O <sup>+</sup> 6 <sub>6</sub> <sup>-</sup> -6 <sub>6</sub> <sup>+</sup>     | 385.1           | 175.063                     | 0.10                         |
| pH <sub>3</sub> O <sup>+</sup> 7 <sub>7</sub> <sup>-</sup> -7 <sub>7</sub> <sup>+</sup>     | 514.0           | 172.396                     | 0.11                         |
| pH <sub>3</sub> O <sup>+</sup> 8 <sub>8</sub> <sup>-</sup> -8 <sub>8</sub> <sup>+</sup>     | 660.1           | 169.303                     | 0.12                         |
| oH <sub>3</sub> O <sup>+</sup> 9 <sub>9</sub> <sup>-</sup> -9 <sub>9</sub> <sup>+</sup>     | 823.3           | 165.819                     | 0.13                         |
| pH <sub>3</sub> O <sup>+</sup> 10 <sub>10</sub> <sup>-</sup> -10 <sub>10</sub> <sup>+</sup> | 1003.5          | 161.984                     | 0.14                         |
| oH <sub>3</sub> O <sup>+</sup> 12 <sub>12</sub> <sup>-</sup> -12 <sub>12</sub> <sup>+</sup> | 1414.7          | 153.424                     | 0.17                         |
| pH <sub>3</sub> O <sup>+</sup> 5 <sub>4</sub> <sup>-</sup> -4 <sub>4</sub> <sup>+</sup>     | 179.0           | 60.164                      | 0.49                         |
| oH <sub>3</sub> O <sup>+</sup> 4 <sub>3</sub> <sup>-</sup> -3 <sub>3</sub> <sup>+</sup>     | 102.0           | 69.538                      | 0.38                         |
| pH <sub>3</sub> O <sup>+</sup> 4 <sub>2</sub> <sup>-</sup> -3 <sub>2</sub> <sup>+</sup>     | 139.3           | 70.254                      | 0.63                         |
| pH <sub>3</sub> O <sup>+</sup> 4 <sub>1</sub> <sup>-</sup> -3 <sub>1</sub> <sup>+</sup>     | 161.7           | 70.684                      | 0.77                         |
| oH <sub>3</sub> O <sup>+</sup> 4 <sub>0</sub> <sup>-</sup> -3 <sub>0</sub> <sup>+</sup>     | 169.1           | 70.827                      | 0.81                         |
| pH <sub>3</sub> O <sup>+</sup> 3 <sub>2</sub> <sup>-</sup> -2 <sub>2</sub> <sup>+</sup>     | 42.3            | 82.274                      | 0.28                         |
| pH <sub>3</sub> O <sup>+</sup> 3 <sub>1</sub> <sup>-</sup> -2 <sub>1</sub> <sup>+</sup>     | 64.7            | 82.868                      | 0.44                         |

