

2024 年度 学士卒業論文

野辺山 45 m 望遠鏡を用いた
メタノールメーザー源の観測による
大質量原始星周囲のガス化学の研究

2025 年 2 月 28 日

指導教員 百瀬 宗武

茨城大学
理学部 理学科 物理学コース

21s2006a 大谷 正亮

概要

メタノールメーザーは大質量星形成領域に付随することが知られており，一部の天体では周期変動が検出されている．本研究では，メタノールメーザー源の周期変動の有無によるガスの化学進化や組成の違いを調べることを目的とする．主なターゲットとして炭素鎖分子および N_2H^+ を選定し，周期変動の有無で分類したメタノールメーザー源に対して，野辺山 45 m 望遠鏡を用いた分光観測を実施した．解析の結果，多くの天体で主要なラインを 5σ 以上の信号強度で検出した．また，簡易的な解析として，ライン強度の分散および天体の光度との相関を調査した．

目次

第 1 章	はじめに	3
1.1	研究背景	3
1.1.1	大質量原始星について	3
1.1.2	大質量星形成領域における炭素鎖分子の化学	3
1.2	研究目的	4
第 2 章	観測	5
2.1	観測概要	5
2.2	観測天体	5
第 3 章	解析	7
3.1	Java NewStar を用いた解析	7
3.1.1	FLAG	8
3.1.2	Large INTEG	8
3.1.3	BASELINE	8
3.2	Python を用いた解析	9
3.2.1	スペクトルの平均化	9
3.2.2	フィッティング	10
3.2.3	積分強度の計算	11
第 4 章	結果	12
4.1	ラインを検出した天体数	12
4.2	積分強度	13
4.3	積分強度と光度の関係	15
第 5 章	考察	18
第 6 章	まとめと今後の展望	19
付録		20
A	スペクトル	20
A.1	HC ₃ N - 100 GHz	20
A.2	HC ₃ N - 80 GHz	23
A.3	C ₂ H	26
A.4	H ¹³ CO ⁺	29
A.5	CH ₃ CCH	32
A.6	CH ₃ OH	35
A.7	N ₂ H ⁺	38

A.8	CH_3CN	41
B	ガウスフィットを行ったスペクトル	44
B.1	HC_3N - 100 GHz	44
B.2	HC_3N - 80 GHz	47
B.3	C_2H	50
B.4	H^{13}CO^+	55
	謝辞	56

第1章 はじめに

1.1 研究背景

1.1.1 大質量原始星について

太陽の8倍以上の質量をもつ恒星は大質量星と呼ぶ。若い大質量星による強い放射は周囲の星間物質の化学反応を促進する。その化学進化を解明することは、星形成や原始惑星系円盤の化学組成を理解する上で重要である。

また、メタノールメーザーは大質量星形成領域に付随することが知られており、一部には周期変動を示す天体も検出されている。周期変動のメカニズムについては複数の説が提唱されているが、10 - 100 日周期程度の連続的な変動の要因として、Inayoshi, K. et al. (2013) [1] は、高い降着率 ($\dot{M}_* \gtrsim 10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$) において原始星の半径が最大に達したとき、中心星が一時的に脈動不安定となるモデルを示した。この脈動不安定性によって周囲のガスやダストの温度が変化し、メタノールメーザーの周期変動を引き起こすと考えられている。

1.1.2 大質量星形成領域における炭素鎖分子の化学

これまで、炭素鎖分子の化学は主に中小質量星形成領域を対象として研究されてきた。中小質量星形成領域では、炭素鎖分子が分子雲コアから星形成コアにかけて減少することが知られていた [2]。しかし、後に星形成コアで欠乏していると考えられていた炭素鎖分子が豊富に存在する領域が確認され、新たな反応機構として、昇華した CH_4 を原料に炭素鎖分子が生成する Warm Carbon Chain Chemistry (WCCC) が提唱された [3]。

近年では、大質量星形成領域においても炭素鎖分子が検出され [4]、同様の研究が進められている。大質量星形成領域では、より強い紫外線や星風の影響を受けるため、炭素鎖分子の生成・破壊過程が中小質量星形成領域とは異なる可能性がある。

大質量原始星の化学進化を議論する上で、シアノポリイン HC_{2n+1}N などの炭素鎖分子や N_2H^+ の存在量が、化学進化の指標となることが示唆されている [5]。シアノポリイン HC_{2n+1}N の柱密度は、分子雲コアから星形成コアにかけて増加する一方、 N_2H^+ はダスト表面から昇華した CO との反応によって破壊され、わずかに減少する。図 1.1 のように、縦軸に HC_3N の柱密度、横軸に N_2H^+ と HC_3N の柱密度比をとり、進化段階ごとにプロットすることで、これらの分子の柱密度が分子雲コアから星形成コアへと進化する様子をトレースできる。

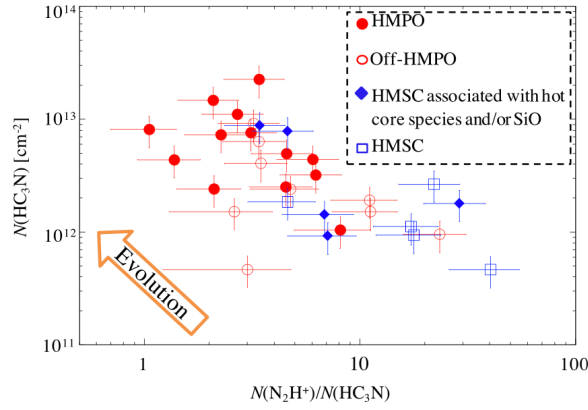


図 1.1: HMSC (大質量星なし分子雲コア) から HMPO (大質量原始星) にかけての化学進化. 右下から左上にかけて進化をトレースしている様子が見てとれる.

縦軸: HC_3N の柱密度, 横軸: N_2H^+ と HC_3N の柱密度比 (Taniguchi, K. et al. (2019) [5] より引用).

1.2 研究目的

メタノールメーザーは大質量星形成領域の特定の進化段階で発生しやすいことが知られている. そのためメタノールメーザー源のシアノポリイン HC_{2n+1}N や N_2H^+ の柱密度を周期変動の有無で分けて Taniguchi, K. et al. (2019) [5] の結果と比較することで, メタノールメーザーの発生, およびその周期変動が大質量星形成のどの段階と対応するのかを明らかにできる. また, 連続的な周期変動が脈動変動モデル [1] によるものであることを示唆する可能性がある.

本研究では Taniguchi, K. et al. (2019) [5] で示された大質量星の化学進化の指標を, メタノールメーザーの周期変動との関連性の観点から調べ, メタノールメーザーの発生期における周期変動の出現タイミングを議論することを目指す.

そこで, 炭素鎖分子や N_2H^+ をターゲットとして野辺山 45 m 望遠鏡を用いてメタノールメーザー源に対し観測を行った. さらにその結果を解析し, 今後の解析方針の参考にするためラインの強度や, それと天体の光度の関係について調べ周期変動の有無で比較を行った.

第2章 観測

2.1 観測概要

野辺山 45 m 望遠鏡を用いて複数輝線の観測を行った．以下が今回解析を行った観測の周波数設定と観測輝線の一覧である．

表 2.1: 周波数設定と観測輝線

周波数 [GHz] 輝線/遷移				周波数分解能 [kHz]	帯域幅 [MHz]	受信機
96.744549 CH ₃ OH/2-1	93.17348 N ₂ H ⁺ /1-0	91.971465 CH ₃ CN/5-4	81.881463 HC ₃ N/9-8	30.52	125	FOREST
100.076386 HC ₃ N/11-10	87.365334 C ₂ H/1-0	86.754288 H ¹³ CO ⁺ /1-0	85.455665 CH ₃ CCH/5-4	61.04	250	

2.2 観測天体

メタノールメーザー源を周期変動の有無で分類し，12 天体ずつ用いた．以下がその一覧である．ただし，光度は赤外線観測に基づく太陽光度基準のものである．なお，光度及び周期変動の有無については，茨城大学研究員の田辺義浩氏によって行われた文献調査に基づいている．

表 2.2: 観測天体 (周期変動あり)

天体名	距離 [kpc]	光度 ($L_{\odot}$)
174.19-00.09	1.8	4.41×10^3
213.70-12.59	0.9	3.48×10^4
188.94+00.88	2.1	1.20×10^4
012.88+00.48	2.5	2.27×10^4
014.23-00.50	2.0	5.36×10^3
034.39+00.22	1.6	5.37×10^3
035.79-00.17	3.6	3.83×10^3
075.76+00.34	3.8	1.95×10^5
107.29+05.63	0.8	3.23×10^2
108.75-00.96	4.1	5.70×10^4
111.53+00.76	2.6	1.69×10^5
022.35+00.06	4.7	2.53×10^4

表 2.3: 観測天体 (周期変動なし)

天体名	距離 [kpc]	光度 ($L_{\odot}$)
188.71+01.03	2.0	9.54×10^3
192.60-00.05	1.6	2.29×10^4
019.88-00.53	3.4	1.25×10^4
035.02+00.35	2.3	2.07×10^4
069.52-00.97	2.5	2.35×10^4
078.10+03.64	1.6	8.90×10^3
094.58-01.79	3.6	2.74×10^4
108.18+05.51	0.8	5.89×10^2
111.24-00.76	3.4	1.21×10^4
232.62+00.99	1.7	8.66×10^3
015.03-00.67	2.0	3.44×10^5
023.65-00.12	3.2	1.08×10^4

第3章 解析

解析にはリダクションソフト “Java NewStar” および Python スクリプトを用いた。大まかには，Java NewStar を用いて時間積分，ベースラインフィットを行い，そのスペクトルを茨城大学 D3 の折原龍太氏によって作成された Python スクリプトを用いてテキスト形式に変換し，自作の Python スクリプトで平均化，フィッティングなどを行う流れで進めた。

3.1 Java NewStar を用いた解析

Java NewStar はアメリカ国立電波天文台が開発した “AIPS” をベースにした野辺山 45 m 電波望遠鏡向けに作成されたソフトウェアである。Java NewStar を用いた解析では “NewStar manual” [6] を参考にした。

Java NewStar を起動し，使用するディレクトリを選択すると以下のようなウィンドウが表示される。

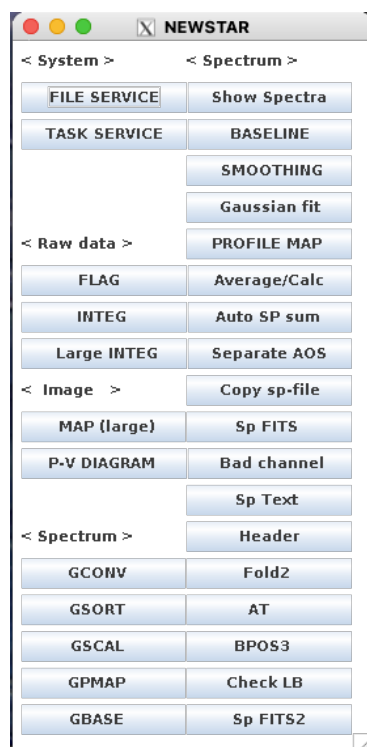


図 3.1: Java NewStar のメニュー画面

今回の解析では “FLAG”， “Large INTEG”， “BASELINE” を用いた。

3.1.1 FLAG

時間積分してスペクトルを得る前に、悪天候等で状態が悪くなったデータを Scan 単位で生データから削除する必要がある。

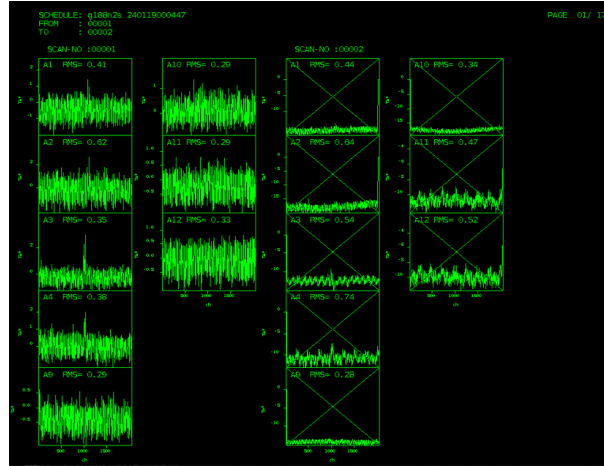


図 3.2: 生データから状態の悪いデータを flag

上図のように、ノイズレベル RMS が他より 2 倍程度大きい Scan や、スプリアスが含まれるデータ、ベースラインが大きく波状にうねっている Scan は時間積分後のスペクトルに悪影響を及ぼすため flag した。

3.1.2 Large INTEG

生データでは ON 点,OFF 点で各 20 秒積分されたデータが Scan 数だけある。これを全ての Scan で時間積分することでより S/N の大きいスペクトルを得ることができる。

3.1.3 BASELINE

ベースラインを多項式または sin, cos 関数でフィットし、スペクトルデータからバイアスやオフセットを取り除く。ラインがない範囲を 2, 3 箇所指定し、選択したフィッティング関数でベースラインがフィットされ、スペクトルから差し引かれる。本研究では 1 次式でフィットした。

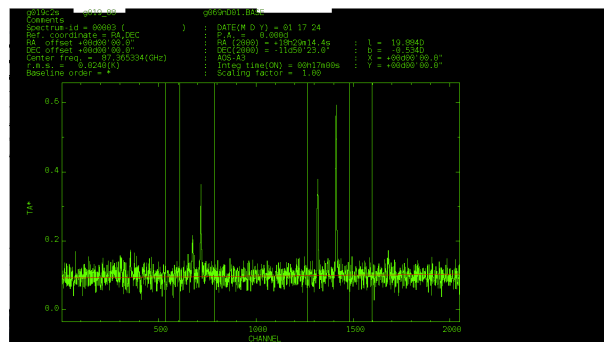


図 3.3: ラインのない範囲を選択することで赤線でベースラインがフィットされる。

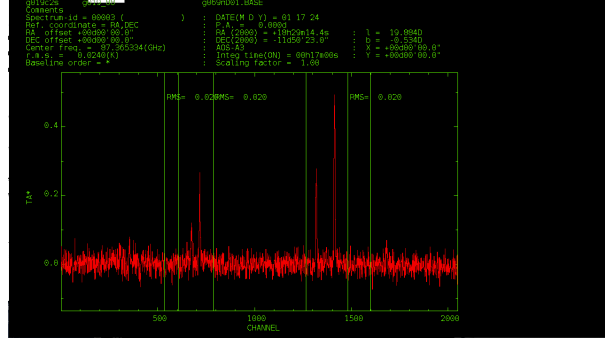


図 3.4: ベースラインフィット後のスペクトル

3.2 Python を用いた解析

さらに解析を進める上で、スペクトルを一括で処理したり、フィッティングを行う際に自由にパラメータを設定できるなどの点で Python を用いるのが便利である。以降はスペクトルデータを txt 出力し、Python スクリプトで読み込み解析を行う。

3.2.1 スペクトルの平均化

ベースラインフィットまで行ったスペクトルには、同じ周波数設定で同時に観測した 2 つのスペクトルが存在する。この 2 つを平均することでノイズを小さくする操作を行う。Java NewStar から出力したスペクトルデータのヘッダーには RMS が書かれている。これはノイズレベルの RMS を指し、2 つのスペクトルを RMS の二乗の逆数で重み付けして平均した。2 つのスペクトルの強度を I_1 , I_2 , 重み係数を w_1 , w_2 とすると、平均後の強度 I は、

$$\begin{aligned}
 w_1 &= 1/\text{rms}_1^2 \\
 w_2 &= 1/\text{rms}_2^2 \\
 I &= \frac{I_1 w_1 + I_2 w_2}{w_1 + w_2}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

のようにして得る。このように 2 つのスペクトルを重みをつけて平均することで RMS を最も小さくできる。

実際の平均前後のスペクトルを以下に示す.

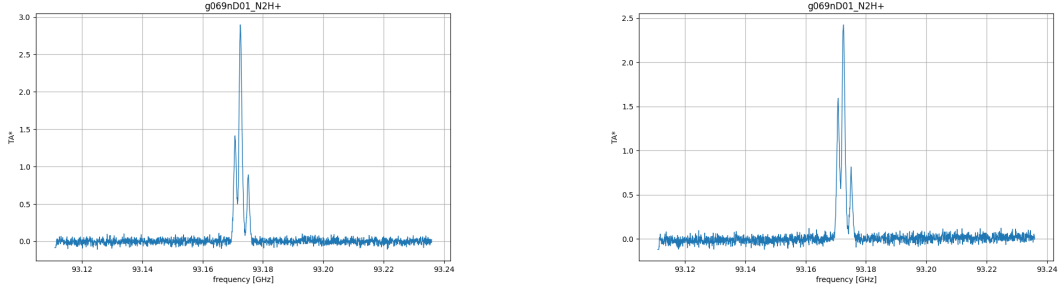


図 3.5: 平均前のスペクトル

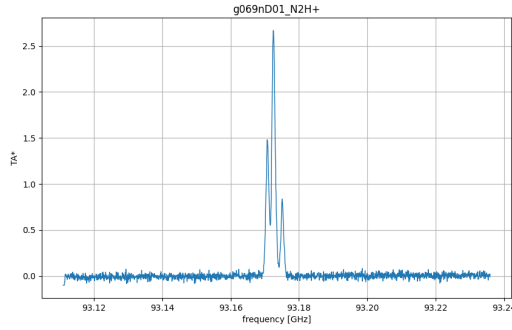


図 3.6: 平均後のスペクトル

3.2.2 フィッティング

本研究では単純なガウシアンでフィットできるライン, HC_3N , H^{13}CO^+ , C_2H についてフィッティングを行った. フィッティングには SciPy モジュールの `curve_fit` 関数を用いた. この関数ではあらかじめ関数形を指定して初期推定値を与えると, デフォルトでは非線形最小二乗法に基づき, Levenberg-Marquardt 法 (LM 法) を用いてパラメーターを最適化する. 詳細は SciPy モジュールの公式ドキュメントに記されている [7]. また, 戻り値としてパラメータの他に共分散行列も返すため, その対角成分を取り出すことでパラメータの分散も得ることができる.

関数形にはガウシアン

$$Ae^{-\left(\frac{\nu-\nu_0}{2\sigma^2}\right)^2} \quad (3.2)$$

を定義した. ただし, A はガウシアン of 振幅, ν は周波数, ν_0 はピークの中心周波数, σ^2 は分散である.

初期推定値は各ラインで以下のように定義した.

表 3.1: 各ラインのガウスフィット初期推定値

ライン	振幅 A	中心周波数 ν_0 [GHz]	分散 σ^2
HC ₃ N - 100 GHz	1	100.076386	0.001
HC ₃ N - 80 GHz		81.881463	
H ¹³ CO ⁺		86.754288	
C ₂ H		87.318	

ここで、HC₃N, H¹³CO⁺ については観測時の中心周波数、C₂H については超微細構造によるピークが複数見られるため、87.318 GHz 付近にある最も強いピークを中心周波数として設定した。

3.2.3 積分強度の計算

ガウスアンフィット後のパラメータのうち、振幅 A 、分散 σ^2 を用いてピークの積分値 I^* は、

$$I^* = \sqrt{2\pi} A \sigma^2 \quad (3.3)$$

となる。さらに、天体の放射領域がビームサイズに比べて十分小さく点源とみなせる場合、距離 1 kpc にあった場合に比較して強度は $1/d^2$ 倍となる（ただし、 d [kpc] は実際の天体までの距離）。これを補正した、距離 1 [kpc] で換算した積分強度 I は、

$$I = I^* d^2 \quad (3.4)$$

となる。考察にはこの積分強度 I を用いた。ただし、全てのスペクトルを正常にフィットするのは困難であったため、フィット結果を採用する基準を次のように設けた。

- ラインが 5σ 以上で検出できていること。
- スペクトルのピークが、フィットしたガウシアン of ピークの $5\sigma_G$ (σ_G はフィットしたガウシアン of 振幅の標準偏差) 以内に入っていること。

第4章 結果

4.1 ラインを検出した天体数

各ラインを 5σ 以上で検出した天体数を以下に示す.

表 4.1: ラインを検出した天体数

ライン	検出天体数 (5σ)
HC ₃ N - 100 GHz	19 / 20
C ₂ H	20 / 20
H ¹³ CO ⁺	19 / 20
CH ₃ CCH	15 / 20
CH ₃ OH	17 / 18
N ₂ H ⁺	18 / 18
CH ₃ CN	12 / 18
HC ₃ N - 80 GHz	17 / 18

各ラインの周波数は “NIST Recommended Rest Frequencies for Observed Interstellar Molecular Microwave Transitions” [8] のデータベースを参照した. また, 解析したスペクトルを付録 A, ガウスフィットを行ったスペクトルを付録 B に掲載した.

4.2 積分強度

各天体で計算した式 (3.4) で示した積分強度をラインごとに以下に示す.

