

平成 25 年度 2013 年度
卒業論文

メタノールモニタ観測に おけるデータ解析

茨城大学 理学部理学科 学際理学コース
10S6023N
電波・赤外線天文研究室
中村 英斗

要旨

6.7GHz メタノールメーザーは、900 個ほどの天体において観測されている。また、降着円盤に付随しており、100-200K において励起すると考えられている。大質量星は、自身の寿命が $\sim 10^6$ 年と非常に短く、観測できる天体の絶対数が少ない。さらに、濃い星間ダストに大質量星からの放射が吸収されてしまい、可視光での観測ができないため、詳しいことは解明されていない。そこで、メーザーの寿命の長さや発生時期などを考慮すると、6.7GHz メタノールメーザーを用いた観測が大質量星を解明するための最良の手段と言える。しかし、観測されたデータを比べるサンプルが少ないことが懸念されており、茨城局日立アンテナを用いた観測が行われている。また、メタノールメーザーは強度変動しており、確認するためには長期間のデータが必要となる。そこで、2013 年に行われた観測データに対して、グラフのカタログを作成した。

1. 序論

1.1 メーザーとは

メーザーは、誘導放射によるマイクロ波増幅（microwave amplification by stimulated emission of radiation）と呼ばれ、これを略して maser と呼ばれる。メーザーにはいくつかの特徴があり

- 強度が熱放射の場合に比べて大きい
- 電波源の広がり方が極めて小さく点状である（メーザースポット）
- 直線または、円偏光している
- 線幅は熱運動による幅よりも小さいことが多い
- 電波の位相が揃っている

などがあげられる。宇宙空間で、メーザー現象を起こす分子としては、OH, H₂O, SiO, CH₃OH（メタノール）などである。特に、クラス II メタノールメーザーは、大質量星形成領域以外では検出例がないため、近年では大質量星形成の指標として、観測が行われている。

1.2 メーザーの発生原理

メーザー増幅作用の簡単な例を示す。

図 1-1 のような三エネルギー準位の分子モデルを考える。このとき、エネルギー準位 1 と 2 の間の平衡式は

$$N_2(C_{21} + M_{21} + P_{21} + A) = N_1(C_{12} + M_{12} + P_{12}) \quad (1.1)$$

となる。

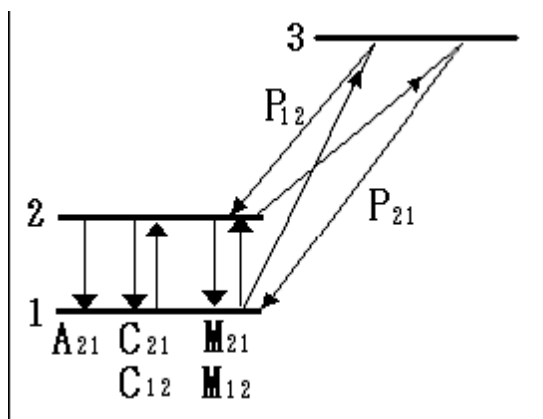


図 1-1 メーザーを理解するための三エネルギー準位モデル

ただし、ここで

N_1, N_2 : エネルギー準位 1,2 における分子の数密度

C_{ij} : 衝突遷移確率

$M_{ij} \equiv B_{ij}I\Omega_m/4\pi$: 強制放射および吸収の確率

B_{ij} : アインシュタインの B 係数

I : 電波強度

Ω_m : 増幅の種となる放射ビームの立体角

A : 自然放射係数

P_{ij} : ほかの準位 3 を介しての遷移

である。強制放射による電波は、たねとなった電波と同じ方向へ放射されるので $\Omega_m/4\pi$ なる方向依存性が付加されている。 P_{ij} に関しては、ここでは励起源が赤外線などの放射であるか、他の粒子との衝突であるかは問わないこととする。準位 1 から準位 3 にくみ上げられた分子は準位 2 へおち、準位 1 と 2 の間に分布の逆転(population inversion)をおこす。

(1.1)式において、数密度大、温度大、電波強度大とすると、 C, M, P に対して、 A は無視することができ、また $C_{12} \cong C_{21} = C$ とおける。したがって、 $M = M_{12} = M_{21}$ とすると、

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{P_{12} + M + C}{P_{21} + M + C} \quad (1.2)$$

$N = N_1 + N_2$ において、 $M = C = 0$ としたときの $\Delta N = N_2 - N_1$ は、

$$\Delta N \equiv \frac{P_{12} - P_{21}}{P_{12} + P_{21}} \quad (1.3)$$

である。 ΔN_0 はポンピングのみの効果による逆転分布を表すので、

$$\eta_p = \frac{\Delta N_0}{N} \quad (1.4)$$

をポンプ効率と呼ぶ。 $P = P_1 + P_2$ とすると、

$$\Delta N = \frac{\Delta N_0}{1 + \frac{2(C+M)}{P}} \quad (1.5)$$

電波の x 方向への伝播の式

$$\frac{dI}{dx} = \frac{h\nu}{4\pi\Delta\nu} (N_2 - N_1)BI + N_2A \quad (1.6)$$

に(1.5)式を代入すると、

$$\frac{dI}{dx} = \frac{\alpha_0 I}{1 - (I/I_S)} + \varepsilon \quad (1.7)$$

となる。ただし、

$$\begin{aligned} \alpha_0 &\equiv \frac{h\nu}{4\pi\Delta\nu} \frac{\Delta N_0}{1 + 2C/P} \\ I_S &\equiv \frac{1 + 2C/P}{B\Omega_m/2\pi P} \\ \varepsilon &\equiv \frac{h\nu}{4\pi\Delta\nu} N_2 A \end{aligned} \quad (1.8)$$

である。(1.7)式の第 1 項が準位 1-2 間の分布が逆転した分子への入射電波 (強度 I) によって起こる強制放射、すなわち増幅分を表す。ただし、 α_0 は逆吸収係数(negative absorption)であり、 I_S はメーザー放射する強度である。

1.3 6.7GHz メタノールメーザー

メタノールメーザーは 25GHz 帯において、1971 年に初めて発見された。メタノールメーザー源の分布は輝線によって大きく異なるため、クラス I (25.0, 36.1 GHz などの遷移周波数) とクラス II (6.7, 12.2 GHz などの遷移周波数) とに分類されている。

クラス I は、アウトフローが周囲の高密度物質と相互作用するときに生じ、衝突励起といわれている。輝度温度は、 $10^6 - 10^8 K$ であるという観測や、放射スポットの大きさは 100AU 程度であるため、VLBI 観測では分解してしまうといった報告もあるが、詳しいことはわかっていない。また、超コンパクト H_{II} 領域や、赤外線点源などの大質量星形成の指標となる天体との位置的相関が必ずしも良くなく、1pc 程度離れている場合もある。

クラス II においては、赤外線源や超コンパクト H_{II} 領域に比較的よく一致していると考えられ、暖かいダストからの赤外線による励起であるといわれている。また、大質量星形

成の指標となる天体との位置的相関が良いとされている。しかし、干渉計を用いた高空間分解能観測により、クラスⅡメタノールメーザーの中には、超コンパクトH_{II}領域や、赤外線点源などよりも極近傍に位置しているより若い天体（超コンパクトH_{II}領域を伴わない大質量原始星や、ミリ波連続波源あるいはサブミリ波源など）との相関が良いものが多数存在することが明らかになってきた。これらの観測結果により、近年では、クラスⅡメタノールメーザーは超コンパクトH_{II}領域が形成されるよりも前の段階から生じると考えられている。

今回、解析に用いたデータは、日立局においてクラスⅡに分類される 6.7GHz メタノールメーザーで観測されたものである。6.7GHz メタノールメーザーは、約 900 個の天体において観測されている。また、降着円盤に付随しており、100-200K において励起すると考えられている。大質量星は、自身の寿命が $\sim 10^6$ 年と非常に短く、観測できる天体の絶対数が少ない。さらに、濃い星間ダストに大質量星からの放射が吸収されてしまい、可視光での観測ができないため、詳しいことは解明されていない。そこで、メーザーの寿命の長さや発生時期などを考慮すると、6.7GHz メタノールメーザーを用いた観測が大質量星を解明するための有力な手段と言える。

1.4 強度変動

6.7GHz メタノールメーザーは、強度変動することで知られている。近年では、H₂COメーザーや OH メーザーでも検出され始めており、その周期がメタノールメーザーと同期していたため、メタノールメーザーのみに特徴的な強度変動現象ではなく、大質量星の周囲で生じる何らかの物理現象を表している可能性が高いと考えられる。全スペクトル成分間に共通した変動であるという特徴は、共通の励起源の変動をトレースしていることを裏付ける特徴になりうる。

この周期変動を引き起こす要因として、以下の 2 説が考えられる。

- 連星系による、UCH_{II}領域からの種光子の周期的な強度変動
- 連星系円盤による、周期的な質量降着

しかし、どちらの説も観測的な検証はなく、周期変動の要因は明確になっていない。

1.5 研究目的

これまで述べてきたように、大質量星形成過程の解明においては、6.7GHz メタノールメーザーでの観測が非常に有効である。しかし、観測されたデータと比べるサンプルが少ないことが懸念されており、茨城局においても日立アンテナを用いた観測が行われている。また、上記でも述べたようにメタノールメーザーは強度変動をしており、確認のためには、長期間のデータが必要となる。

そこで、2013 年に行われた観測データに対して、ピーク速度、ピーク強度、積分強度をまとめ、これらからのベースとなる、グラフのカatalogを作成することを本研究の目的とした。

2. 観測・解析

2.1 観測天体について

杉山孝一郎氏、元木業人氏、藤沢健太氏、他山口大学研究グループによって提案された、茨城 32m 電波望遠鏡を用いた 6.7GHz メタノールメーザーの大規模観測において、選出された 450 天体のうち 431 天体を解析対象とする。観測データは 2013 年 1 日目から 334 日目までに取得したものを用いる。母体カタログに掲載されている天体の積分時間は 1 秒～10 分である。それに対して、日立アンテナにおいて観測された天体は 1 回につき 5 分積分され、年間～70 回の観測が行われている（毎日観測されている 09.621+0.196 を除く）ので、全てのデータを用いると最大で 350 分の積分時間が得られる。

2.2 解析方法

2.2.1 グラフ作成

各観測日ごとにまとめられているデータを、天体ごとにまとめ直す。詳しいまとめ方や、ファイル名についてのまとめは付録に示す。そして、 $1/(\text{rms})^2$ で重みをつけた平均を計算するプログラム winteg.c（米倉覚則氏作成）を用いて 432 天体に対して平均化を行った（図 2-1 参照）。

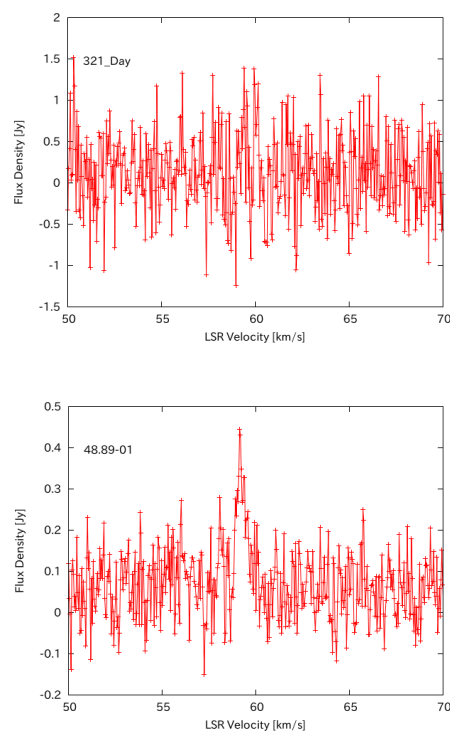


図 2-1 上：天体 48.89-01 の 321 日目のデータ
下：22 日間積分し平均化したデータ (60km/s 付近)

2.2.2 天体の各成分

各天体のピーク速度、ピーク強度、積分強度、rms (root mean square) ノイズレベルを求めるために、lineparam2 (米倉覚則氏作成) を用いた。コマンド入力の形式は、lineparam2 filename v1 v2 v3 v4 である。v1, v2, v3, v4 は baseline フィッティングパートを表しており、ピーク速度、ピーク強度、積分強度は、v2-v3 の間で求める。rms ノイズレベルは、v1-v2 及び v3-v4 の間で求められる。

2.2.3 母体カタログとの比較

作成したグラフと母体カタログを比較する。新たな速度成分が見つかった天体に対してはそれが真の検出であるのか、誤検出であるのかを2つの方法で確かめた (ただし、母体カタログにグラフが掲載されていなく、比較できなかった天体もある)。第1に、観測に使用されたスケジュールファイルや、解析ログを確認する方法である。観測や解析において、誤りがあった場合には以下のような原因が考えられる。

- 1, 観測を行う際に別の天体をみていた場合
- 2, 1st Lo や 2nd Lo の設定周波数が異なったまま観測をしていた場合
- 3, 解析の際に正しい静止周波数, 1stLo, 2nd Lo 周波数を用いていなかった場合
- 4, 解析の際に正しい天体の座標や、観測時刻を用いていなかった場合

まず、1の事項に関しては、スケジュールファイルの確認を行った。スケジュールファイルは、毎回同じものを使用しており観測時刻のみ変更しているので1回の観測をチェックし観測座標が正しければ、別日の観測においても正しいと判断した。次に、2の事項に関しては、1日の観測では、約50天体を観測しており、それらはすべて同じ1st Lo, 2nd Lo 周波数設定で観測していることから、毎日観測している 09.621+0.196 を基準に判断した。09.621+0.196 が同じ速度に出ている場合は、1st Lo, 2nd Lo 周波数設定に誤りはないと判断した。最後に、3・4の事項は下記の成分 (平均化スペクトルで最も強度が強かった成分) が最も良く確認できる日の解析ログ (静止周波数、1st Lo, 2nd Lo 周波数設定、天体座標や観測時刻) の確認を行った。

第2に、観測データを観測日の前半のみの平均化データと後半のみの平均化データに分けて改めてグラフを作成することにより、真の検出であるか、誤検出であるかを判断した。データを分けたグラフのどちらにおいても、同

じ速度成分が見えた場合は、真の検出であると判断した。なぜならば、もしも上記の事項のような誤りがあった場合には速度成分が日によってずれるからである。

天体 18.999-0.239 の例を以下にグラフを表示する。

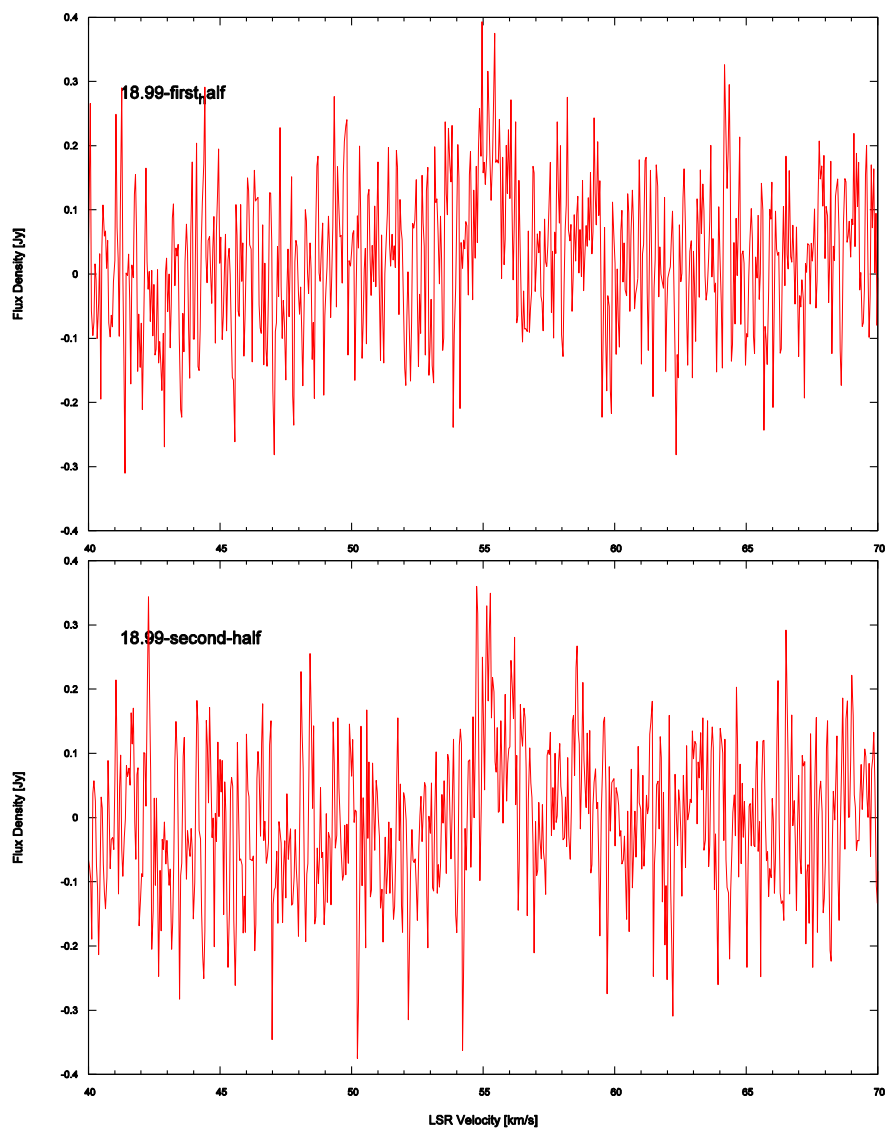


図 2-2 上：前半のみのグラフ 下：後半のみのグラフ (55km/s 付近)

3. 結果

解析を行った結果を以下に示す。

431 天体に対して解析を行った。12 天体においては非検出であり、8 天体は新しい速度成分とみられる天体であった。グラフと表は銀径±銀緯の順番に並んでいる。表に記載している S_{pk} は強度ピーク、 V_{pk} は強度ピークにおける速度成分、 S は積分強度を表している。未検出であった天体に関しては積分強度ではなく、ノイズレベルを示した。また、空間的に分離できない天体が 42 天体ある。それらは、備考欄にその旨を記載した。

- 未検出であった天体(12 天体)

28.85+0.50, 36.02-0.20, 37.38-0.09, 38.56+0.15, 41.87-0.10, 45.57-0.12,
78.62+0.98, 106.80+5.31, 168.06+0.82, 173.71+2.35, 203.32+2.05,
358.980+0.084,

- 新しい速度成分が検出されたとみられる天体(8 天体)

06-539-0.108, 10.822-0.103, 12.776+0.128, 18.999-0.239, 19.609-0.234,
28.069+0.41, 34.82+0.35, 48.89-0.17

- 空間的に分離できない天体(42 天体)

0.677-0.025, 0.667-0.034, 0.672-0.031, 0.651-0.049, 0.647-0.055, 0.695-0.038,
08.669-0.356, 10.480+0.033, 10.287-0.125, 10.299-0.146, 10.342-0.142,
10.356-0.148, 11.936-0.150, 18.440+0.045, 19.486+0.151, 23.04-0.32, 23.18-0.45,
24.92+0.10, 28.85+0.50, 29.92+0.05, 29.91-0.05, 30.00-0.01, 29.98-0.04,
30.82+0.27, 30.79+0.20, 30.22-0.18, 30.91+0.14, 30.94+0.11, 30.78+0.00,
33.68-0.26, 35.18-0.74, 37.02-0.03, 38.08-0.27, 42.07+0.24, 43.18-0.01,
49.47-0.37, 49.48-0.40, 49.62-0.36, 49.57-0.38, 49.66-0.45, 81.72+0.57,
109.92+1.98

	Source name	MX data		Integrated intensity	備考
	(l,b) (°, °)	Vpk [km/s]	Spk [Jy]	S [Jy km/s]	
周期変動 探査天体	351.775-0.536	1.719	165.083	159.452	
	352.630-1.067	-2.927	145.989	107.782	
	353.410-0.360	-20.401	92.046	98.794	
	354.615+0.472	-24.274	174.450	278.744	
	358.809-0.085	-56.181	5.583	6.631	
	358.906+0.106	-17.823	2.060	1.677	
	358.931-0.030	-15.905	5.552	8.029	
	358.980+0.084				ノイズレベル 0.076[Jy]
	359.138+0.031	4.392	14.185	14.694	
	359.436-0.104	-46.747	103.898	39.252	
	359.615-0.243	19.387	72.093	61.747	
	359.938+0.170	-0.494	0.654	0.689	
	359.970-0.457	23.069	2.041	0.439	
	0.092+0.663	11.718	21.762	18.226	
	0.167-0.446	13.706	2.810	0.888	
	0.212-0.001	2.739	49.637	4.516	
	0.315-0.201	18.266	56.758	60.846	
	0.376+0.040	37.047	0.312	0.129	
	0.409-0.504	25.189	3.633	2.671	
	0.475-0.010	27.985	2.082	3.330	
	0.496+0.188	1.048	20.728	40.072	
	0.546-0.852	13.528	93.911	178.756	
	0.645-0.042	49.614	44.194	50.956	
	0.673-0.029	70.449	12.171	41.034	
	0.836+0.184	3.590	3.855	1.967	
	1.008-0.237	1.574	8.514	7.672	
	1.147-0.124	-15.167	5.202	3.860	
	1.329+0.150	-12.118	0.803	0.294	
	1.719-0.088	-8.090	2.241	3.093	
	2.143+0.009	59.261	5.769	13.958	
	2.521-0.220	-6.216	1.242	0.964	
	2.536+0.198	3.235	20.758	48.570	
	2.591-0.029	-8.132	1.566	2.270	
	2.615+0.134	94.134	1.024	2.627	
	2.703+0.040	95.050	8.375	13.696	
	3.253+0.018	2.383	3.345	4.954	
	3.312-0.399	0.732	0.585	0.239	
	3.442-0.348	-35.114	0.511	0.194	
	3.502-0.200	43.936	0.832	0.569	
	3.910+0.001	17.350	6.033	3.838	
	4.393+0.079	1.912	7.041	11.967	
	4.434+0.129	-0.938	5.808	8.153	
	4.569-0.079	9.723	0.514	0.236	
	4.586+0.028	15.745	0.692	0.800	
	4.676+0.276	4.597	2.067	2.712	
	4.866-0.171	5.425	0.445	0.173	
	5.618-0.082	-26.546	1.421	1.977	
	5.630-0.294	10.020	1.881	3.583	
	5.657+0.416	19.525	2.411	3.040	
	5.677-0.027	-11.601	0.650	0.322	
	5.885-0.393	9.661	1.417	0.138	
	5.900-0.430	9.774	2.015	0.892	
	06.189-0.358	-30.161	172.745	154.187	
	06.368-0.052	147.457	1.550	2.562	
	06.539-0.108	0.747	0.556	0.116	
	06.588-0.192	5.030	6.468	7.299	
	06.610-0.082	0.780	20.833	15.389	
	06.795-0.257	26.108	44.223	106.153	
	06.881+0.093	-2.146	2.933	1.714	
	07.166+0.131	85.647	2.140	3.617	
	07.601-0.139	154.685	41.710	8.457	
	07.632-0.109	156.967	4.218	7.356	
	08.139+0.226	19.888	13.631	8.676	
	08.317-0.096	46.793	2.817	4.155	
	08.683-0.368	43.155	106.022	116.852	
	08.832-0.028	-3.843	90.939	250.664	
	08.872-0.493	24.062	39.527	40.742	
	09.215-0.202	45.554	8.305	9.013	
	09.621+0.196	1.316	5050.018	2279.681	
	09.986-0.028	42.385	72.802	69.187	
	10.205-0.345	6.862	1.162	1.253	

	Source name	MX data		Integrated intensity	備考
	(l,b) (° , °)	Vpk [km/s]	Spk [Jy]	S [Jy km/s]	
周期変動 探査天体	10.320-0.259	39.113	8.577	10.948	
	10.323-0.160	11.632	82.314	142.928	
	10.444-0.018	73.354	25.187	53.255	
	10.472+0.027	75.054	30.537	83.925	
	10.627-0.384	4.511	2.974	2.436	
	10.629-0.333	-8.004	4.956	9.674	
	10.724-0.334	-2.200	2.197	0.996	
	10.822-0.103	73.449	0.483	1.091	
	10.886+0.123	17.217	4.936	8.770	
	10.958+0.022	24.567	14.943	11.836	
	11.034+0.062	24.445	0.469	0.362	
	11.109-0.114	23.988	19.001	36.288	
	11.497-1.485	8.384	56.006	111.384	
	11.903-0.102	43.186	36.399	47.835	
	11.904-0.141	43.164	53.806	63.288	
	11.936-0.616	32.271	31.691	59.218	
	11.992-0.272	59.730	1.994	1.507	
	12.025-0.031	108.268	94.835	99.023	
	12.112-0.126	40.390	2.387	5.108	
	12.181-0.123	19.802	4.995	9.953	
	12.199-0.033	49.304	10.515	15.615	
	12.203-0.107	19.777	8.921	16.306	
	12.265-0.051	68.430	2.039	6.114	
	12.526+0.016	42.665	4.172	5.117	
	12.625-0.017	21.639	11.863	22.976	
	12.681-0.182	58.483	514.019	868.354	
	12.776+0.128	39.214	0.571	0.430	
	12.889+0.489	39.293	59.245	75.917	
	12.904-0.031	58.683	50.543	42.823	
	12.909-0.260	39.273	205.055	264.969	
	13.179+0.061	46.534	1.776	0.626	
	13.657-0.599	51.251	42.795	52.215	
	13.696-0.156	99.284	1.439	1.713	
	13.713-0.083	43.618	23.027	11.039	
	14.101+0.087	15.093	58.668	104.070	
	14.230-0.509	25.454	0.389	0.159	
	14.390-0.020	26.839	2.584	2.063	
	14.457-0.143	38.360	1.465	1.477	
	14.490+0.014	20.209	1.157	0.430	
	14.521+0.155	3.498	0.545	0.476	
	14.604+0.017	34.781	2.142	2.373	
	14.631-0.577	25.184	0.703	0.418	
	14.991-0.121	46.019	5.574	2.701	
	15.034-0.677	21.331	39.904	14.751	
	15.094+0.192	25.741	14.054	8.095	
	15.607-0.255	66.111	1.010	0.378	
	15.665-0.499	-2.948	24.076	13.432	
	16.112-0.303	34.463	1.591	0.735	
	16.302-0.196	51.866	8.915	7.337	
	16.403-0.181	39.196	0.414	0.203	
	16.585-0.051	62.130	40.155	41.743	
	16.662-0.331	43.025	2.767	1.284	
	16.831+0.079	58.682	3.693	7.209	
	16.855+0.641	24.197	1.336	0.751	
	16.864-2.159	14.977	18.269	13.831	
	16.976-0.005	8.053	0.608	0.850	
	17.021-2.403	20.646	6.577	10.251	
	17.029-0.071	91.304	0.903	0.927	
	17.638+0.157	20.765	19.397	4.773	
	17.862+0.074	108.331	1.059	2.476	
	18.073+0.077	55.643	5.467	9.333	
	18.159+0.094	58.374	8.796	6.526	
	18.262-0.244	75.831	22.031	33.029	
	18.341+1.768	28.010	65.668	36.025	
	18.460-0.004	49.468	20.802	13.092	
	18.661+0.034	80.288	16.114	29.966	
	18.733-0.224	38.133	3.589	5.057	
	18.834-0.300	41.205	4.409	3.334	
	18.874+0.053	38.515	8.867	5.700	
	18.888-0.475	54.988	2.096	4.188	
	18.999-0.239	55.143	0.301	0.214	