# NGC 4418 & Arp220/ $\text{OH}^+$ , $\text{H}_2\text{O}^+$ , $\text{H}_3\text{O}^+$

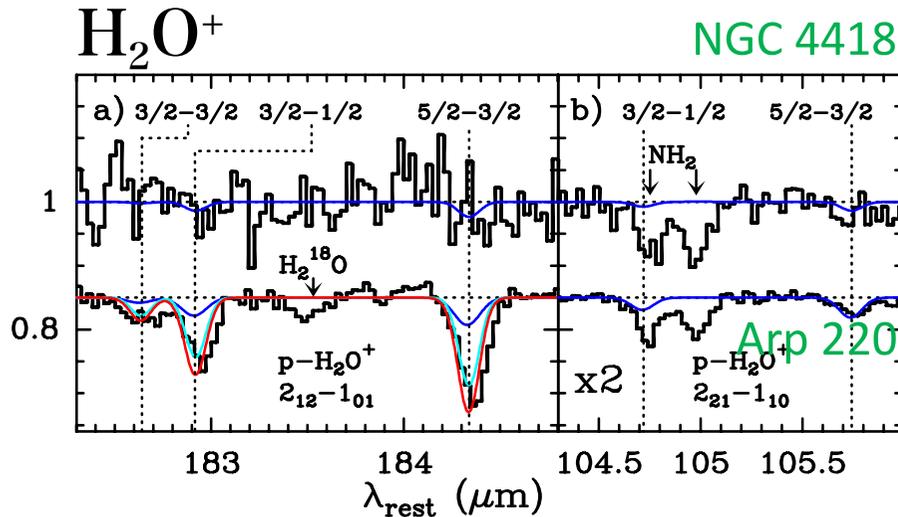
$\text{OH}^+$



$\text{H}_3\text{O}^+$



$\text{H}_2\text{O}^+$



González-Alfonso et al. 2013

# Chemical Modelを使った電離度の推定

| Reaction  | Rate coefficient<br>( $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ )                              |
|---|--|
| $\text{H}^+ + \text{O} \rightarrow \text{O}^+ + \text{H}$                         | $k_{\text{H}^+ \text{O}} = 7.31 \times 10^{-10} T_{300}^{0.23} \exp\{-225.9/T\}$ |
| $\text{O}^+ + \text{H} \rightarrow \text{O} + \text{H}^+$                         | $k_{\text{O}^+ \text{H}} = 5.66 \times 10^{-10} T_{300}^{0.36} \exp\{8.6/T\}$    |
| $\text{O}^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{OH}^+ + \text{H}$                      | $k_{\text{O}^+ \text{H}_2} = 1.7 \times 10^{-9}$                                 |
| $\text{OH}^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}^+ + \text{H}$            | $k_{\text{OH}^+ \text{H}_2} = 1.01 \times 10^{-9}$                               |
| $\text{H}_2\text{O}^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{H}$   | $k_{\text{H}_2\text{O}^+ \text{H}_2} = 6.4 \times 10^{-10}$                      |
| $\text{H}^+ + \text{OH} \rightarrow \text{OH}^+ + \text{H}$                       | $k_{\text{H}^+ \text{OH}} = 2.1 \times 10^{-9}$                                  |
| $\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}^+ + \text{H}$     | $k_{\text{H}^+ \text{H}_2\text{O}} = 6.9 \times 10^{-9}$                         |
| $\text{H}_2^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_3^+ + \text{H}$                   | $k_{\text{H}_2^+ \text{H}_2} = 2.08 \times 10^{-9}$                              |
| $\text{H}_3^+ + \text{O} \rightarrow \text{OH}^+ + \text{H}_2$                    | $k_{\text{H}_3^+ \text{O}:\text{OH}^+} = 8.4 \times 10^{-10}$                    |
| $\text{H}_3^+ + \text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}^+ + \text{H}$             | $k_{\text{H}_3^+ \text{O}:\text{H}_2\text{O}^+} = 3.6 \times 10^{-10}$           |
| $\text{H}_3^+ + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O}^+ + \text{H}_2$          | $k_{\text{H}_3^+ \text{OH}} = 1.3 \times 10^{-9}$                                |
| $\text{H}_3^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{H}_2$ | $k_{\text{H}_3^+ \text{H}_2\text{O}} = 5.9 \times 10^{-9}$                       |
| $\text{OH}^+ + e \rightarrow \text{O} + \text{H}$                                 | $k_{\text{OH}^+ e} = 3.75 \times 10^{-8} T_{300}^{-0.5}$                         |
| $\text{H}_2\text{O}^+ + e \rightarrow \text{products}$                            | $k_{\text{H}_2\text{O}^+ e} = 4.3 \times 10^{-7} T_{300}^{-0.5}$                 |
| $\text{H}_3\text{O}^+ + e \rightarrow \text{products}$                            | $k_{\text{H}_3\text{O}^+ e} = 4.3 \times 10^{-7} T_{300}^{-0.5}$                 |
| $\text{H}_3^+ + e \rightarrow \text{products}$                                    | $k_{\text{H}_3^+ e} = 6.7 \times 10^{-8} T_{300}^{-0.52}$                        |