表 4.2: 積分強度 (HC_3N - 100 GHz)

天体名	積分強度	周期性
107.29+05.63	3.0245×10^{-4}	periodic
188.71+01.03	2.9244×10^{-4}	non-periodic
069.52-00.97	1.8054×10^{-3}	non-periodic
094.58-01.79	2.9205×10^{-4}	non-periodic
213.70-12.59	4.1883×10^{-4}	periodic
108.18+05.51	3.0799×10^{-4}	non-periodic
111.24-00.76	6.8310×10^{-5}	non-periodic
014.23-00.50	5.9389×10^{-4}	periodic
078.10+03.64	1.3924×10^{-3}	non-periodic
188.94+00.88	7.0757×10^{-4}	periodic
019.88-00.53	7.1120×10^{-4}	non-periodic
192.60-00.05	7.9976×10^{-4}	non-periodic
012.88+00.48	2.6088×10^{-3}	periodic
111.53+00.76	8.4979×10^{-4}	periodic
075.76+00.34	1.0547×10^{-3}	periodic

表 4.3: 積分強度 (HC_3N - 80 GHz)

天体名	積分強度	周期性
094.58-01.79	3.6107×10^{-4}	non-periodic
111.53+00.76	7.9955×10^{-4}	periodic
107.29+05.63	3.2989×10^{-4}	periodic
188.94+00.88	4.0148×10^{-4}	periodic
213.70-12.59	2.5050×10^{-4}	periodic
192.60-00.05	4.8576×10^{-4}	non-periodic
012.88+00.48	5.3829×10^{-4}	periodic
188.71+01.03	1.9410×10^{-4}	non-periodic
035.79-00.17	6.1628×10^{-4}	periodic
174.19-00.09	1.1628×10^{-3}	periodic

表 4.4: 積分強度 (C_2H)

天体名	積分強度	周期性
019.88-00.53	7.6579×10^{-4}	non-periodic
174.19-00.09	1.0872×10^{-3}	periodic
108.18+05.51	5.0048×10^{-4}	non-periodic
188.71+01.03	5.6628×10^{-4}	non-periodic
014.23-00.50	9.9141×10^{-4}	periodic
012.88+00.48	1.2843×10^{-3}	periodic
188.94+00.88	1.1554×10^{-3}	periodic
094.58-01.79	5.7232×10^{-4}	non-periodic
108.75-00.96	4.1181×10^{-4}	periodic
111.24-00.76	2.3621×10^{-4}	non-periodic
107.29+05.63	5.4369×10^{-4}	periodic

表 4.5: 積分強度 (H^{13}CO^+)

天体名	積分強度	周期性
111.24-00.76	5.0294×10^{-5}	non-periodic
012.88+00.48	1.2269×10^{-3}	periodic
188.94+00.88	6.9041×10^{-4}	periodic
188.71+01.03	2.0056×10^{-4}	non-periodic
019.88-00.53	5.0404×10^{-4}	non-periodic
174.19-00.09	1.1787×10^{-3}	periodic
213.70-12.59	3.7668×10^{-4}	periodic
108.75-00.96	1.2433×10^{-4}	periodic
014.23-00.50	1.0468×10^{-3}	periodic
107.29+05.63	3.7642×10^{-4}	periodic
035.79-00.17	3.7186×10^{-4}	periodic
192.60-00.05	5.0343×10^{-4}	non-periodic
075.76+00.34	9.0302×10^{-4}	periodic
108.18+05.51	4.6088×10^{-4}	non-periodic
078.10+03.64	8.9475×10^{-4}	non-periodic
094.58-01.79	4.0357×10^{-4}	non-periodic
111.53+00.76	7.9665×10^{-4}	periodic
069.52-00.97	1.7360×10^{-3}	non-periodic

4.3 積分強度と光度の関係

得られた積分強度と天体の光度の関係を調べるため、横軸を光度、縦軸を強度でプロットした図を以下に示す。

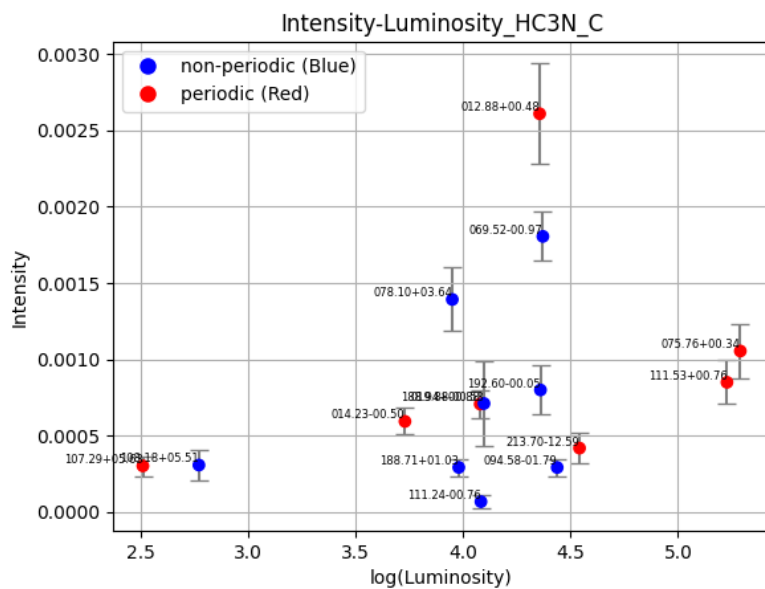


図 4.1: 強度-光度 プロット (HC₃N - 100 GHz)

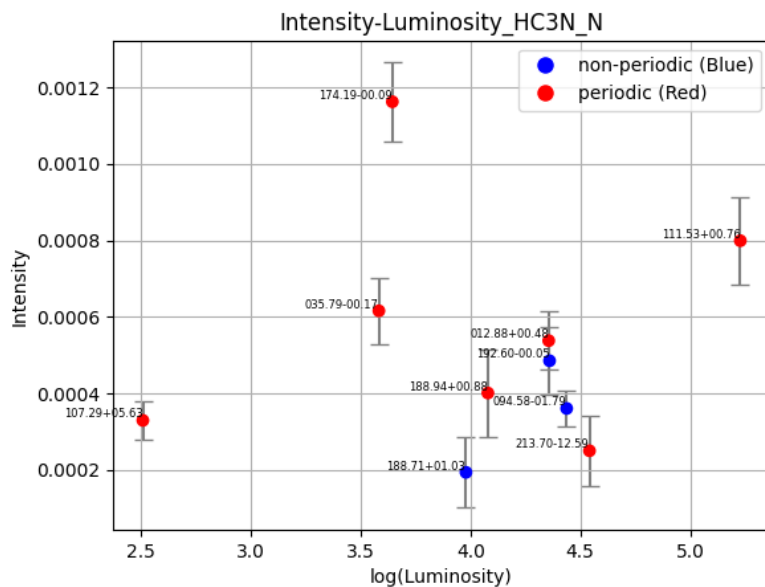


図 4.2: 強度-光度 プロット (HC₃N - 80 GHz)

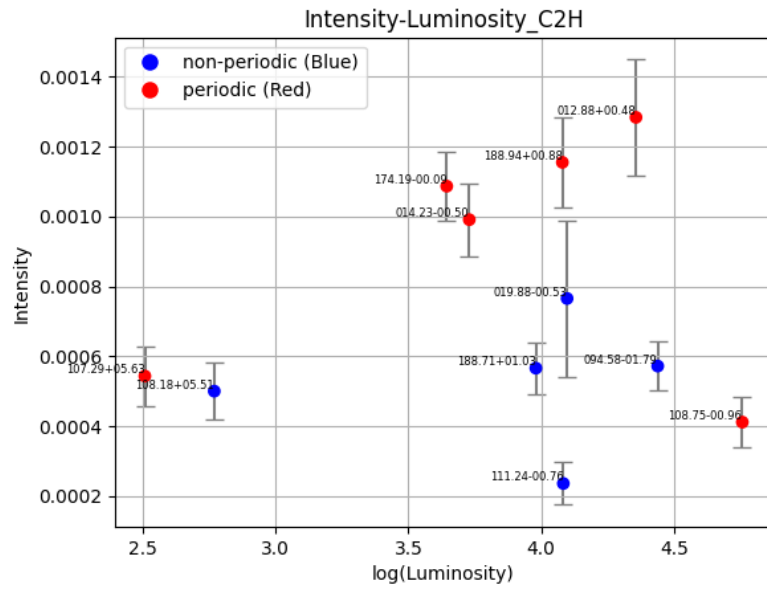


図 4.3: 強度-光度 プロット (C_2H)

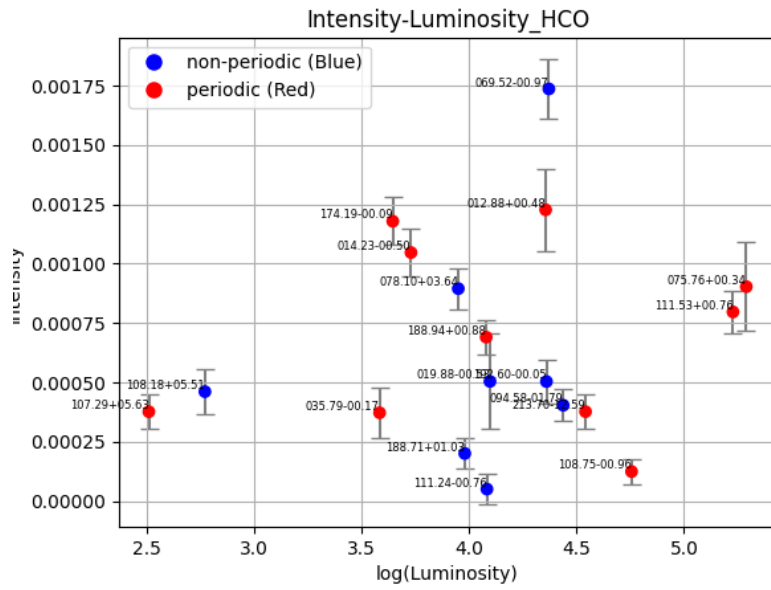


図 4.4: 強度-光度 プロット ($H^{13}CO^+$)

また，周期変動の有無別で積分強度の標本分散，および積分強度と光度の相関係数を計算すると以下ようになった．

表 4.6: 積分強度の標本分散

ライン	periodic	non-periodic
HC ₃ N - 100 GHz	5.50×10^{-7}	3.48×10^{-7}
HC ₃ N - 80 GHz	9.35×10^{-8}	2.05×10^{-8}
C ₂ H	1.16×10^{-7}	4.34×10^{-8}
H ¹³ CO ⁺	1.45×10^{-7}	2.51×10^{-7}

表 4.7: 積分強度と光度の相関係数

ライン	periodic	non-periodic
HC ₃ N - 100 GHz	0.064	0.274
HC ₃ N - 80 GHz	0.210	0.775
C ₂ H	-0.433	0.134
H ¹³ CO ⁺	0.088	0.321

第5章 考察

表 4.6 を見ると、 H^{13}CO^+ を除き、周期変動を示す天体の方が積分強度の分散が大きい。また、表 4.7 では、各ラインともに周期変動を示す天体の方が積分強度と光度の相関がやや弱いものの、 $\text{HC}_3\text{N} - 100 \text{ GHz}$ を除いて、強度と光度に明確な相関は見られなかった。

周期変動のメカニズムとして脈動変動モデルを考えると、中心星の脈動によって周囲の分子が受ける放射が不安定になり、分子雲の温度変動が活発化すると考えられる。その結果、分子の放射強度にばらつきが生じ、周期変動を示さない天体と比べて強度の分散が大きくなり、光度との相関も弱くなる可能性がある（表 4.6, 4.7 の periodic の場合）。

なお、全ての天体で十分なフィッティングができたわけではなく、 $\text{HC}_3\text{N} - 80 \text{ GHz}$ や C_2H のようにデータ数が少ないラインも存在する。そのため、現状の解析では強度の分散や強度と光度の相関を議論するには不十分であることに留意しなければならない。

第6章 まとめと今後の展望

得られたスペクトルのうち、単純なガウシアンでフィットできるラインについてフィッティングを行い、今後の解析や議論の基盤とするために、ラインの積分強度の分散や天体の光度との相関を調べた。その結果、周期性の有無による一定の傾向は確認されたものの、データ数や調査対象のライン数は依然として不十分である。

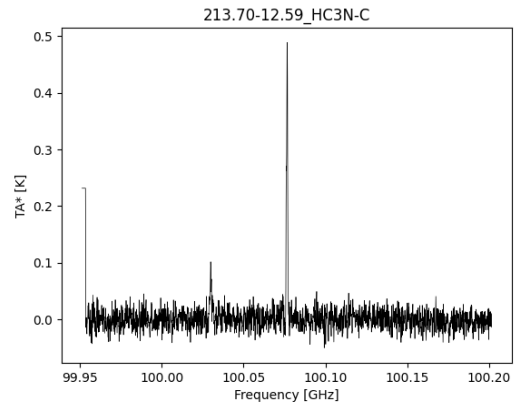
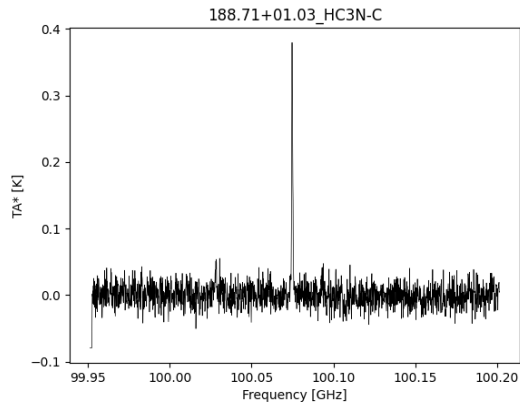
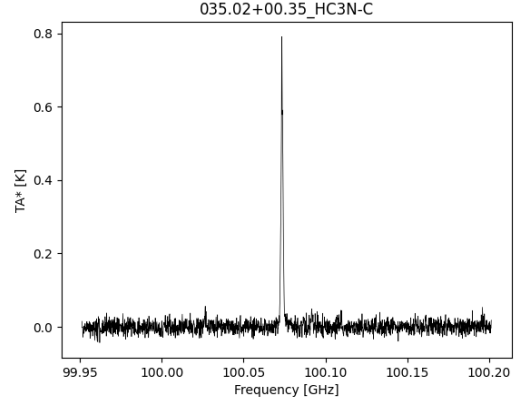
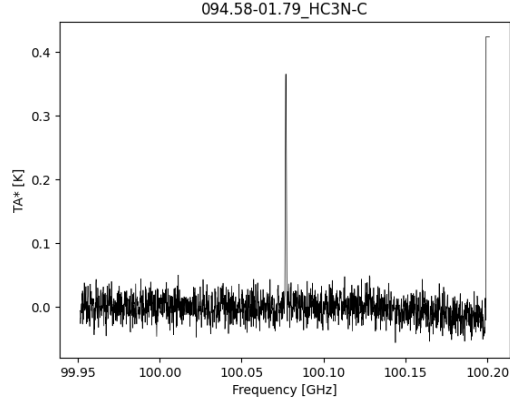
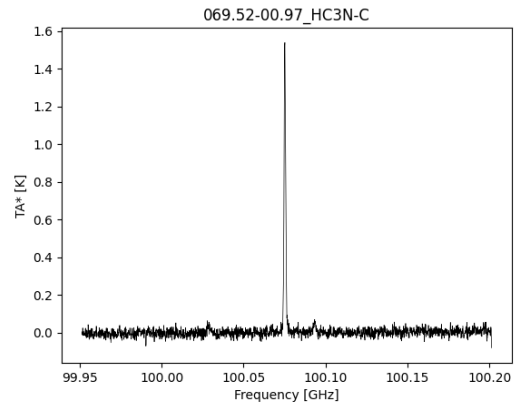
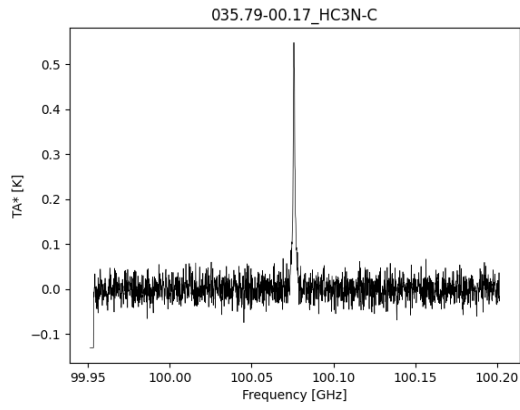
今後の展望として以下が挙げられる。

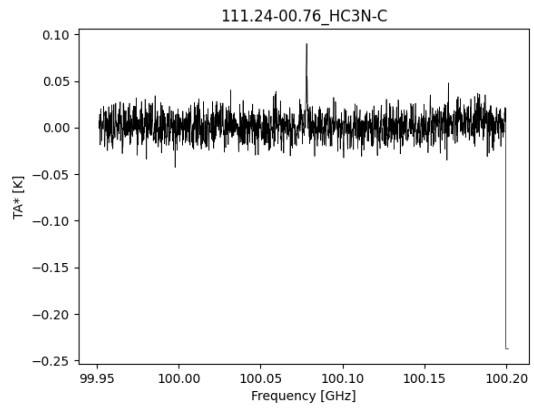
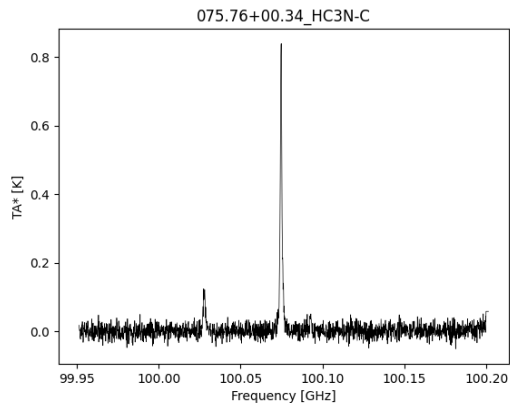
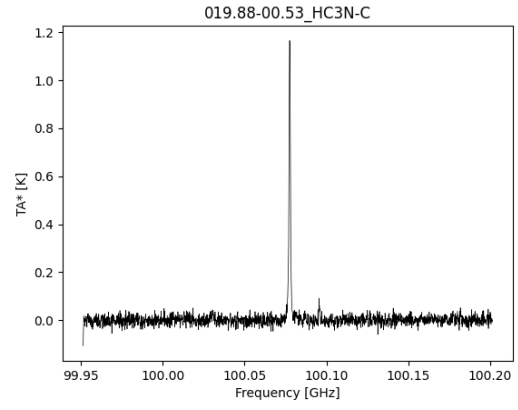
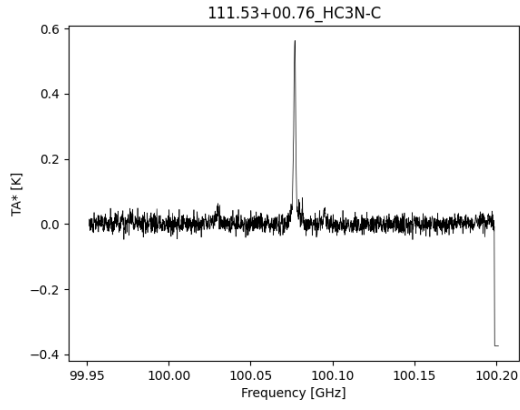
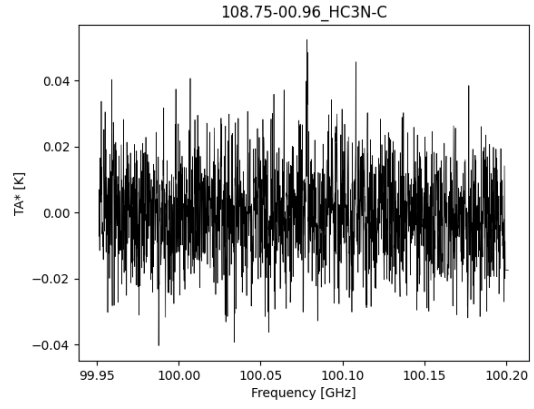
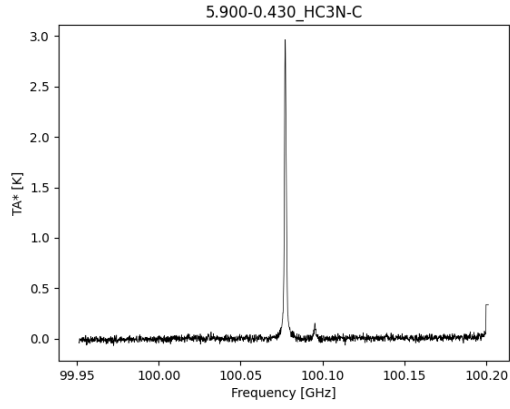
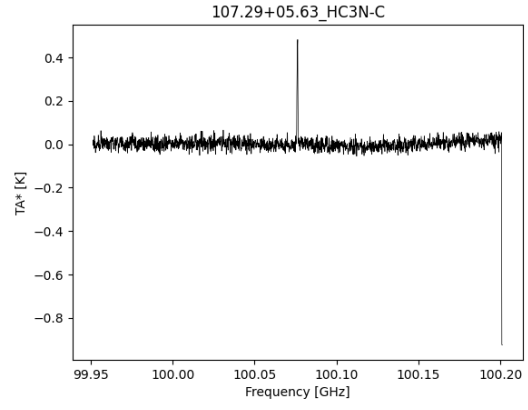
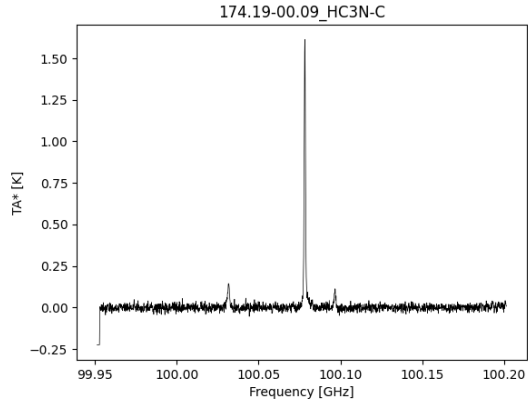
- 結果で得られた積分強度と光度における傾向を比較可能な他の研究およびそれを説明できる分子輝線の放射機構の調査を行う。
- フィッティングのアルゴリズムの改善や、多重ガウシアンを用いた複雑なラインのフィッティング手法を確立することで、より多くのデータでフィッティングを実現する。
- より詳細な分子の反応機構や多様性、脈動変動モデルとの関連、先行研究 [5] との比較を行うために、ガスの柱密度や温度などの物理量を求める。

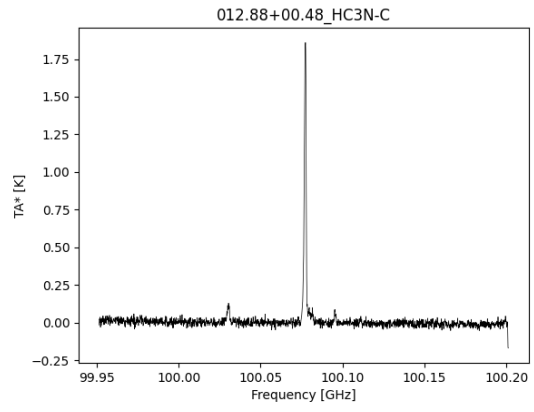
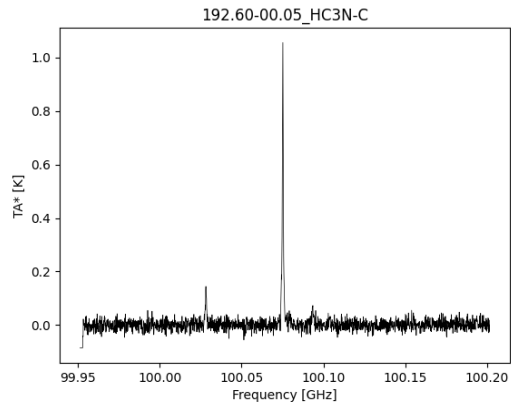
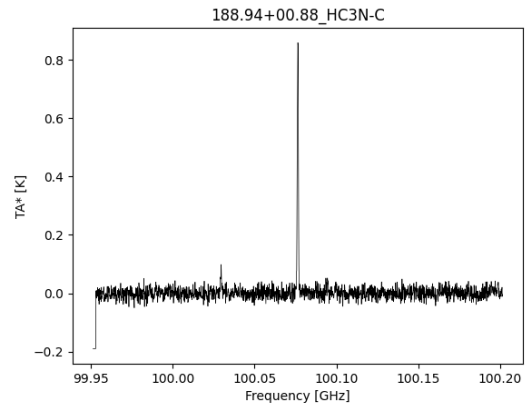
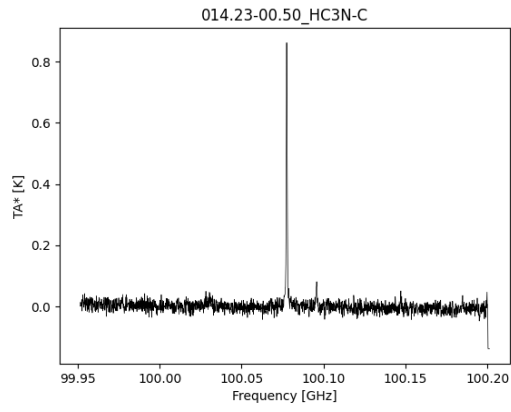
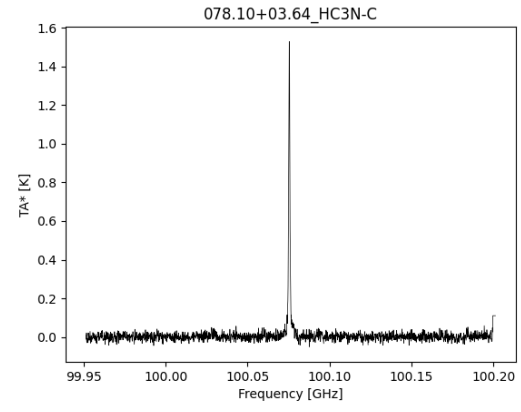
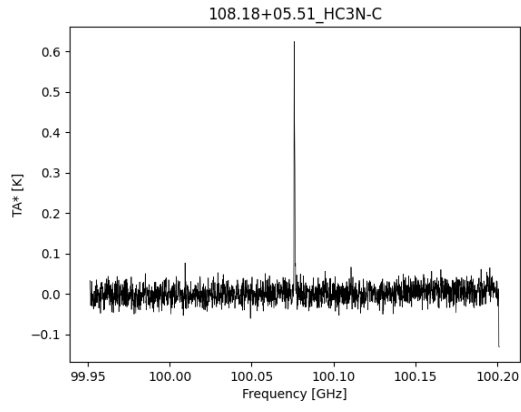
付録