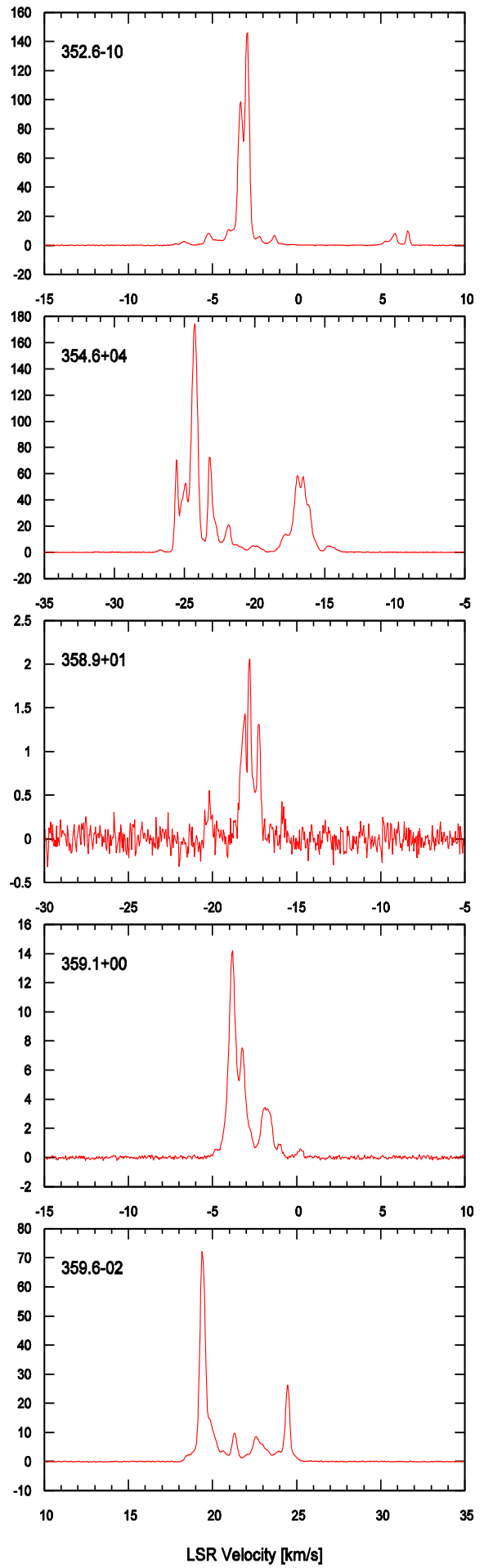
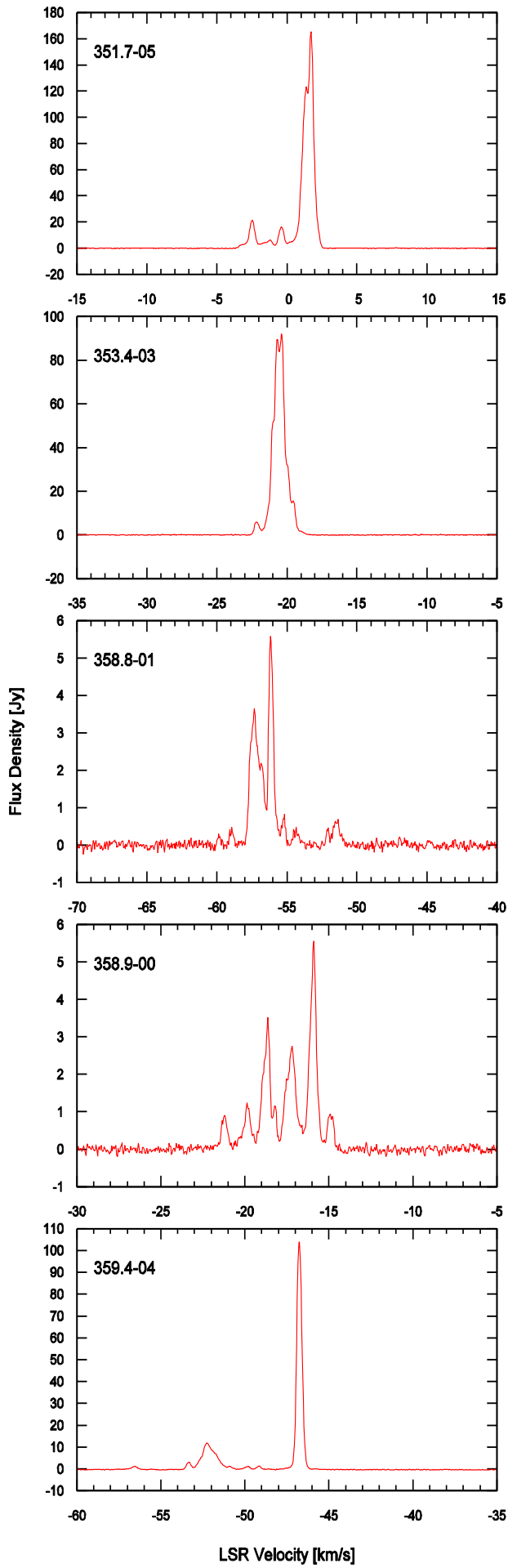
	Source name	MX data		Integrated intensity	備考
	(l,b)	Vpk	Spk	S	
	(° , °)	[km/s]	[Jy]	[Jy km/s]	
周期変動 探査天体	19.009-0.029	55.222	22.417	35.189	
	19.249+0.267	19.862	1.404	2.777	
	19.267+0.349	16.271	3.436	2.373	
	19.365-0.030	25.288	31.074	21.940	
	19.472+0.170	21.700	10.147	18.820	
	19.496+0.115	121.207	4.258	1.813	
	19.609-0.234	56.521	0.369	0.133	
	19.612-0.120	56.486	11.832	12.924	
	19.614+0.011	32.791	3.224	4.645	
	19.667+0.114	14.196	1.389	2.556	
	19.701-0.267	43.784	6.864	7.209	
	19.755-0.128	116.295	1.856	0.991	
	19.884-0.534	46.815	3.131	2.037	
	20.08-0.13	43.614	1.434	0.795	
	20.24+0.08	73.185	14.671	27.628	
	21.41-0.25	88.964	12.092	13.013	
	21.57-0.03	117.220	9.711	16.197	
	21.87+0.01	20.231	1.986	2.937	
	22.05+0.22	54.499	7.063	13.610	
	22.34-0.16	35.577	25.204	22.431	
	22.36+0.06	80.210	11.346	11.883	
	22.43-0.16	29.553	12.277	24.483	
	23.01-0.41	74.835	448.496	703.411	
	23.19-0.38	81.600	26.218	75.954	
	23.24-0.24	64.021	5.149	12.363	
	23.32-0.29	82.757	0.851	2.491	
	23.39+0.19	75.316	37.330	50.993	
	23.43-0.18	102.973	63.472	118.716	
	23.48+0.08	88.017	2.948	5.442	
	23.66-0.13	82.419	13.272	40.532	
	23.70-0.19	77.745	15.233	45.063	
	23.80+0.40	76.314	3.382	1.757	
	23.91+0.07	44.987	1.741	2.388	
	23.98-0.08	70.848	20.787	14.827	
	24.00-0.10	70.842	15.780	12.406	
	24.14+0.00	17.721	23.778	18.483	
	24.33+0.14	110.277	4.932	7.472	
	24.50-0.03	115.003	18.639	16.127	
	24.54+0.32	107.030	4.831	12.204	
	24.64-0.33	35.554	4.628	3.749	
	24.67-0.14	116.156	1.683	2.754	
	24.78+0.08	113.371	81.133	143.110	
	24.93+0.08	53.252	4.275	5.193	
	G25.27-0.43	55.104	2.290	4.570	
	25.38-0.18	57.892	4.170	4.945	
	25.38+0.00	95.570	0.974	0.863	
	25.41+0.10	97.070	9.118	11.685	
	25.53+0.38	95.617	0.507	0.468	
	25.65+1.04	41.841	134.320	54.326	
	25.70+0.04	95.555	358.190	390.457	
	25.82-0.17	91.612	64.497	79.790	
	26.52-0.26	104.239	4.404	6.838	
	26.59-0.00	24.884	9.528	7.925	
	26.60-0.22	114.957	6.737	10.057	
	26.65+0.02	24.927	0.955	0.416	
	27.21+0.26	9.217	7.103	6.238	
	27.22+0.13	118.489	16.481	25.104	
	27.28+0.15	34.773	27.497	21.548	
	27.36-0.16	100.818	37.265	65.022	
	27.78+0.05	111.995	2.495	2.942	
	27.78-0.25	98.248	6.193	3.456	
	27.86-0.24	20.118	0.810	0.076	
	28.02-0.44	17.023	3.900	3.581	
	28.14+0.00	101.139	28.227	21.289	
	28.20-0.05	101.158	3.997	7.605	
	28.28-0.36	81.820	13.848	22.976	
	28.39+0.08	71.446	15.527	13.450	
	28.53+0.12	39.519	3.334	2.563	
	28.69+0.41	93.615	0.595	0.816	
	28.81+0.36	91.652	5.042	10.880	
	28.82+0.48	83.110	1.913	3.688	

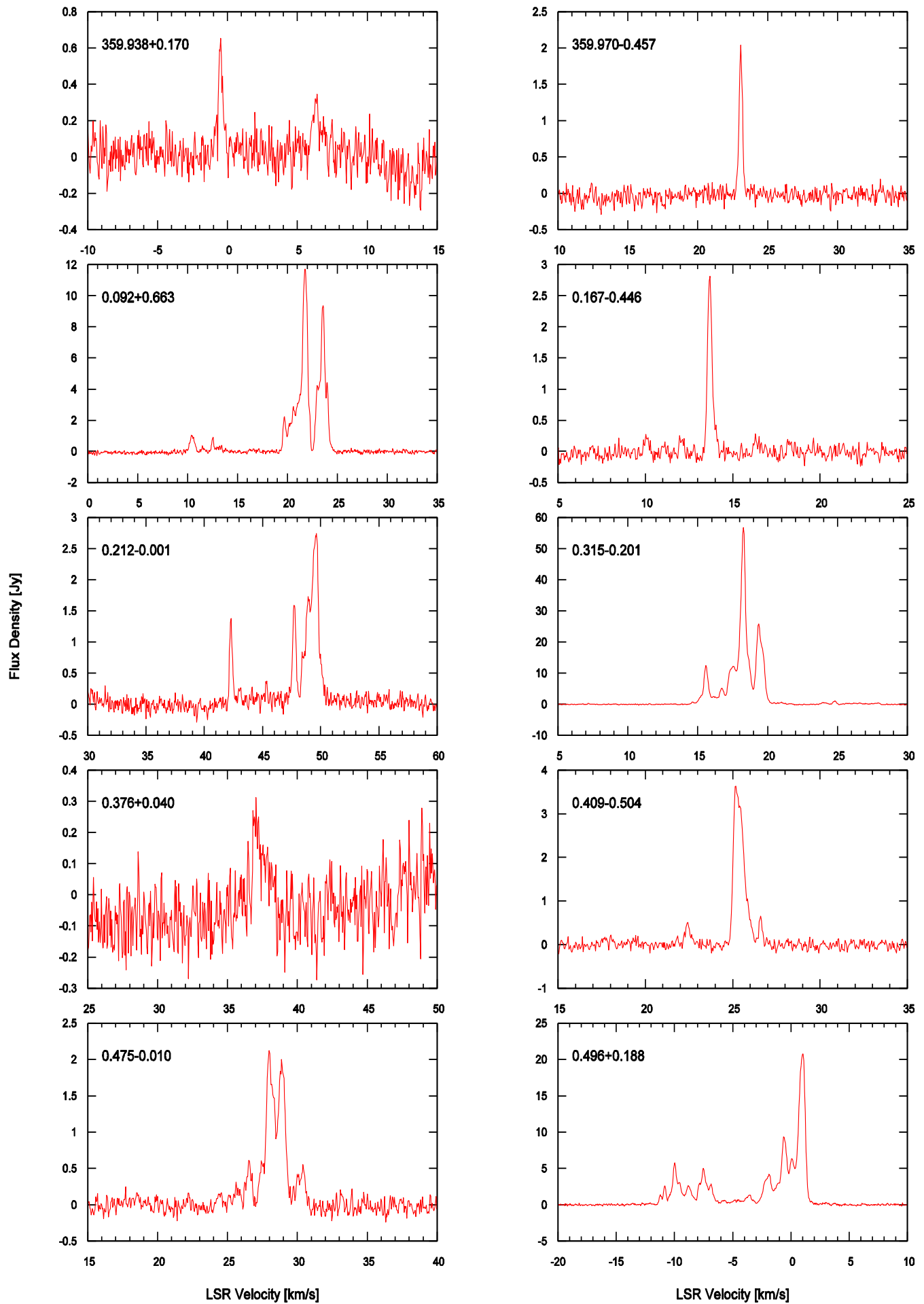
	Source name	MX data		Integrated intensity	備考
	(l,b) (° °)	Vpk [km/s]	Spk [Jy]	S [Jy km/s]	
周期変動 探査天体	28.83-0.25	91.860	56.748	107.699	
	28.86+0.07	104.928	1.230	0.630	
	29.31-0.16	48.913	4.275	3.673	
	29.86-0.04	101.456	79.111	101.103	
	29.95-0.02	95.941	143.340	181.002	
	30.20-0.17	108.598	19.539	42.959	
	30.30-0.18	113.156	1.096	2.335	
	30.30+0.06	36.192	7.765	14.164	
	30.40-0.29	105.065	3.163	7.392	
	30.53+0.01	53.143	0.654	0.734	
	30.59-0.13	88.272	3.806	1.824	
	30.59-0.04	43.063	4.328	6.617	
	30.70-0.07	88.293	124.368	72.990	
	30.76-0.05	91.771	34.608	58.733	
	30.78+0.23	48.929	33.818	55.565	
	30.82-0.05	109.412	13.297	42.471	
	30.86+0.16	101.818	53.457	119.219	
	30.96-0.14	77.830	19.237	23.678	
	30.98-0.05	77.880	0.713	0.504	
	31.04+0.36	82.800	5.624	9.093	
	31.06+0.09	16.569	15.290	9.749	
	31.16+0.06	41.075	2.109	1.712	
	31.28+0.06	110.286	63.859	127.697	
	31.41+0.31	95.829	14.726	39.873	
	31.58+0.08	98.883	5.028	6.581	
	32.80+0.19	26.848	0.746	0.851	
	32.97+0.04	91.061	9.967	12.971	
	33.09-0.07	104.229	11.726	28.784	
	32.74-0.08	38.555	4.452	97.489	
	33.13-0.09	73.173	10.702	23.071	
	32.11+0.09	92.909	9.166	18.238	
	33.40+0.01	105.268	20.453	37.611	
	32.03+0.06	92.877	56.254	125.325	
	33.64-0.21	60.321	116.164	84.203	
	33.74-0.15	60.348	4.452	5.113	
	33.86+0.01	63.694	6.391	6.444	
	33.97-0.00	64.104	1.842	4.803	
	34.10+0.01	56.008	4.559	4.168	
	34.24+0.13	57.646	17.098	19.245	
	34.39+0.24	55.676	19.181	13.081	
	34.74-0.09	53.220	6.283	5.440	
	34.78-1.38	47.100	12.594	31.604	
	34.82+0.35	58.778	0.313	0.064	
	35.02+0.35	44.406	17.400	22.311	
	35.20-0.74	28.528	142.100	159.079	
	35.20-1.74	44.541	102.123	114.111	
	35.25-0.24	72.365	1.534	0.394	
	35.39+0.02	89.186	0.338	0.182	
	35.40+0.03	89.223	0.362	0.247	
	35.59+0.06	44.059	0.316	0.279	
	35.79-0.17	60.781	23.184	27.105	
	36.02-0.20				ノイズレベル 0.079[Jy]
	36.10+0.56	72.832	22.648	36.810	
	36.64-0.21	77.401	1.456	0.331	
	36.70+0.09	53.648	2.537	3.717	
	36.84-0.02	57.139	2.090	5.244	
	36.90-0.41			0.000	
	36.92+0.48	-35.874	1.109	0.292	
	37.04-0.04	80.202	9.119	18.143	
	37.38-0.09				ノイズレベル 0.0805[Jy]
	37.40+1.52	41.247	270.099	159.031	
	37.47-0.11	56.821	8.006	29.375	
	37.52-0.10	50.064	4.255	4.987	
	37.54+0.21	83.727	6.318	8.127	
	37.60+0.42	87.171	15.987	16.765	
	37.74-0.12	50.359	1.031	0.303	
	37.76-0.19	60.601	1.658	1.895	
	37.77-0.22	54.964	1.129	0.803	
	38.03-0.30	57.286	7.044	13.652	
	38.12-0.24	70.399	5.440	7.555	
	38.20-0.08	79.853	11.690	15.202	

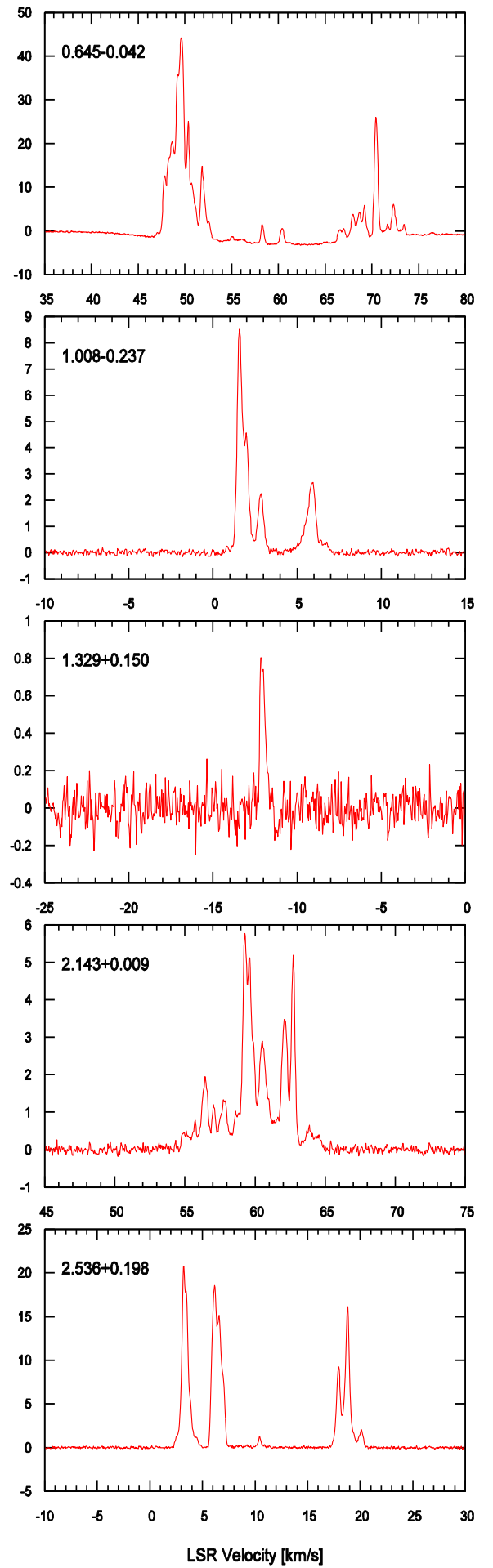
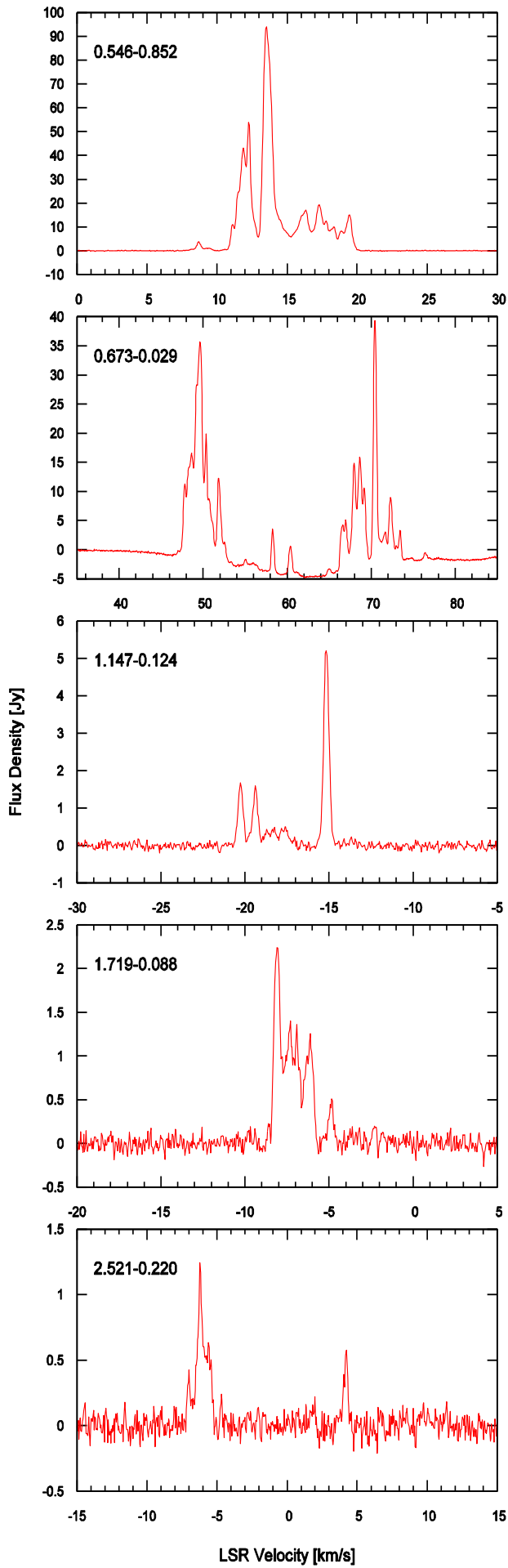
	Source name	MX data		Integrated intensity	備考
	(l,b) (° °)	Vpk [km/s]	Spk [Jy]	S [Jy km/s]	
周期変動 探査天体	38.26-0.20	70.236	0.893	1.713	
	38.26-0.08	15.449	9.180	5.841	
	38.56+0.15				ノイズレベル 0.0755[Jy]
	38.60-0.21	63.806	0.318	0.111	
	38.66+0.08	-31.413	1.595	0.423	
	38.92-0.36	32.324	0.665	0.606	
	39.10+0.48	15.870	19.746	22.485	
	39.39-0.14	68.489	0.388	0.361	
	39.54-0.38	48.370	0.280	0.099	
	40.28-0.22	74.408	20.530	45.980	
	40.41+0.70	15.579	21.189	28.904	
	40.62-0.14	31.167	11.625	4.874	
	40.94-0.04	36.672	1.817	0.949	
	41.08-0.13	56.389	0.399	0.353	
	41.12-0.11	37.147	0.713	0.506	
	41.12-0.22	63.343	2.584	2.509	
	41.16-0.20	56.040	3.729	5.386	
	41.23-0.20	57.277	5.618	10.342	
	41.27+0.37	20.381	0.384	0.119	
	41.34-0.14	11.790	16.809	21.733	
	41.58+0.04	11.673	0.485	0.303	
	41.87-0.10				ノイズレベル 0.0738[Jy]
	42.03+0.19	12.910	19.973	28.478	
	42.30-0.30	28.172	4.596	2.981	
	42.43-0.26	66.796	2.036	1.334	
	42.70-0.15	-42.852	3.439	4.691	
	43.04-0.46	54.773	5.087	7.479	
	43.08-0.08	10.161	6.661	3.168	
	43.15+0.02	9.314	26.710	58.590	
	43.80-0.13	40.376	29.975	29.447	
	43.87-0.77	47.986	9.507	14.371	
	44.31+0.04	55.634	0.442	0.070	
	44.64-0.52	49.328	0.387	0.194	
	45.07+0.13	57.774	40.321	17.282	
	45.44+0.07	56.552	2.766	4.987	
	45.47+0.05	56.547	3.759	6.273	
	45.47+0.13	57.272	5.995	9.653	
	45.49+0.13	57.263	6.764	8.567	
	45.57-0.12				ノイズレベル 0.0736[Jy]
	45.81-0.36	59.960	14.801	9.355	
	46.07+0.22	58.487	2.072	1.246	
	46.12+0.38	58.487	2.072	1.259	
	48.89-0.17	59.137	0.445	0.232	
	48.90-0.27	72.002	0.338	0.109	
	48.99-0.30	71.699	0.538	0.270	
	49.03-1.06	36.680	13.475	25.569	
	49.27+0.31	-5.047	7.998	15.041	
	49.35+0.41	68.097	7.034	6.978	
	49.41+0.33	-12.039	7.577	17.193	
	49.49-0.39	59.303	682.979	624.361	
	49.60-0.25	62.439	26.489	58.827	
	50.00+0.59	-5.141	3.705	4.427	
	50.29+0.69	29.997	2.261	2.463	
	50.78+0.15	49.098	5.072	2.678	
	52.66-1.09	65.154	5.404	6.479	
	52.92+0.41	39.474	3.618	3.674	
	53.04+0.11	9.982	1.118	0.441	
	53.14+0.07	24.590	1.326	0.489	
	53.62+0.04	18.939	2.959	1.166	
	58.75+0.65	33.341	5.573	8.154	
	59.78+0.06	27.110	45.082	70.218	
	59.84+0.66	38.191	19.702	19.335	
	60.56-0.17	3.691	6.810	2.170	
	69.52-0.97	14.669	95.517	40.262	
	70.12+1.72	-24.705	3.835	4.123	
	71.51-0.38	10.270	5.107	3.924	
	73.04+1.80	-2.520	7.853	3.002	
	75.76+0.34	-2.589	64.407	59.459	
	78.10+3.64	-6.084	40.205	33.154	
	78.62+0.98				ノイズレベル 0.0749[Jy]
	78.89+0.71	-7.030	0.556	0.159	