化学モデル: Bruderer et al. 2009

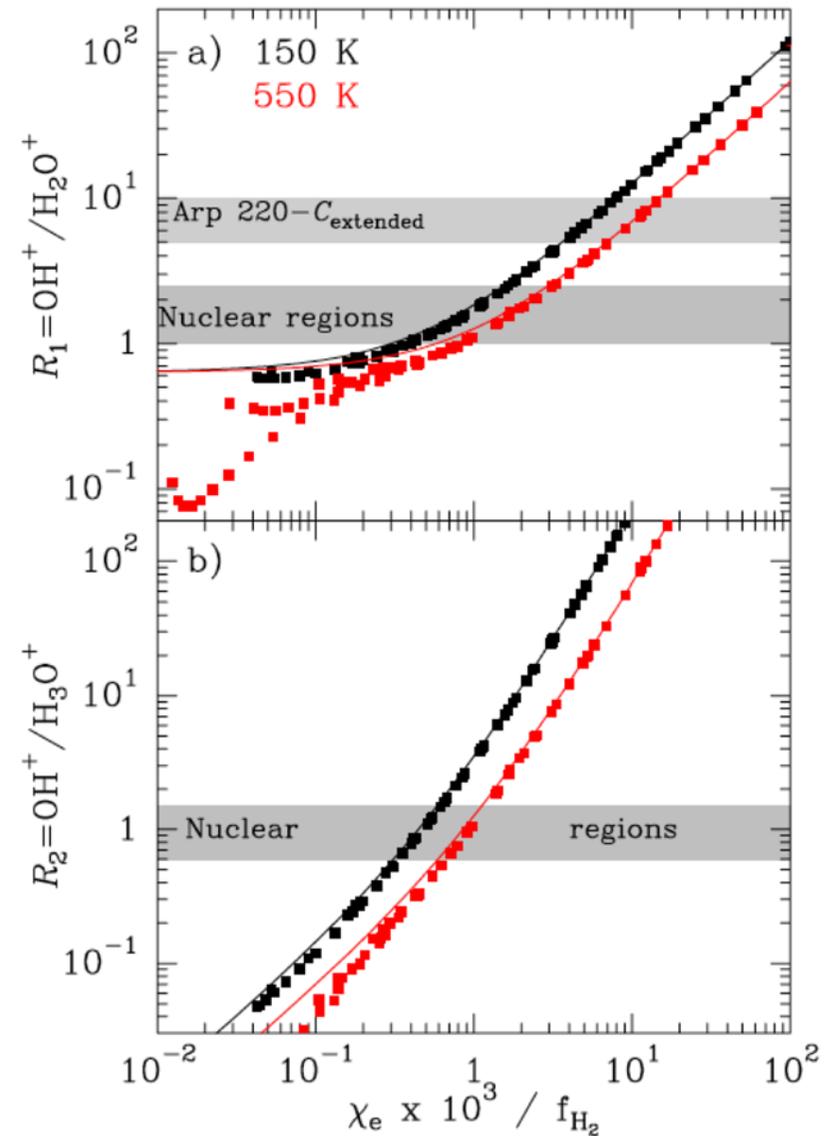
NGC 4418 & Arp220

Ionization rate:  $\zeta > 10^{-13} \text{ s}^{-1}$

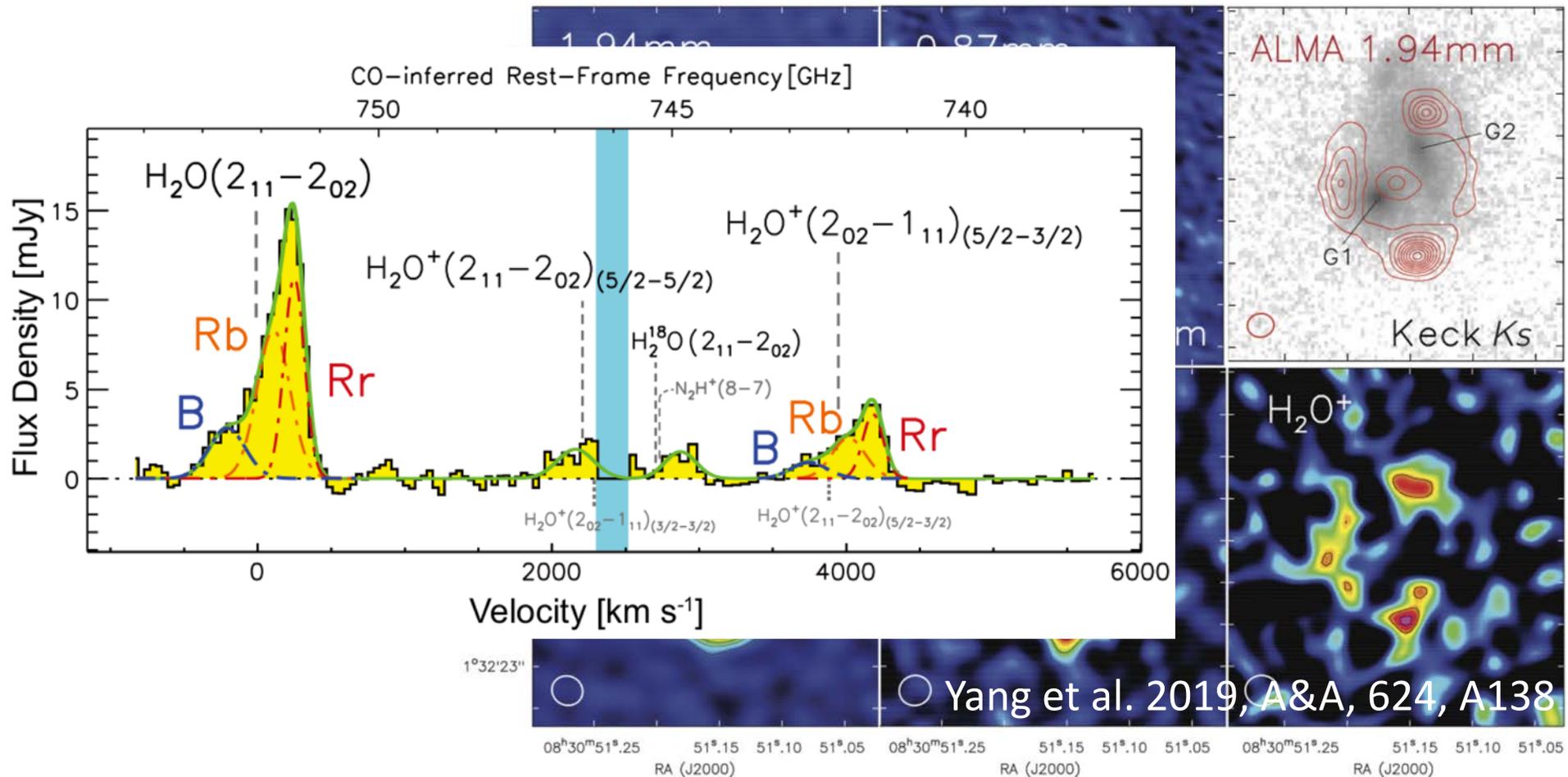
c.f.)  $\zeta \sim 10^{-17} - 10^{-16} \text{ s}^{-1}$  (solar vicinity)