A スペクトル

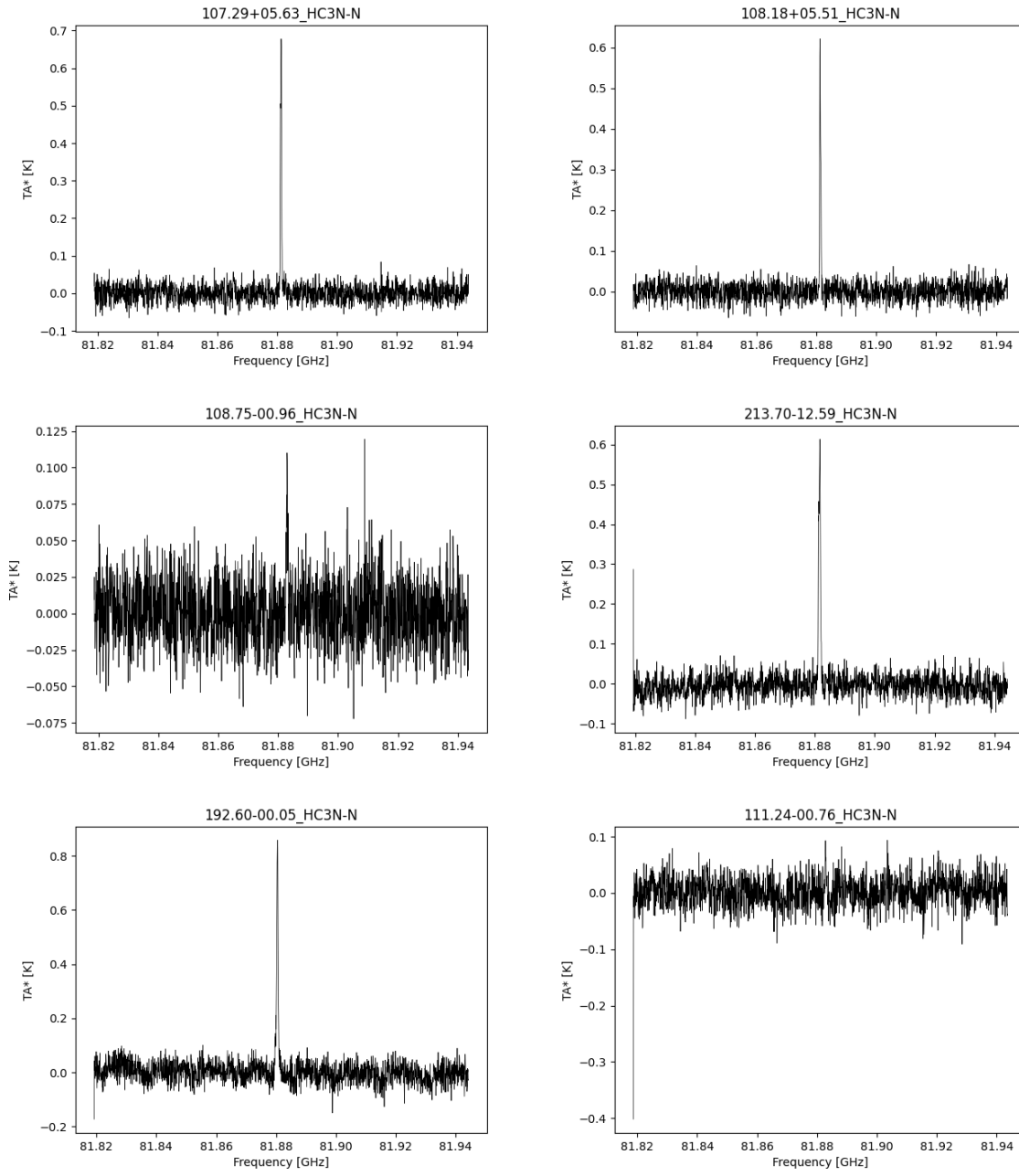
A.1 HC₃N - 100 GHz

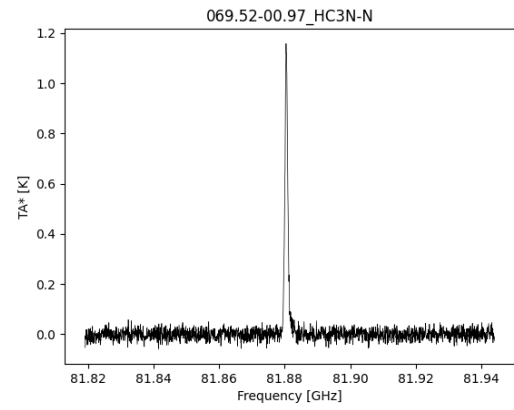
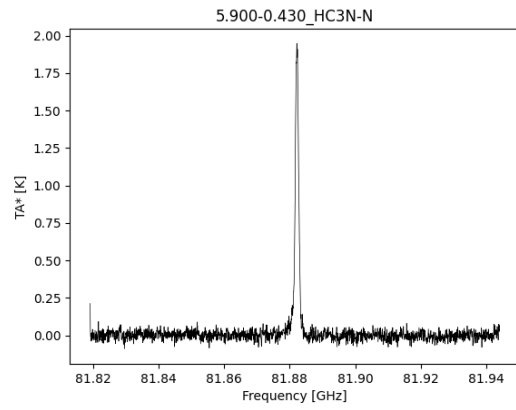
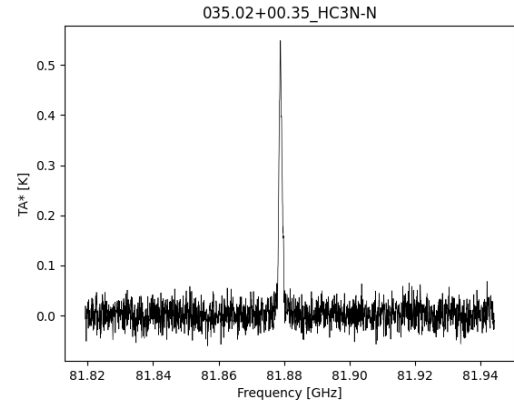
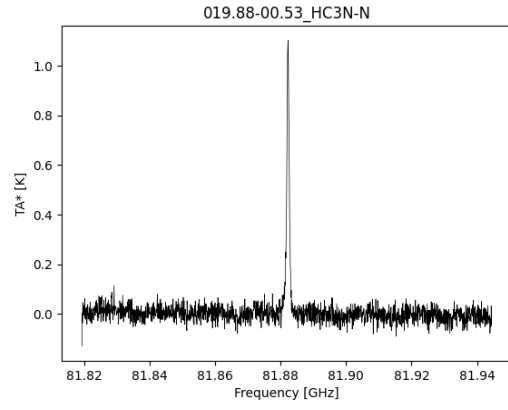
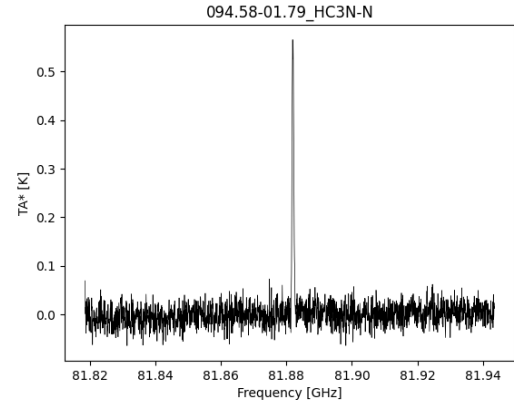
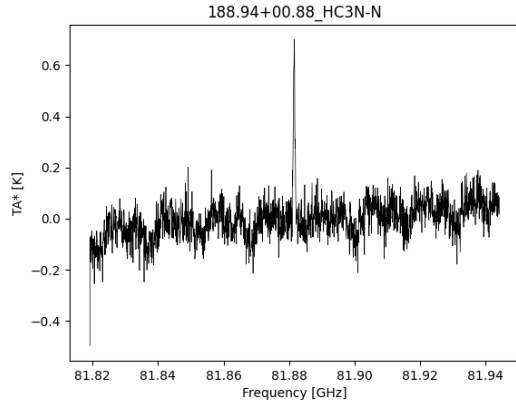
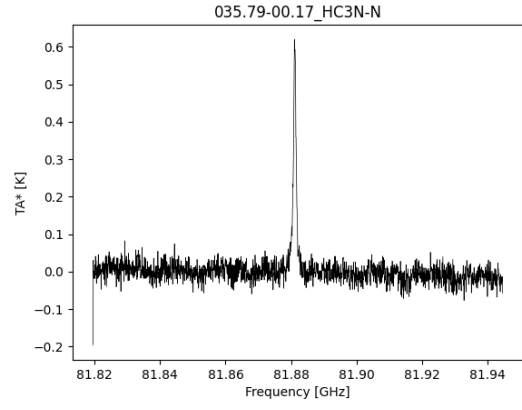
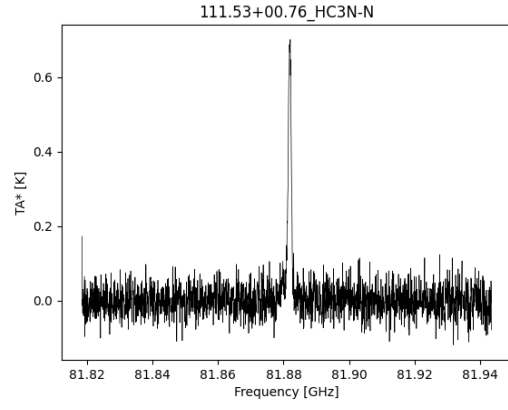


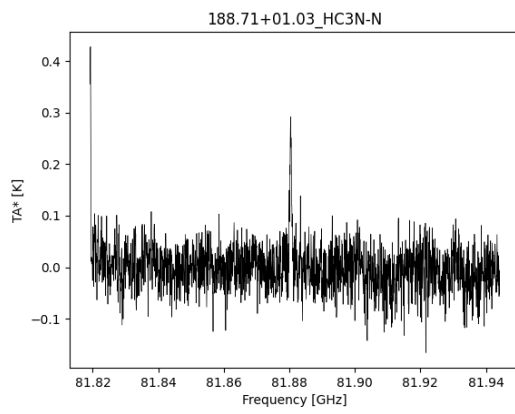
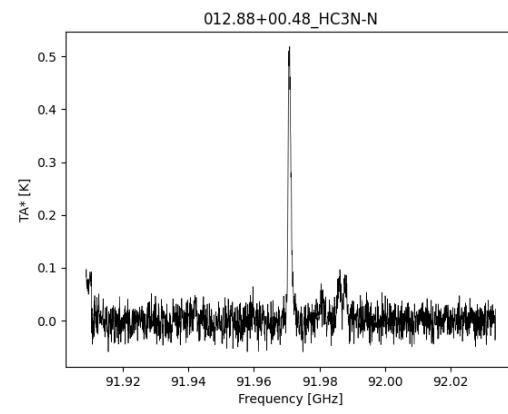
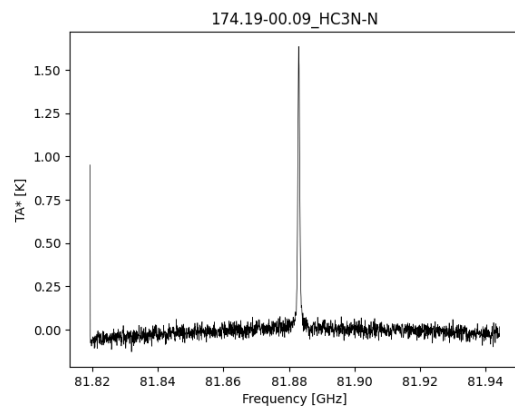




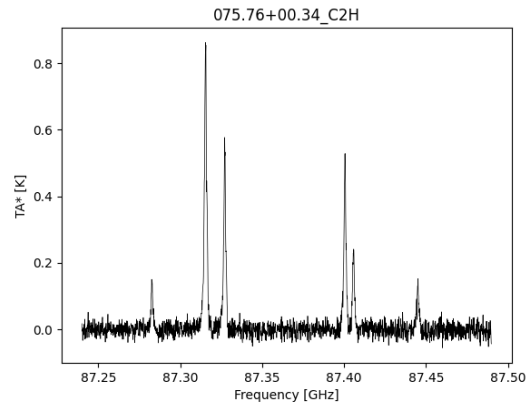
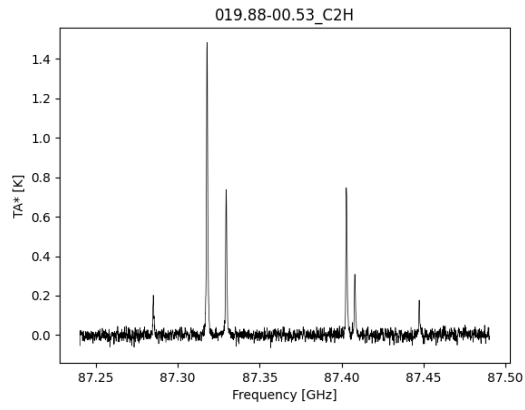
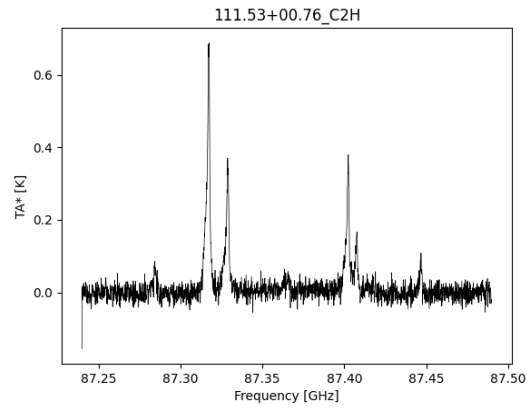
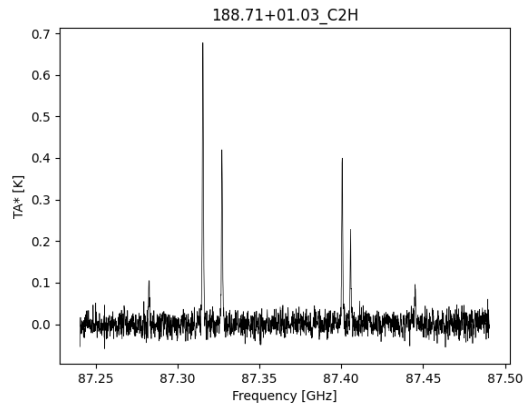
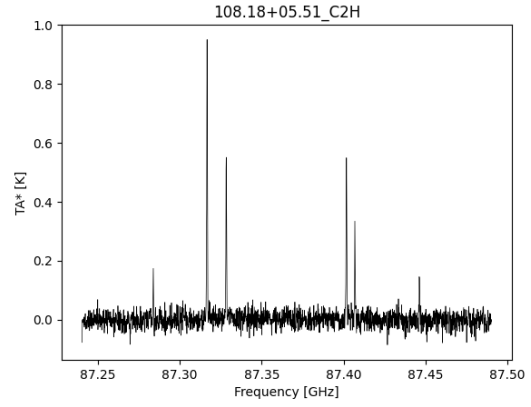
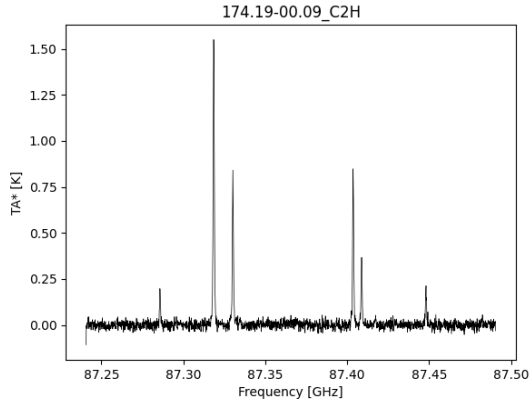
A.2 HC₃N - 80 GHz

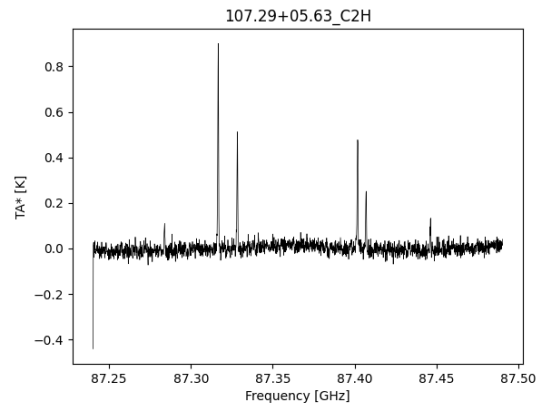
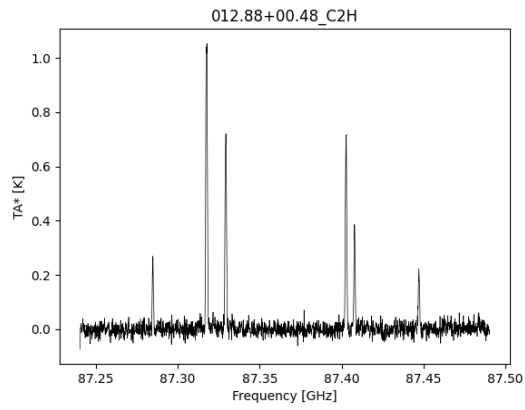
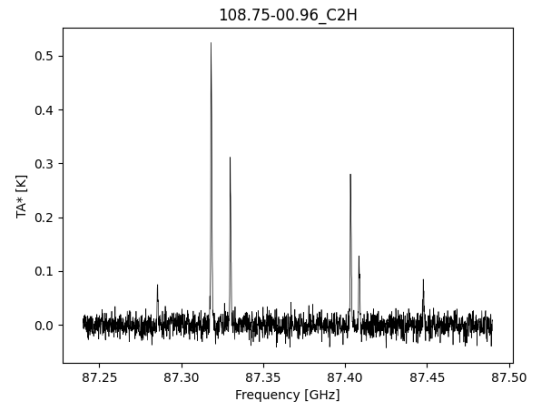
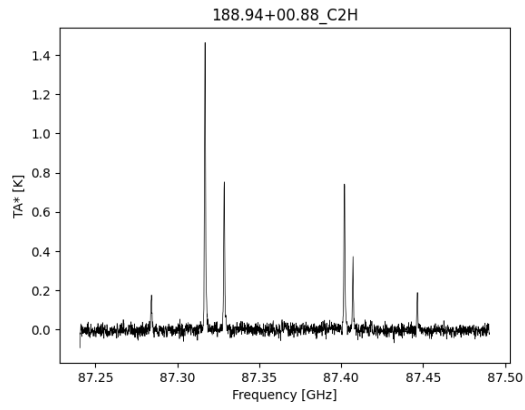
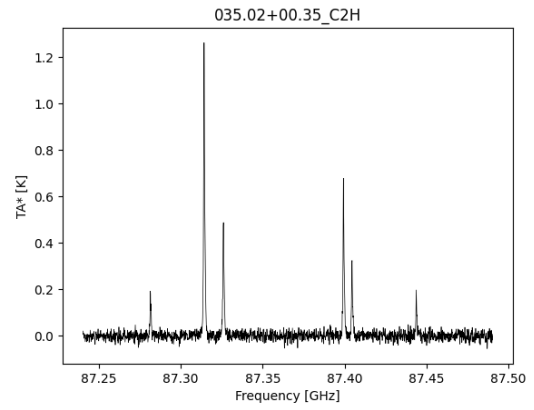
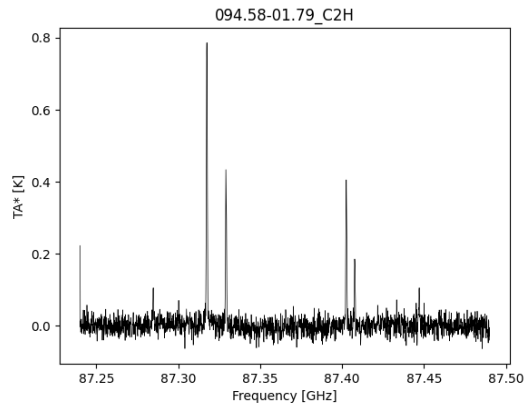
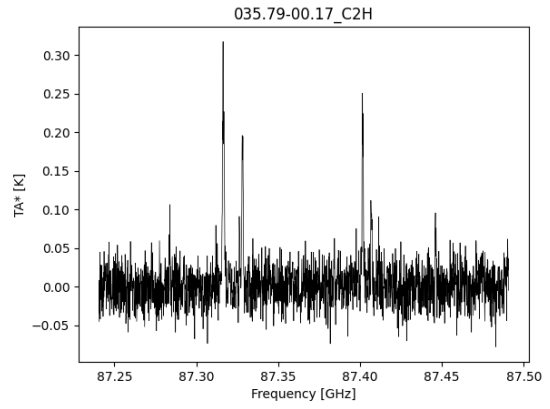
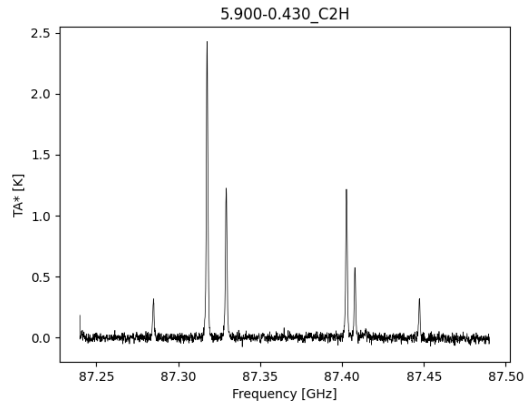