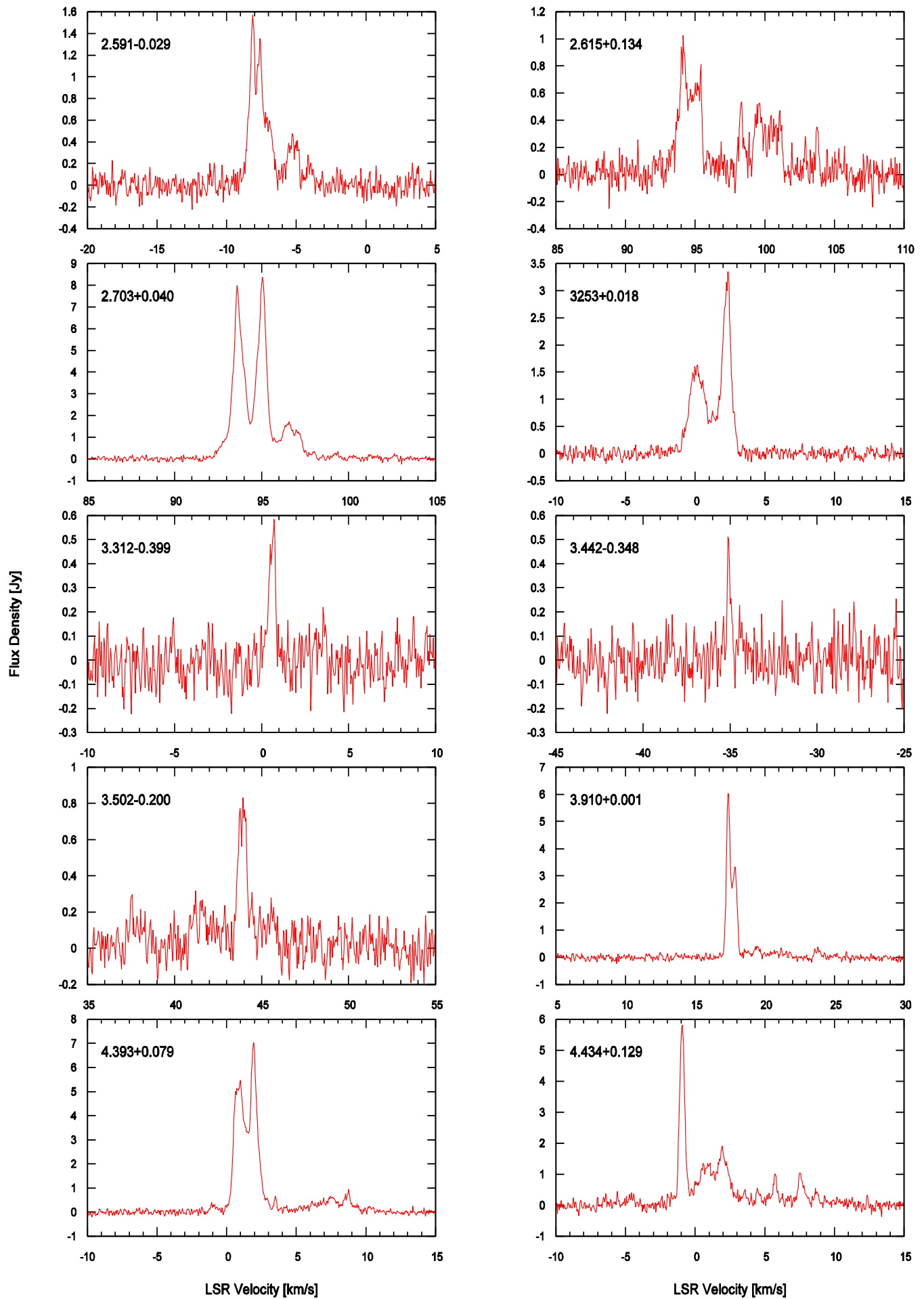
	Source name (l,b) (° , °)	MX data		Integrated intensity S [Jy km/s]	備考
		Vpk [km/s]	Spk [Jy]		
周期変動 探査天体	79.75+0.99	-5.491	20.401	15.725	
	80.85+0.43	-3.999	3.961	2.565	
	81.76+0.59	-8.558	13.012	23.021	
	81.87+0.78	4.620	239.394	273.224	
	85.40-0.00	-29.438	91.370	60.579	
	90.90+1.50	-70.387	25.393	21.741	
	94.58-1.79	-40.853	4.926	6.579	
	97.52+3.17	-71.103	0.906	1.301	
	98.02+1.44	-61.517	2.015	0.915	
	106.80+5.31				ノイズレベル 0.0675[Jy]
	108.18+5.51	-10.950	42.445	25.359	
	108.75-0.96	-45.555	4.225	2.126	
	109.86+2.10	-2.483	468.227	438.328	
	110.21+2.62		0.469	0.000	
	111.24-0.76	-38.647	5.576	7.182	
	111.53+0.76	-58.064	174.495	410.990	
	121.28+0.65	-23.445	7.020	8.554	
	123.05-6.31	-29.314	64.384	37.900	
	133.94+1.04	-44.564	3009.202	6698.120	
	136.84+1.12	-44.993	6.832	2.801	
	168.06+0.82				ノイズレベル 0.0706[Jy]
	173.49+2.42	-13.000	56.516	35.412	
	173.69+2.87	-23.813	0.421	0.228	
	173.71+2.35				ノイズレベル 0.0505[Jy]
	174.19-0.09	1.494	30.605	27.305	
	183.34-0.59	-4.831	10.651	9.062	
	188.714+1.031	-5.470	5.880	3.807	
	188.95+0.89	10.849	698.061	442.377	
	189.03+0.76	10.814	23.137	22.410	
	189.78+0.34	5.500	4.703	3.242	
	192.60-0.05	4.587	81.565	71.817	
	196.45-1.68	15.158	9.113	8.042	
	203.32+2.05				ノイズレベル 0.0685[Jy]
	206.54-16.4	12.446	0.062		Baseline引き直し検討
	212.06-0.74	43.279	0.477	0.650	
	213.70-12.6	12.549	150.045	131.256	
	232.62+0.99	22.855	195.673	96.558	
空間的に分 離出来ない 天体	0.677-0.025	70.454	29.831	23.670	0.673-0.029と同一ビーム内
	0.667-0.034	70.441	23.759	18.241	0.673-0.029と同一ビーム内
	0.672-0.031	70.449	39.314	41.555	0.673-0.029と同一ビーム内
	0.651-0.049	49.582	38.671	49.765	0.645-0.042と同一ビーム内
	0.647-0.055	49.634	36.950	50.825	0.645-0.042と同一ビーム内
	0.695-0.038	70.392	19.740	16.402	0.673-0.029と同一ビーム内
	08.669-0.356	43.167	102.384	113.260	08.683-0.368と同一ビーム内
	10.480+0.033	75.080	25.453	62.369	10.472+0.027と同一ビーム内
	10.287-0.125	11.620	33.774	67.165	10.323-0.160と同一ビーム内
	10.299-0.146	11.640	60.248	105.635	10.323-0.160と同一ビーム内
	10.342-0.142	11.628	52.252	106.072	10.323-0.160と同一ビーム内
	10.356-0.148	11.614	39.873	85.261	10.323-0.160と同一ビーム内
	18.440+0.045	49.514	6.530	3.715	18.460-0.004と同一ビーム内
	19.486+0.151	21.650	8.137	16.558	19.472+0.170と同一ビーム内
	23.04-0.32	74.911	6.591	10.879	23.01-0.41と同一ビーム内
	23.18-0.45	74.771	2.782	5.784	23.19-0.38と同一ビーム内
	24.92+0.10	113.423	2.103	4.618	24.78+0.08, 24.93+0.08と同一ビーム内
	28.85+0.50			0.514	28.82+0.48と同一ビーム内/ノイズレベル 0.514[Jy]
	29.92+0.05	96.060	3.990	7.374	29.86-0.04, 29.95-0.02と同一ビーム内
	29.91-0.05	95.925	39.850	77.271	29.86-0.04, 29.95-0.02と同一ビーム内
	30.00-0.01	95.969	25.090	42.356	29.86-0.04, 29.95-0.02と同一ビーム内
	29.98-0.04	95.927	69.229	122.051	29.86-0.04, 29.95-0.02と同一ビーム内
	30.79+0.20	48.930	18.440	36.198	30.78+0.23と同一ビーム内
	30.22-0.18	113.208	11.483	28.321	30.20-0.17と同一ビーム内
	30.91+0.14	101.796	34.868	74.743	30.86+0.16 と同一ビーム内
	30.94+0.11	101.896	6.146	12.254	30.86+0.16 と同一ビーム内
	33.68-0.26	60.311	23.039	14.328	33.64-0.21と同一ビーム内
	35.18-0.74	28.551	129.044	138.590	35.20-0.74と同一ビーム内
	37.02-0.03	80.180	7.824	15.790	37.04-0.04 と同一ビーム内
	38.08-0.27	55.660	1.538	1.773	38.03-0.30, 38.12-0.24と同一ビーム内
	42.07+0.24	12.902	2.204	2.096	42.03+0.19と同一ビーム内

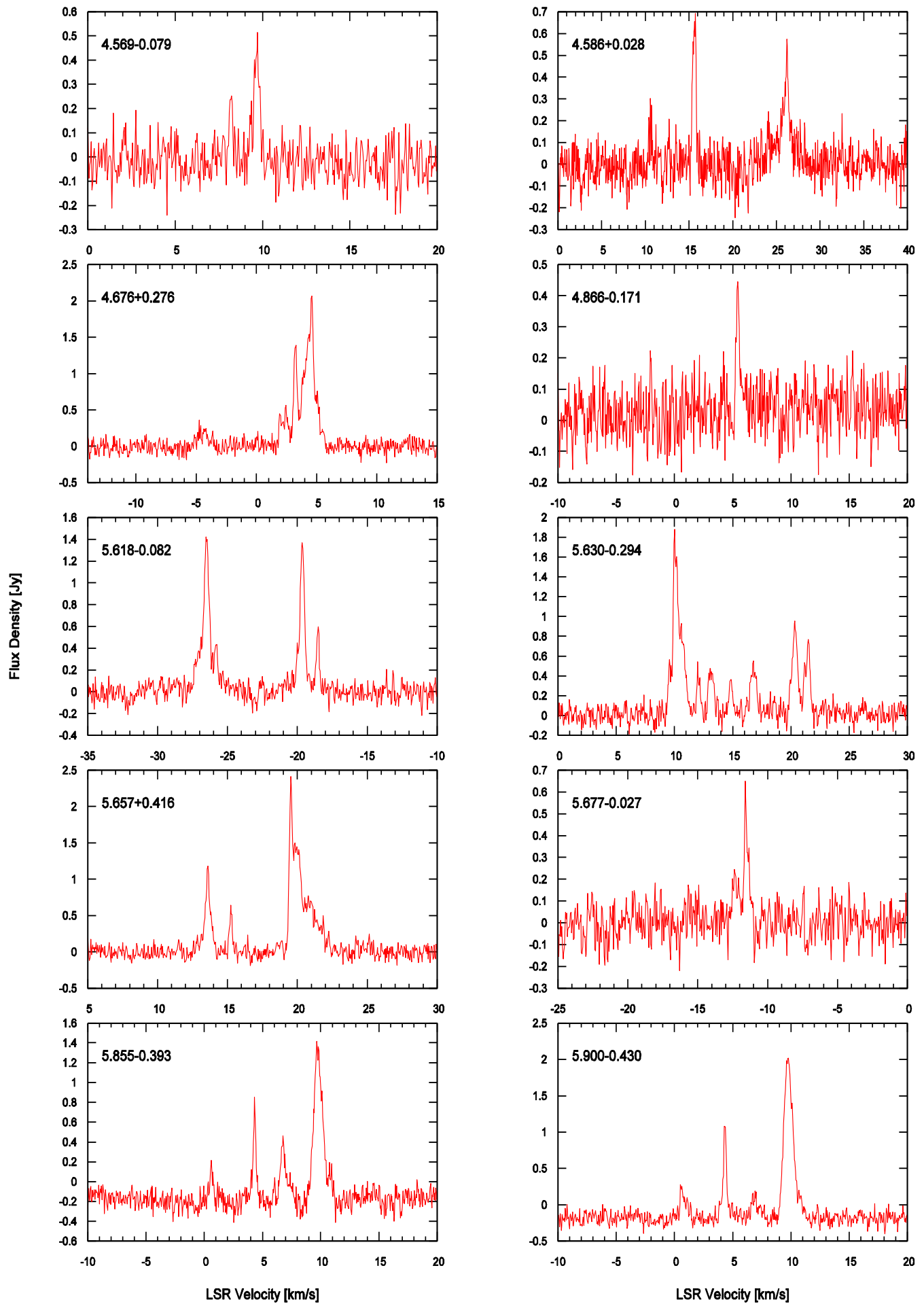
43.18-0.01	9.339	15.032	33.230	43.15+0.02と同一ビーム内
49.47-0.37	59.332	527.603	482.728	49.49-0.39と同一ビーム内
49.48-0.40	59.308	557.026	508.983	49.49-0.39と同一ビーム内
49.62-0.36	59.297	22.335	22.883	49.49-0.39と同一ビーム内
49.57-0.38	59.290	11.451	11.924	49.49-0.39と同一ビーム内
49.66-0.45	59.222	4.824	3.777	49.49-0.39と同一ビーム内
81.72+0.57	-8.578	7.356	12.028	81.76+0.59と同一ビーム内
109.92+1.98	-4.078	7.185	7.266	109.86+2.10と同一ビーム内

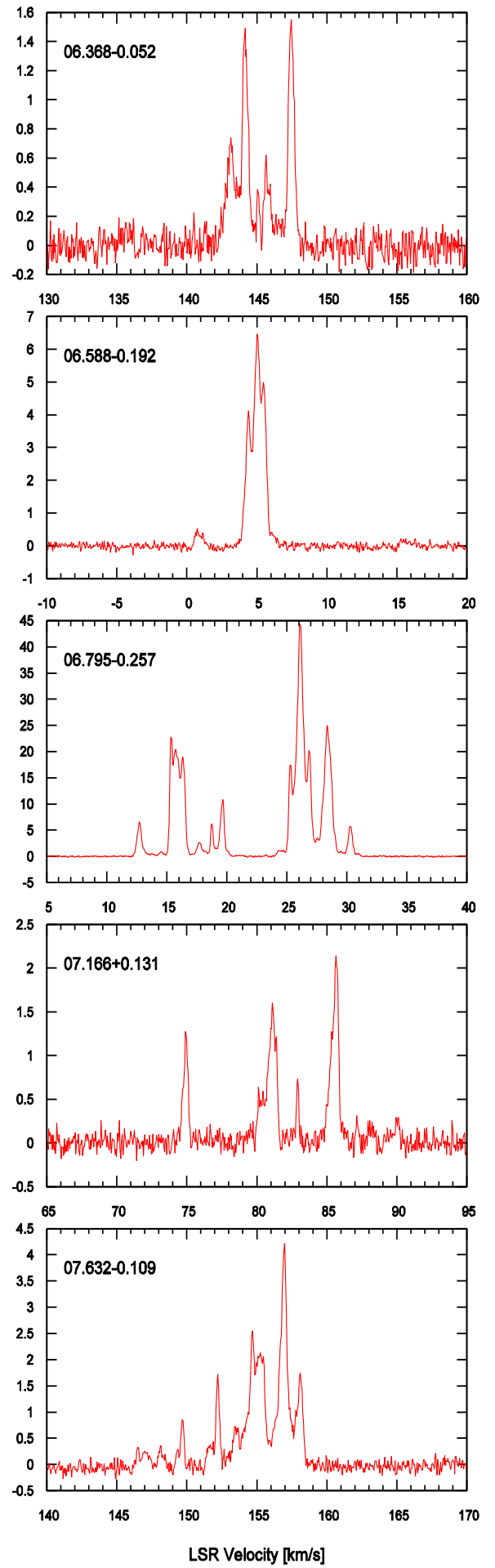
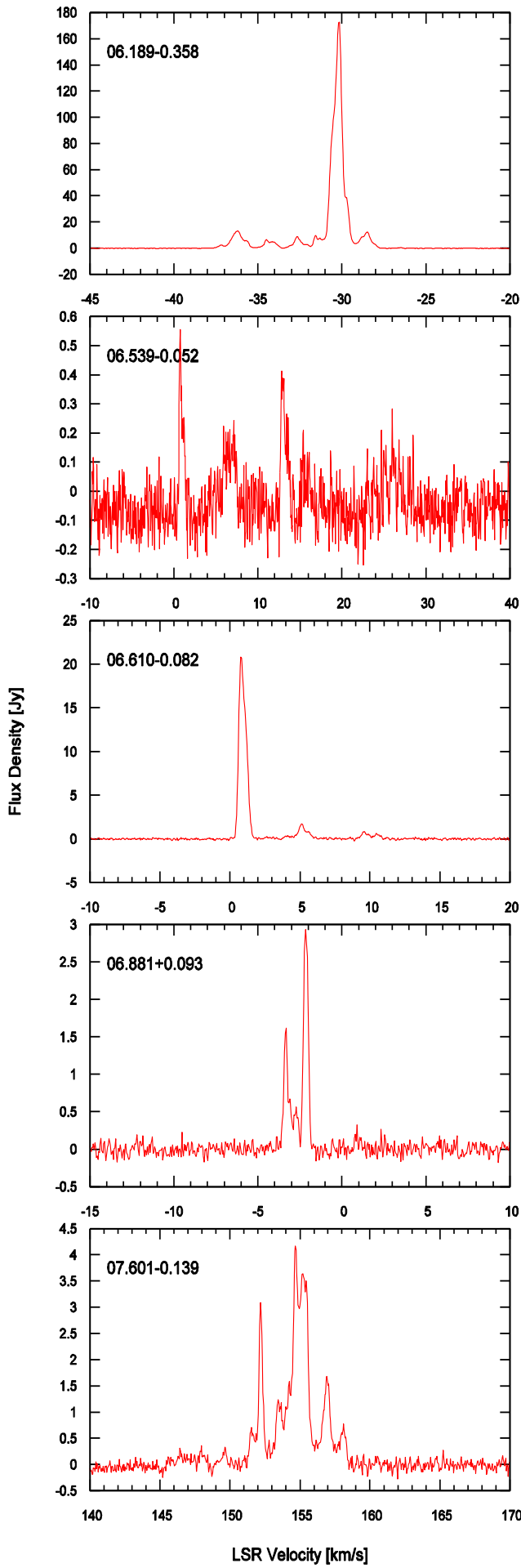


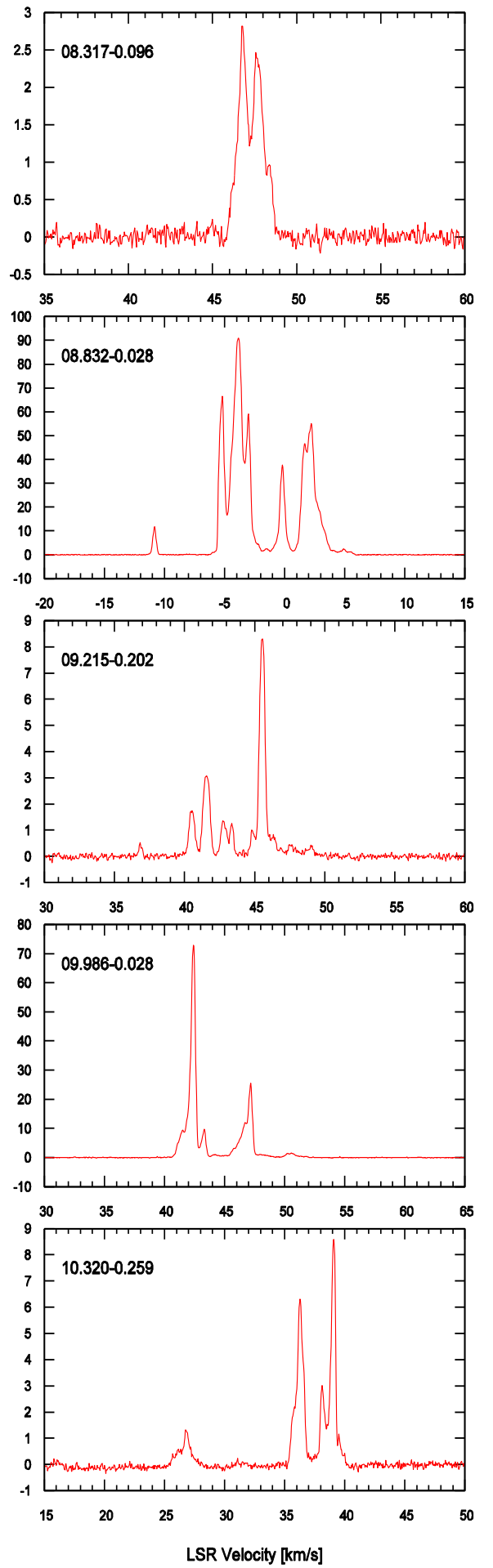
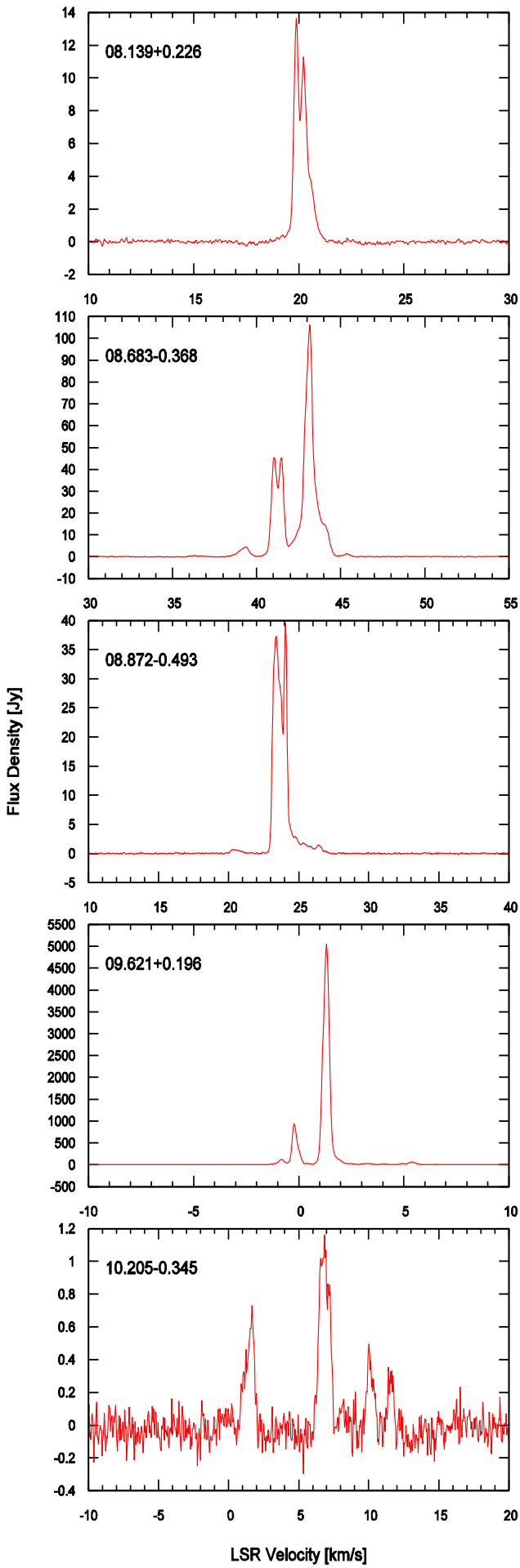