Arp 220ではSupernova rateなどの宇宙線密度と矛盾しない

NGC 4418ではAGNからのX線が主要な電離源(XDR)の可能性も



# 赤方偏移 $z = 3.63$ での $\text{H}_2\text{O}^+$ の検出



$z = 3.63$ の天体: H-ATLAS J083051.0+013224 (G09v1.97)

Observation: ALMA Band 4

$o\text{-H}_2\text{O}^+(2_{02}-1_{11})$ : 742.114 GHz,  $o\text{-H}_2\text{O}^+(2_{11}-2_{02})$ : 746.546 GHz

$\text{HO}^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ の観測ができれば $z = 3.6$ の天体の分子ガスの電離状態がわかる?

# SPICAでの検討: 銀河中心核のOH<sup>+</sup>, H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>サーベイ

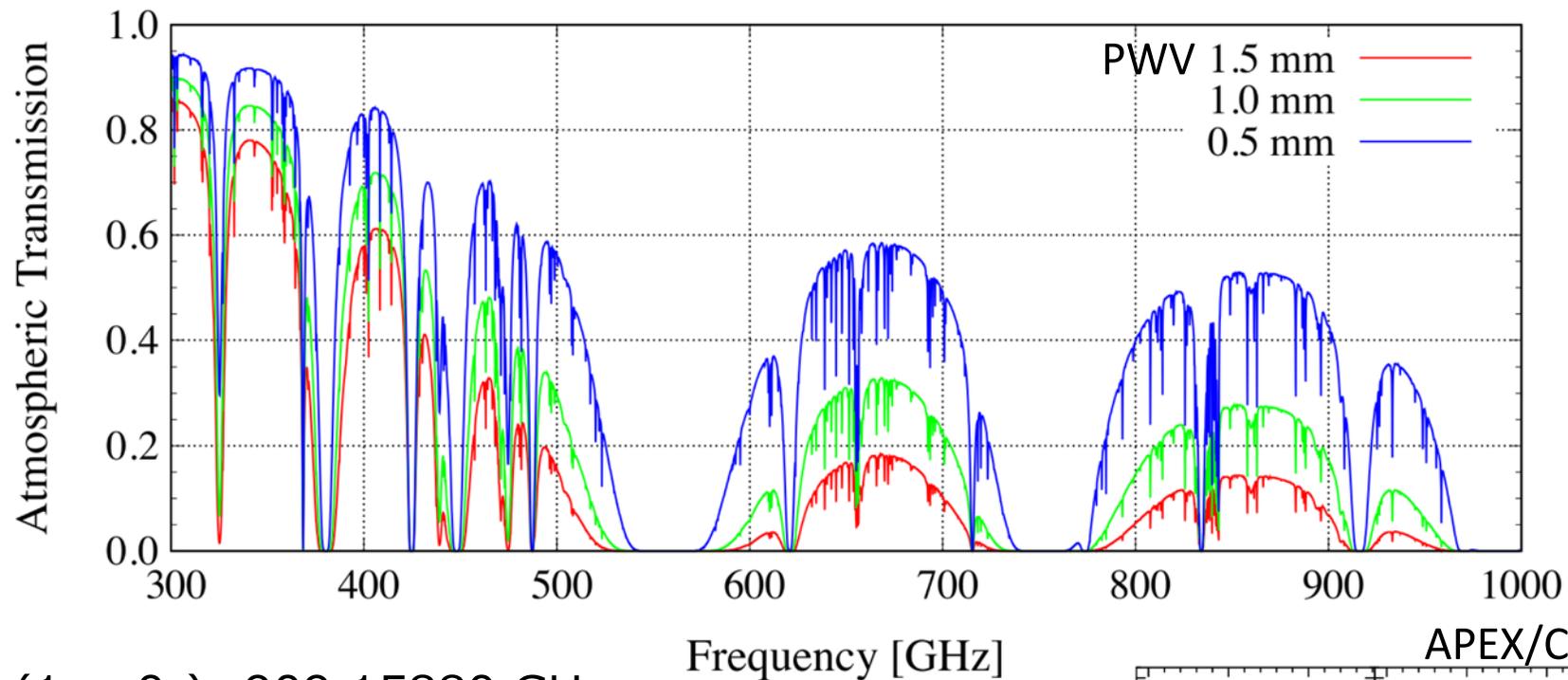
## 銀河中心核や前景における分子ガスの電離度

- $\lambda \sim 60 - 180\mu\text{m} \Rightarrow \text{SPICA/SAFARI}$