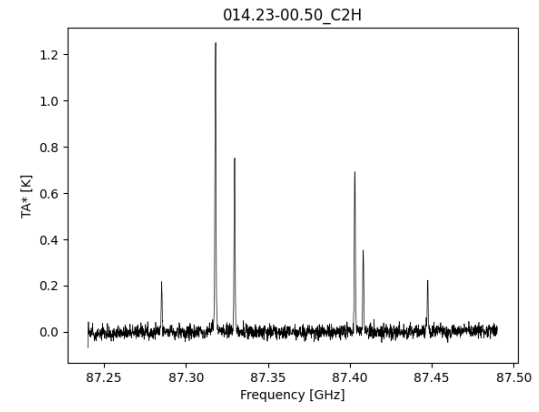
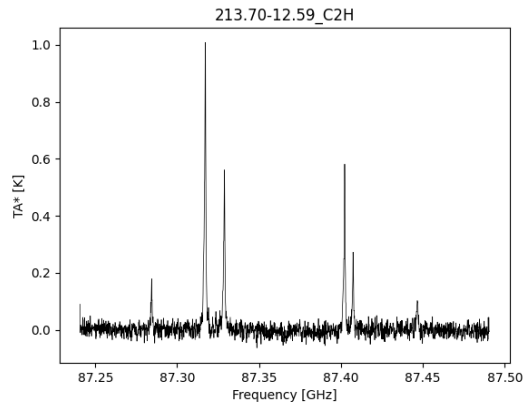
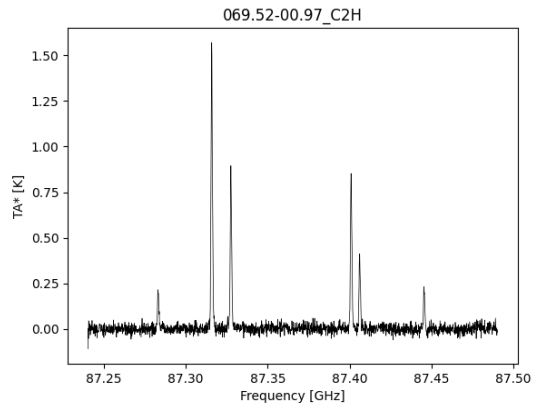
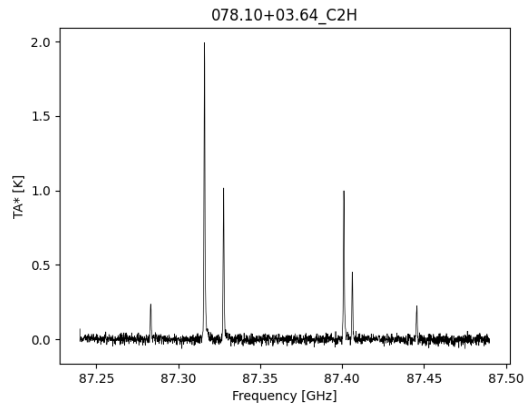
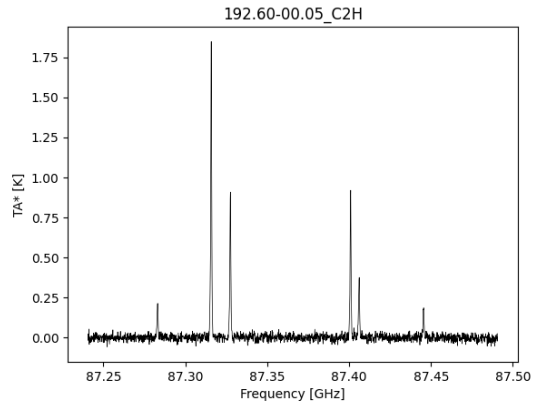
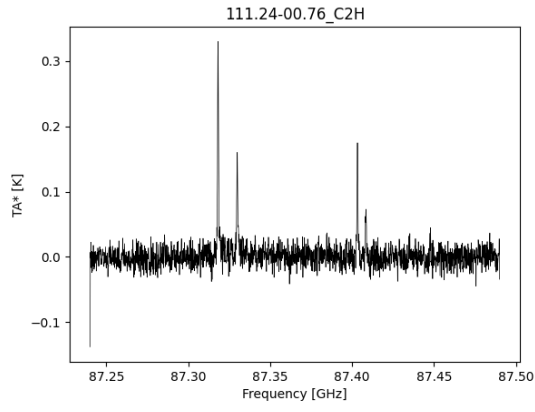




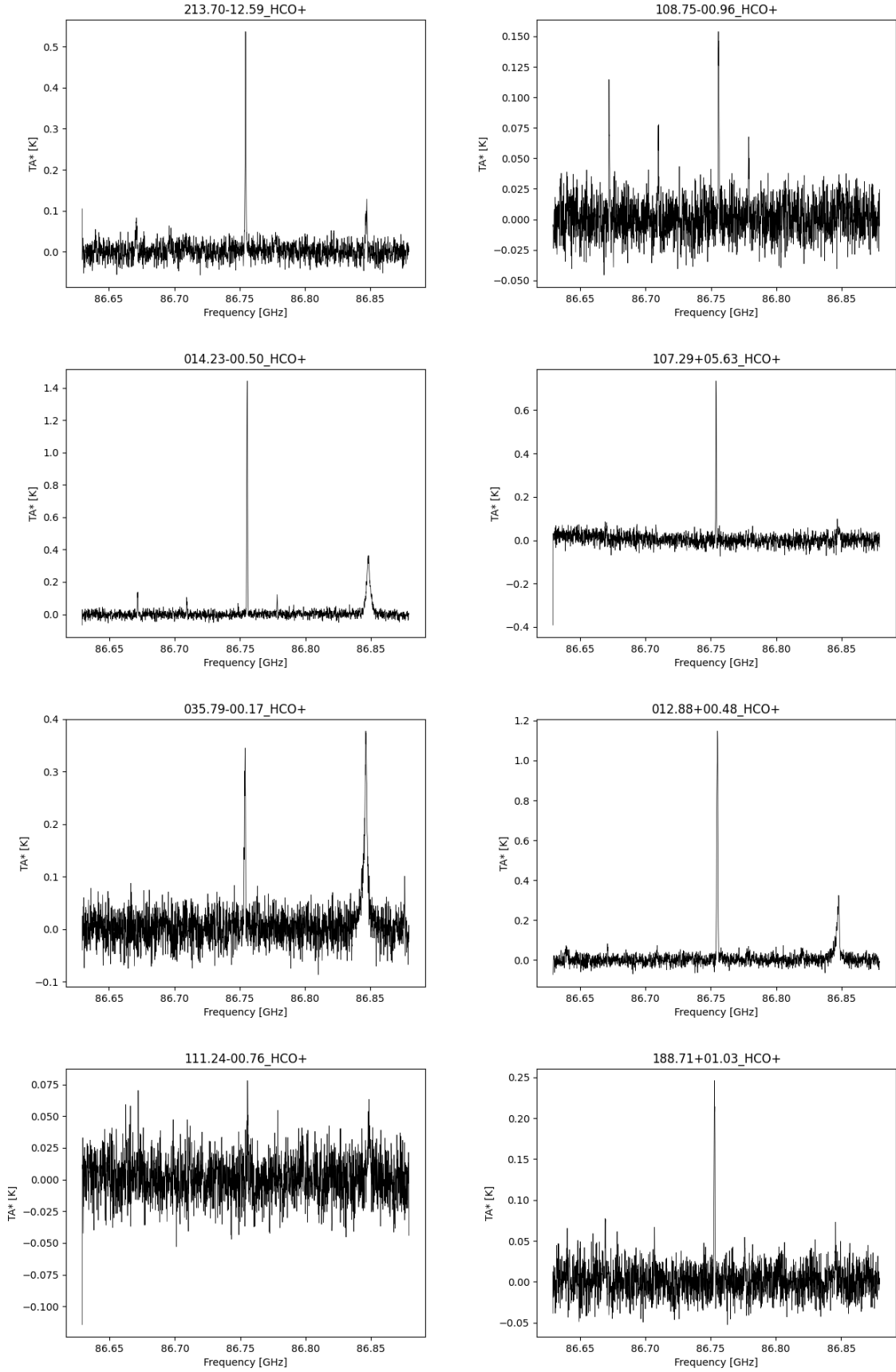
A.3 C₂H

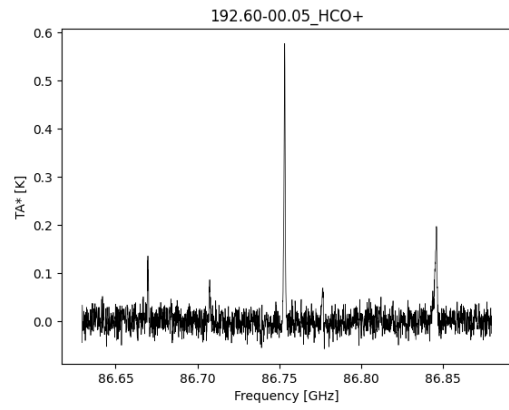
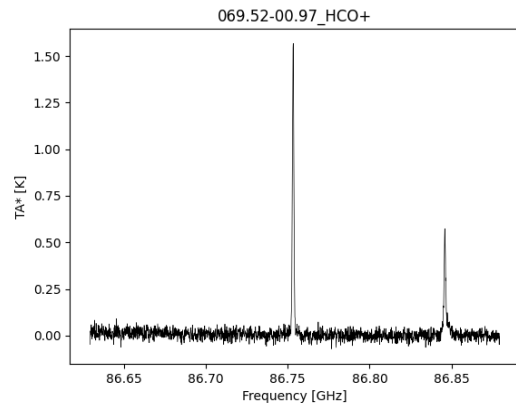
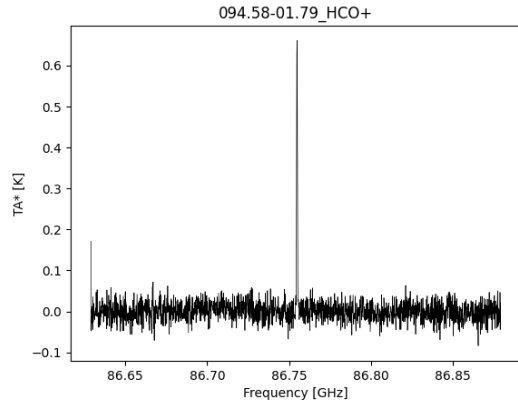
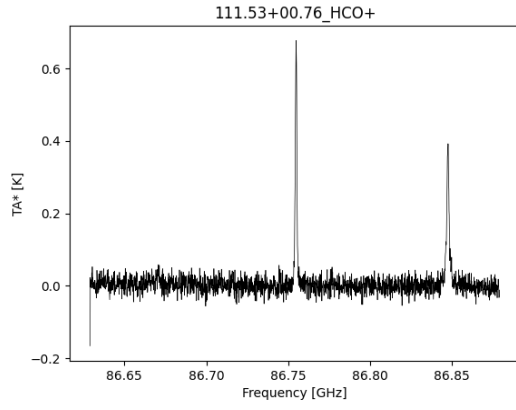
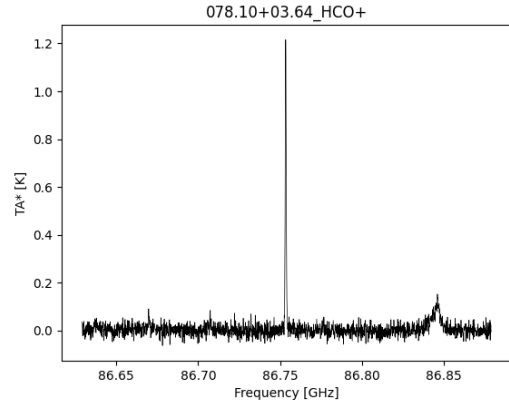
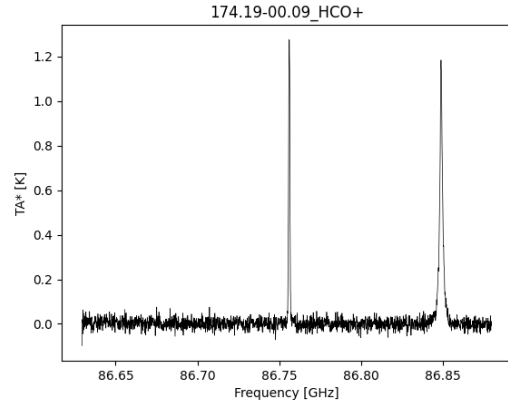
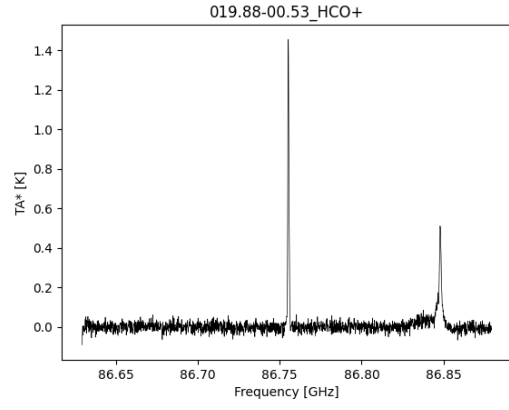
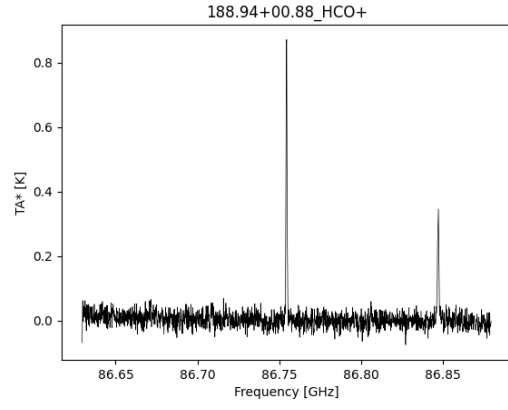


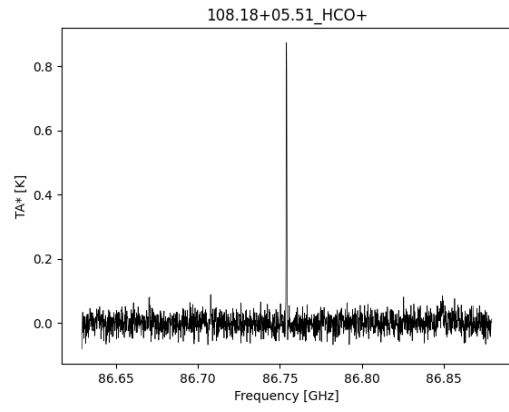
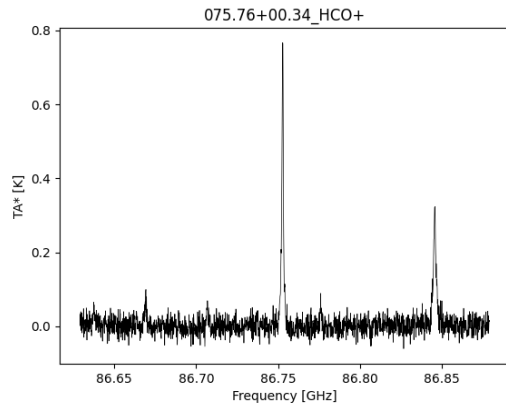
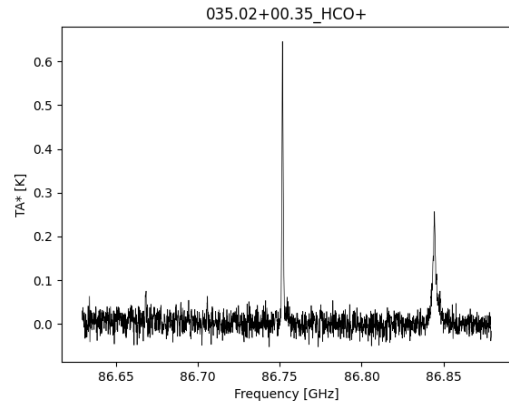
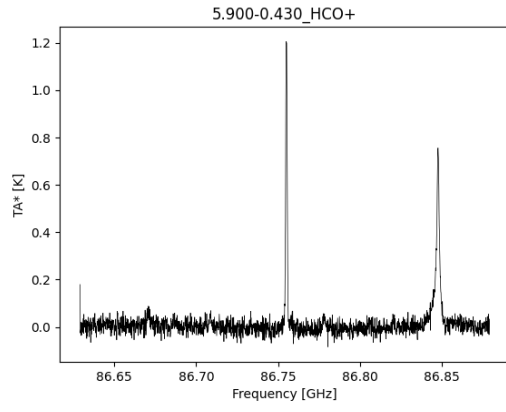




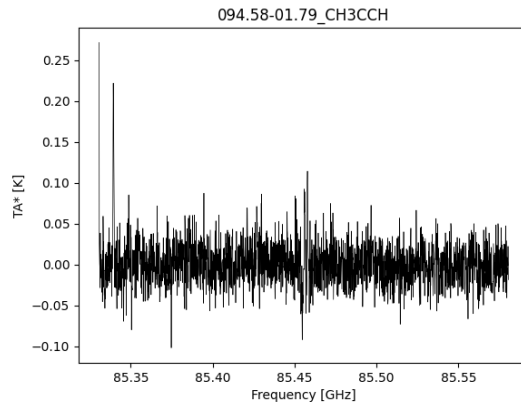
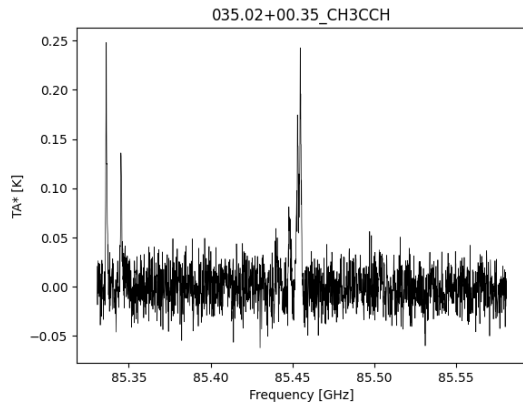
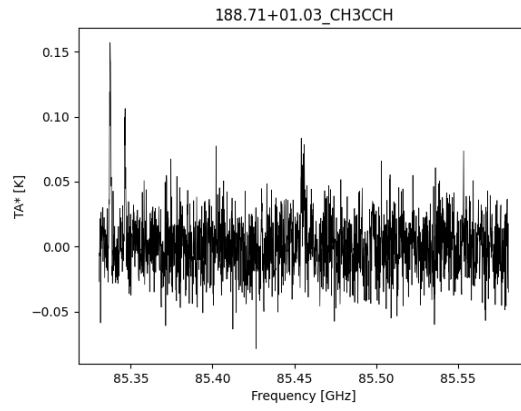
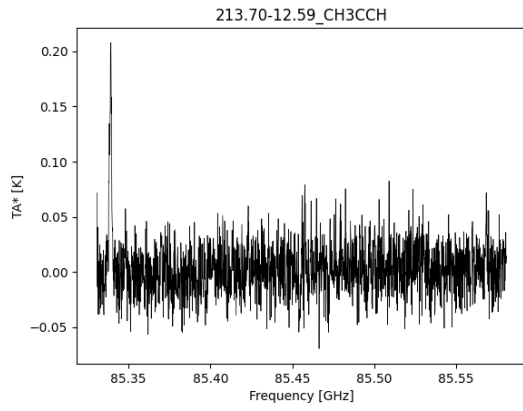
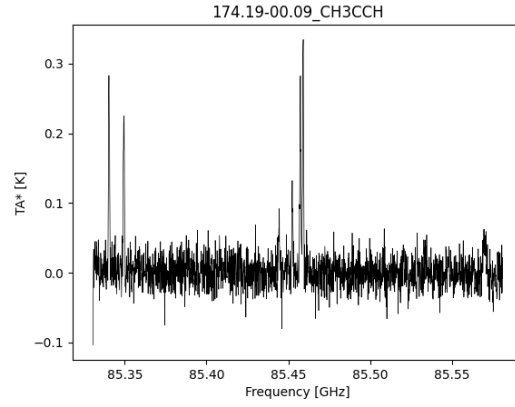
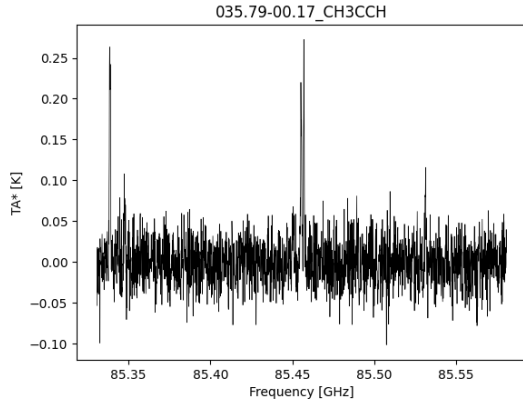
A.4 H^{13}CO^+

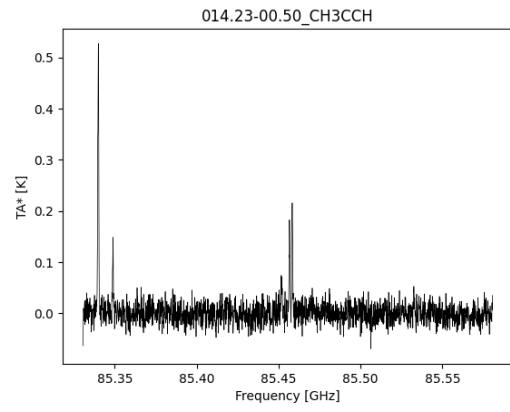
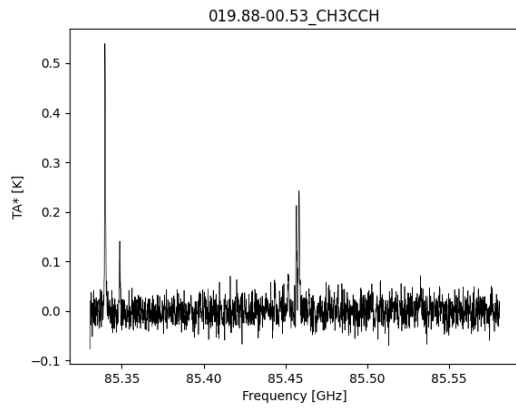
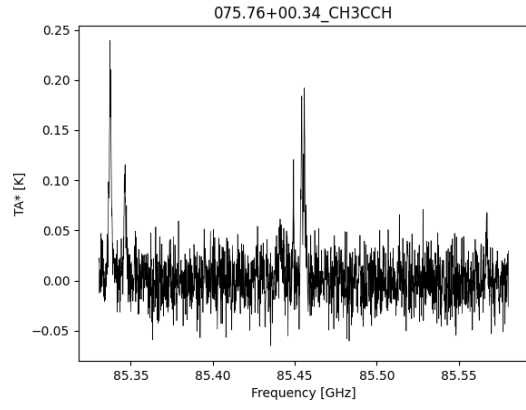
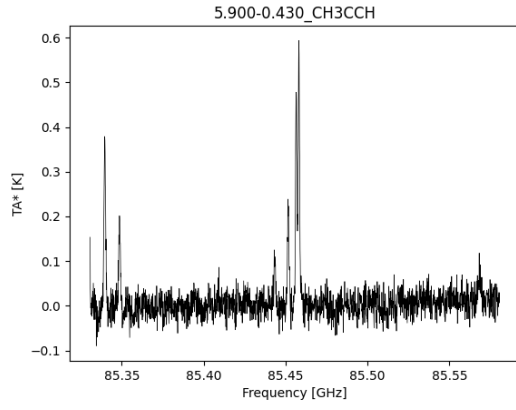
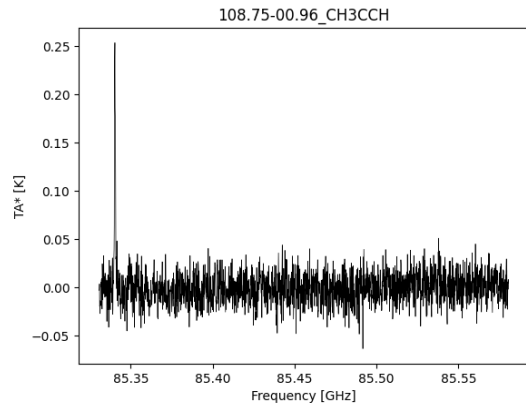
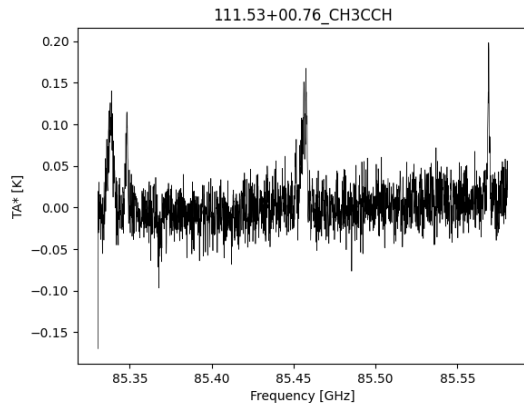
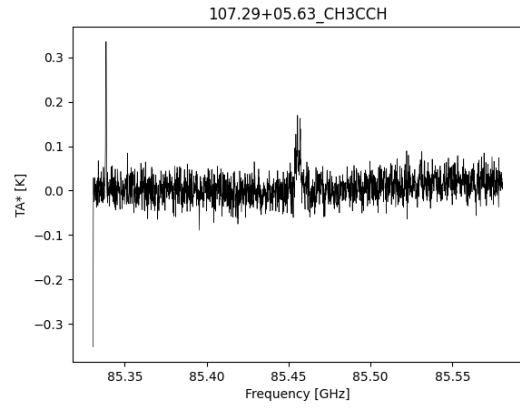
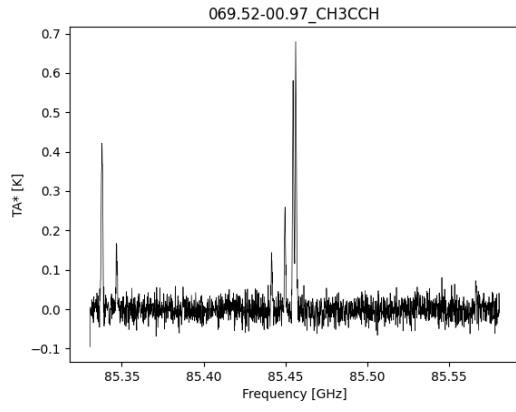