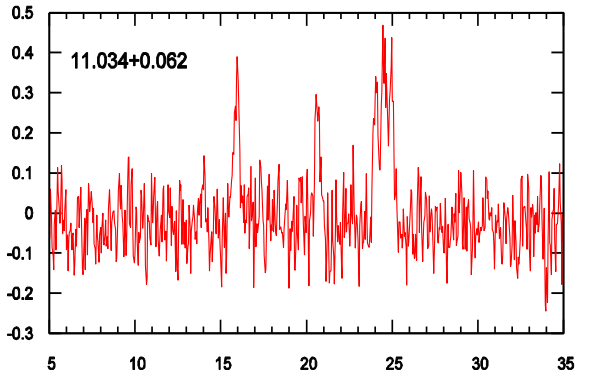
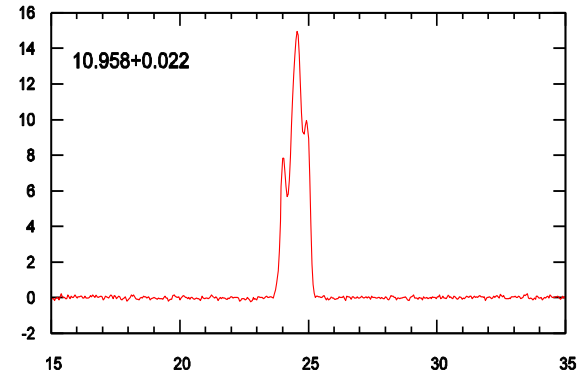
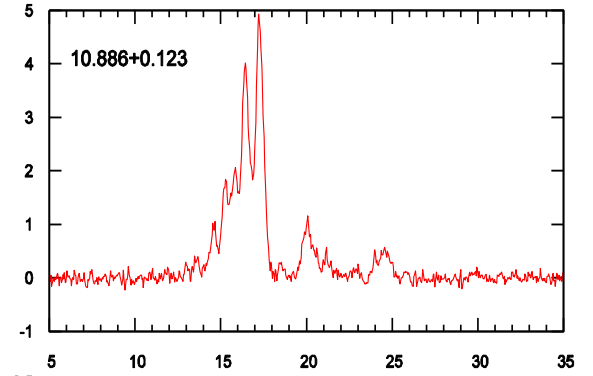
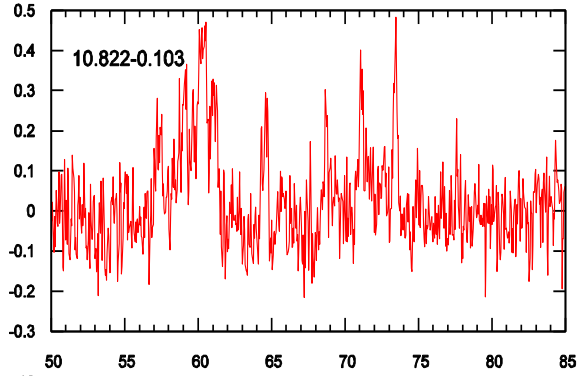
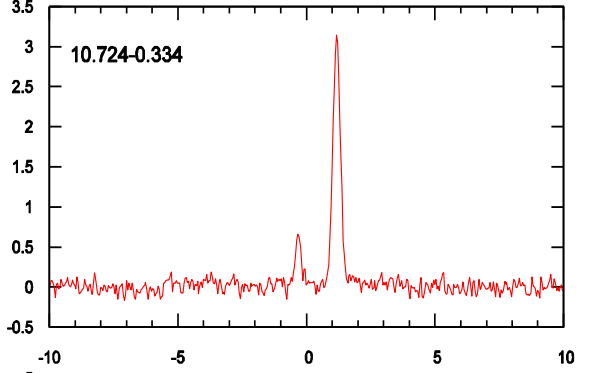
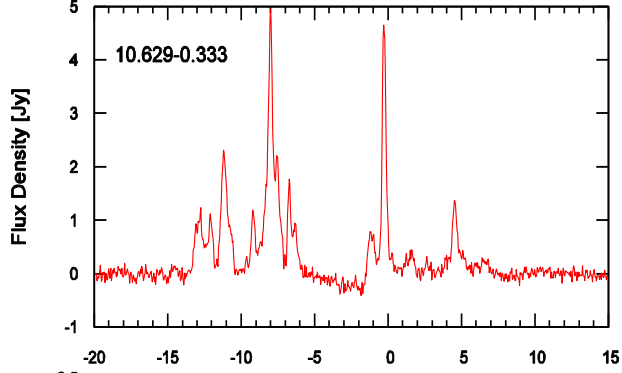
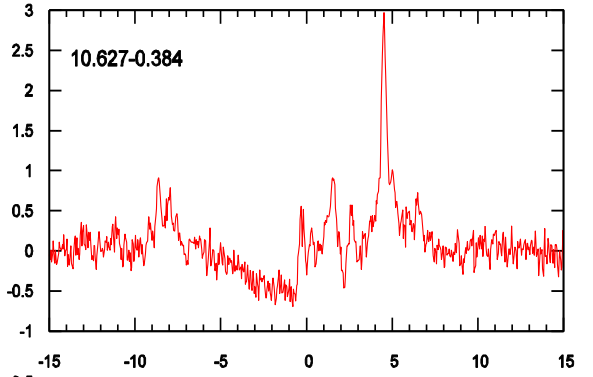
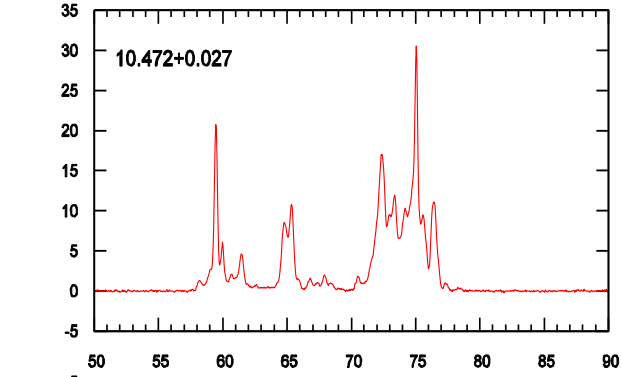
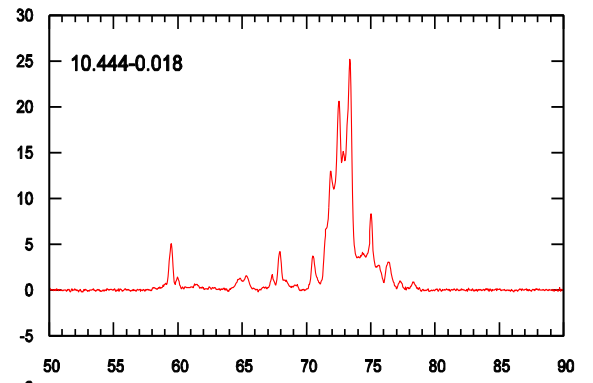
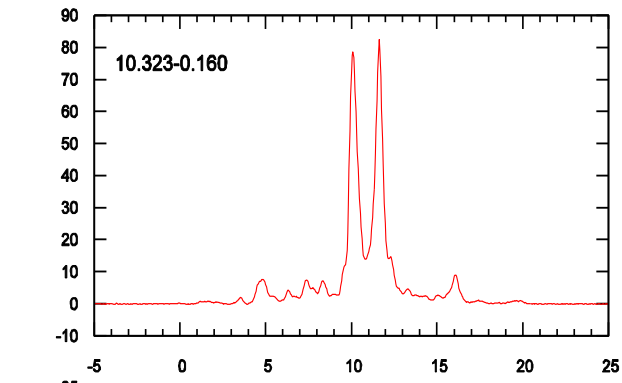






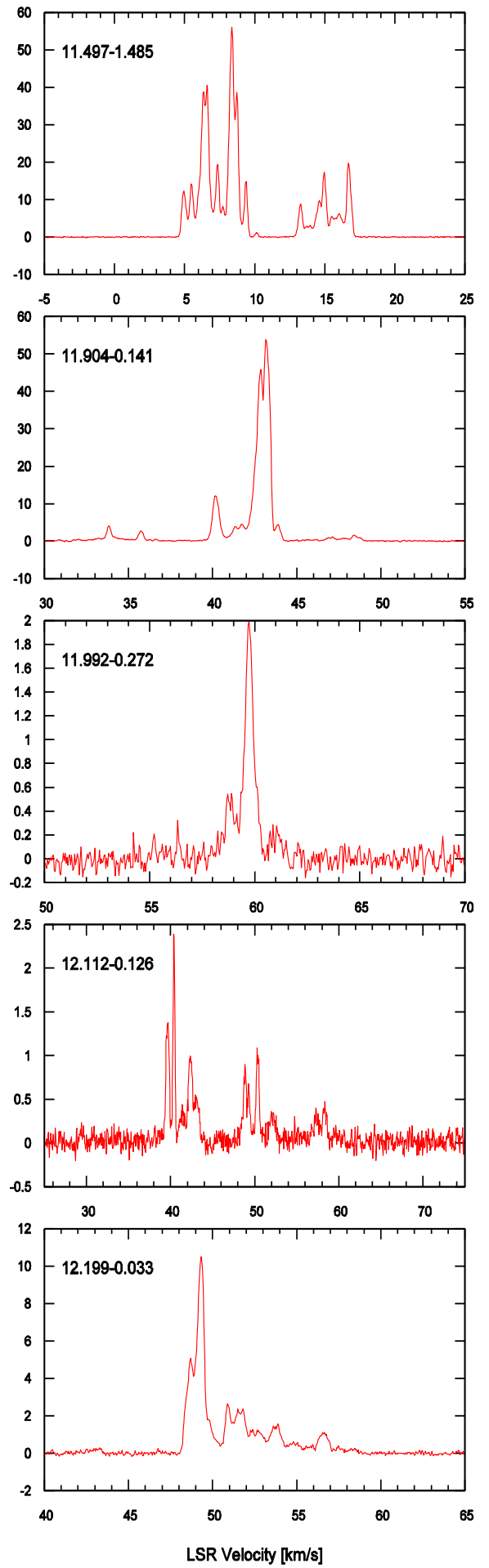
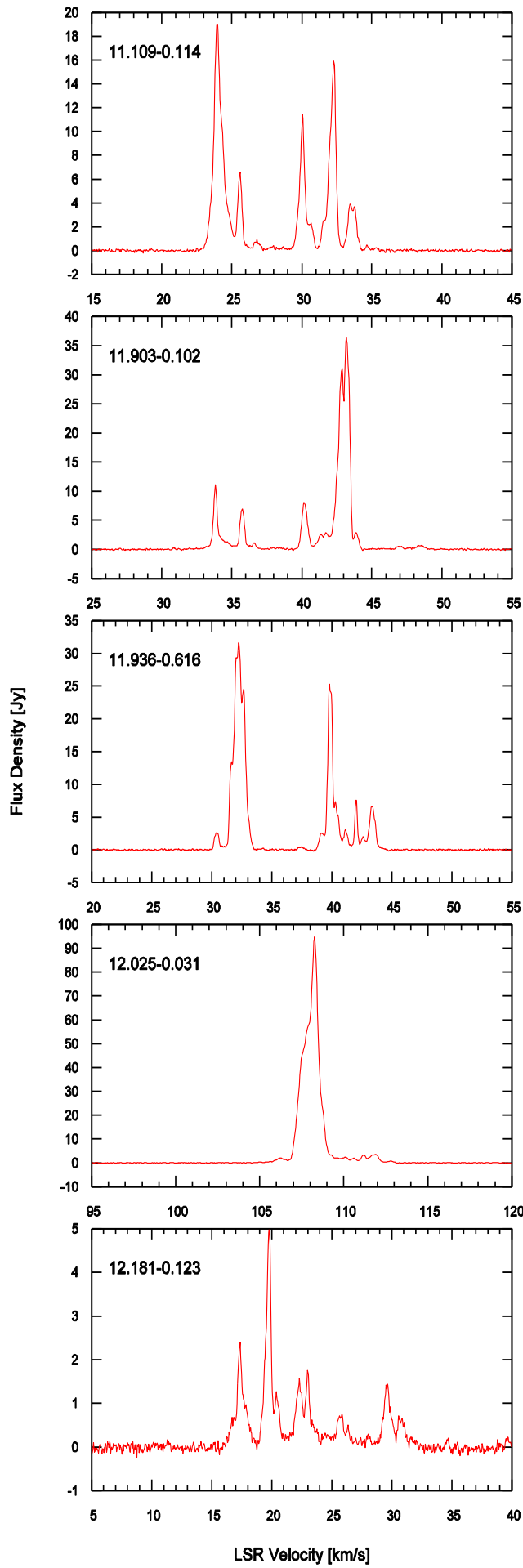


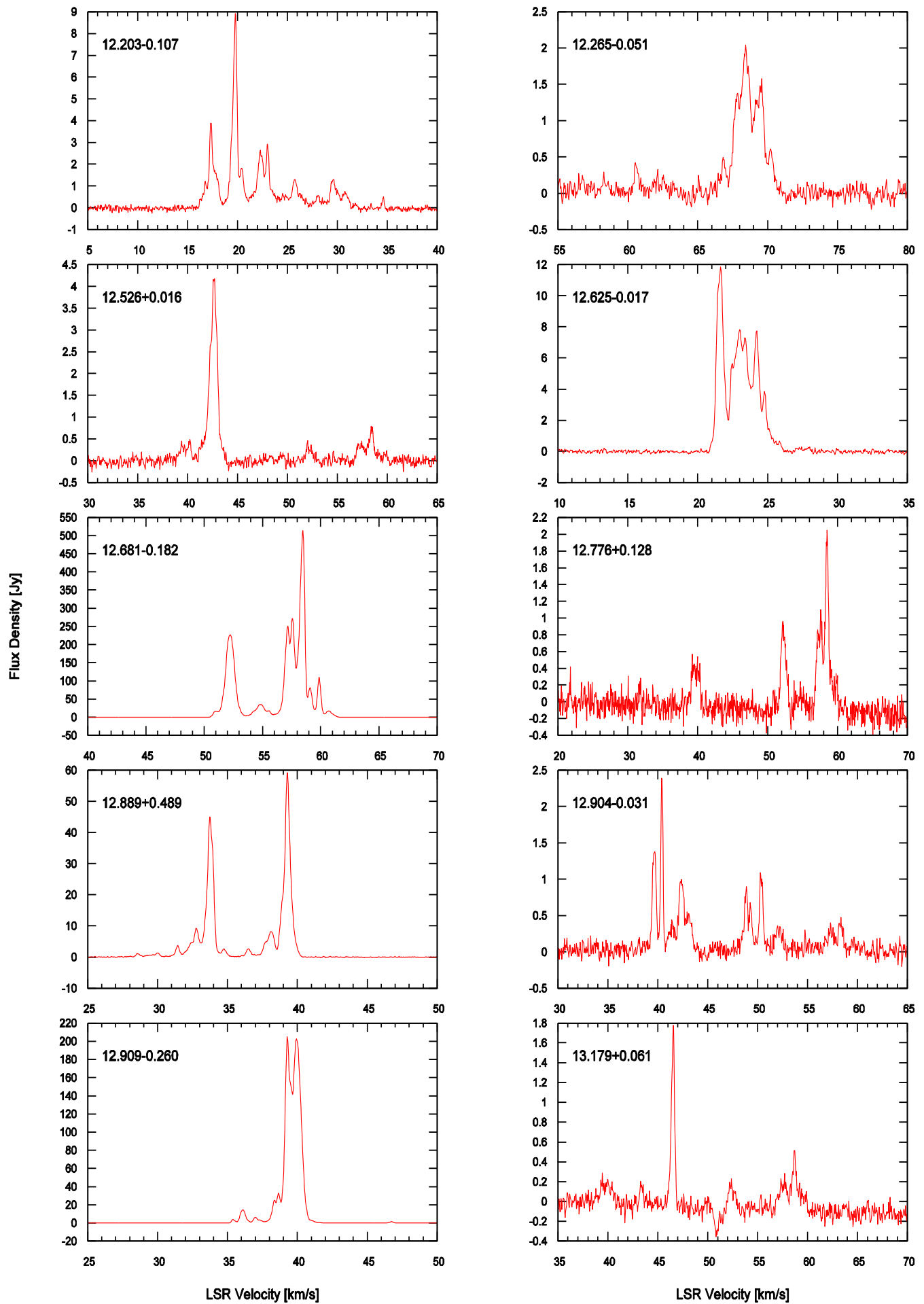


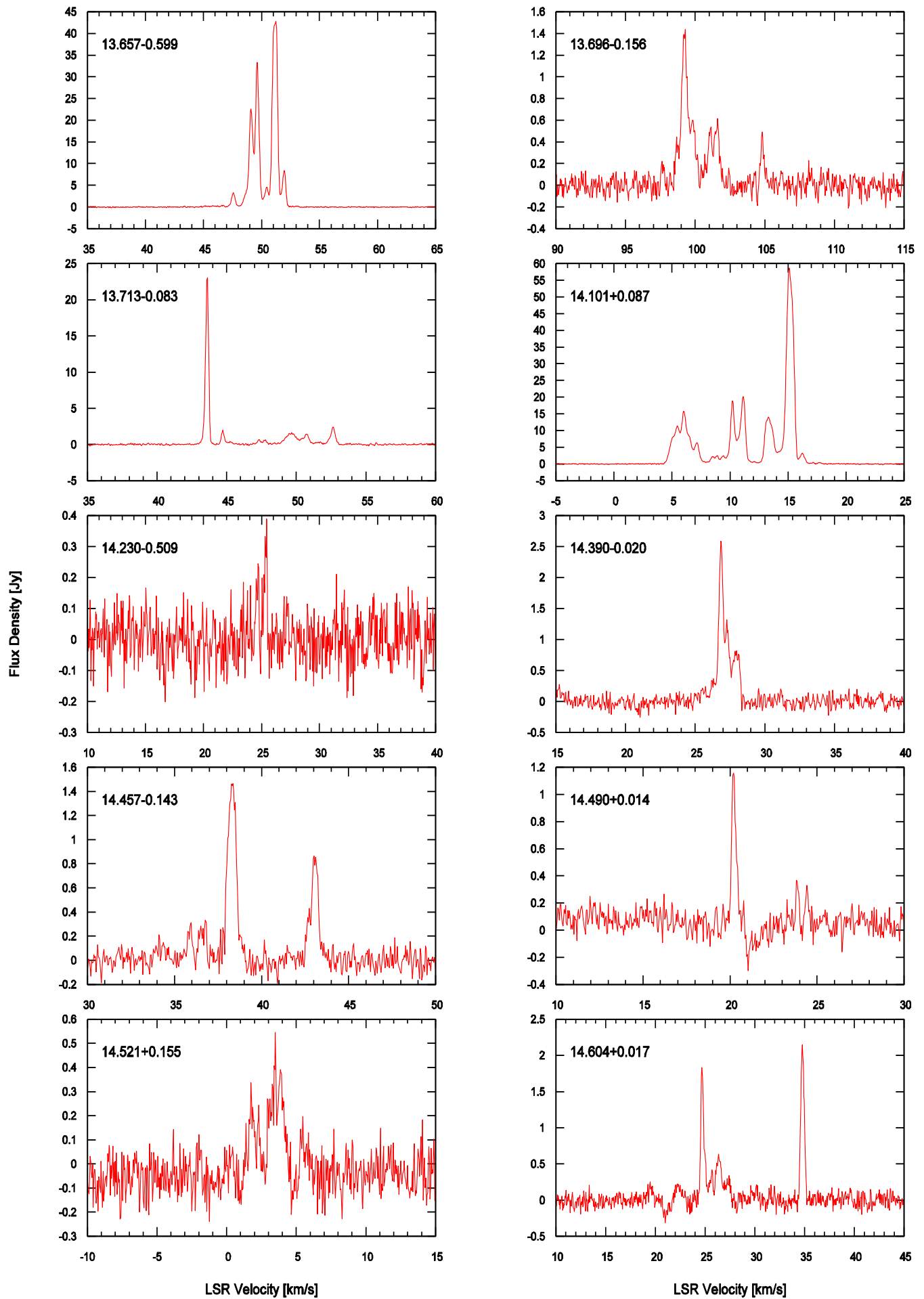


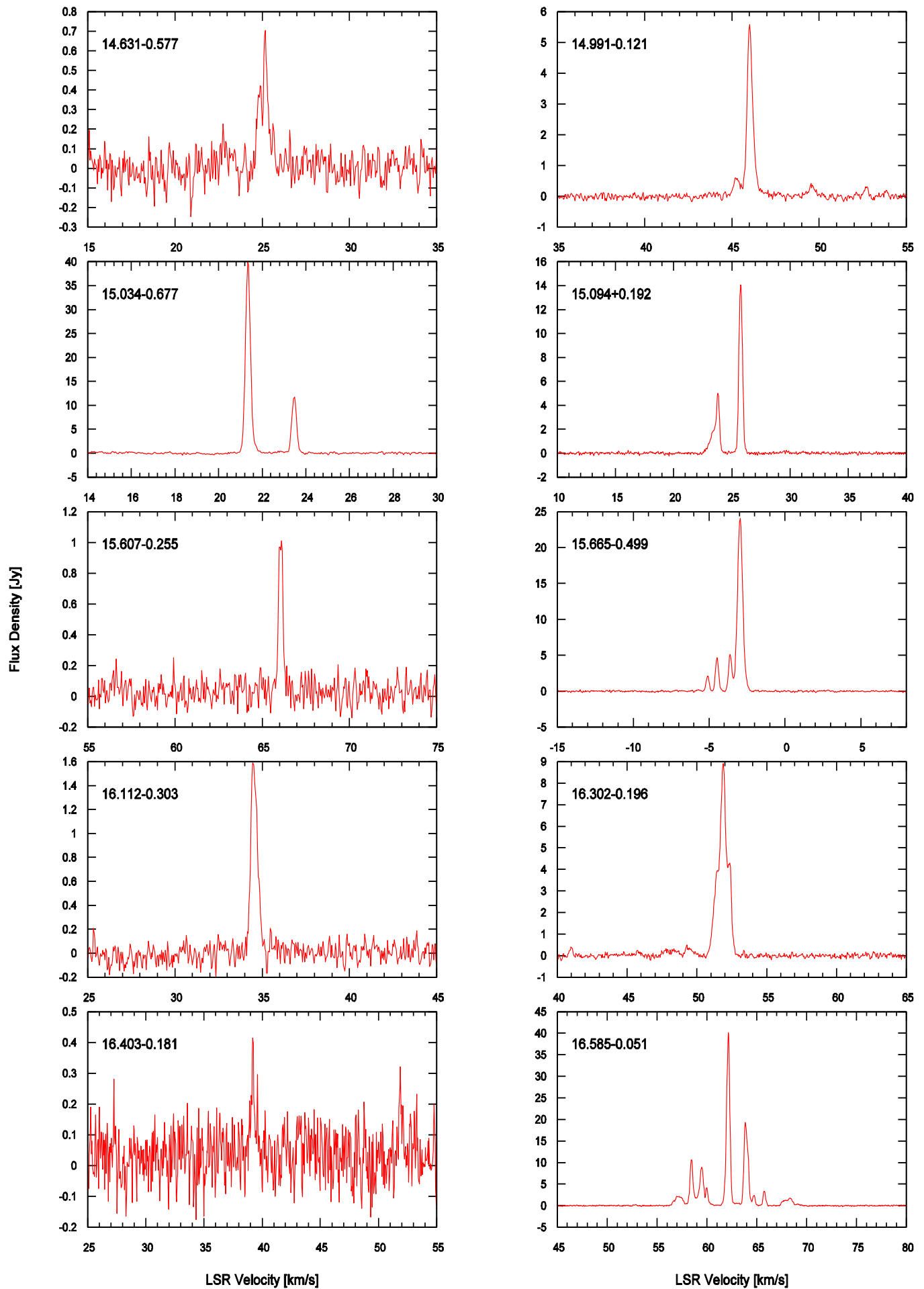
LSR Velocity [km/s]

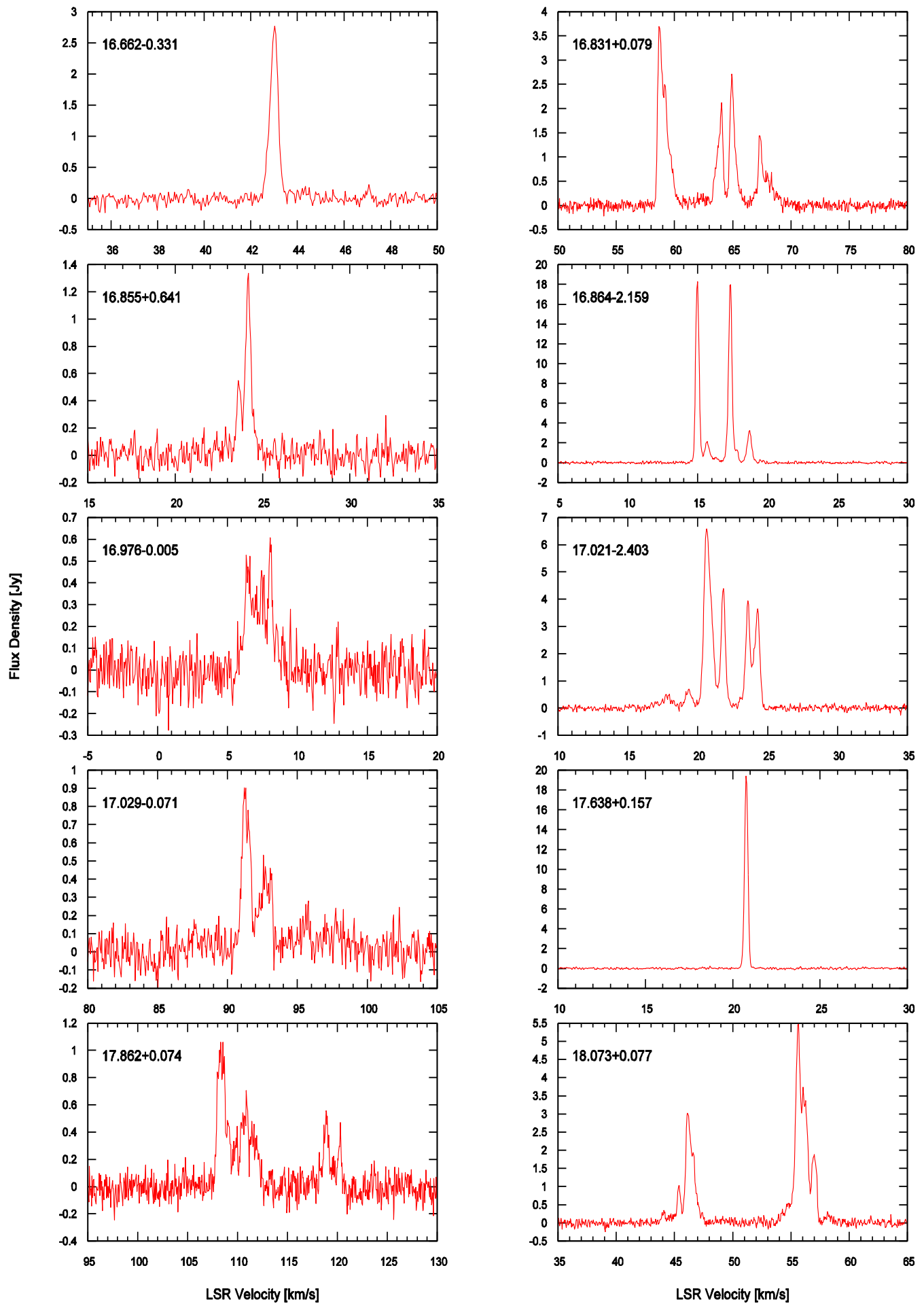
LSR Velocity [km/s]