- AGN, starburst, ULIRGによる違いはあるか?
  - CDRを持つstarburstやULIRGとそれ以外中心核との比較
- 中心核における電離度と分子組成の関係
- AGN/Starburstの化学診断???
- Starburstでも超新星残骸起源の強い $\gamma$ 線が検出される  
e.g.) NGC 253, M82 (Acero et al. 2009, Abbo et al. 2010)  
(現状ではXDRとCDRの見分けがつかない。)

南極テラヘルツ望遠鏡でもOH<sup>+</sup>, H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>の観測

- 300 - 900 GHzに地上から観測可能な遷移が複数ある

# 南極から観測可能な遷移



$\text{OH}^+ (1_0 - 0_1)$ : 909.15880 GHz

$p\text{-H}_2\text{O}^+ (1_{10} 3/2 - 1_{01} 3/2)$ : 607.225790 GHz

$p\text{-H}_2\text{O}^+ (1_{10} 3/2 - 1_{01} 3/2)$ : 607.225790 GHz

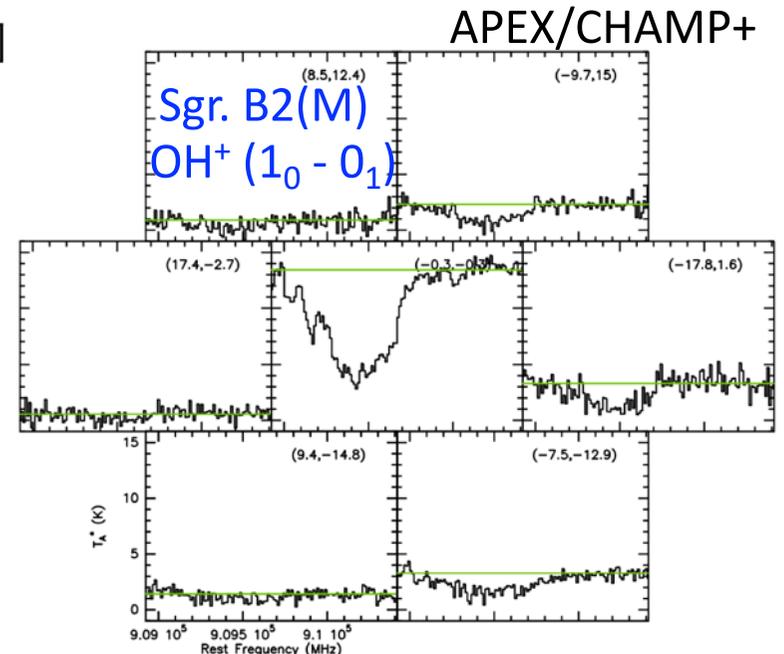
$(o\text{-H}_2\text{O}^+ (2_{11} 5/2 - 2_{02} 5/2))$ : 746.546213 GHz