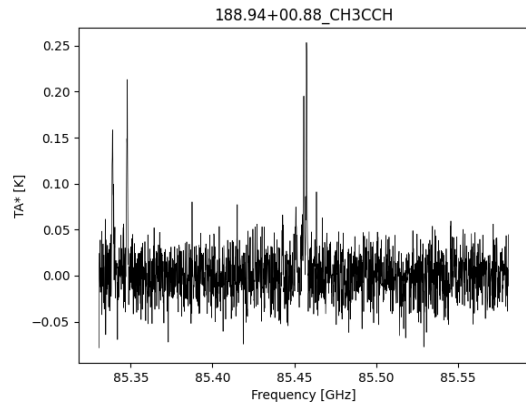
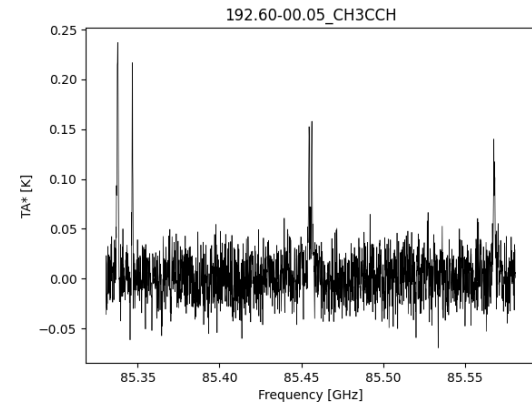
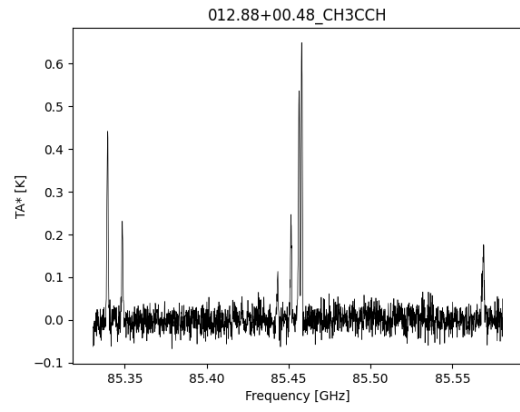
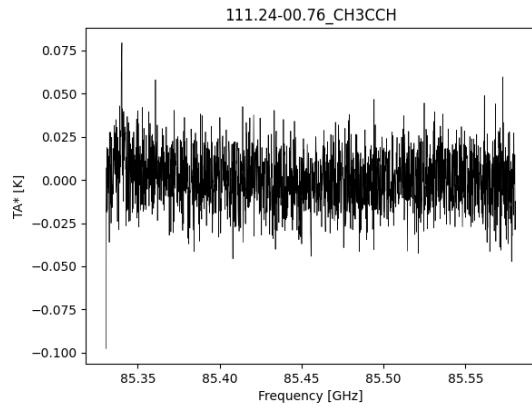
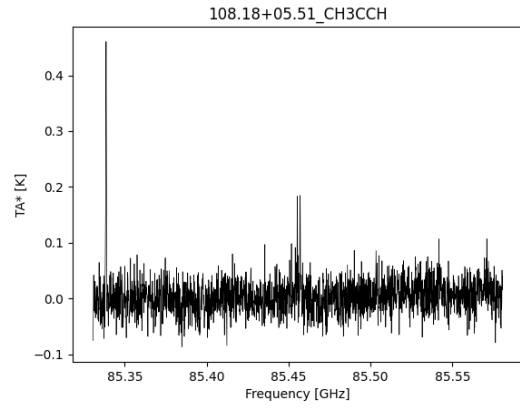
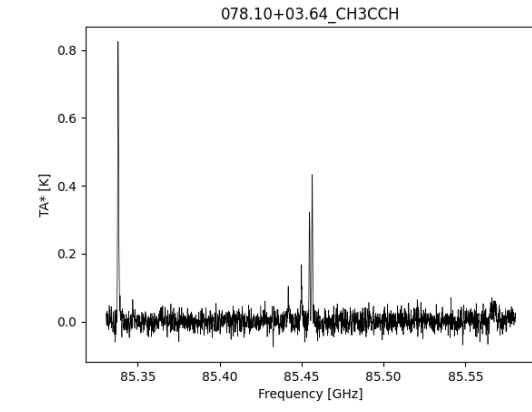




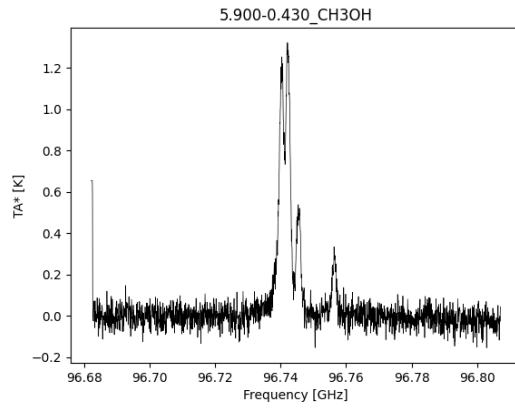
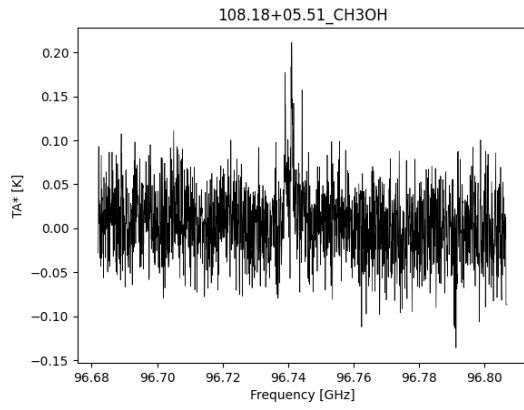
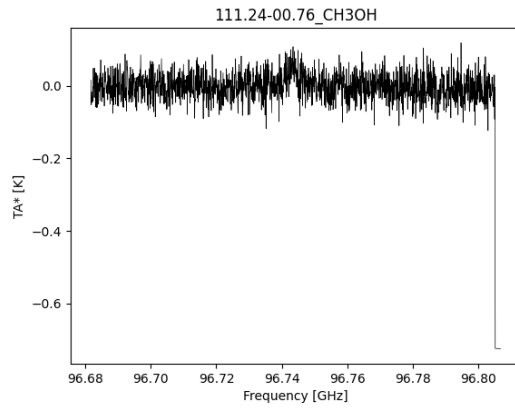
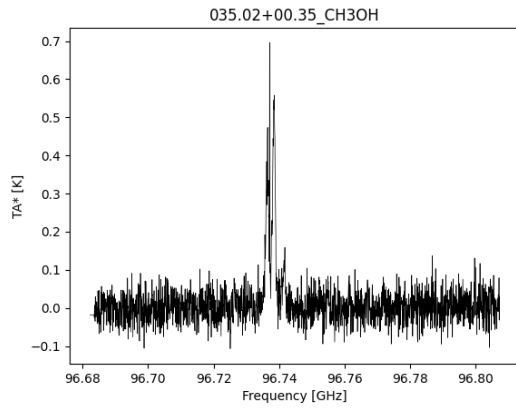
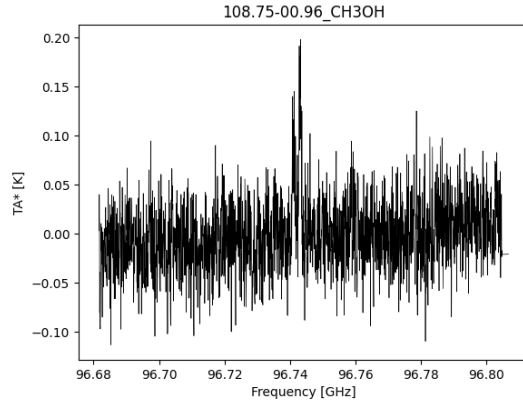
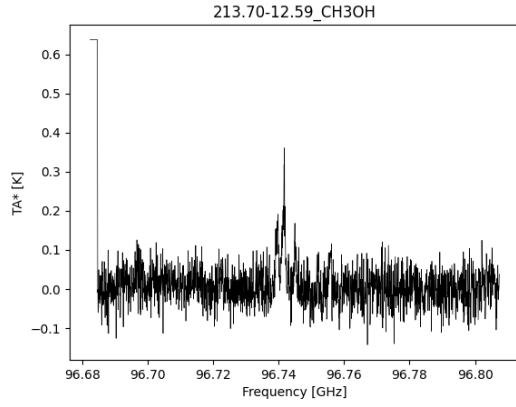
A.5 CH₃CCH

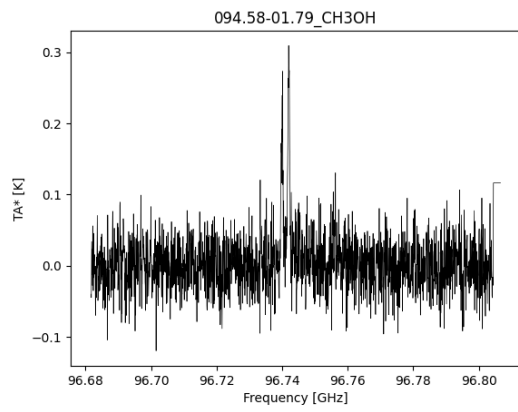
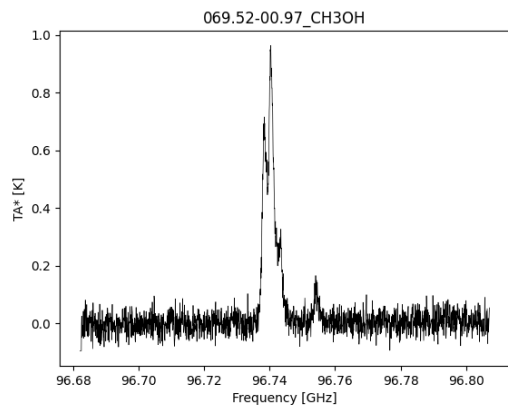
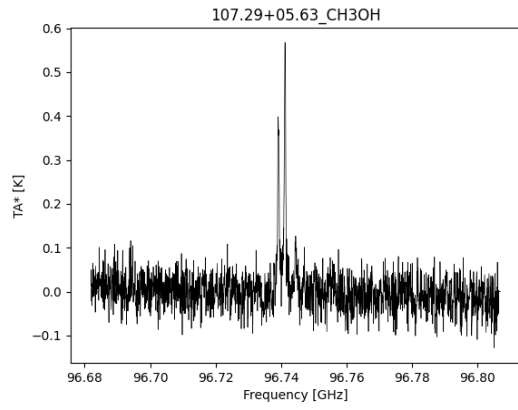
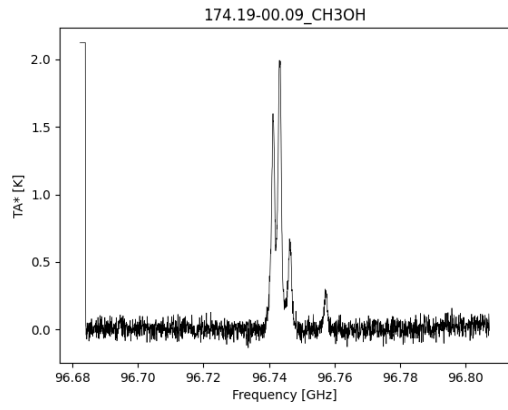
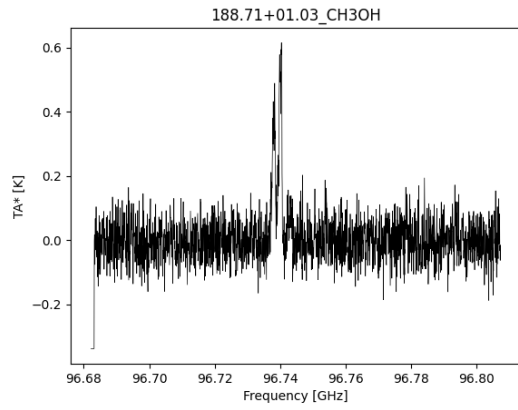
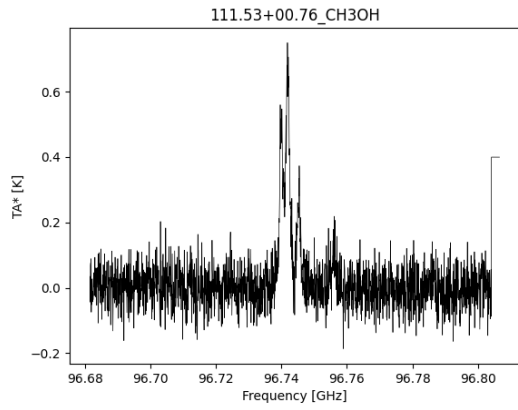
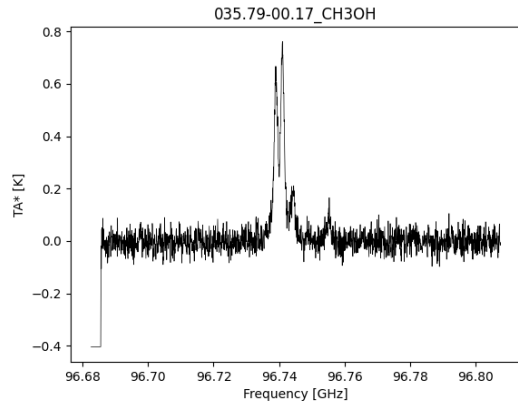
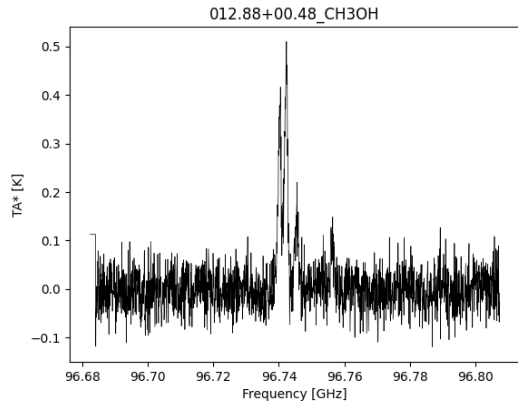


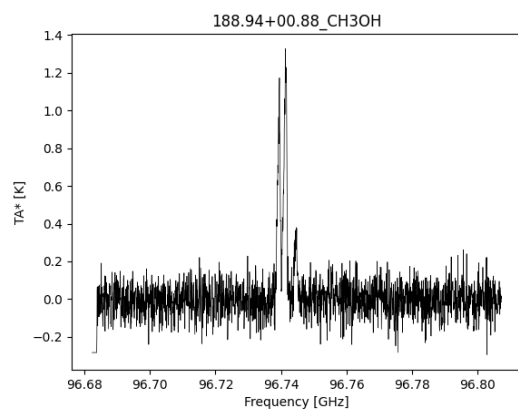
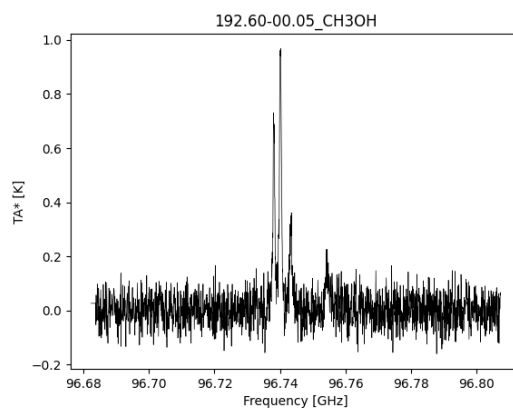
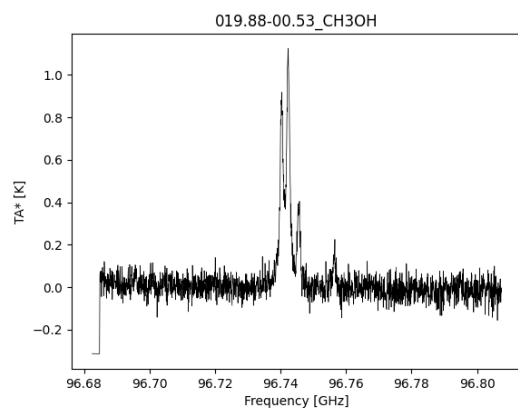




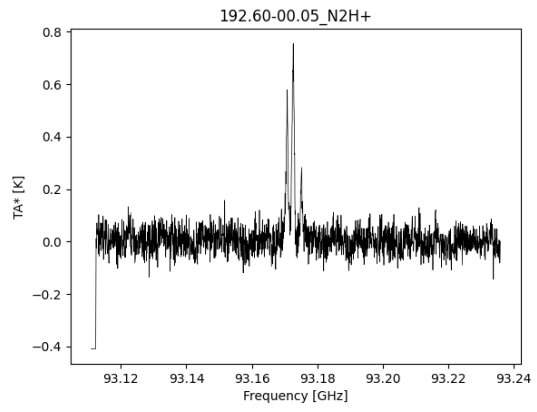
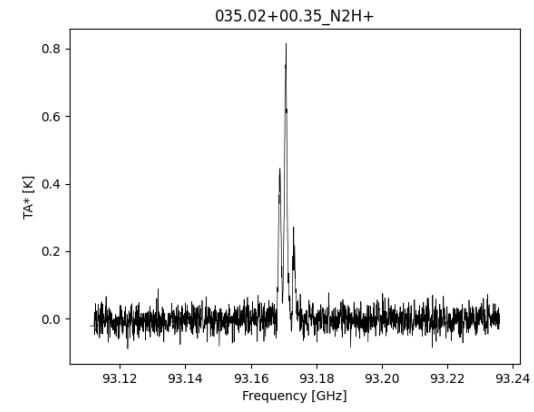
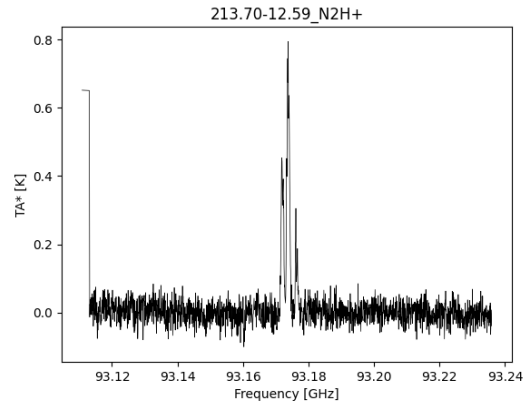
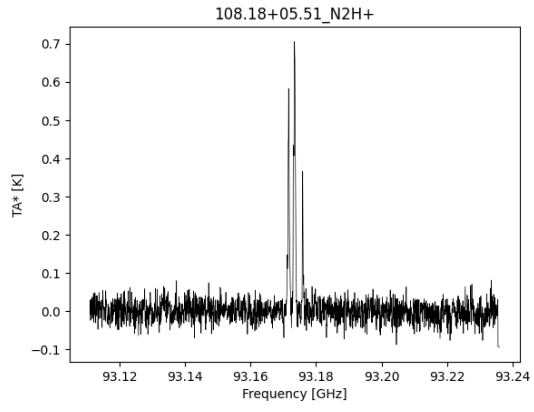
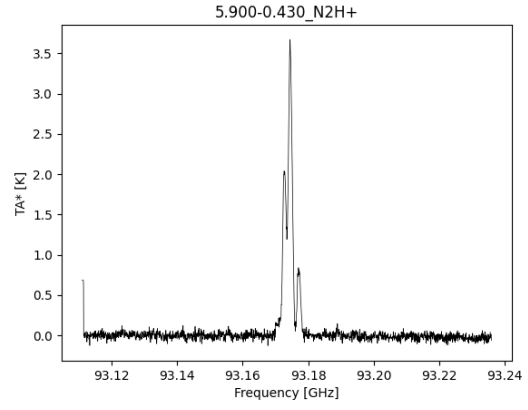
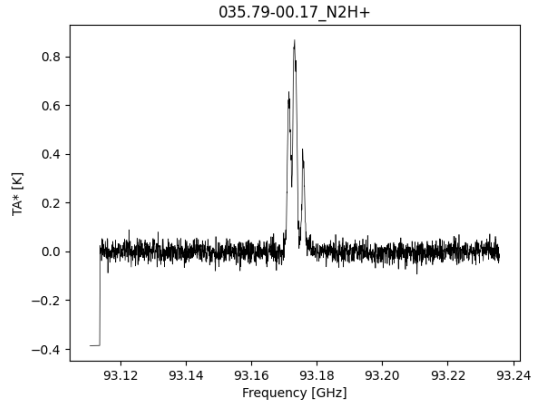
A.6 CH₃OH