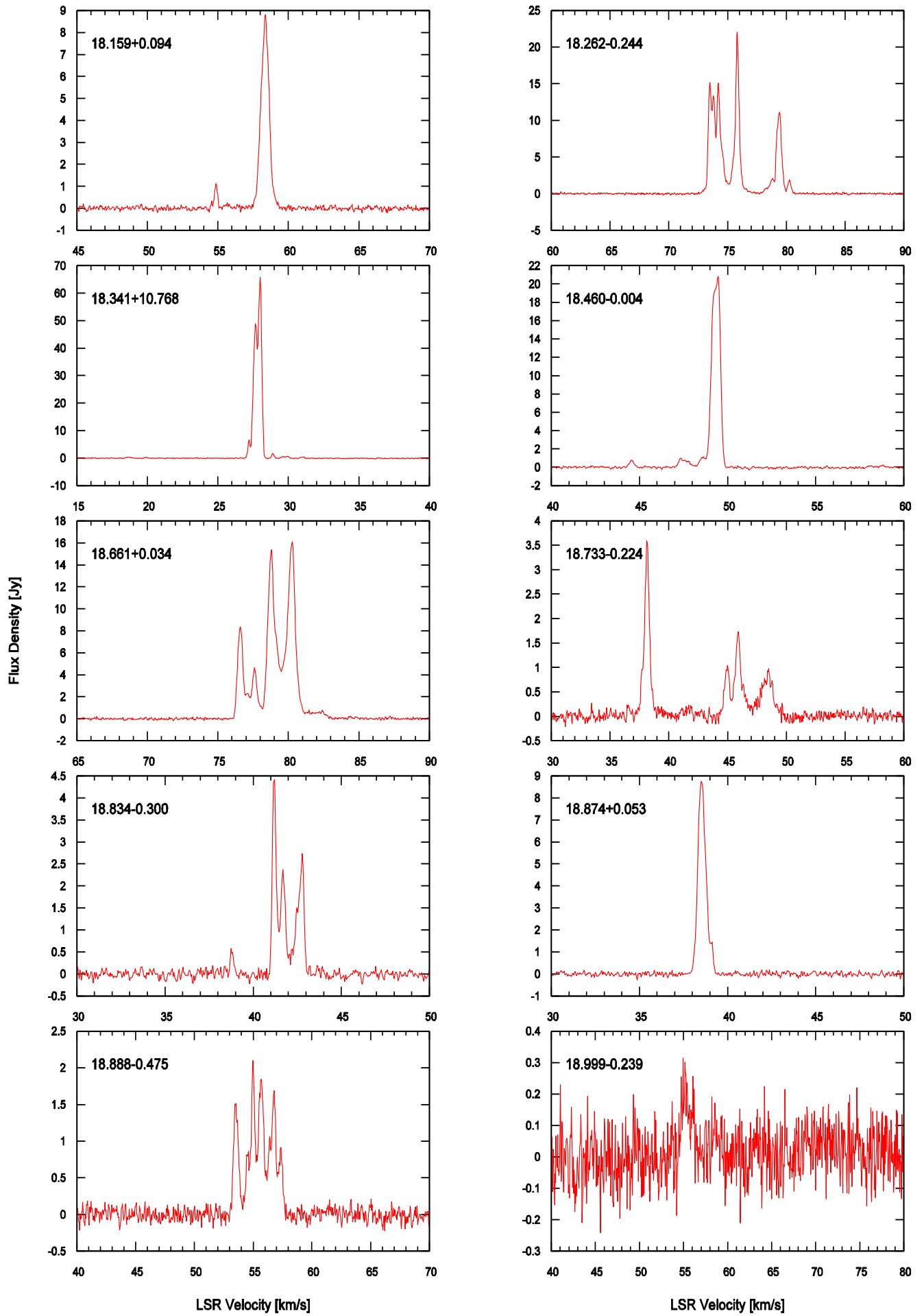


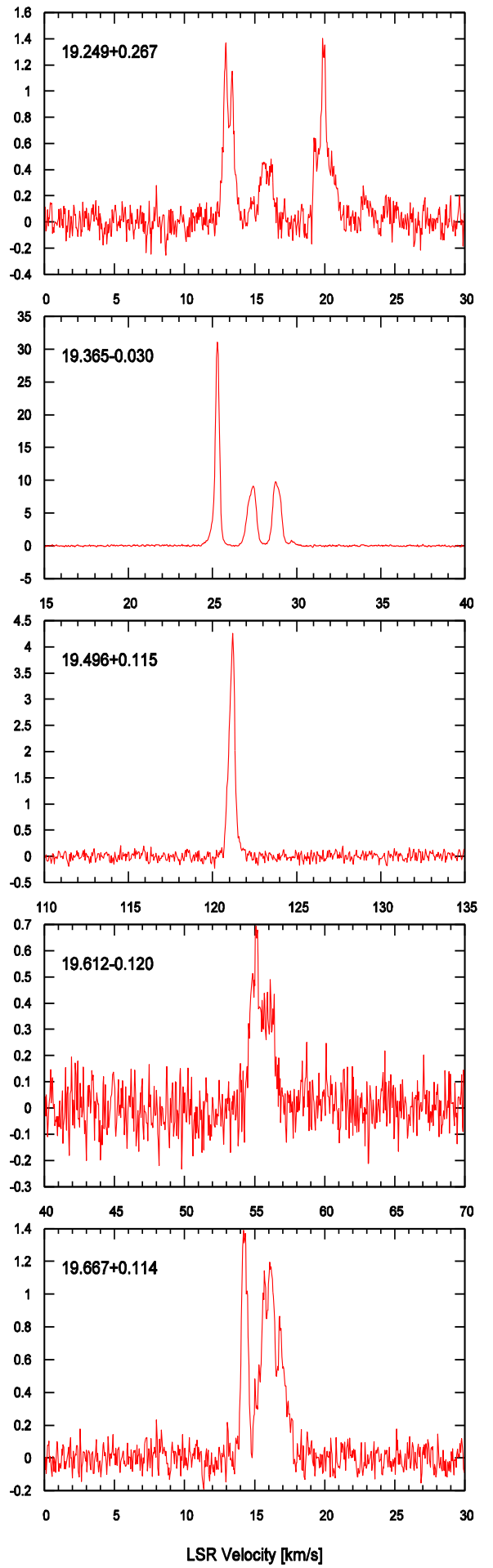
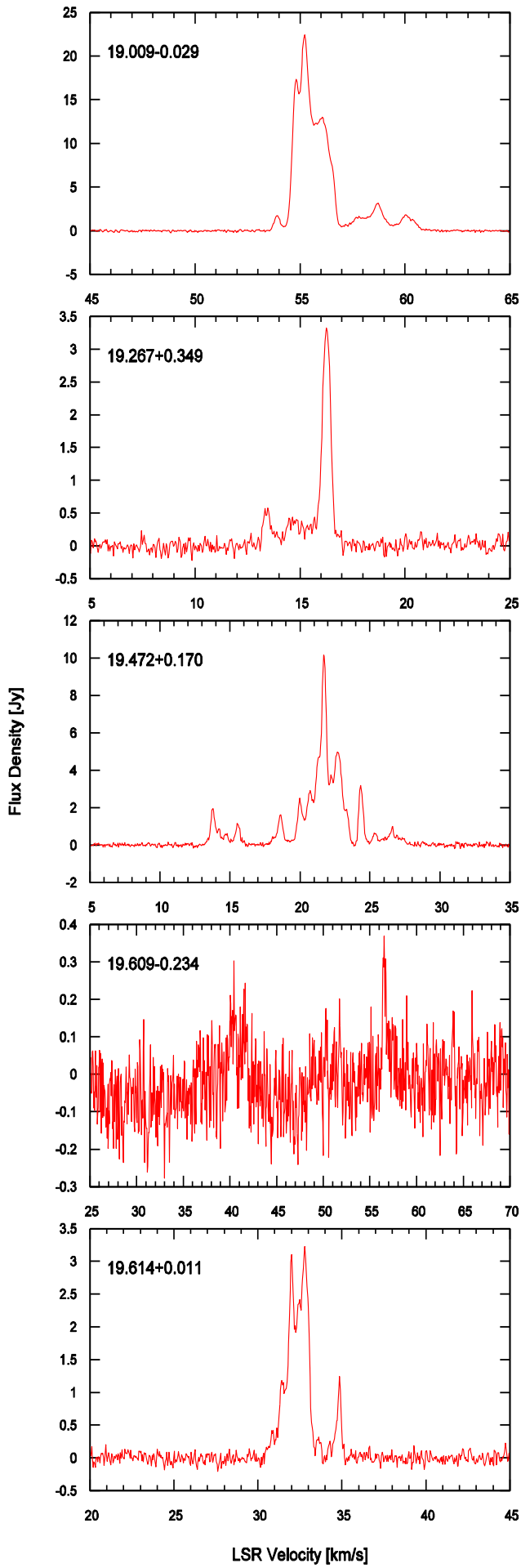


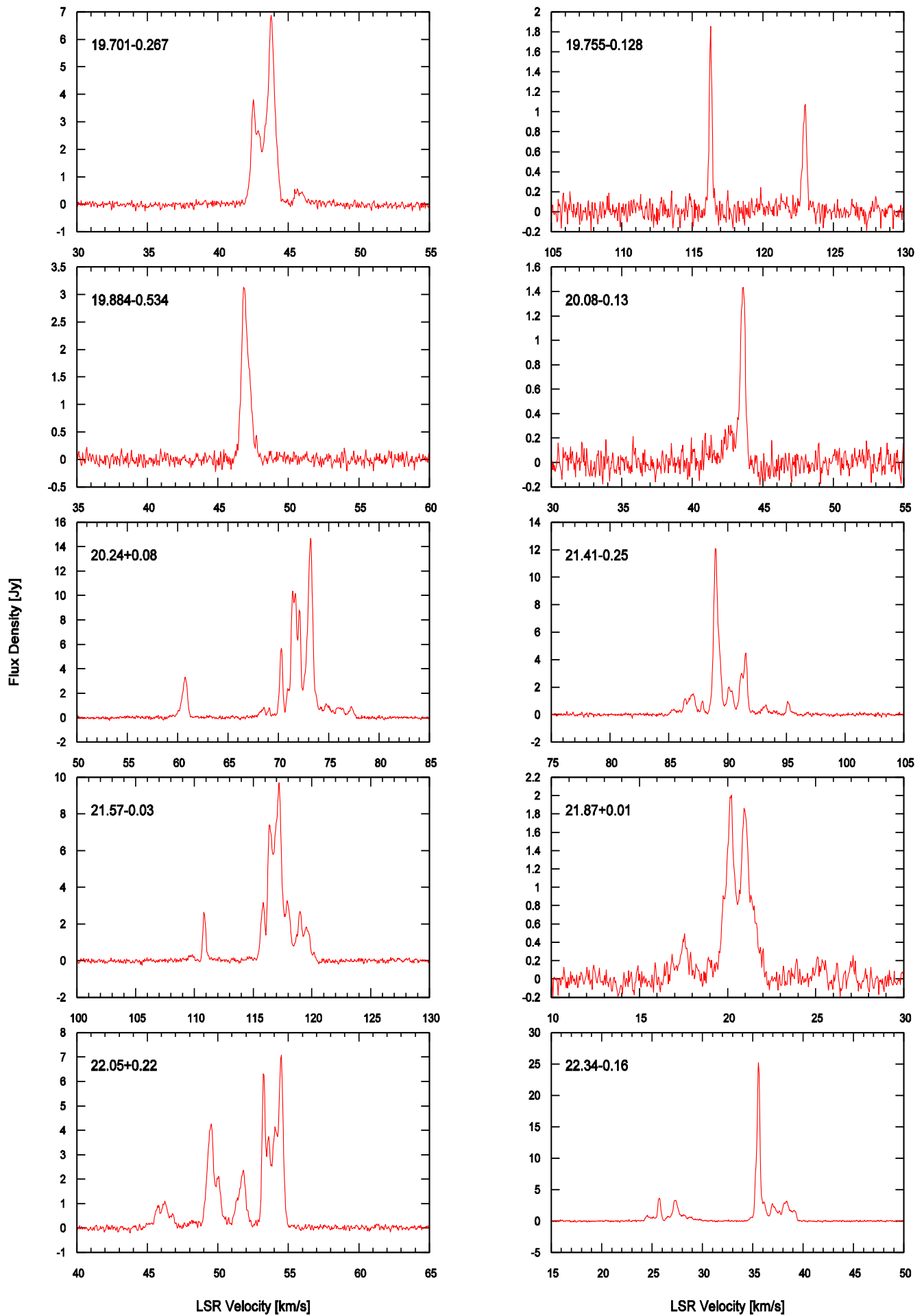


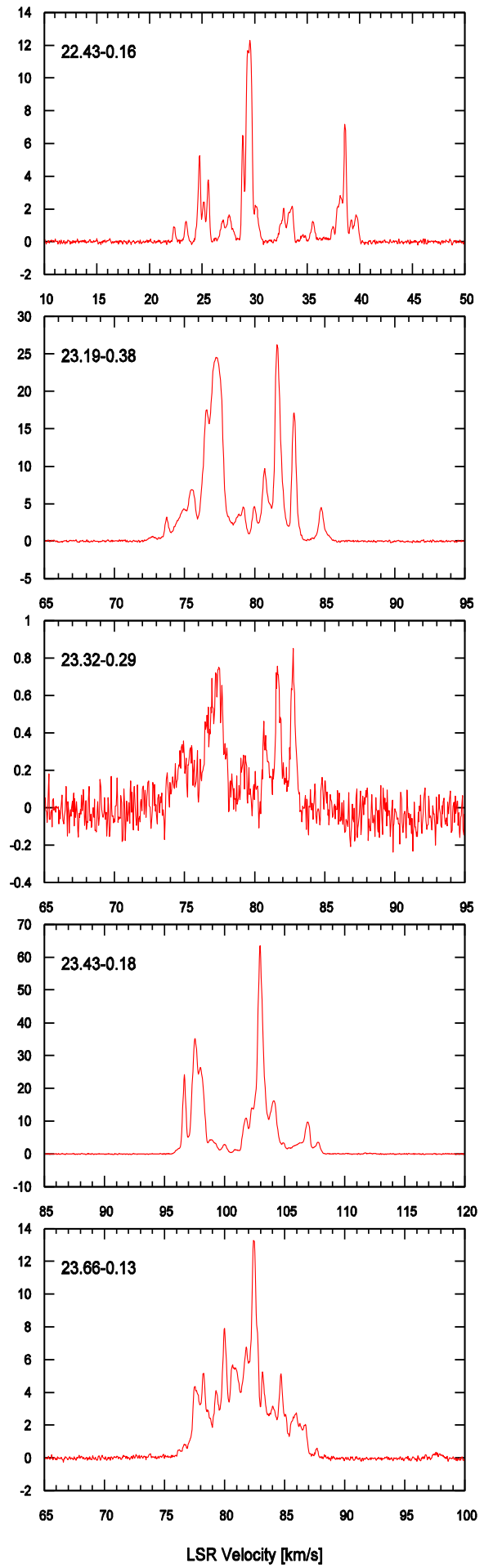
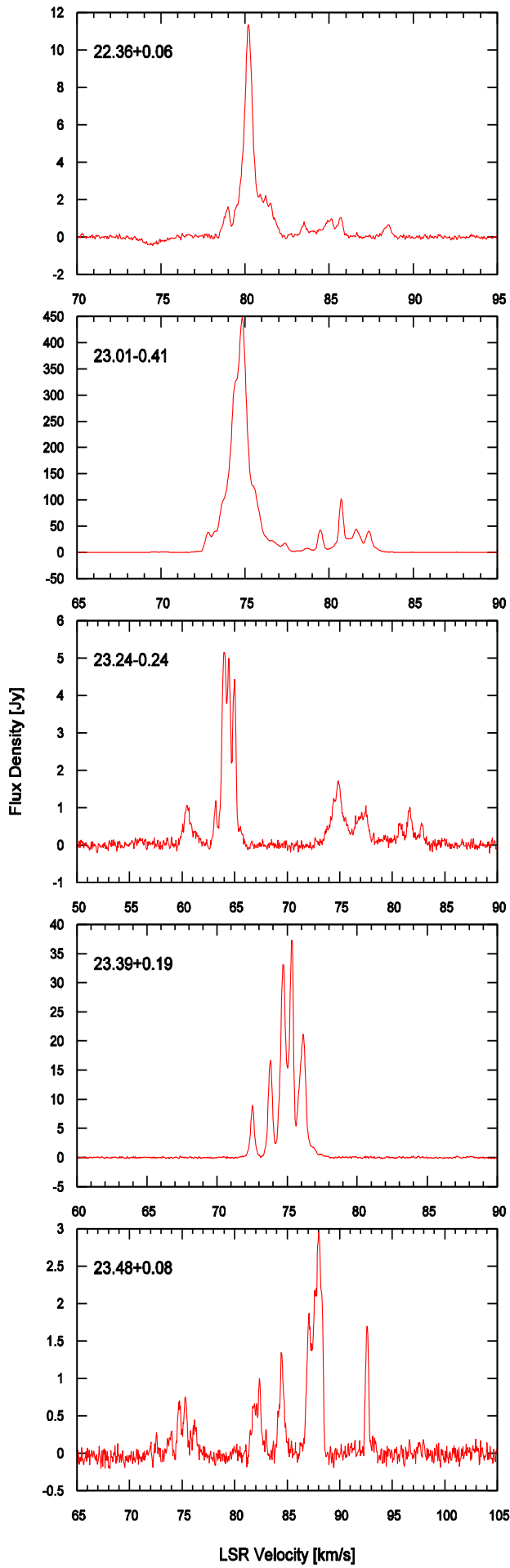