※ 大気の窓外

$o\text{-H}_3\text{O}^+ (3_0 - 2_0)$ : 396.272412 GHz

$p\text{-H}_3\text{O}^+ (3_1 - 2_1)$ : 388.458641 GHz

SPICAよりも低励起 ( $E_u = 43 - 170$  K) の遷移が多い



Wyrowski et al. 2010, A&A, 518, A26

# 南極12 m望遠鏡での検出可能性

## Arp220を観測した場合

$N = 1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 、 $T = 150 \text{ K}$ 、LTEを仮定

OH<sup>+</sup> ( $1_0 - 0_1$ ): 909.15880 GHz

吸収線強度  $\Delta I = 3.4 \text{ Jy}$

10時間on点:  $\sim 0.2 \text{ Jy}$  (**S/N = 17**)

p-H<sub>2</sub>O<sup>+</sup> ( $1_{10} 3/2 - 1_{01} 3/2$ ): 607.225790 GHz

吸収線強度  $\Delta I = 0.2 \text{ Jy}$

10時間on点:  $\sim 0.03 \text{ Jy}$  (**S/N = 6**)

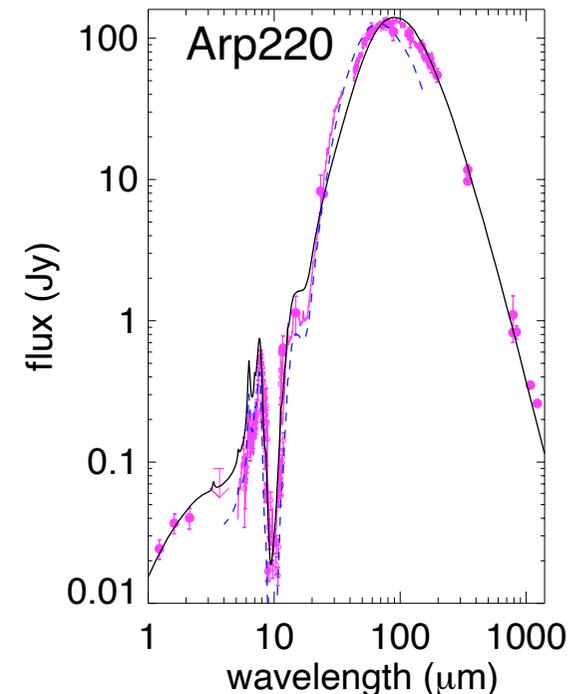
p-H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> ( $3_1 - 2_1$ ): 396.272412 GHz

吸収線強度  $\Delta I = 0.09 \text{ Jy}$

10時間on点:  $\sim 0.016 \text{ Jy}$  (**S/N = 5**) (速度分解能: 100 km/s)

各周波数設定を10時間積分で検出可能だが。。

- 観測時間( $\sim 75$ 時間)がかなり必要
- サーベイのためにはマルチバンドで同時観測  
(e.g. IRAM 30 m EMIR受信機)
- FMLO(Taniguchi et al. 2020)のようなoff点なし観測



Siebenmorgen et al. 2007

# まとめ

## 近傍銀河の中心方向へOH<sup>+</sup>, H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>の観測

- 300 – 900 GHzに地上から観測可能な遷移

OH<sup>+</sup> (1<sub>0</sub> - 0<sub>1</sub>): 909.15880 GHz

*p*-H<sub>2</sub>O<sup>+</sup> (1<sub>1 0 3/2</sub> - 1<sub>0 1 3/2</sub>): 607.225790 GHz

*p*-H<sub>2</sub>O<sup>+</sup> (1<sub>1 0 3/2</sub> - 1<sub>0 1 3/2</sub>): 607.225790 GHz

*o*-H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> (3<sub>0</sub> - 2<sub>0</sub>): 396.272412 GHz

*p*-H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> (3<sub>1</sub> - 2<sub>1</sub>): 388.458641 GHz

## 銀河中心核や前景における分子ガスの電離度

- AGN, starburst, ULIRGによる違いはあるか？

CDRを持つstarburstやULIRGとそれ以外中心核との比較

- 中心核における電離度と分子組成の関係
- ALMAを使った高赤方偏移天体への展開