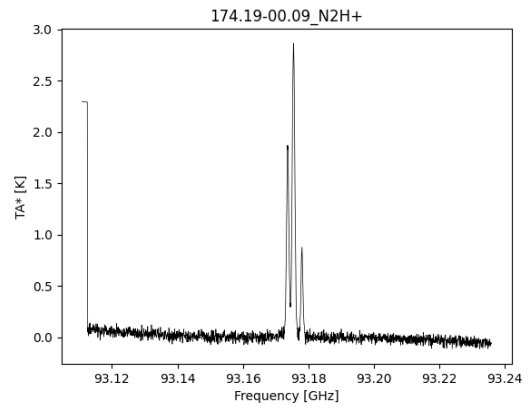
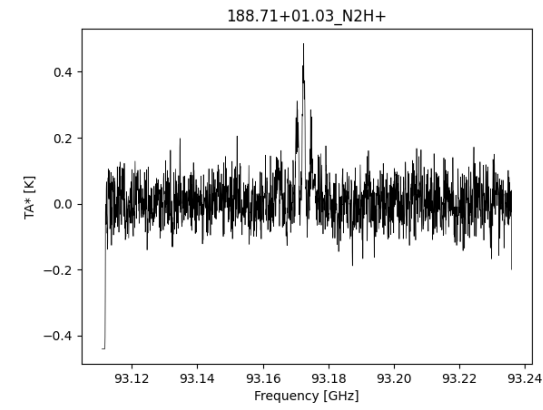
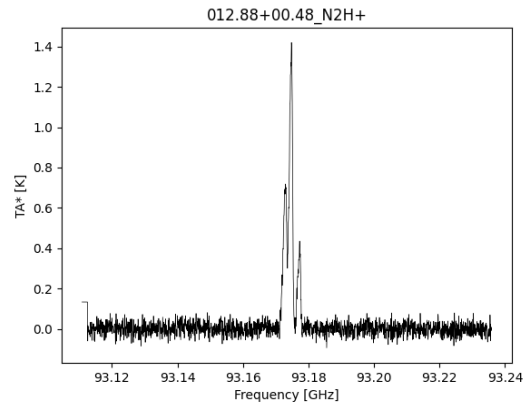
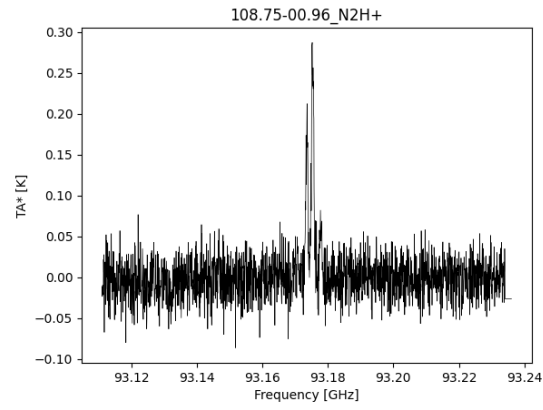
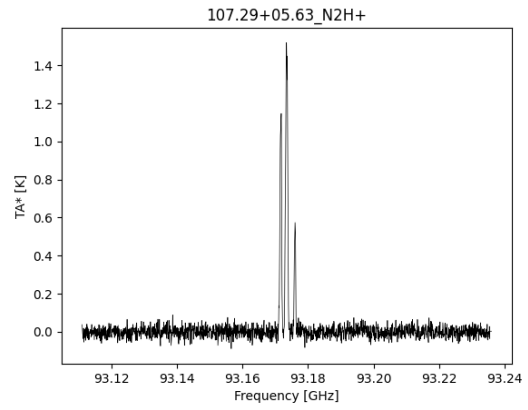
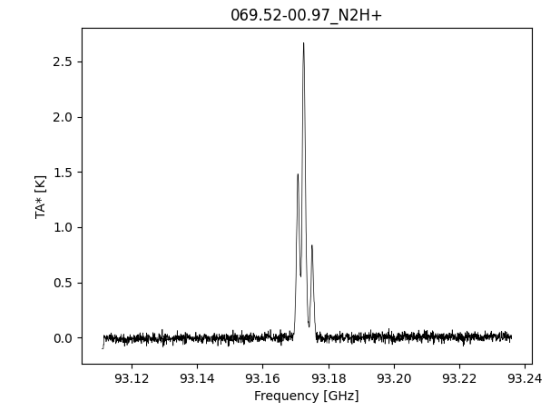
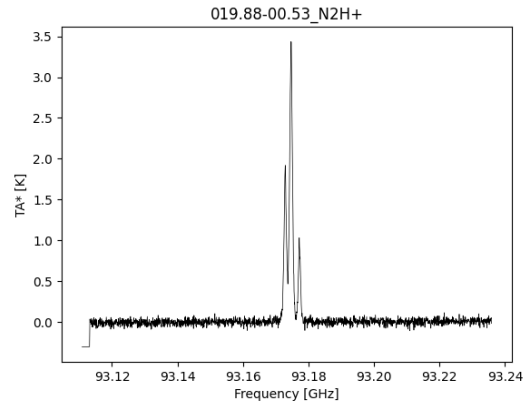
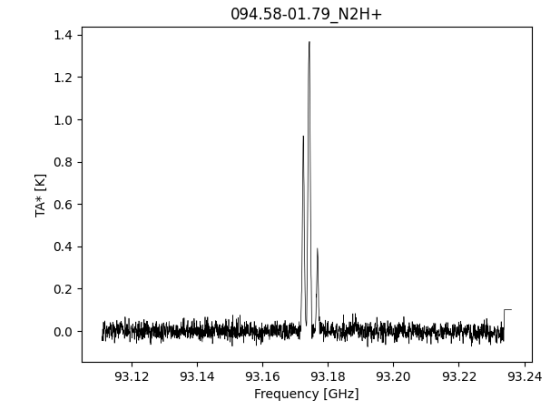


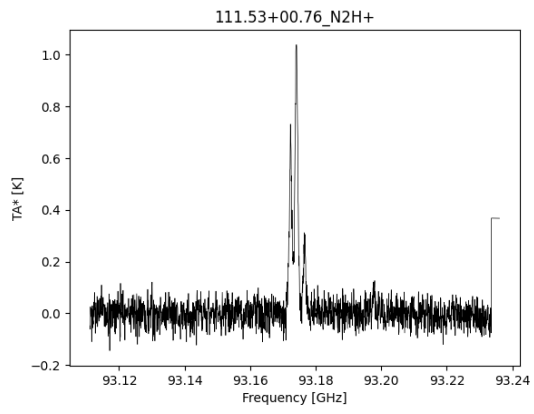
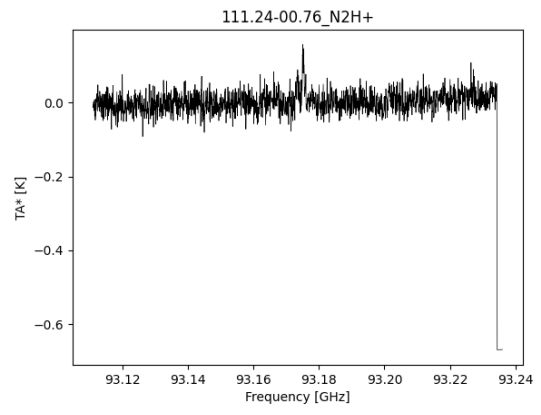
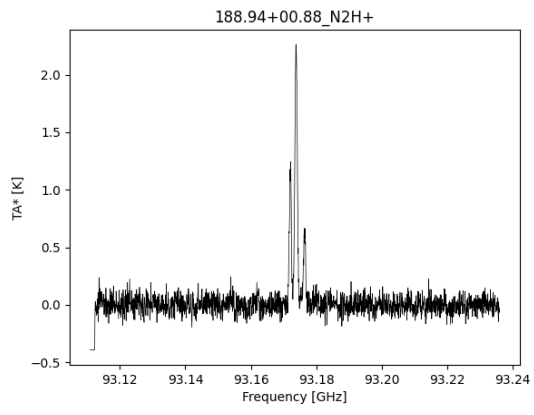




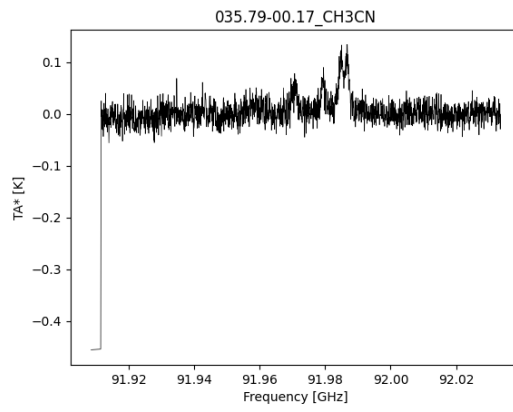
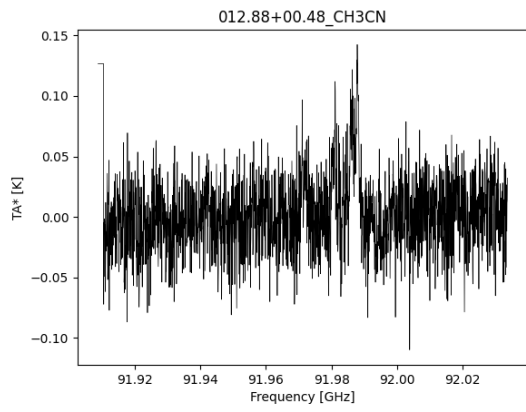
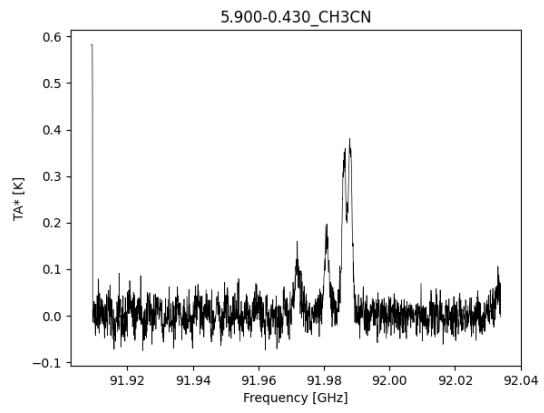
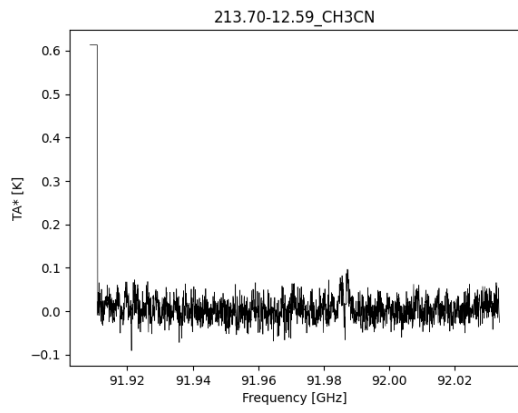
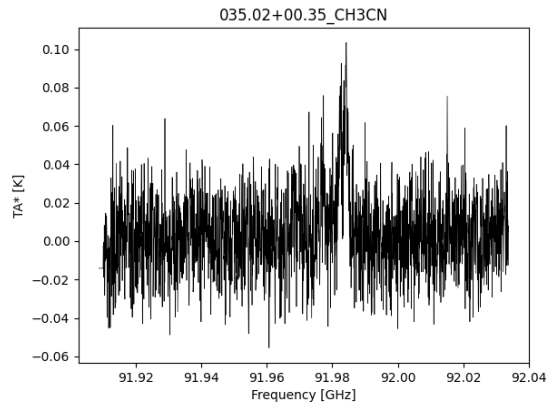
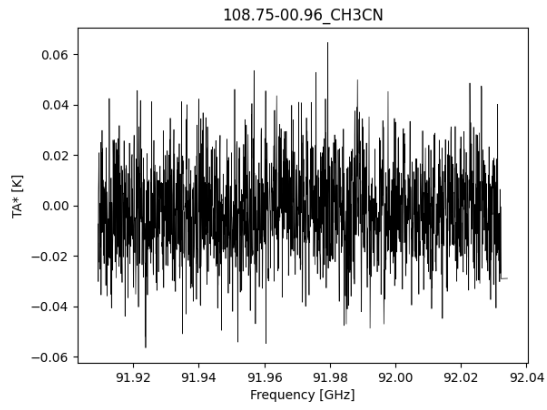
A.7 N_2H^+

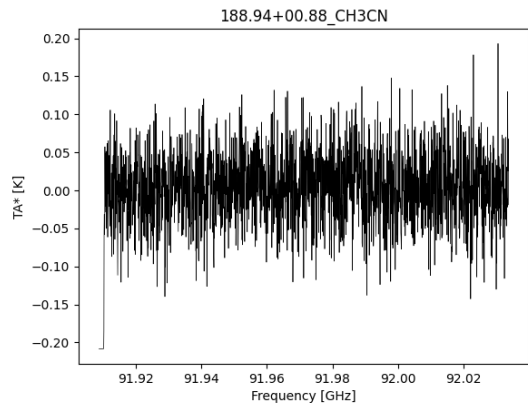
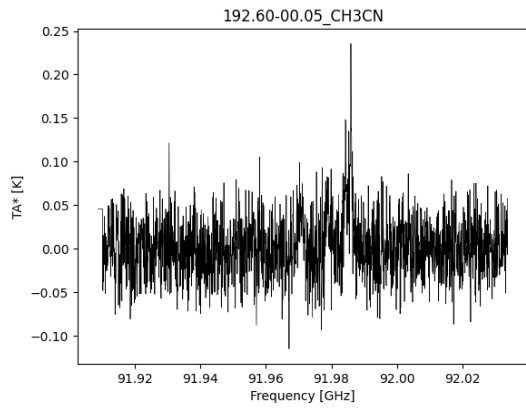
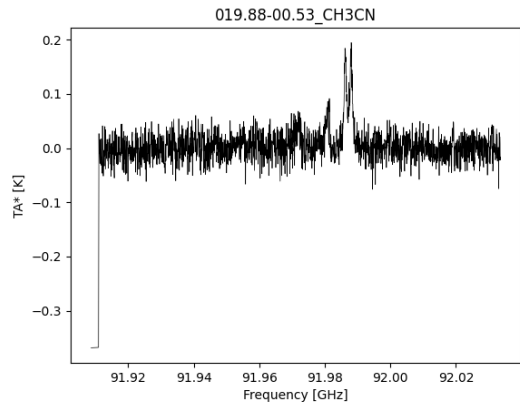
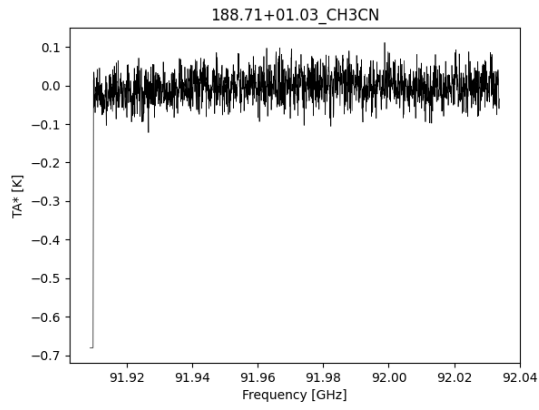
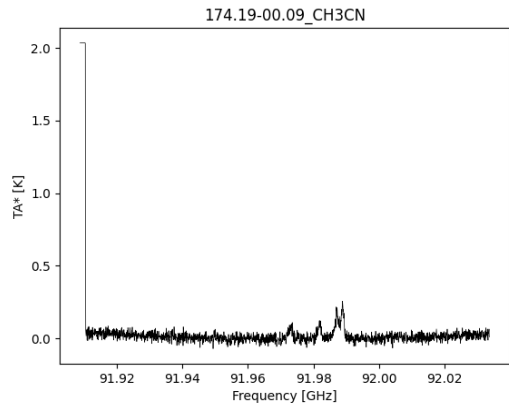
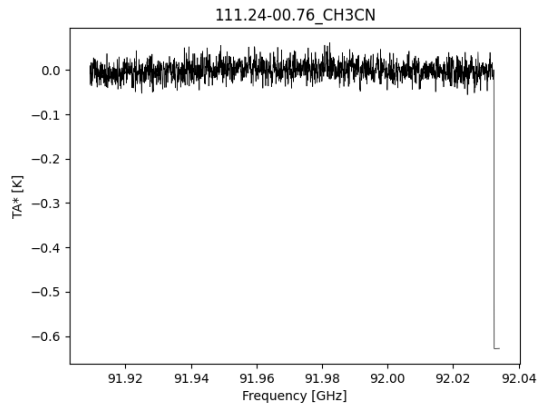
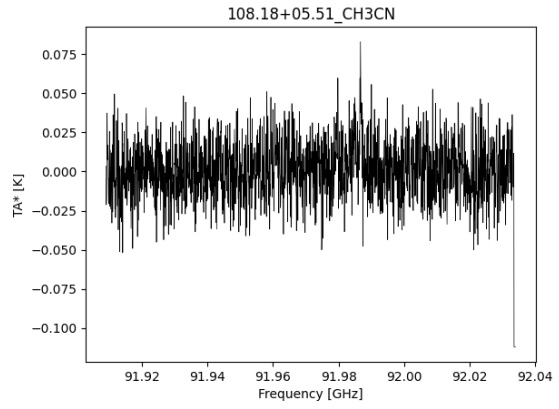
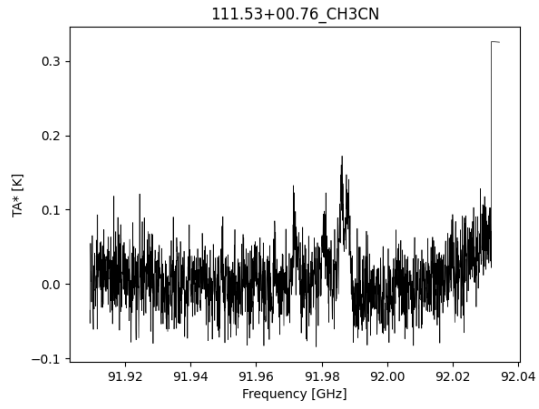


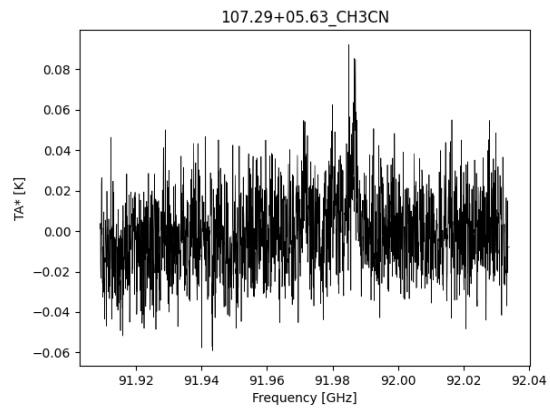
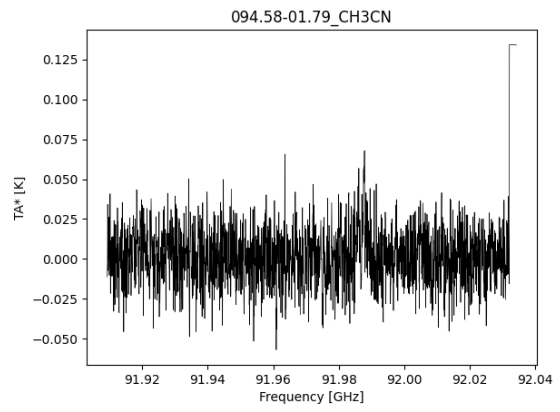
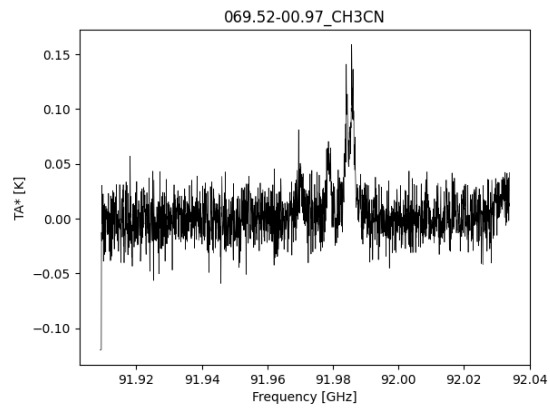