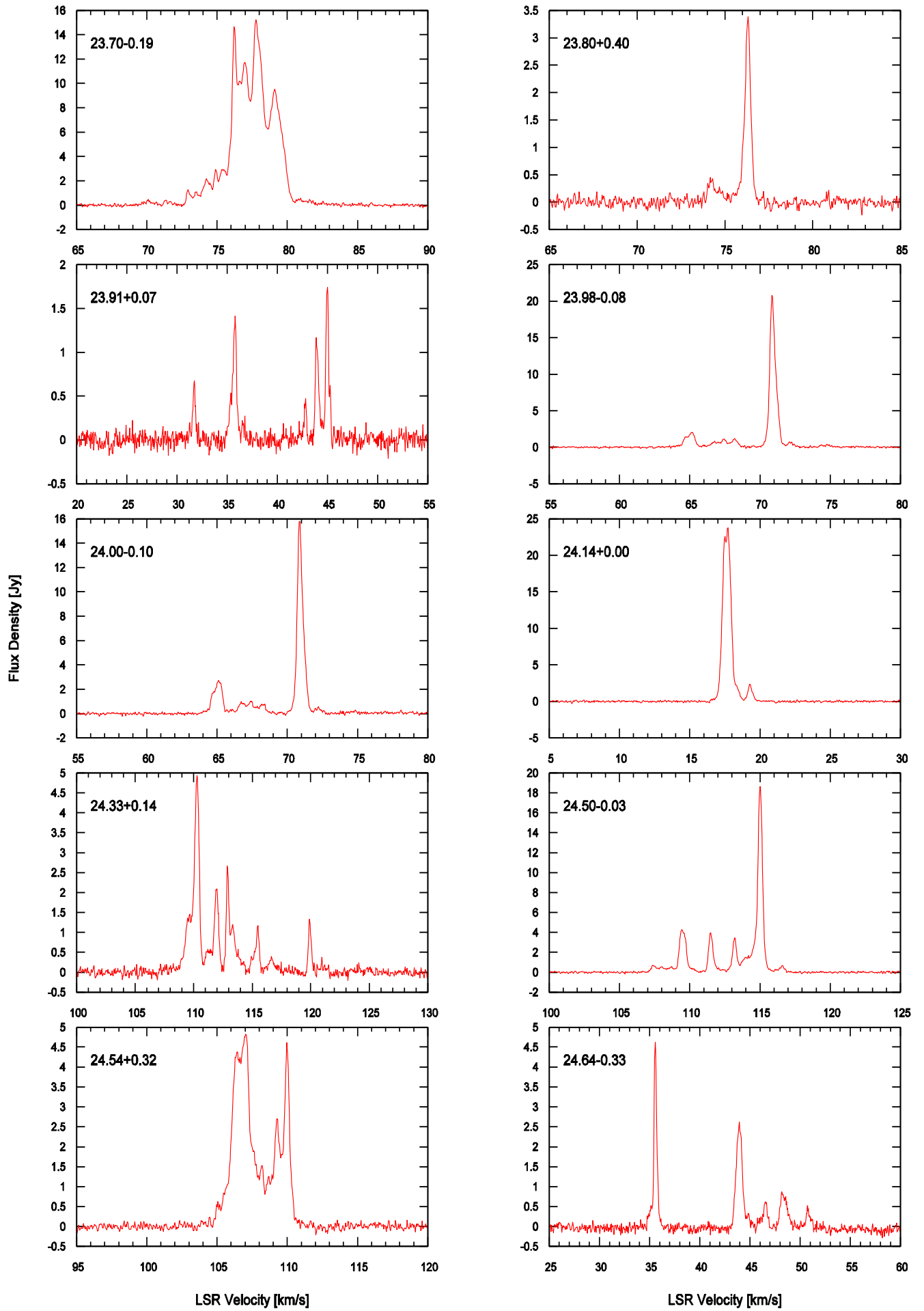


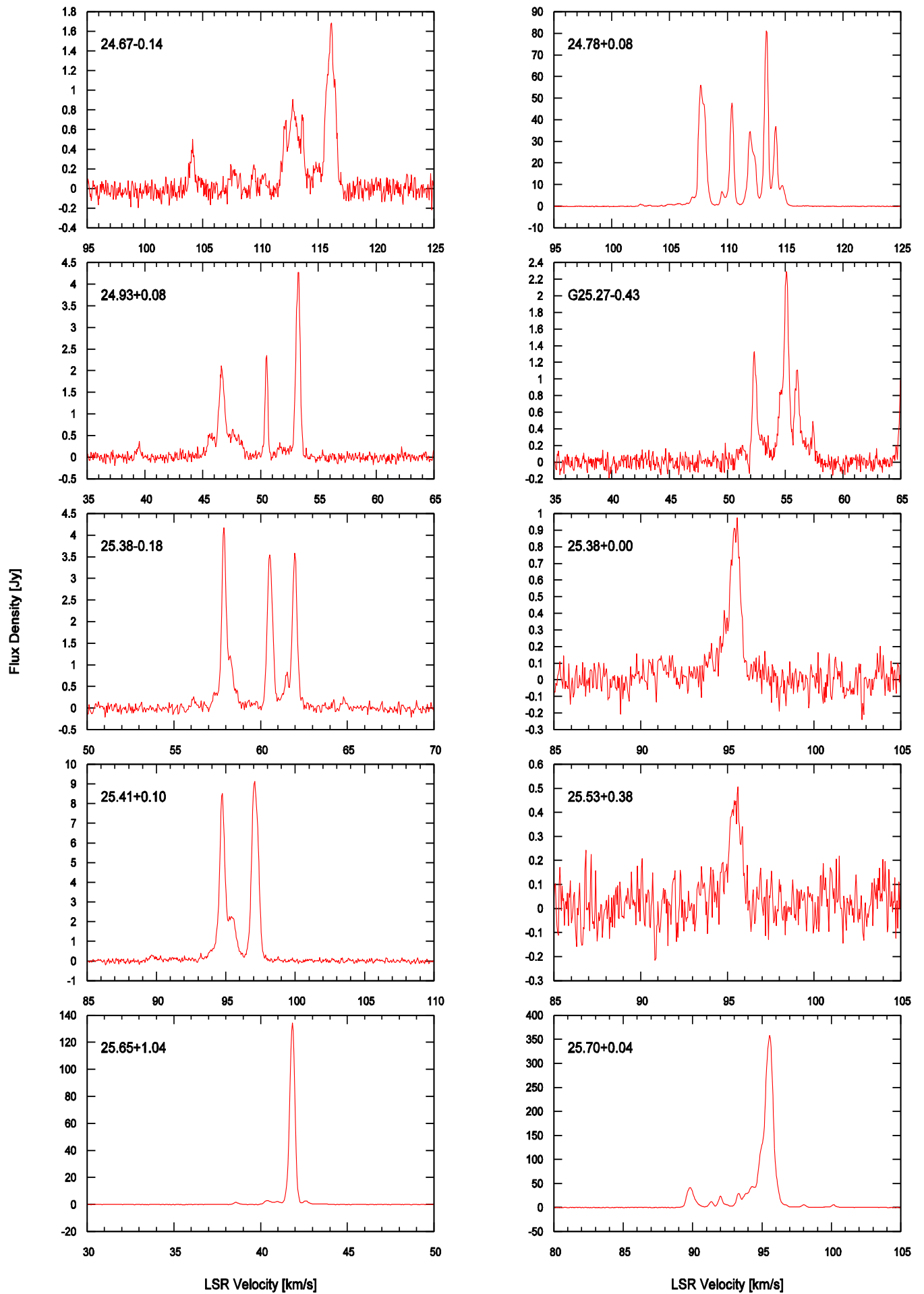


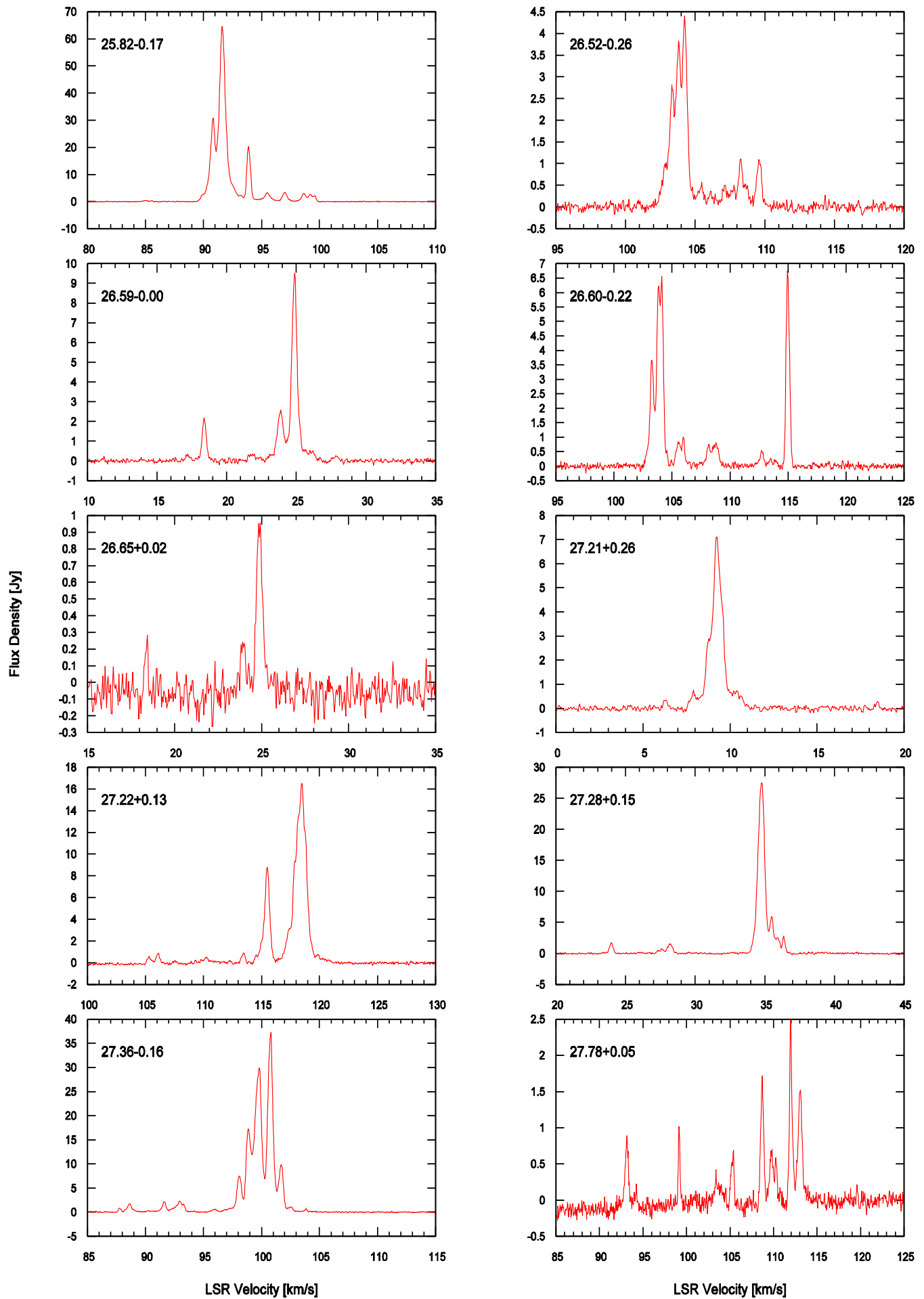


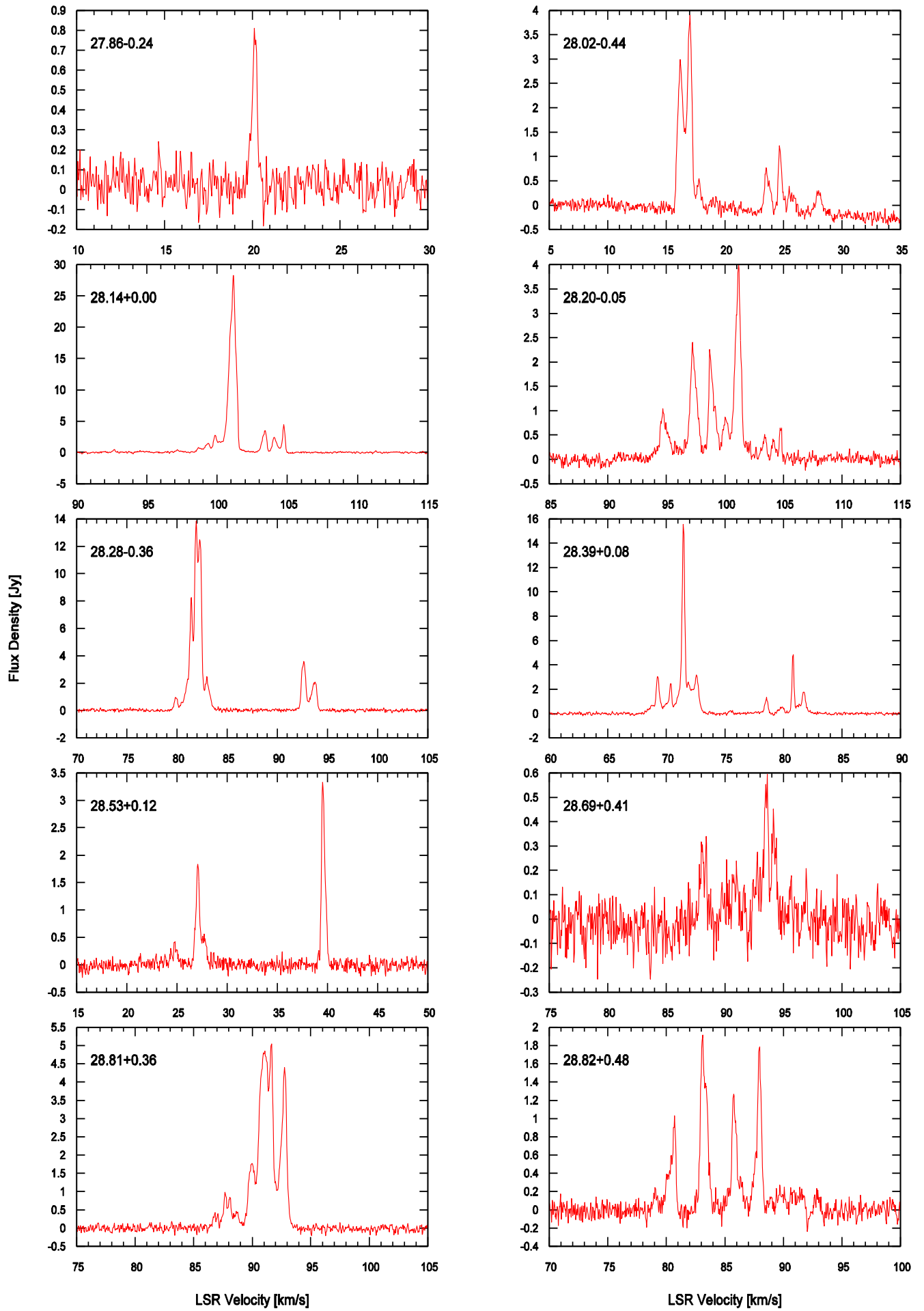


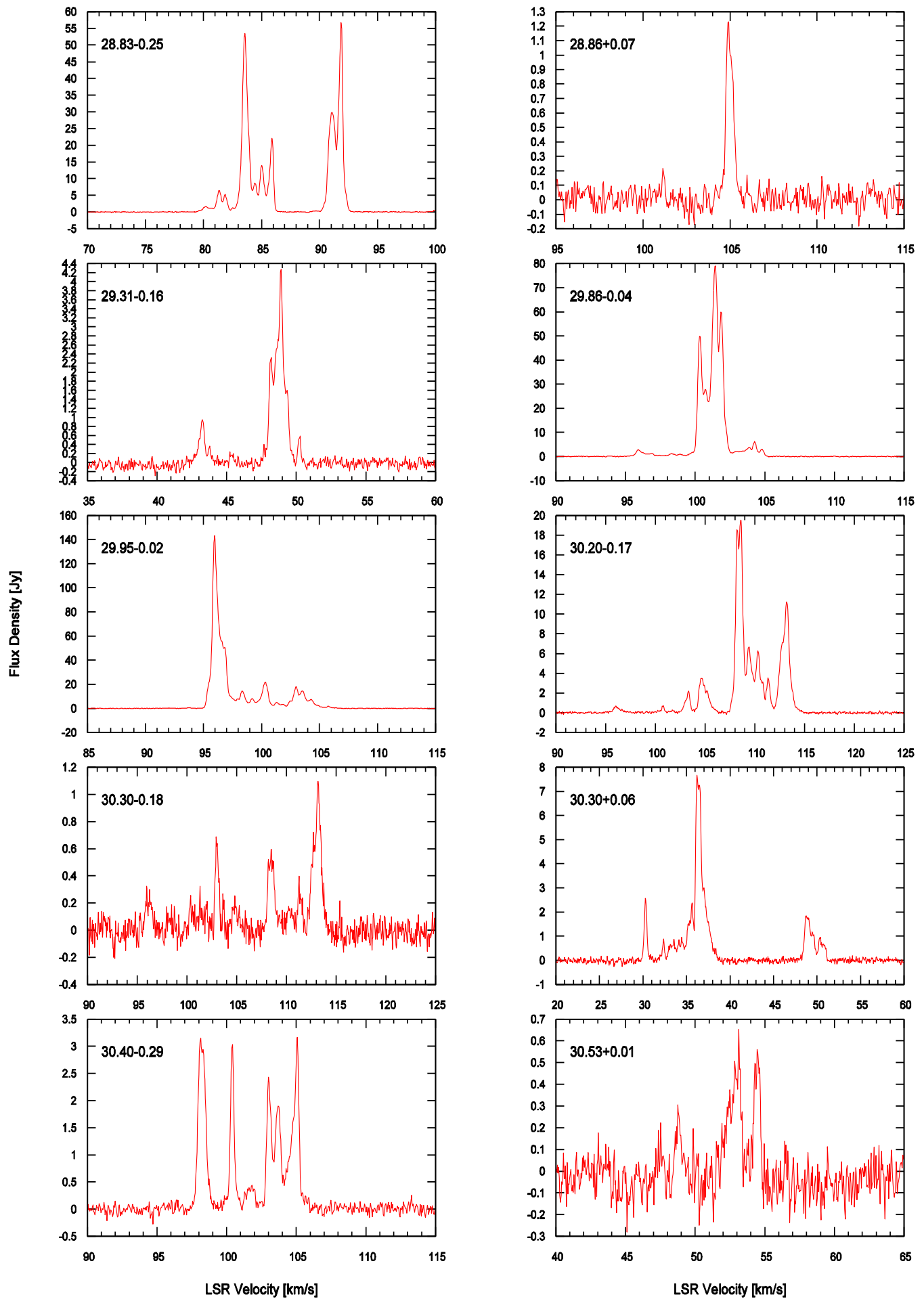


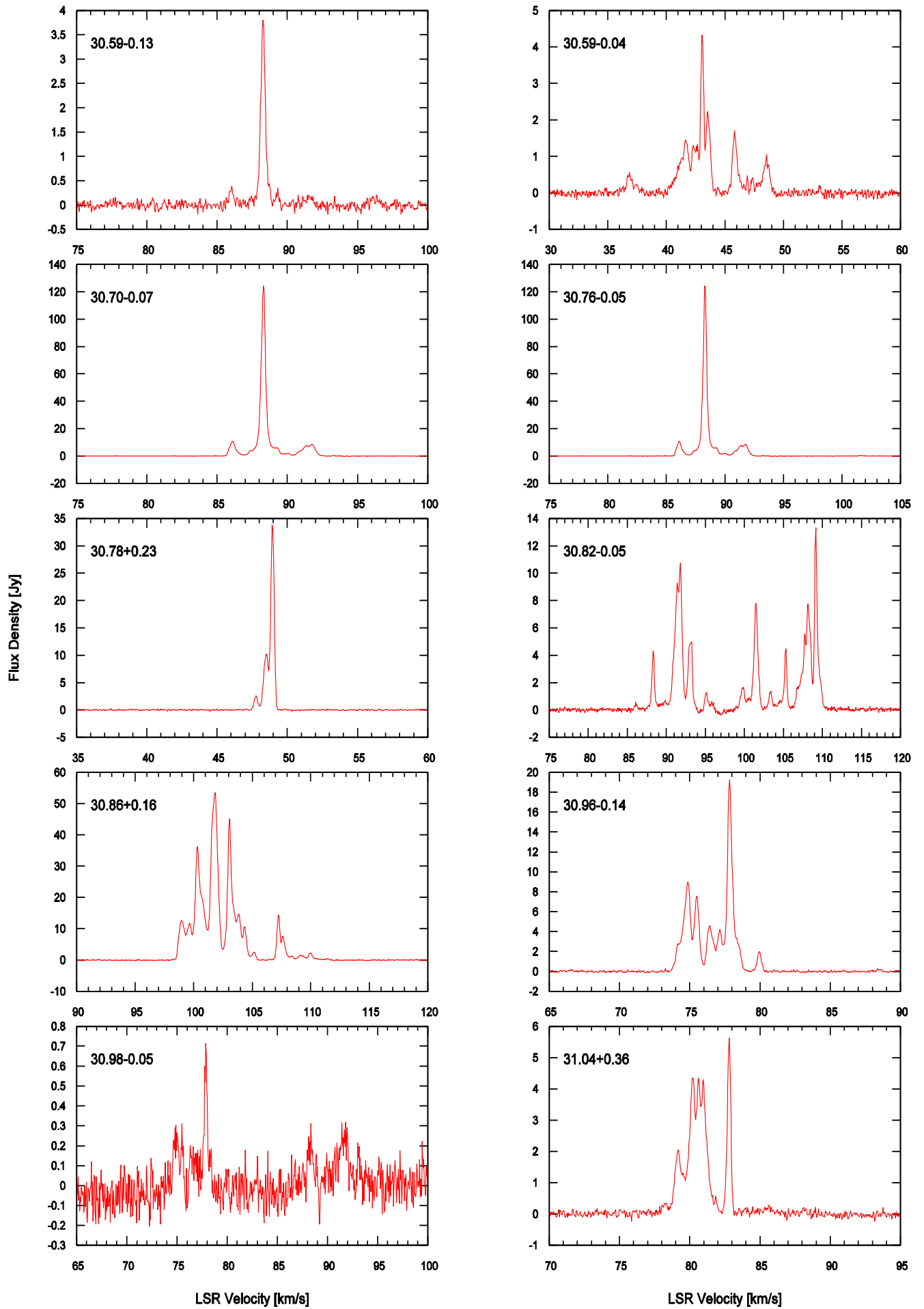


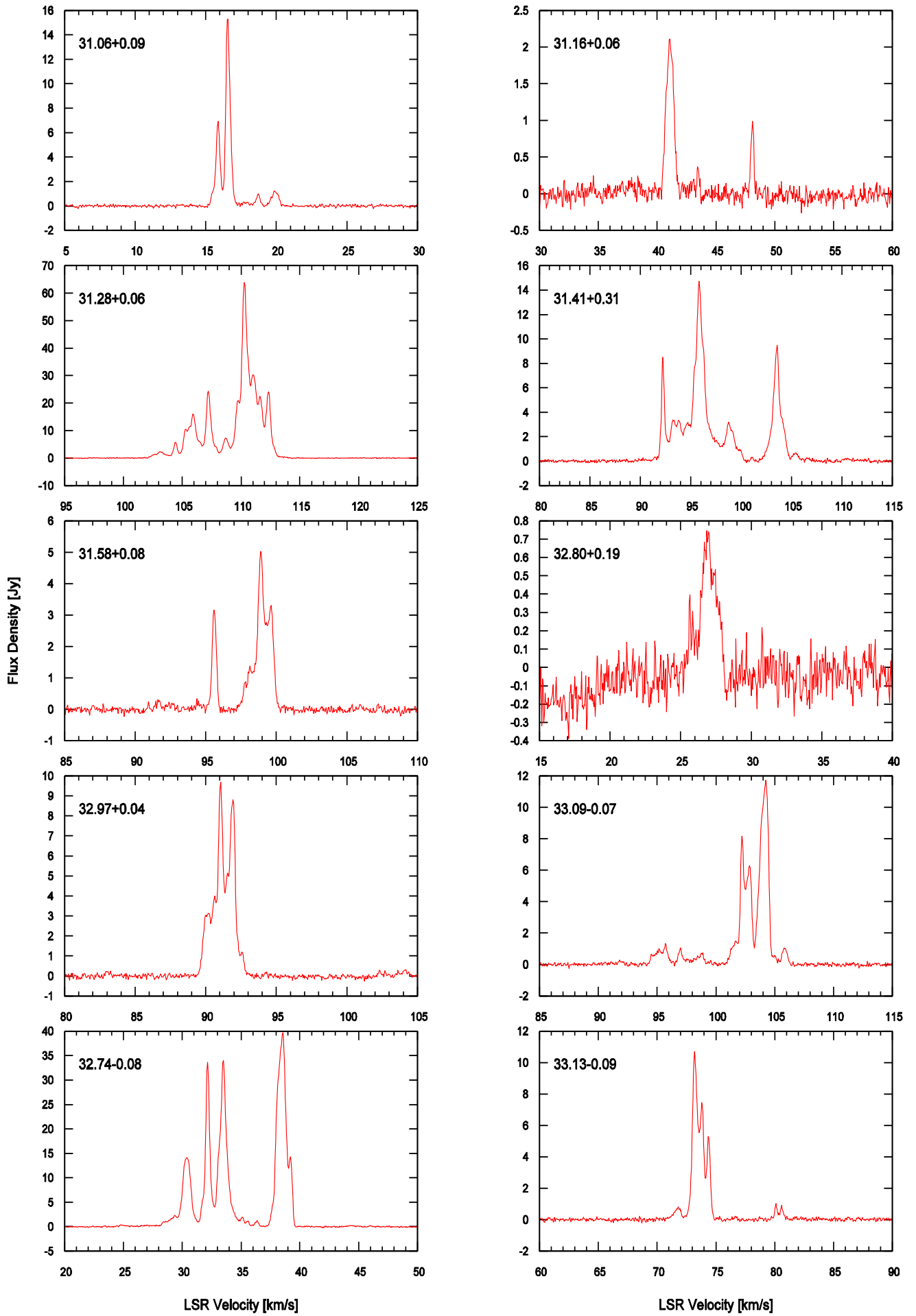


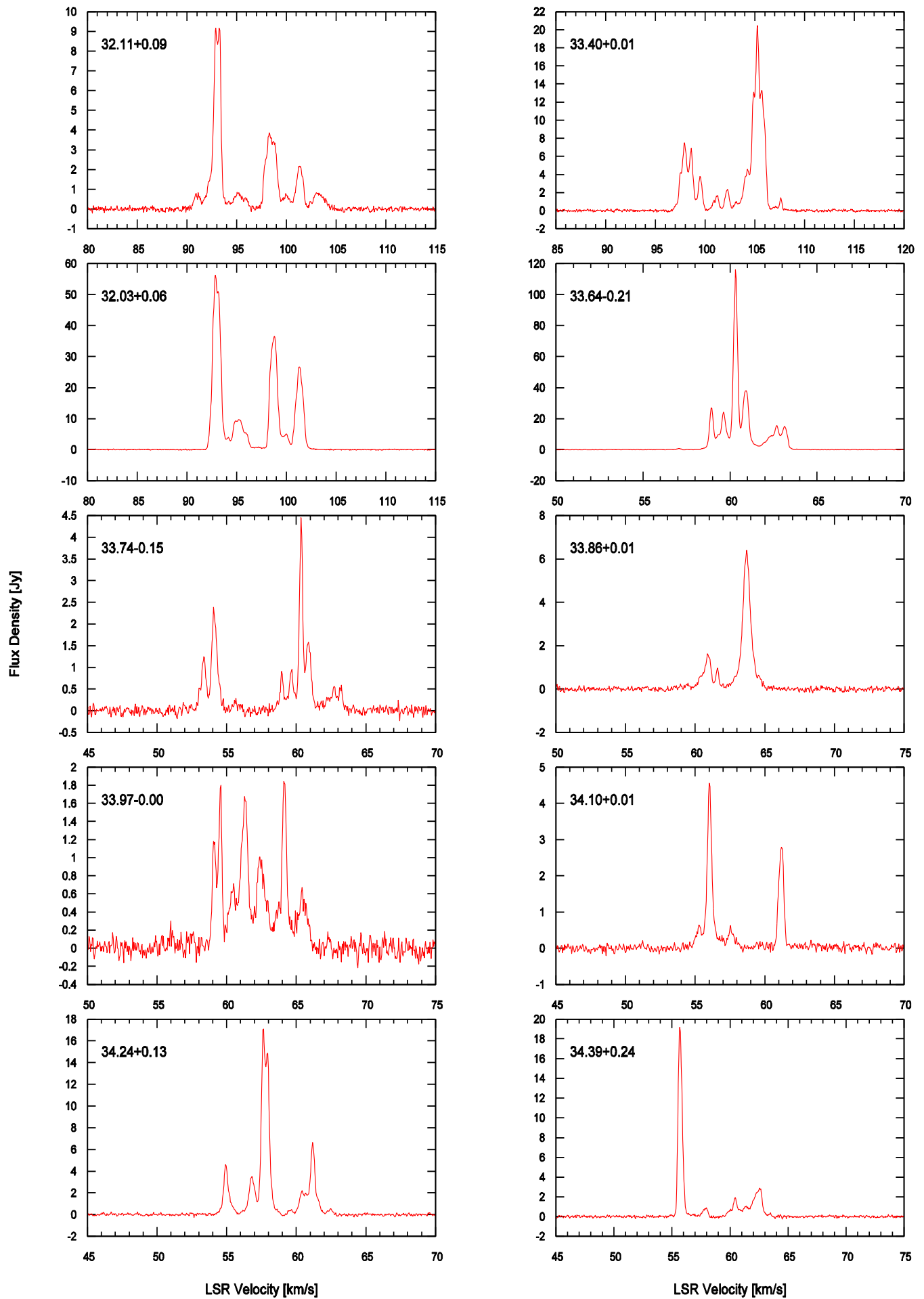


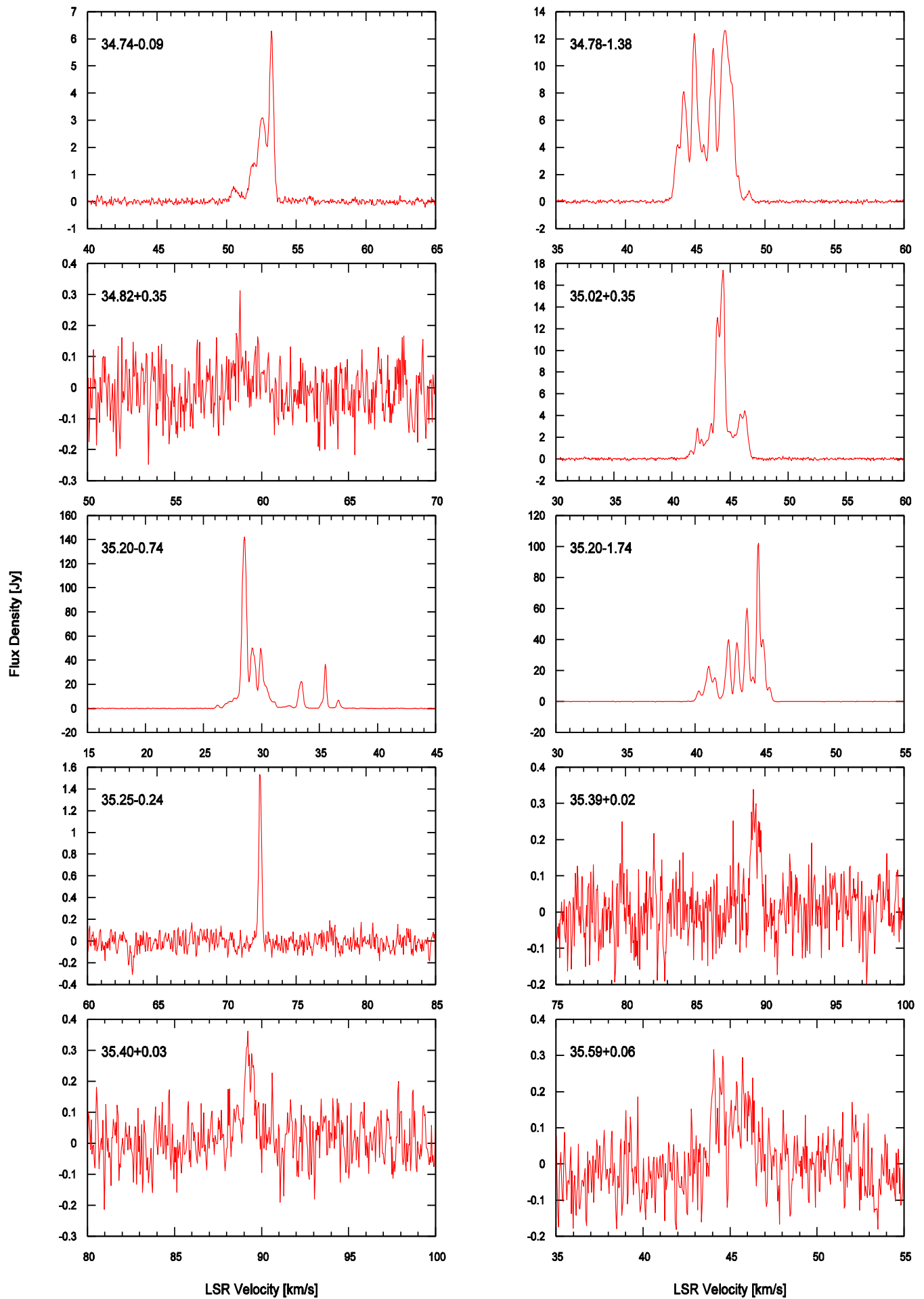


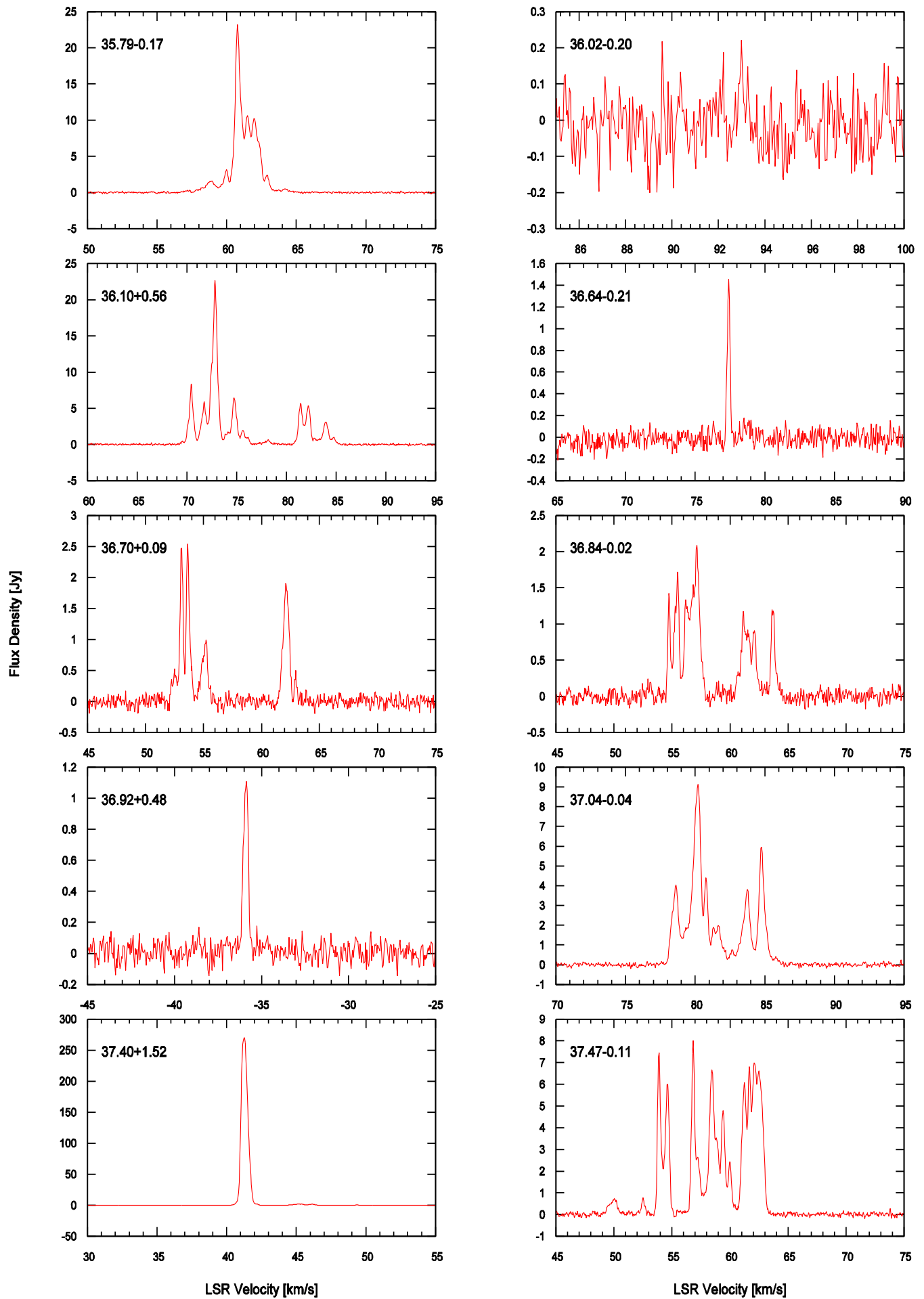


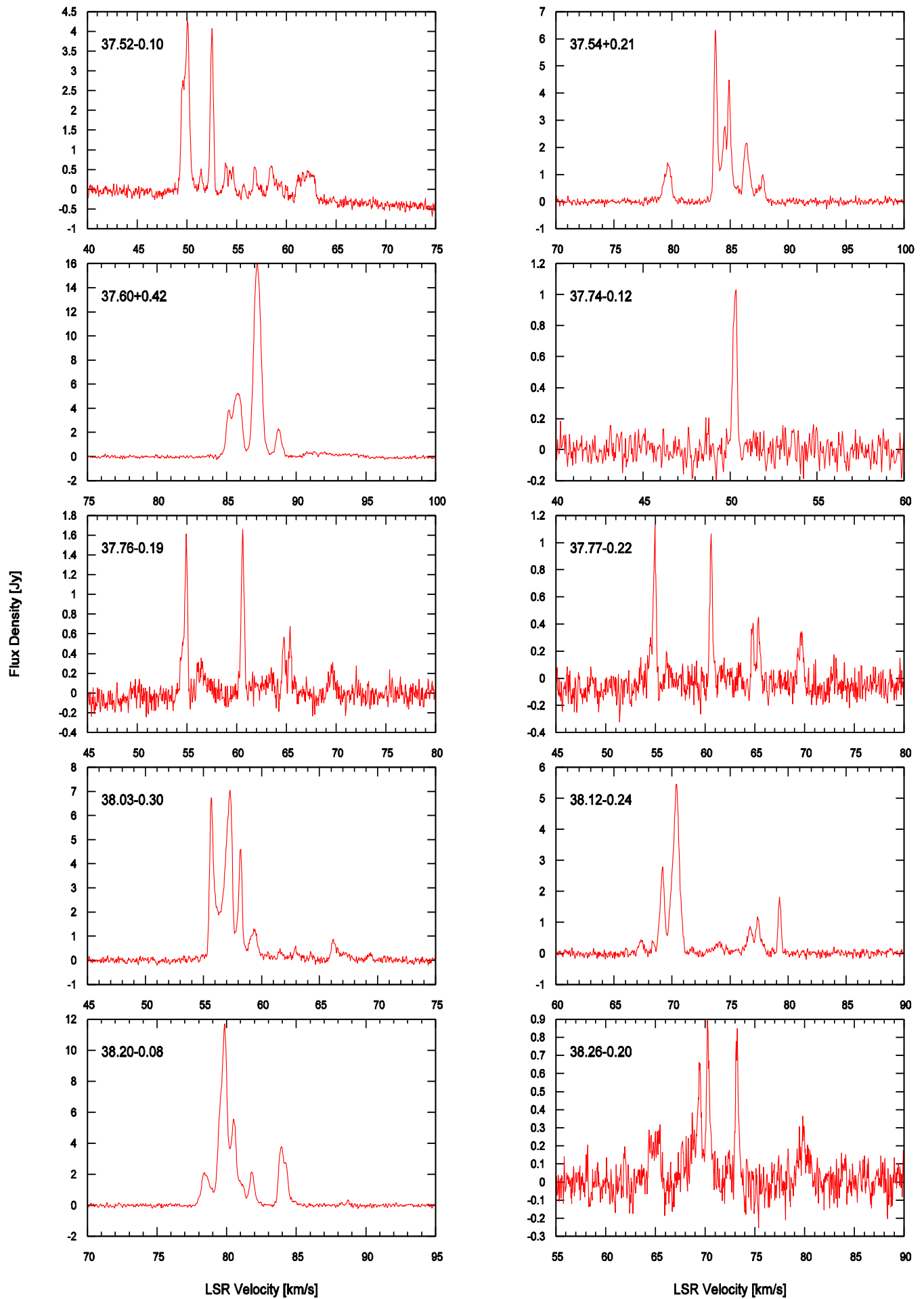


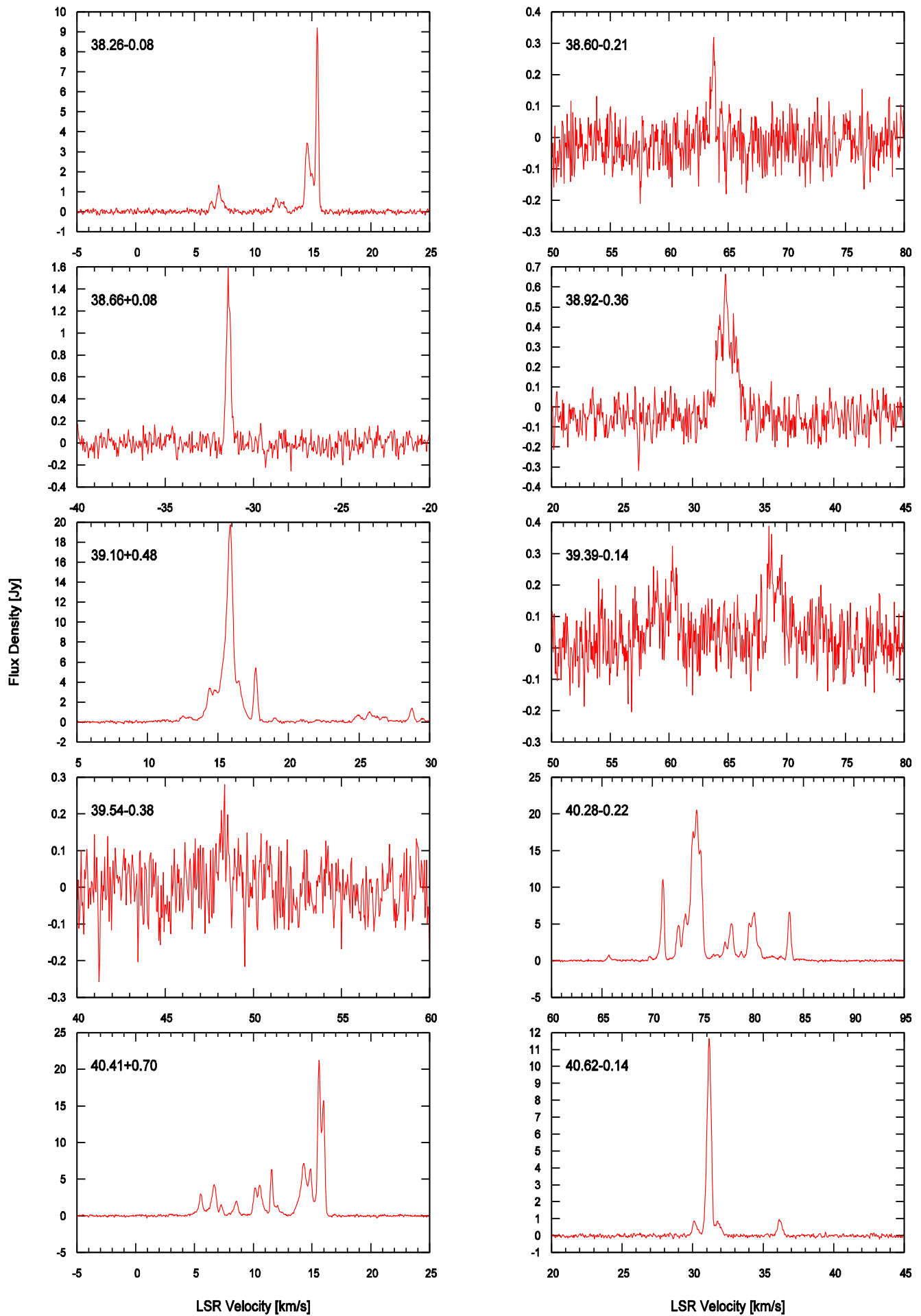


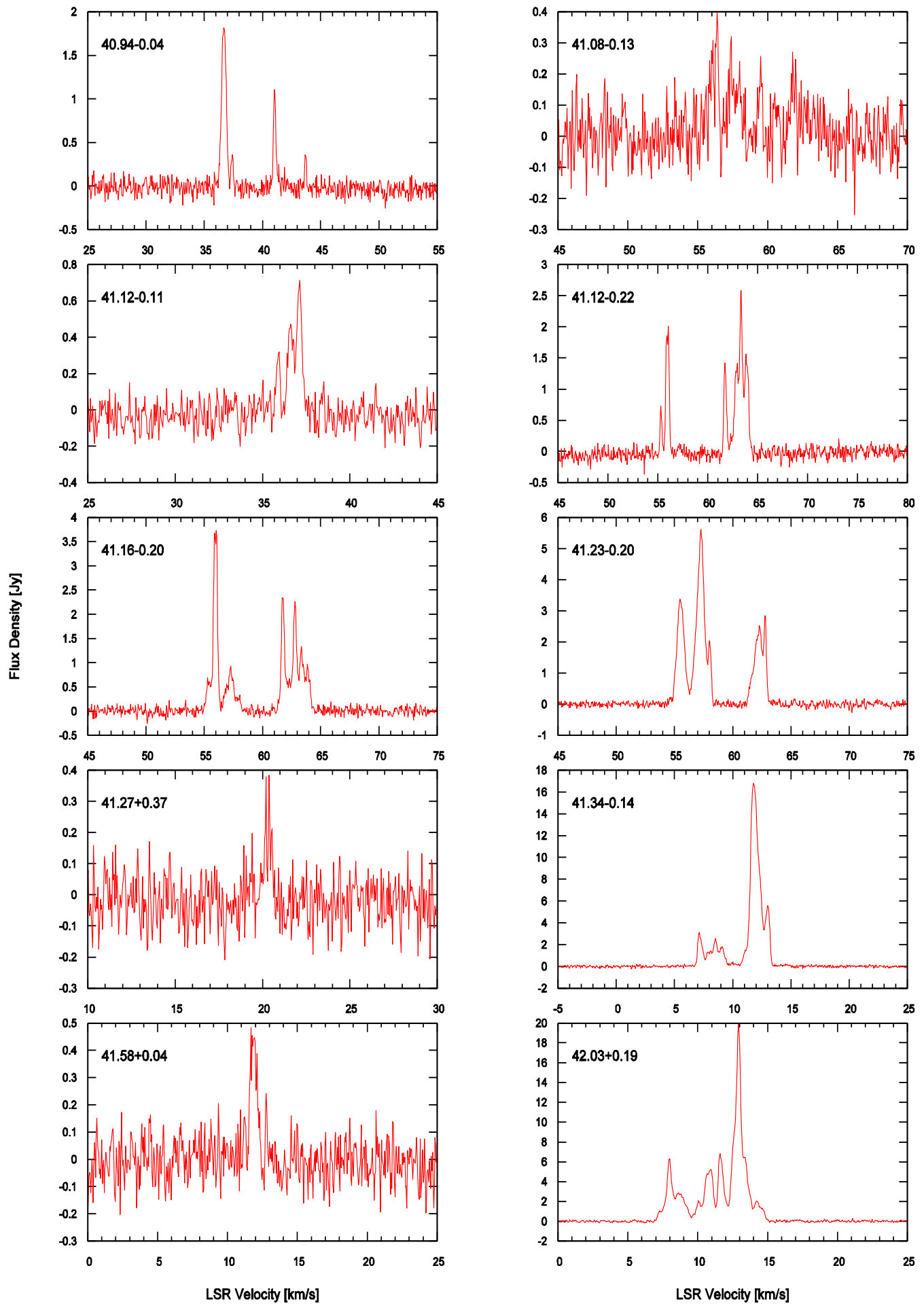