A.8 CH₃CN

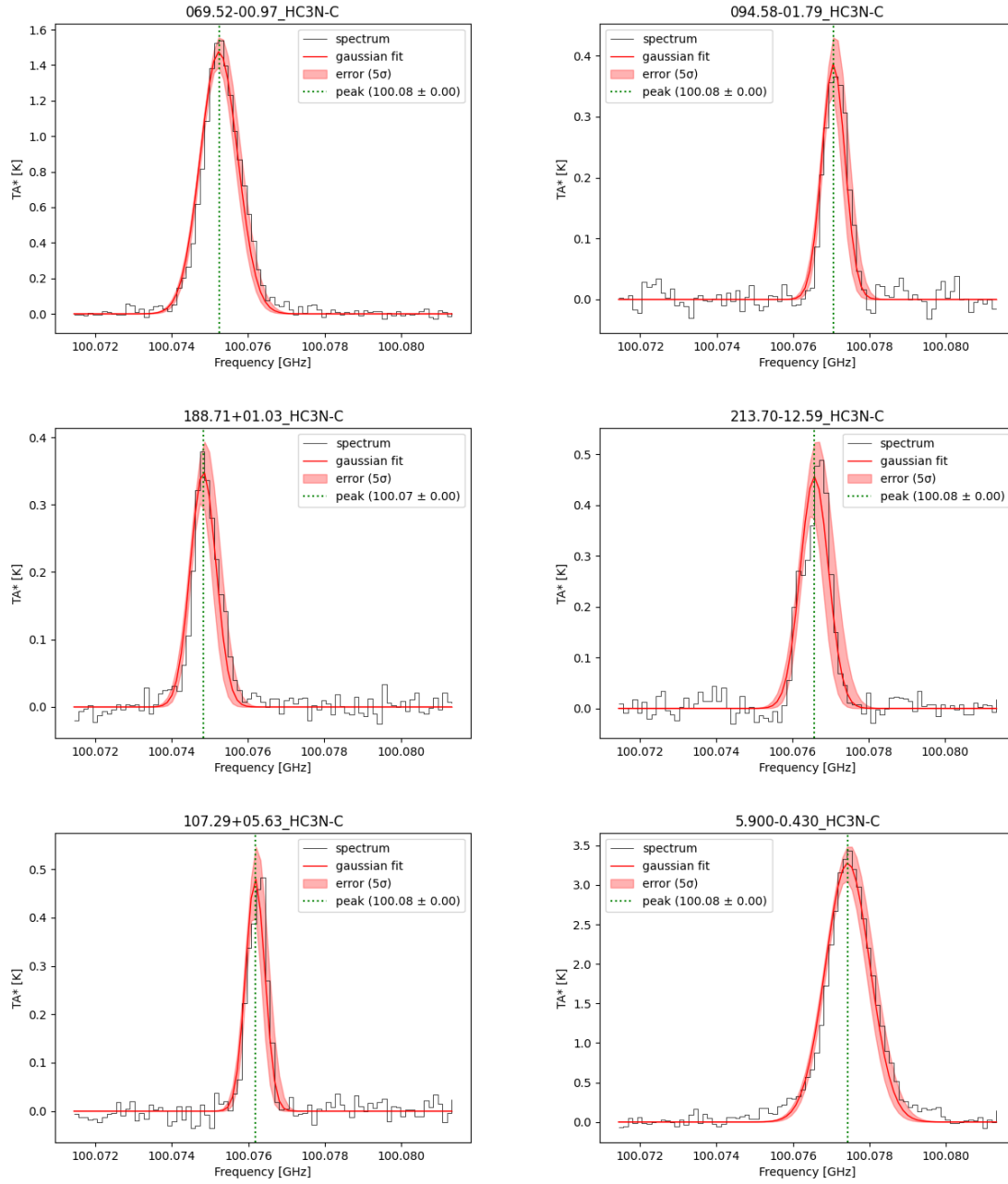


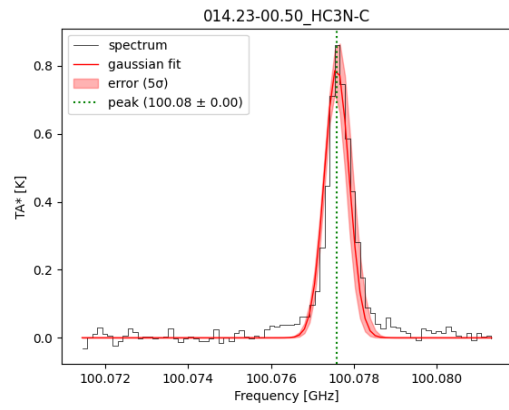
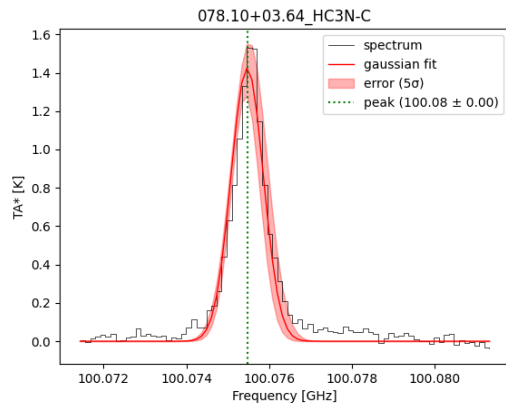
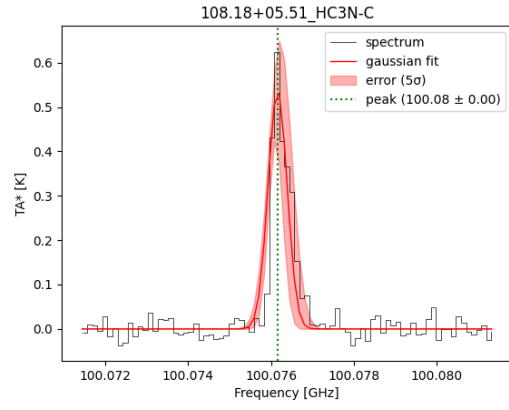
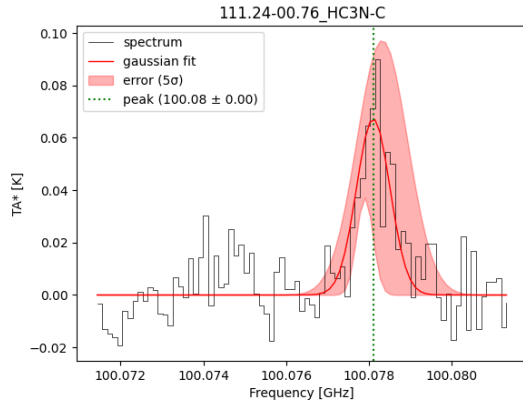
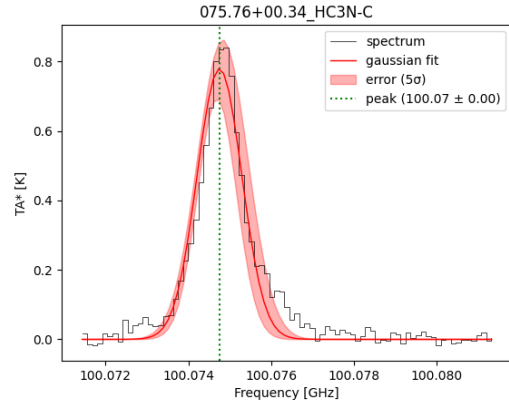
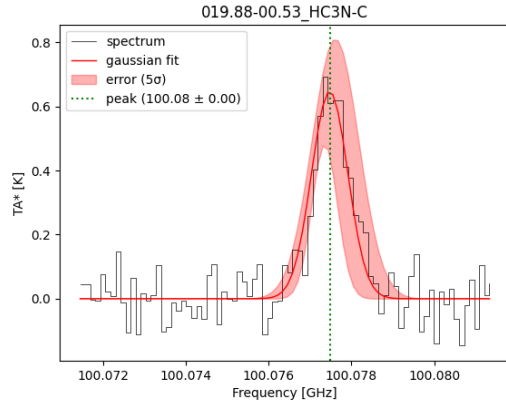
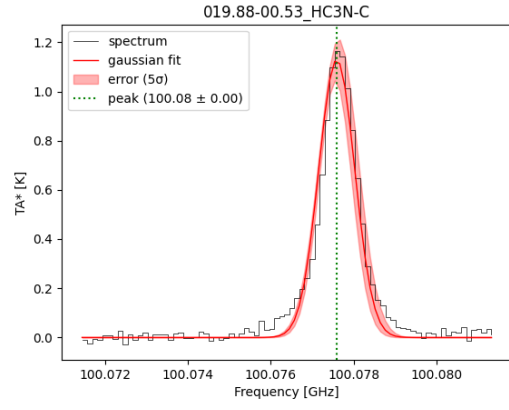
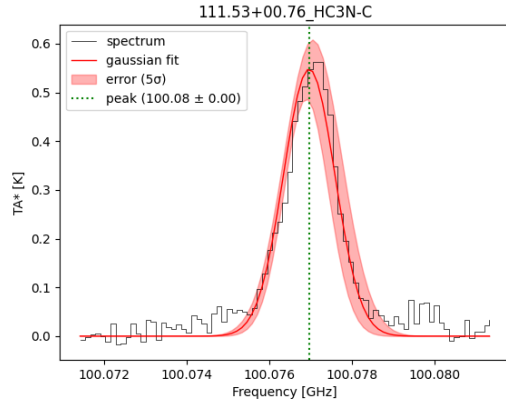


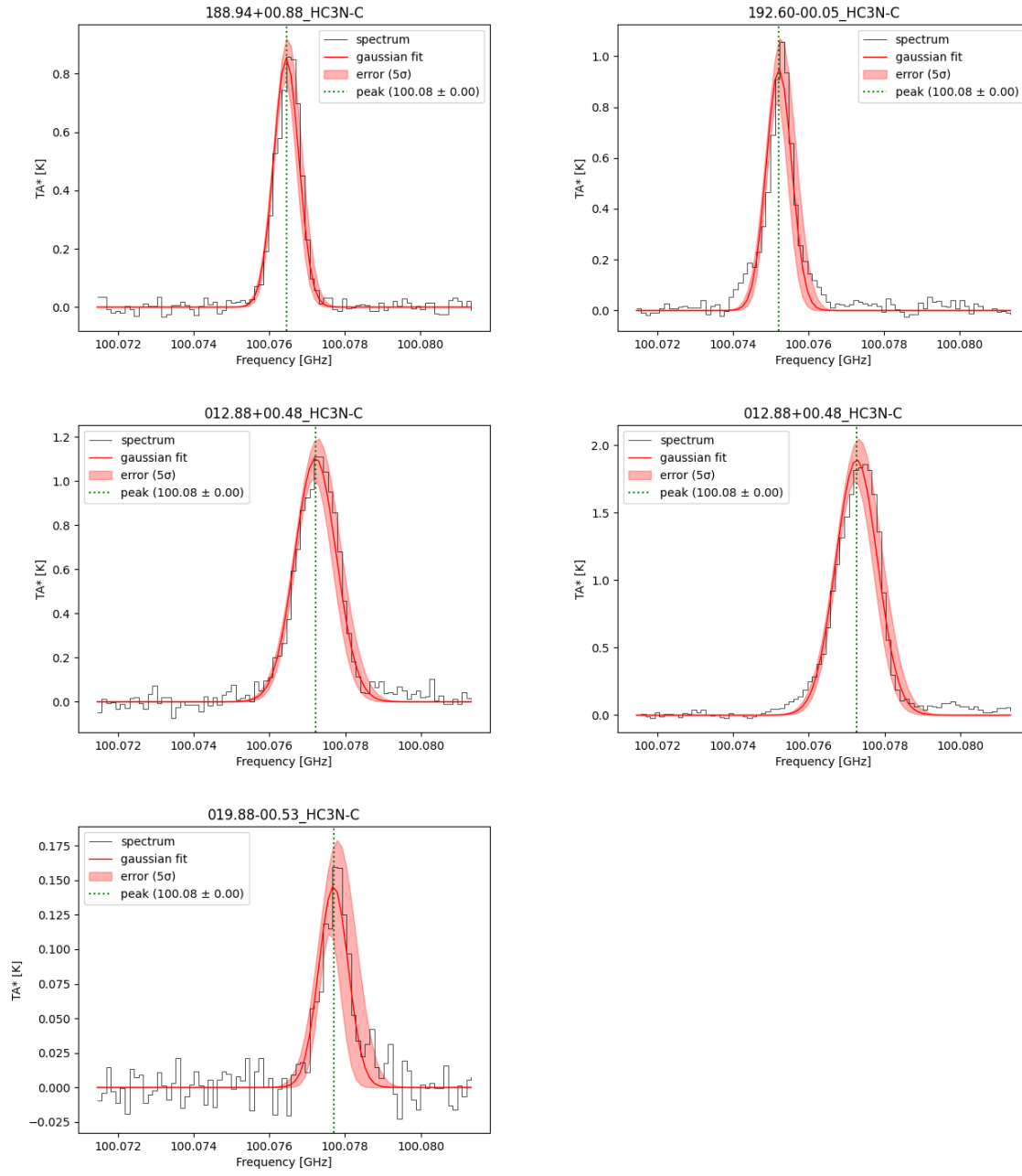


B ガウスフィットを行ったスペクトル

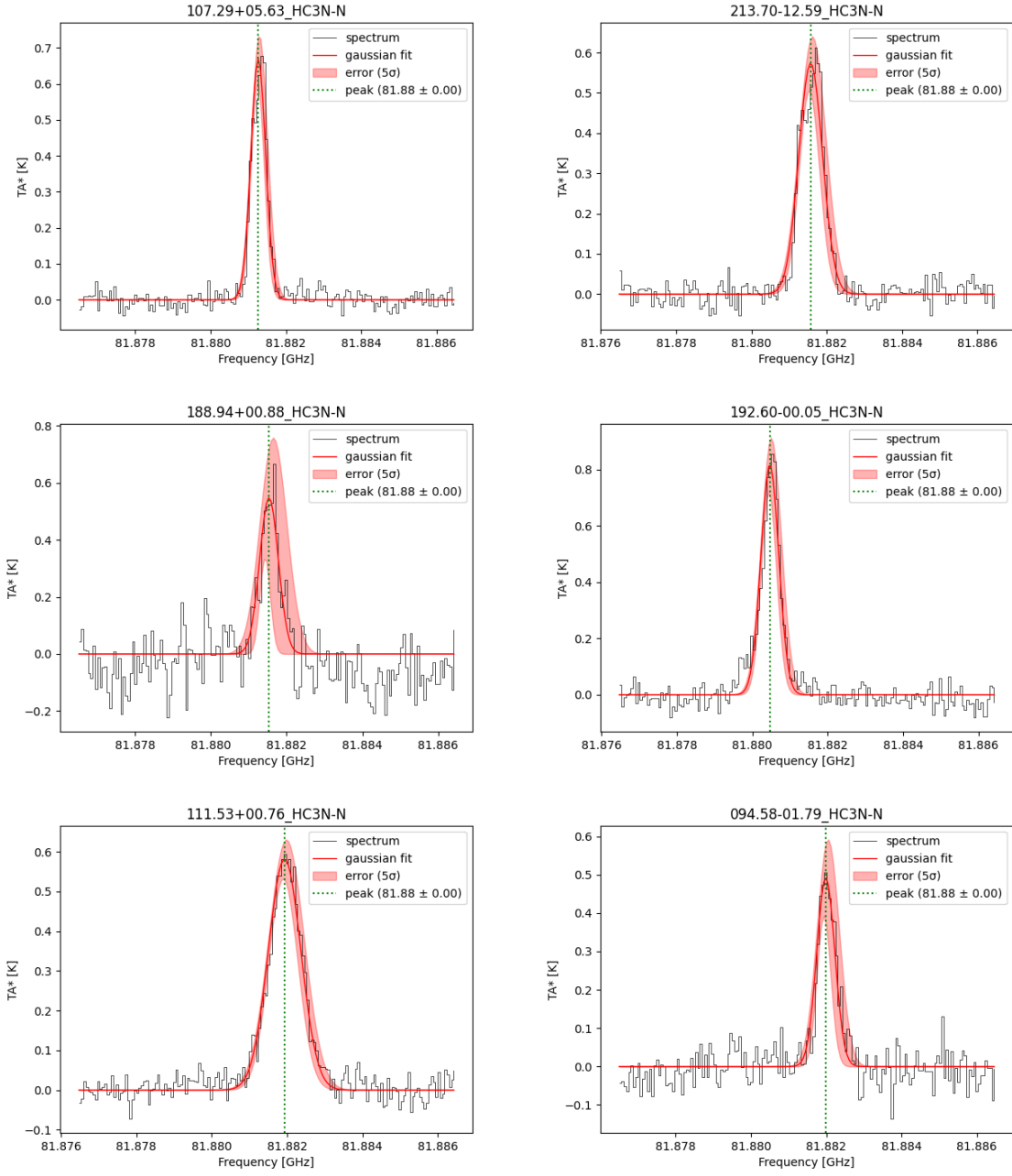
B.1 HC₃N - 100 GHz

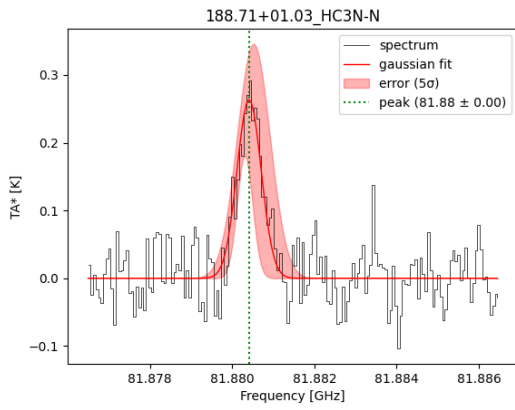
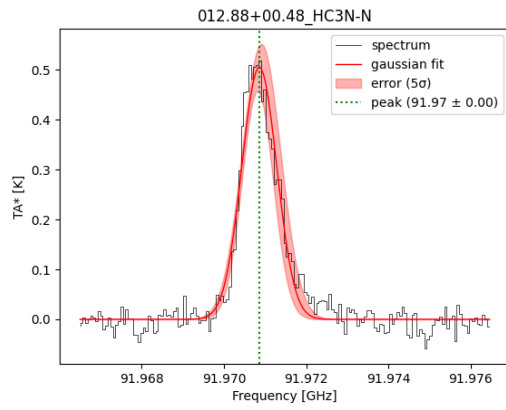
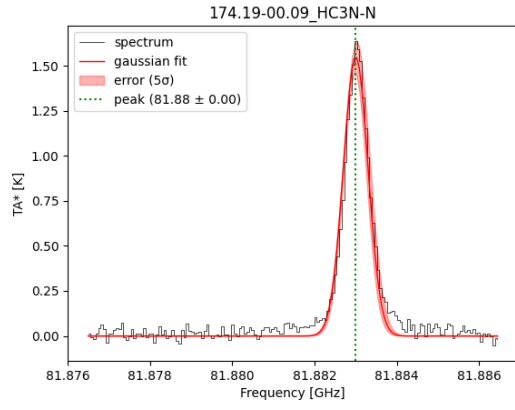
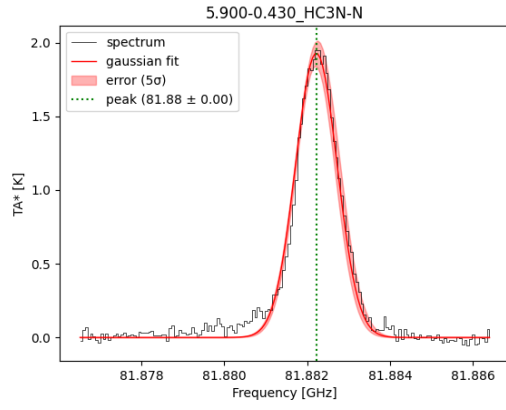
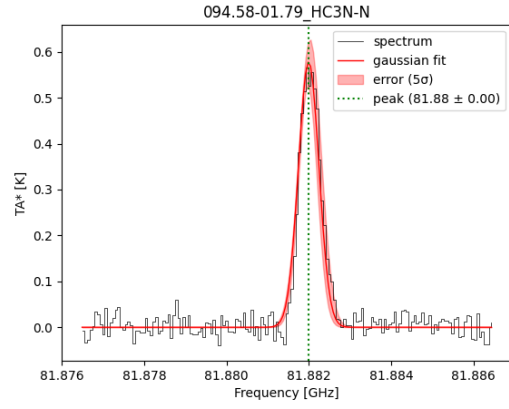
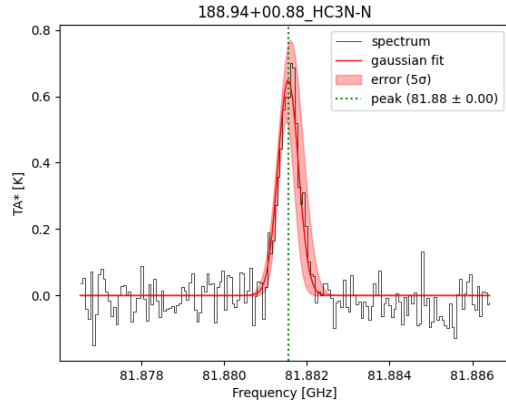
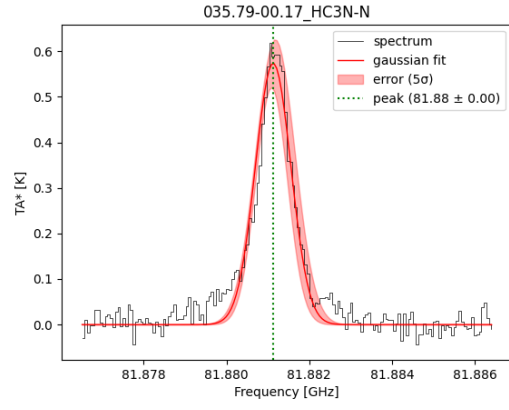
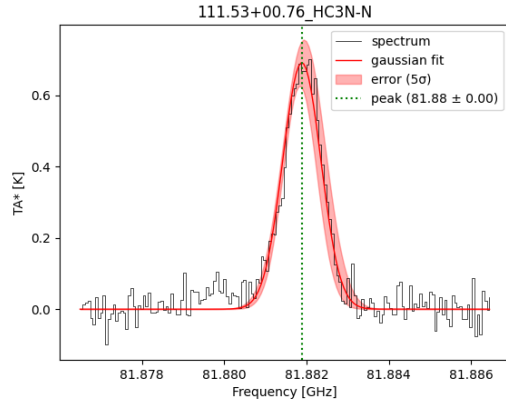


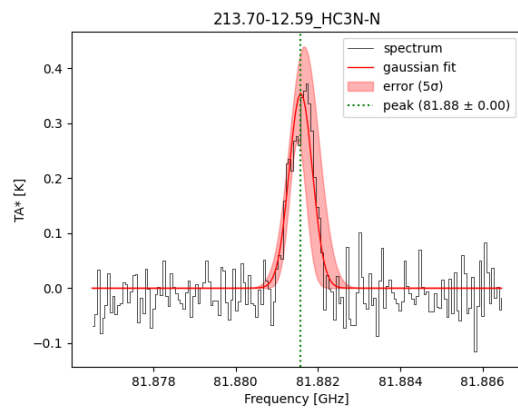




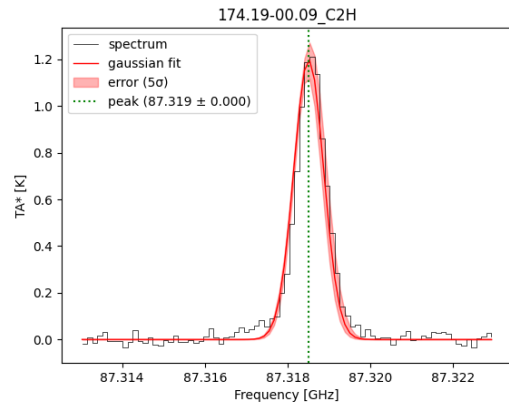
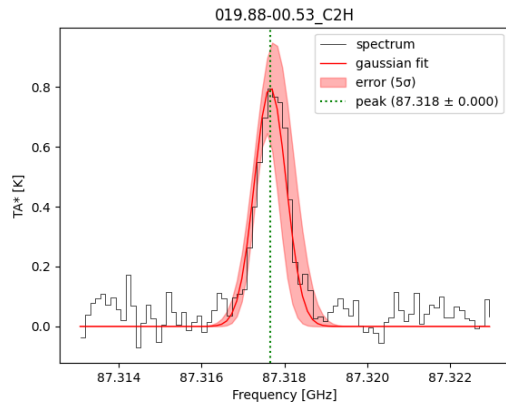
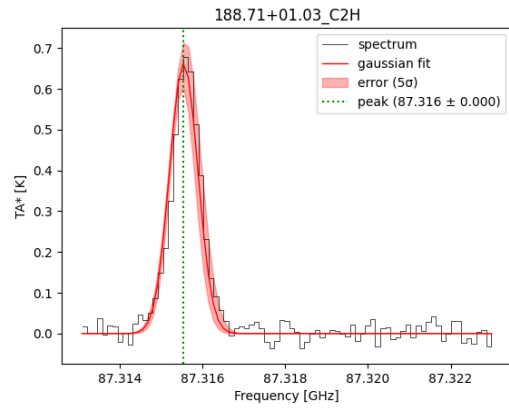
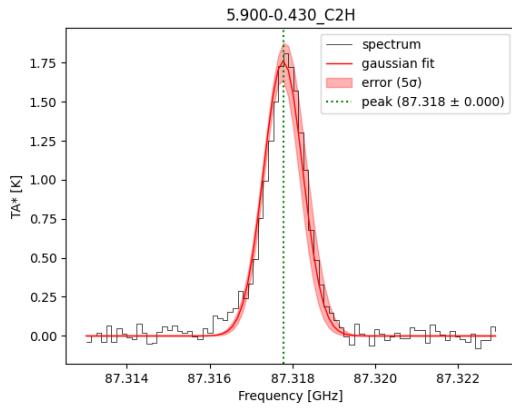
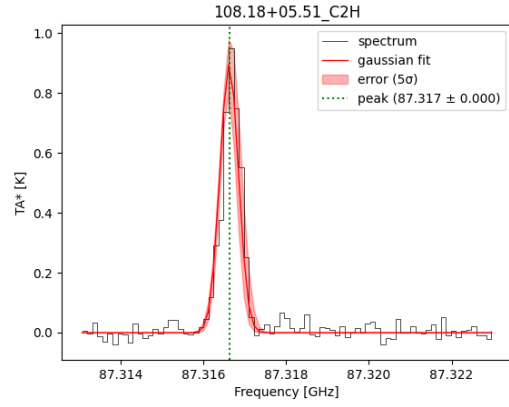
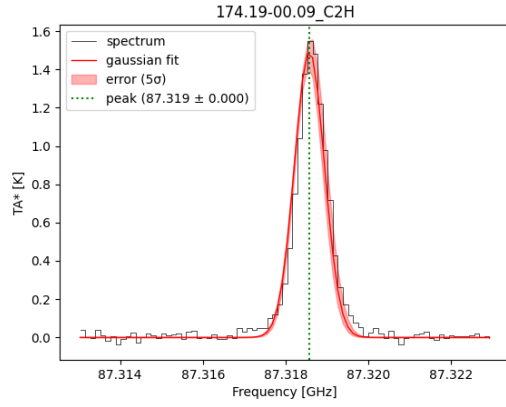
B.2 HC₃N - 80 GHz