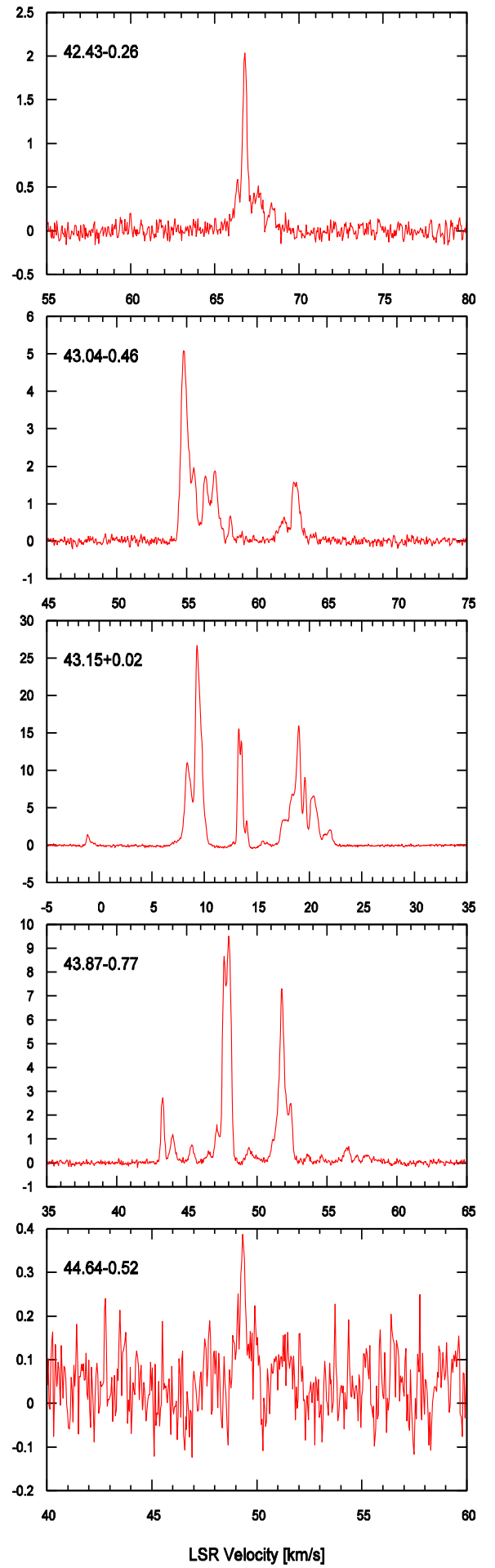
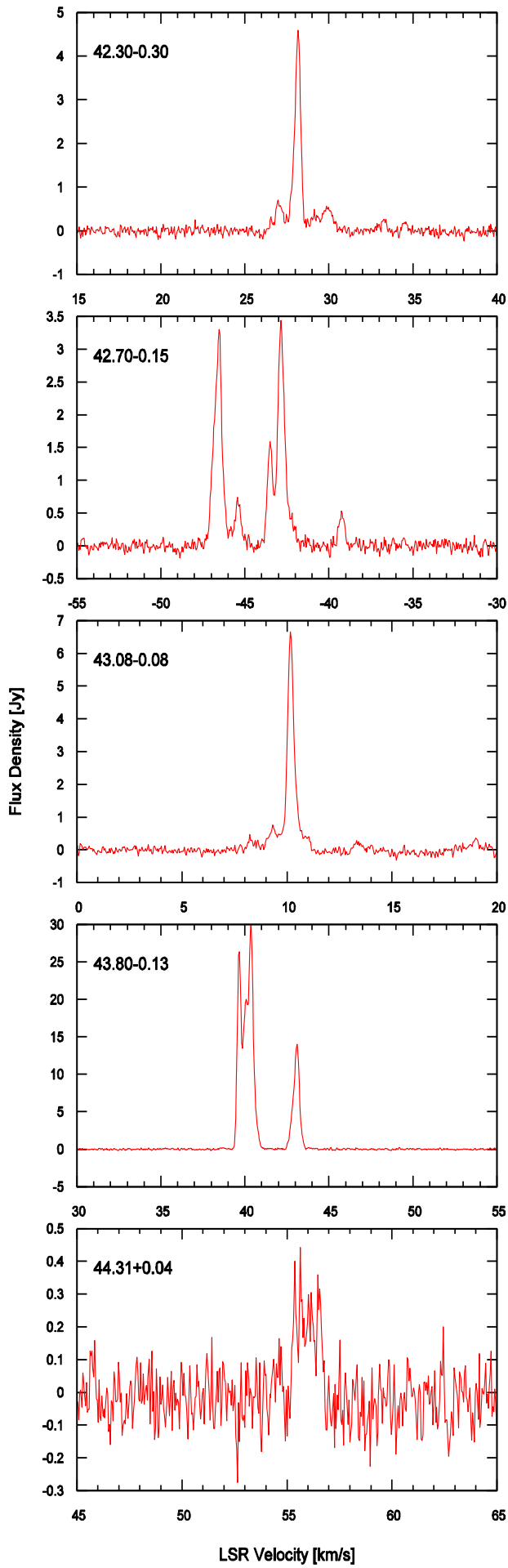


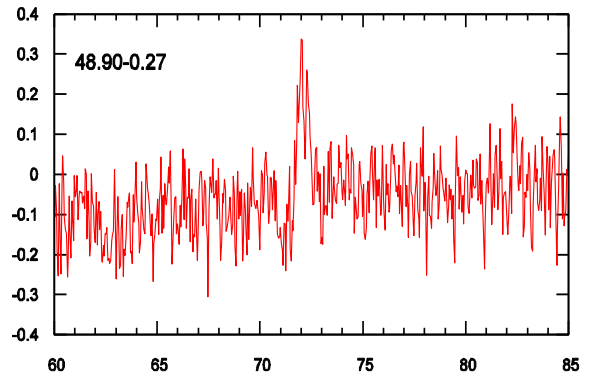
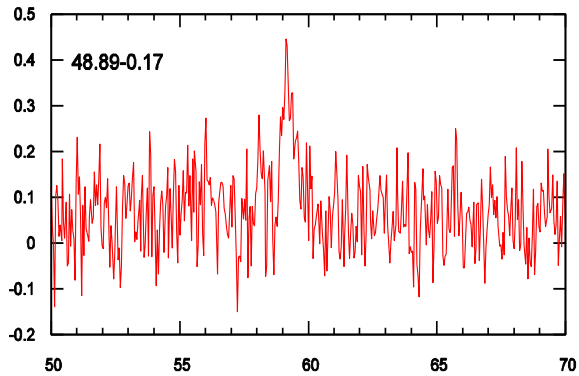
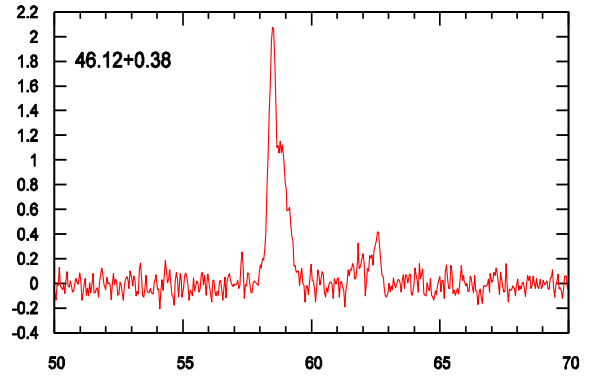
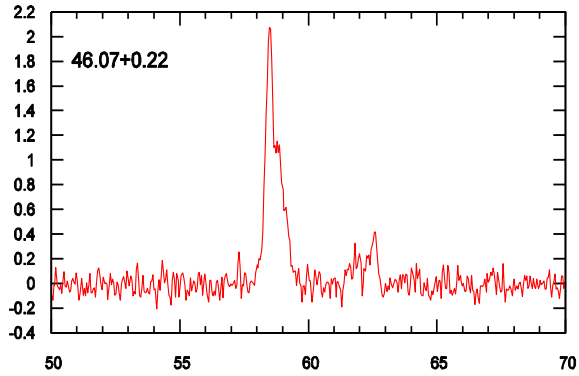
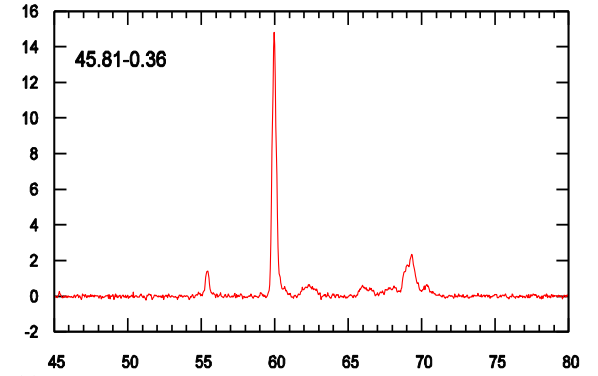
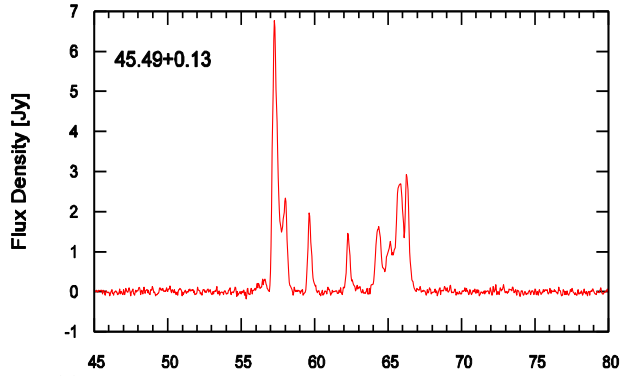
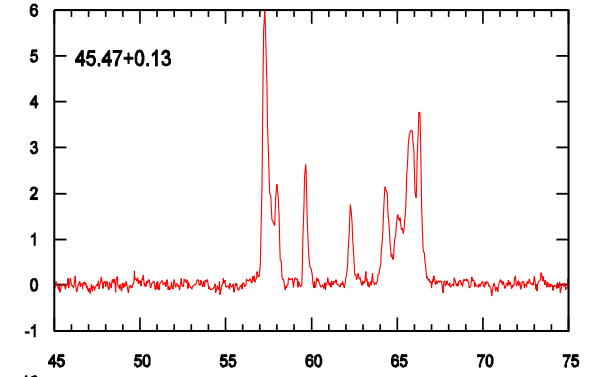
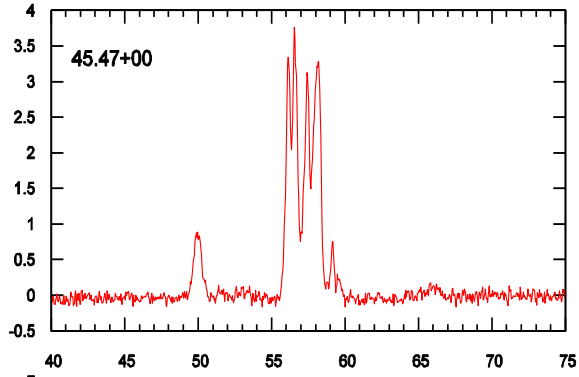
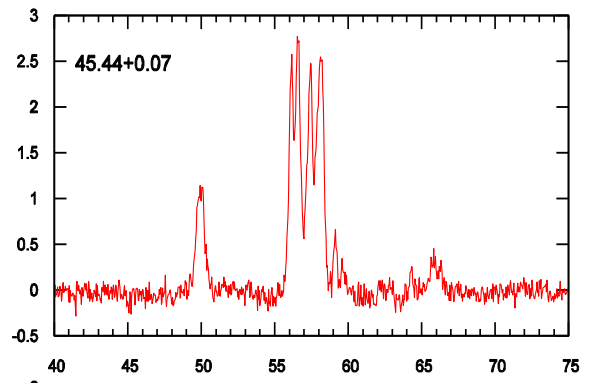
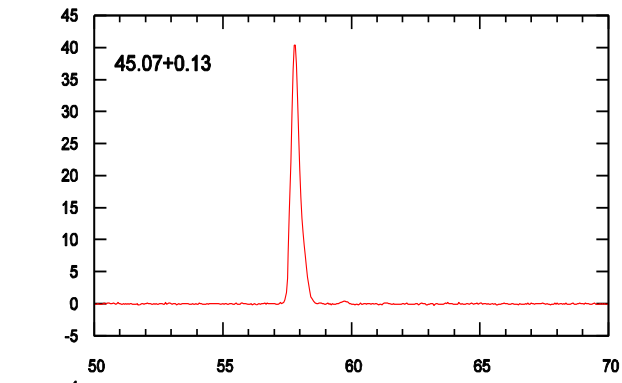






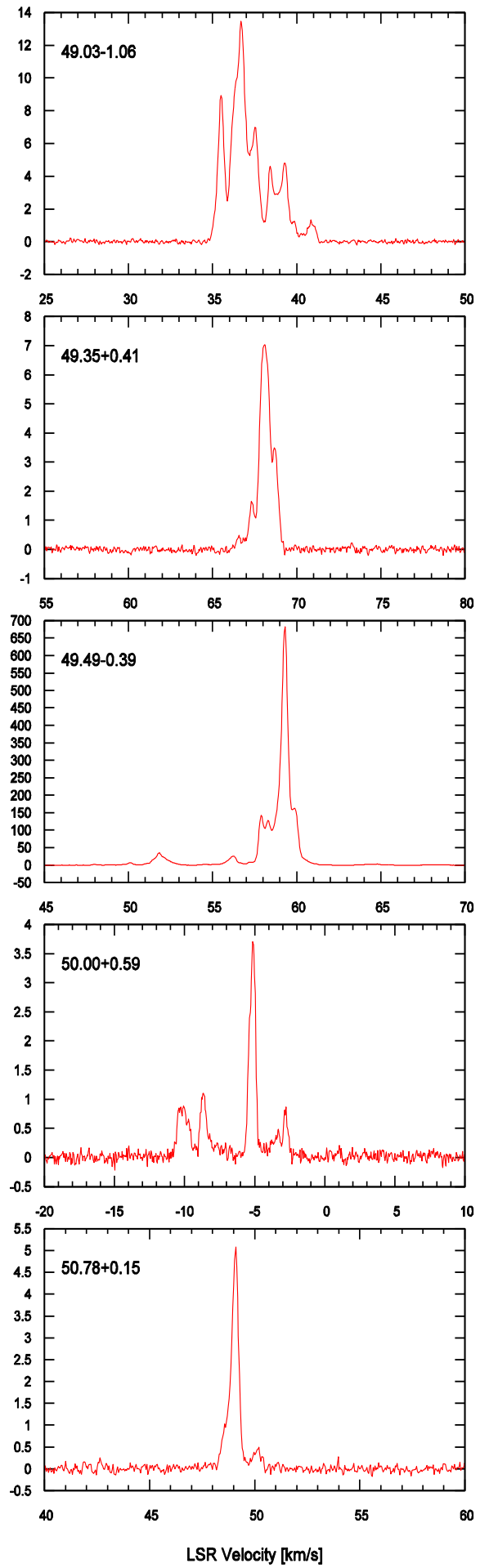
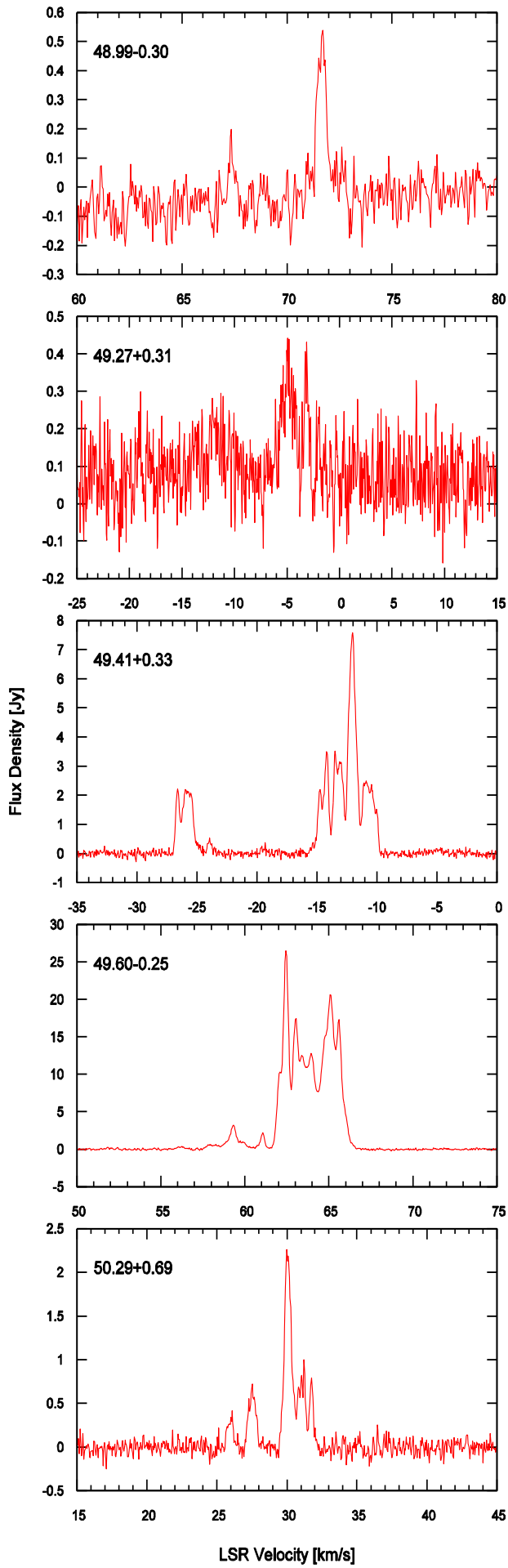