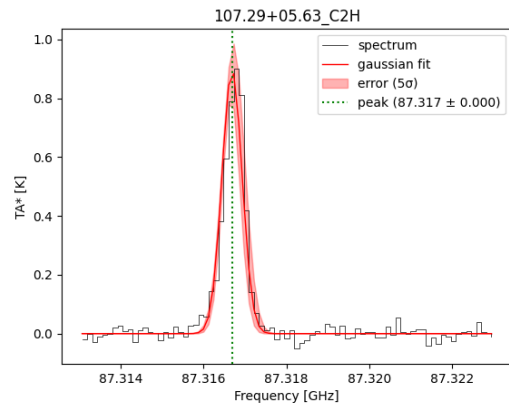
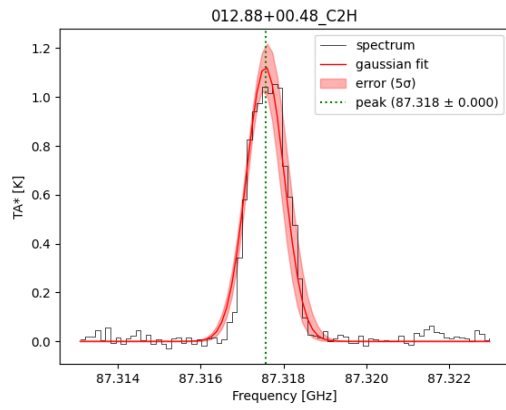
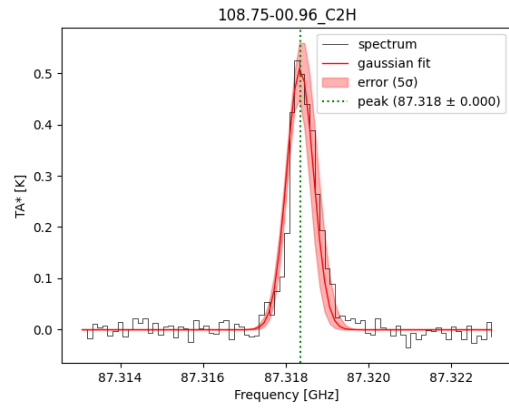
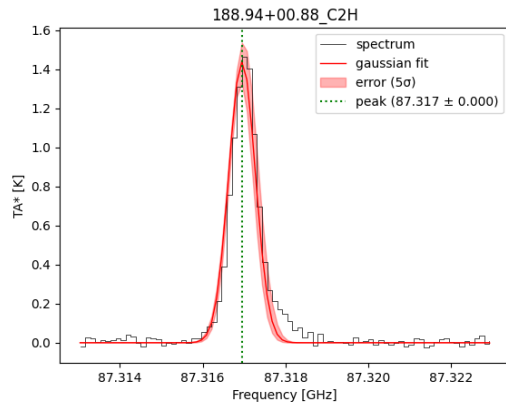
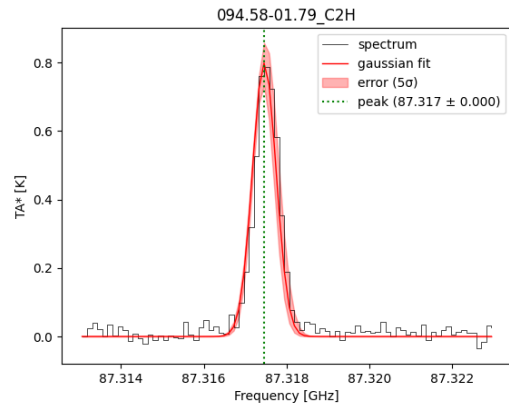
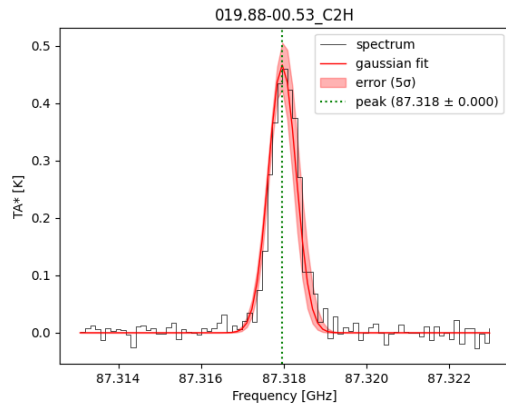
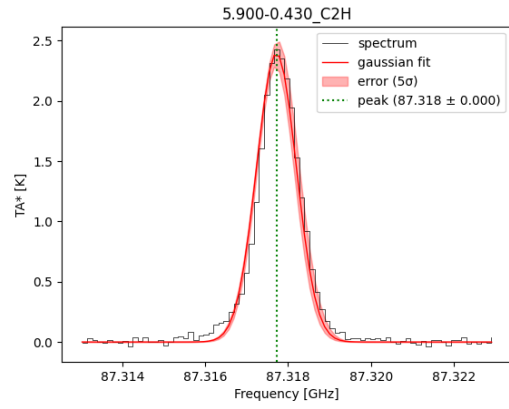
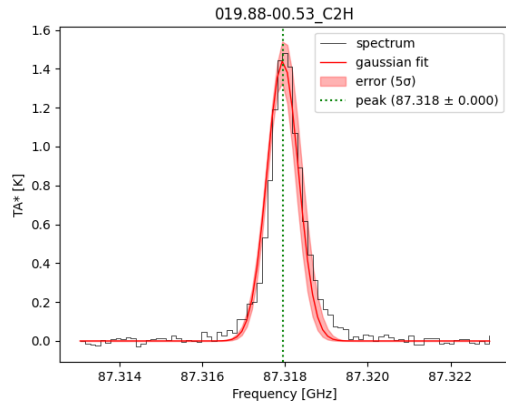


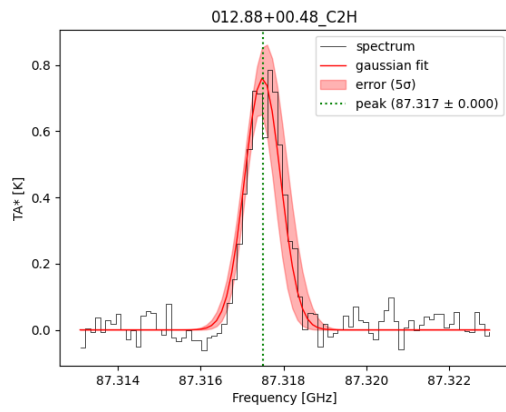
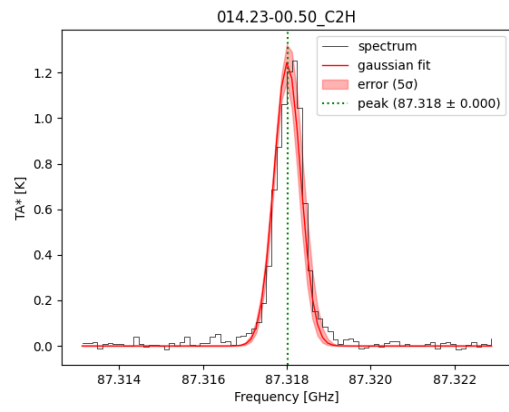
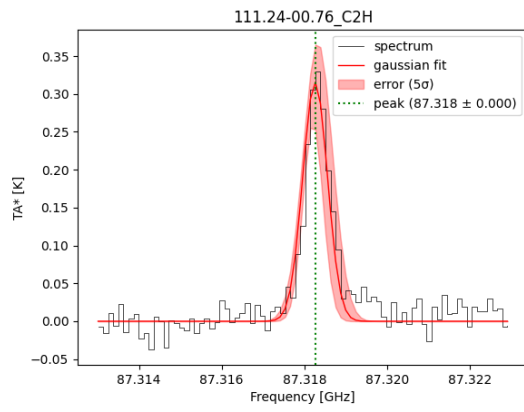




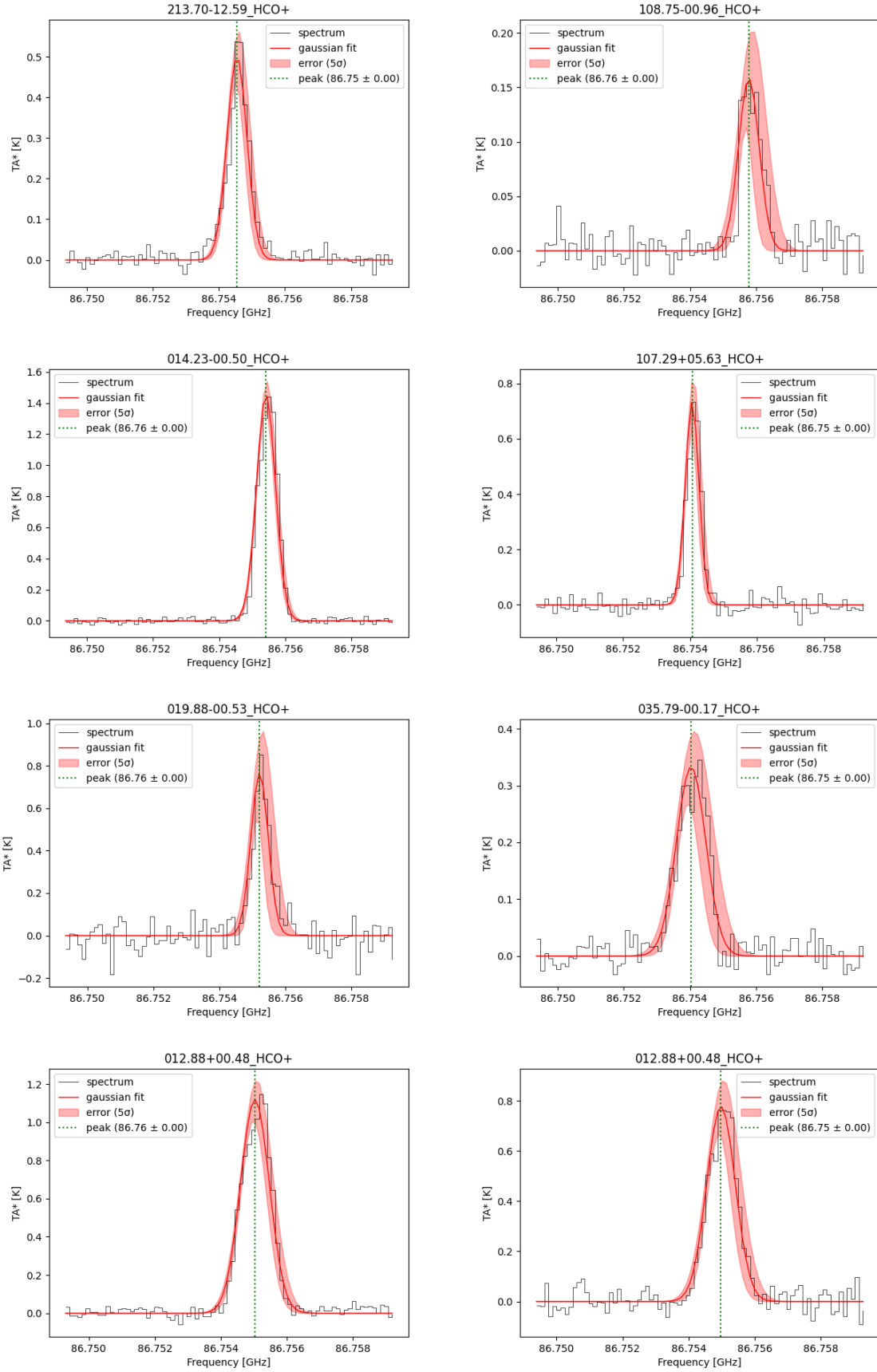
B.3 C₂H

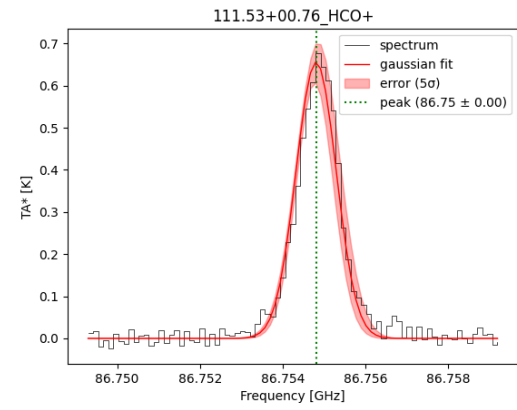
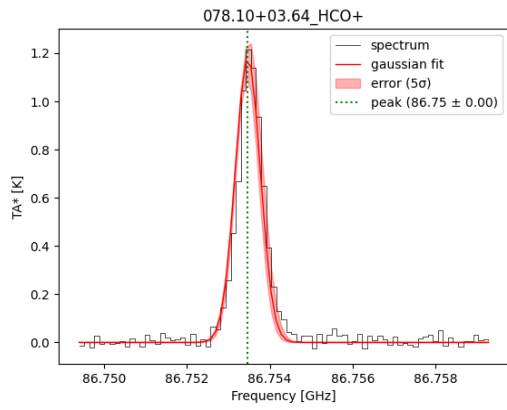
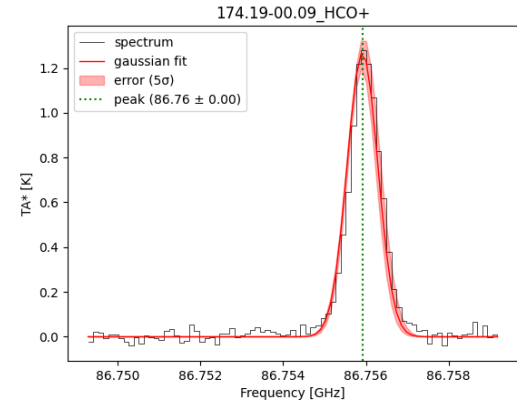
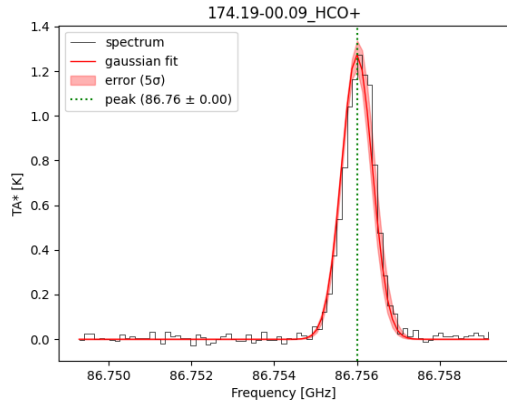
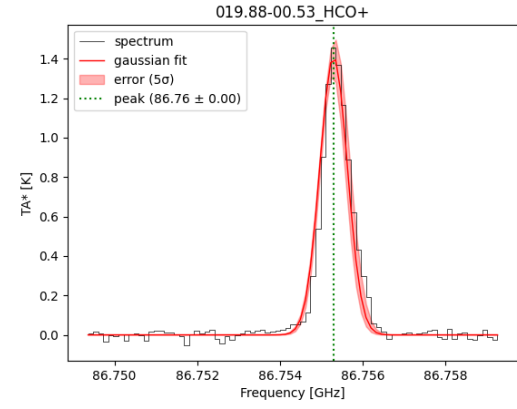
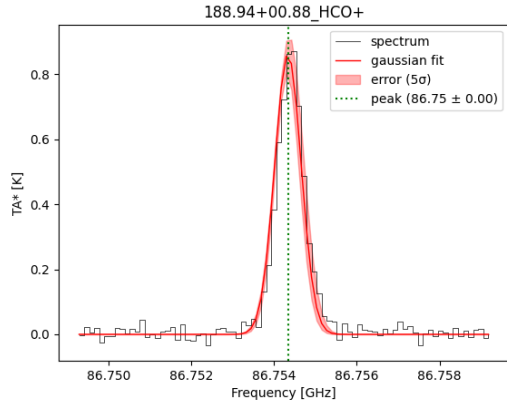
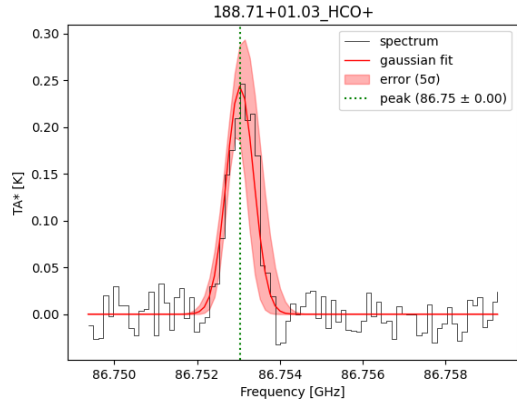
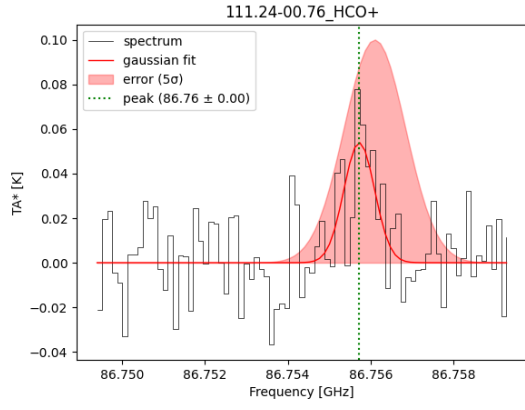


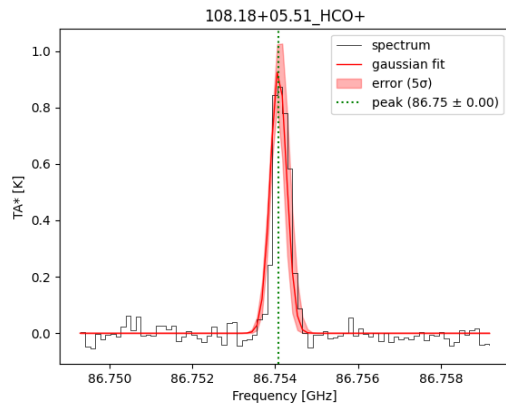
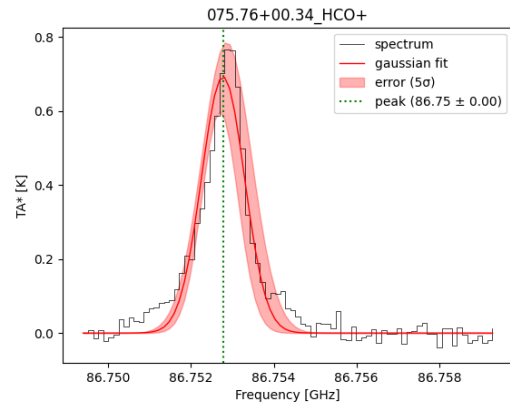
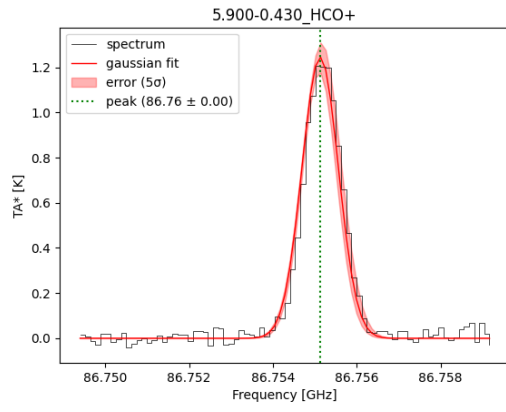
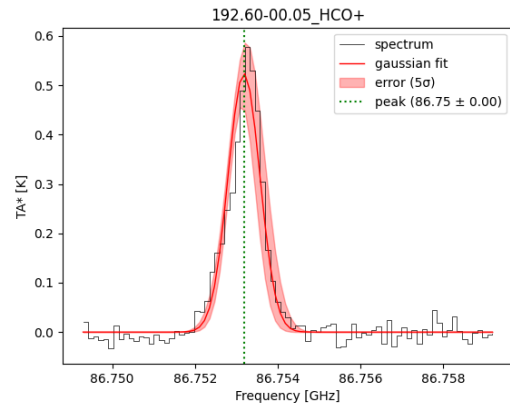
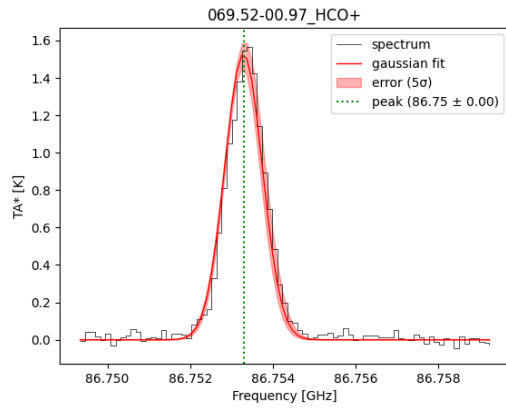
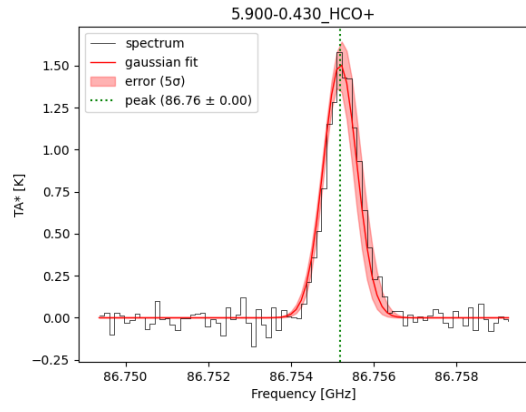
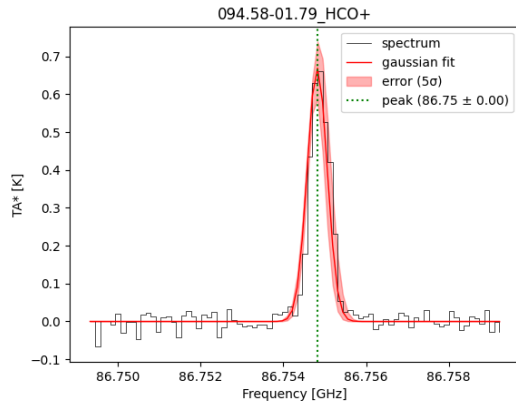




B.4 H^{13}CO^+







謝辞

本研究を進めるにあたり，丁寧かつ熱心にご指導くださった研究室の先生方ならびに先輩方に深く感謝申し上げます．指導教員の百瀬宗武教授には，観測および解析の基礎から実践的な内容に至るまでご指導いただくとともに，解析や考察の方向性について貴重な助言を賜りました．また，先輩の折原龍太さんには解析に必要な知識のご教示に加え，Java NewStar から Python への移行に際して多大なご助力をいただきました．ここに心より感謝申し上げます．

参考文献

- [1] Inayoshi, K. et al. (2013), ApJL, 769, L20
- [2] Suzuki, H. et al. (1992), ApJ, 392, 551
- [3] Sakai, N. et al. (2008), ApJ, 672, 371
- [4] Green, C. E. (2014), MNRAS, 443, 2252
- [5] Taniguchi, K. et al. (2019), ApJ, 872, 154
- [6] 国立天文台 野辺山宇宙電波観測所 (2020), “NewStar manual”,
<https://www.nro.nao.ac.jp/~nro45mrt/html/obs/newstar/index.html>
- [7] The SciPy community, “curve_fit — SciPy v1.15.2 Manual”,
https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.curve_fit.html
- [8] Frank J. Lovas, “NIST Recommended Rest Frequencies for Observed Interstellar Molecular Microwave Transitions”,
<https://physics.nist.gov/cgi-bin/micro/table5/start.pl>