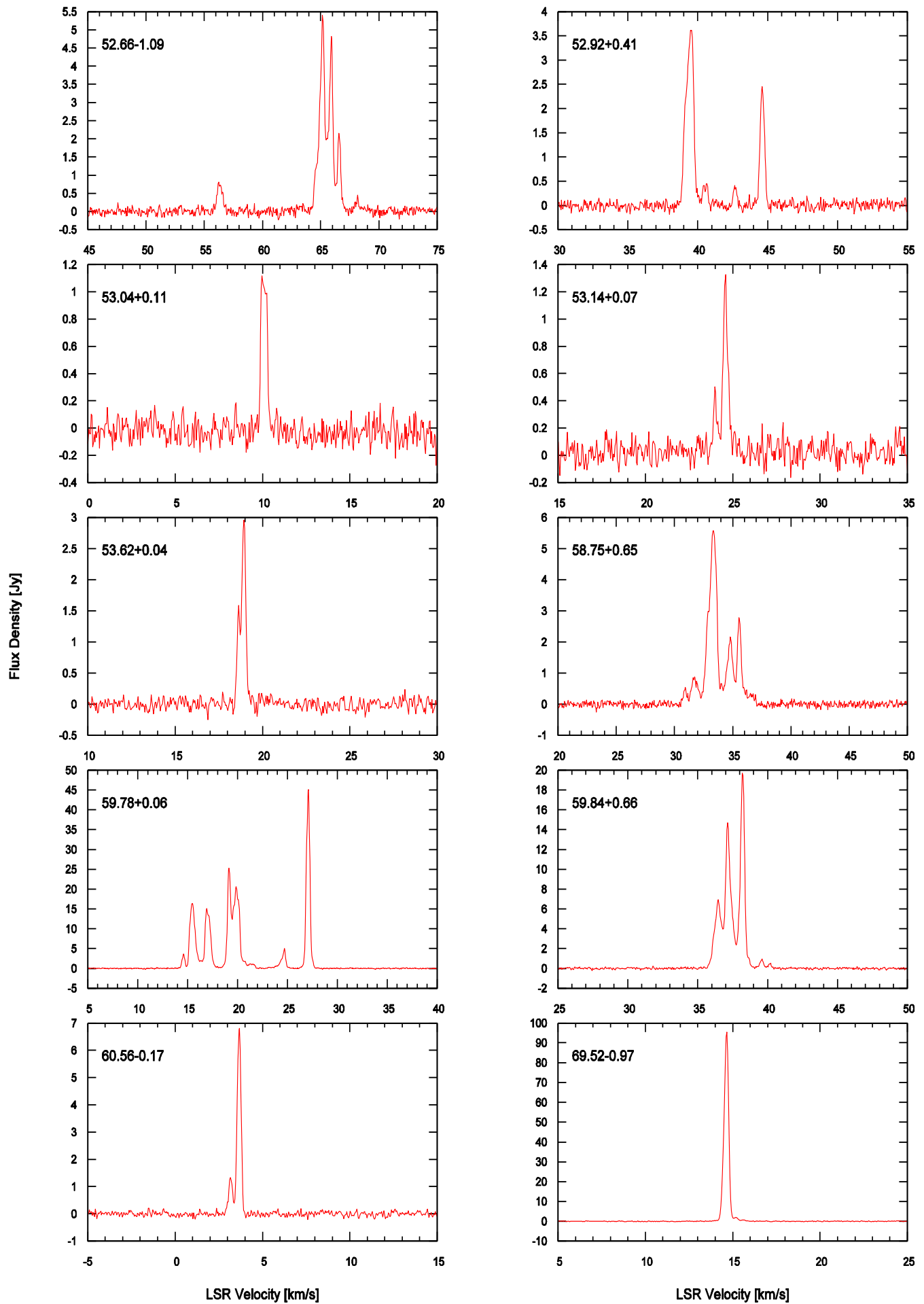


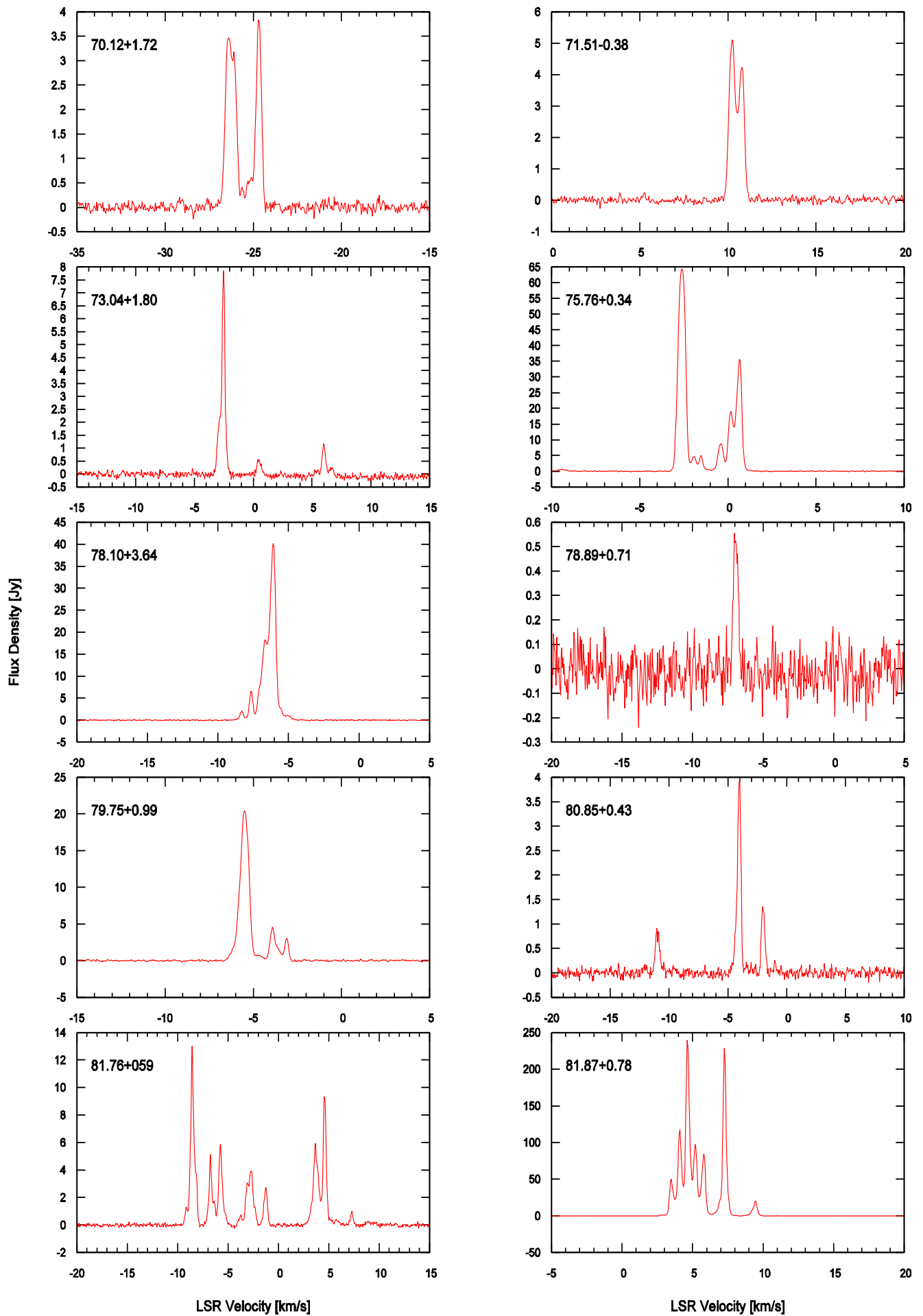


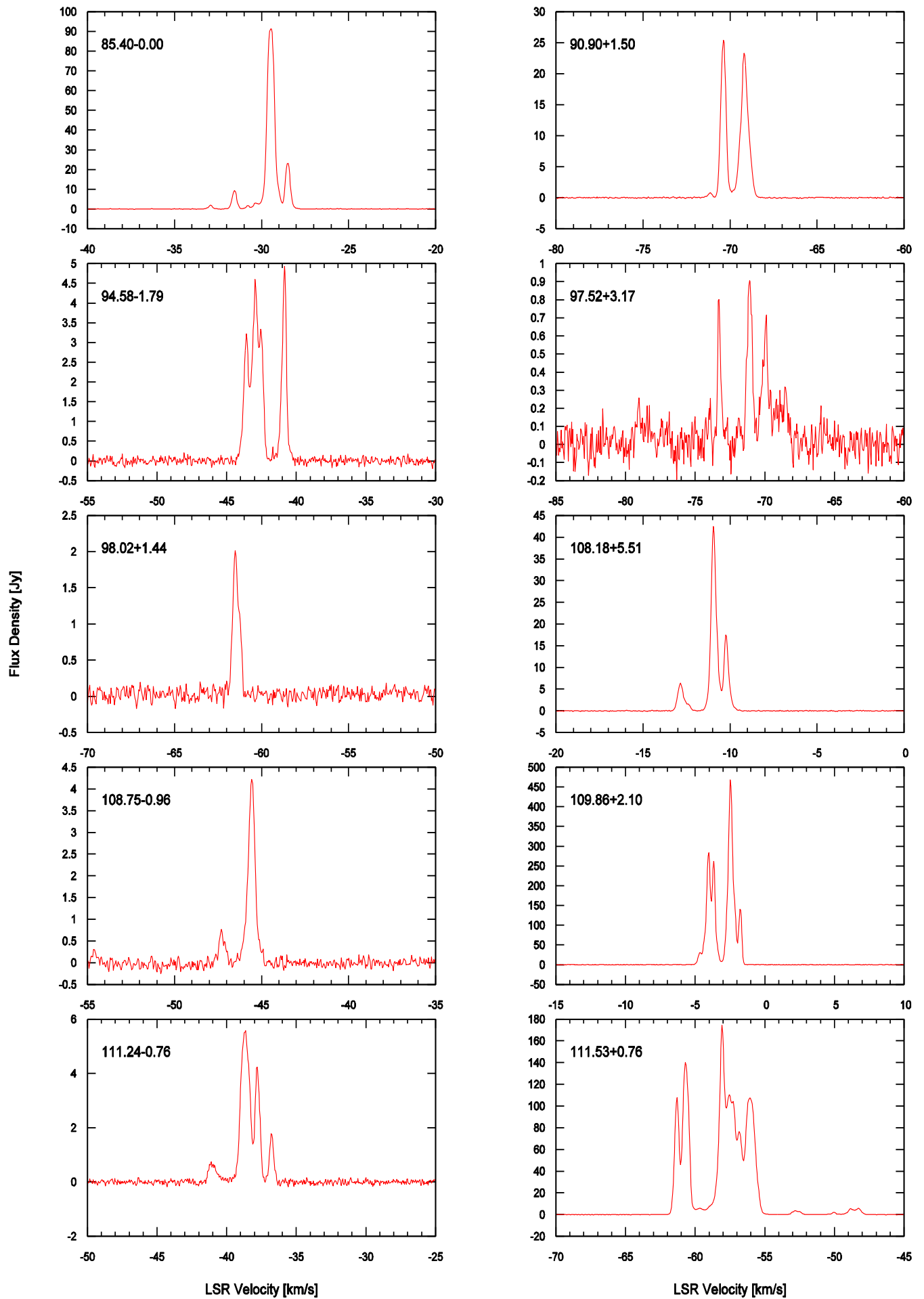
LSR Velocity [km/s]

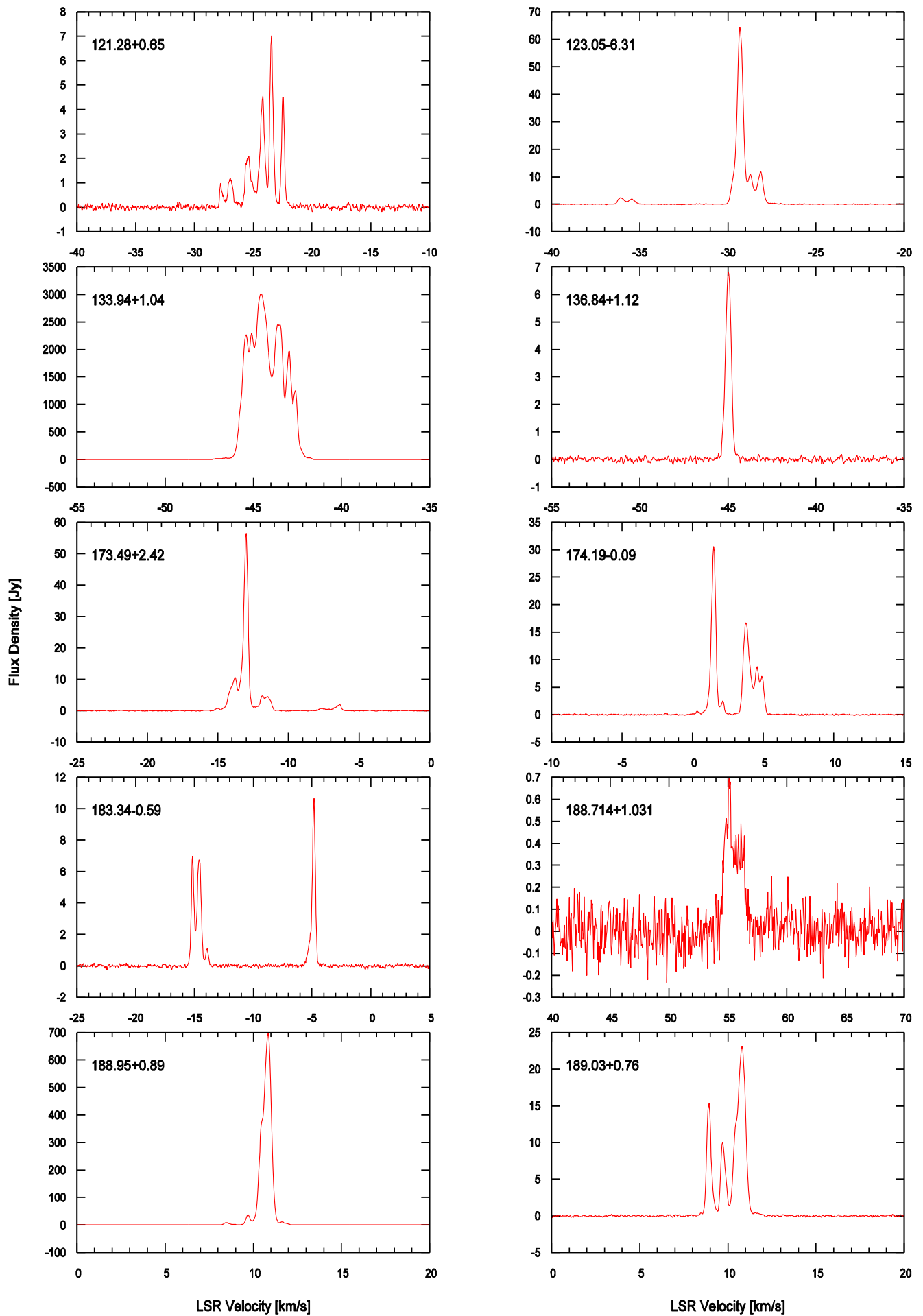
LSR Velocity [km/s]

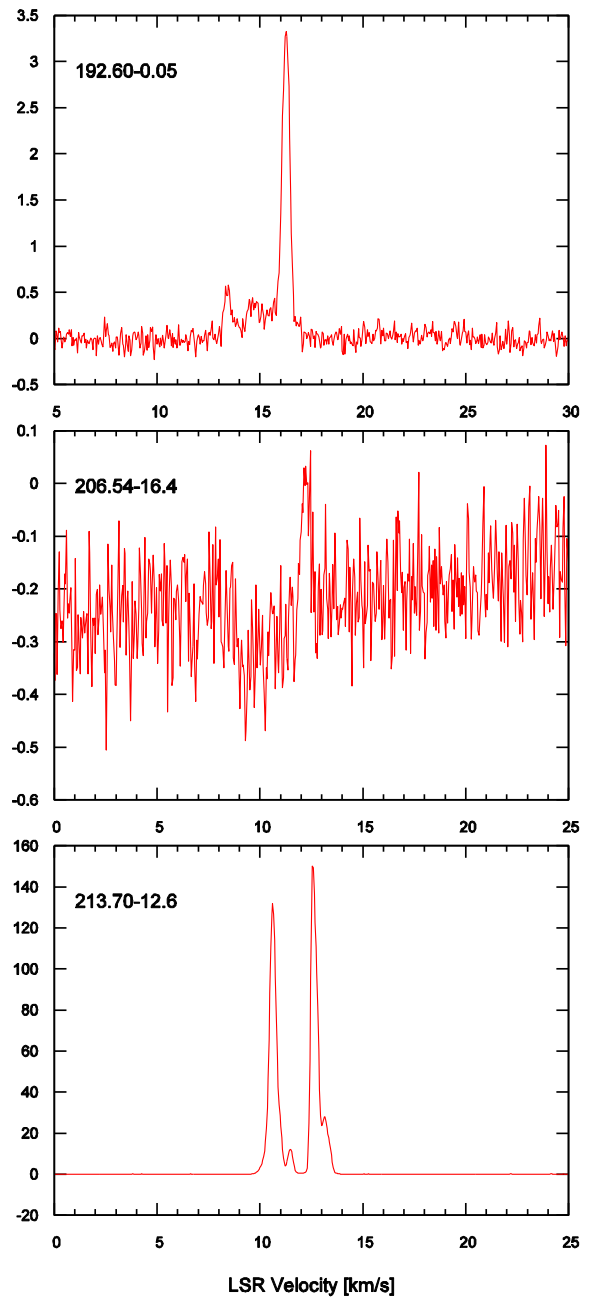
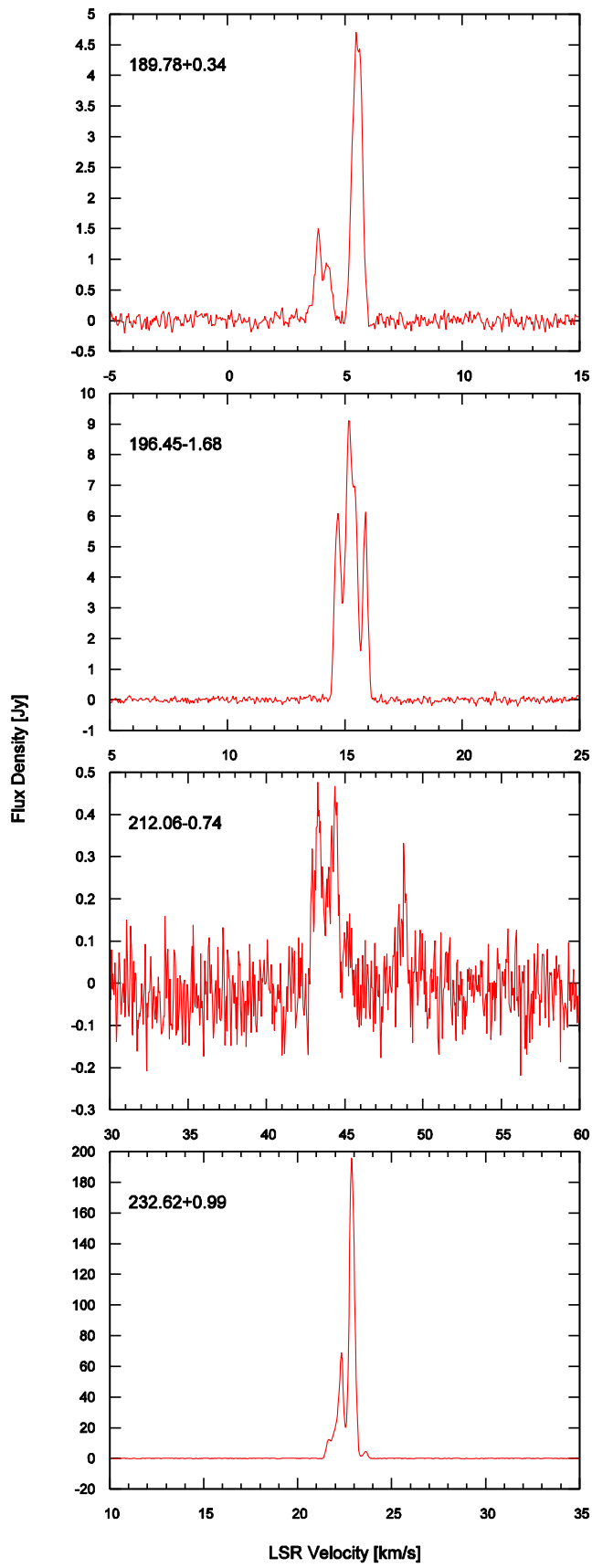












4. 考察

ここでは、解析の結果において新たな速度成分とみられる 8 天体について考察する。

4.1 新たな速度成分について

本研究で作成されたグラフと、母体カタログのグラフを以下に示す。

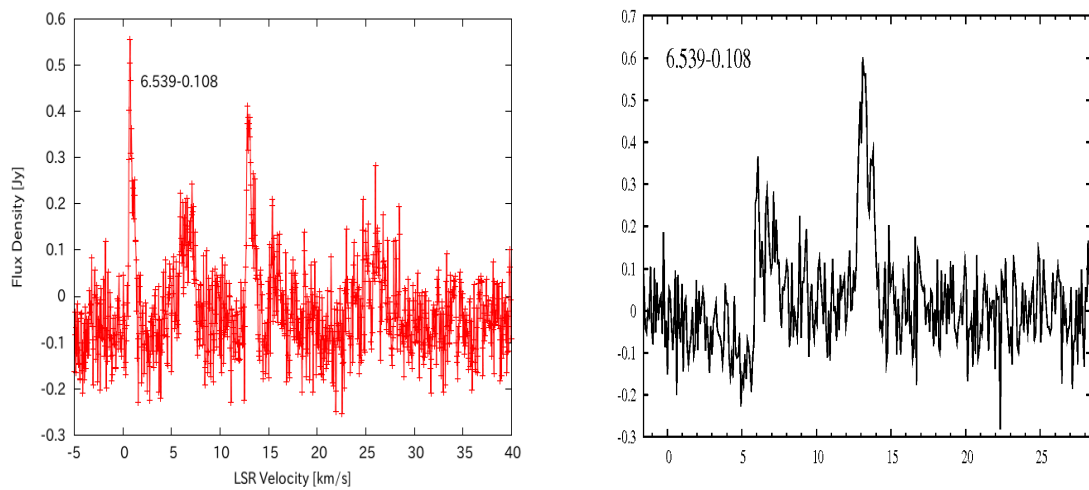


図 4-1 天体 6.539-0.108 左：本研究で得たプロファイル
右：母体カタログのプロファイル

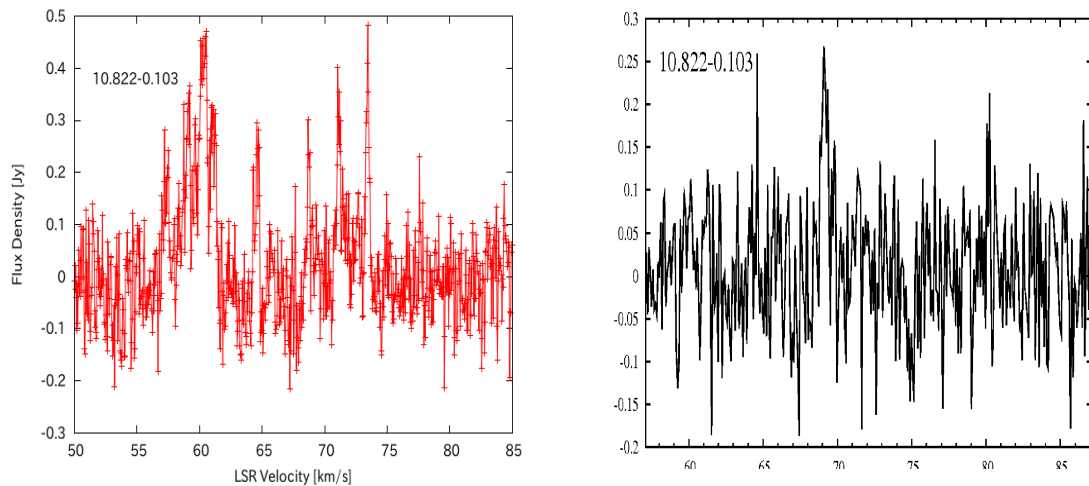


図 4-2 天体 10.822-0.103 左：本研究で得たプロファイル
右：母体カタログのプロファイル

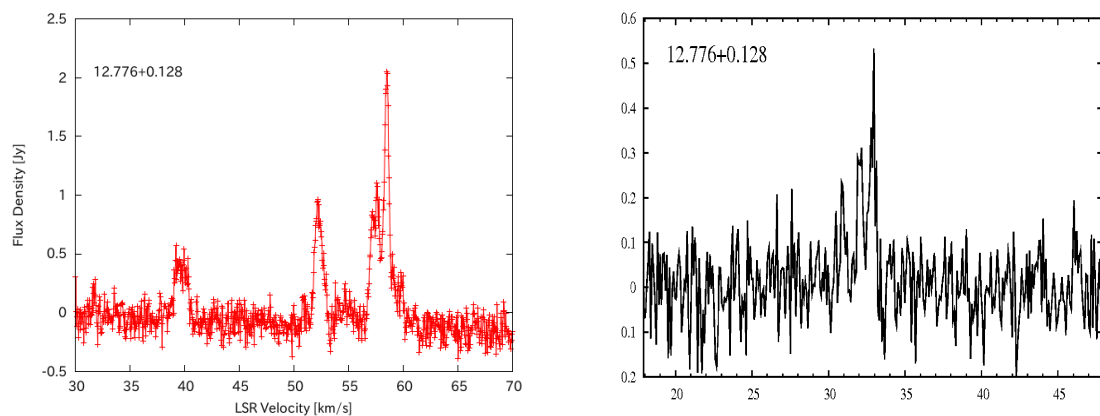


図 4-3 天体 12.776+0.128 左：本研究で得たプロフィール
右：母体カタログのプロファイル

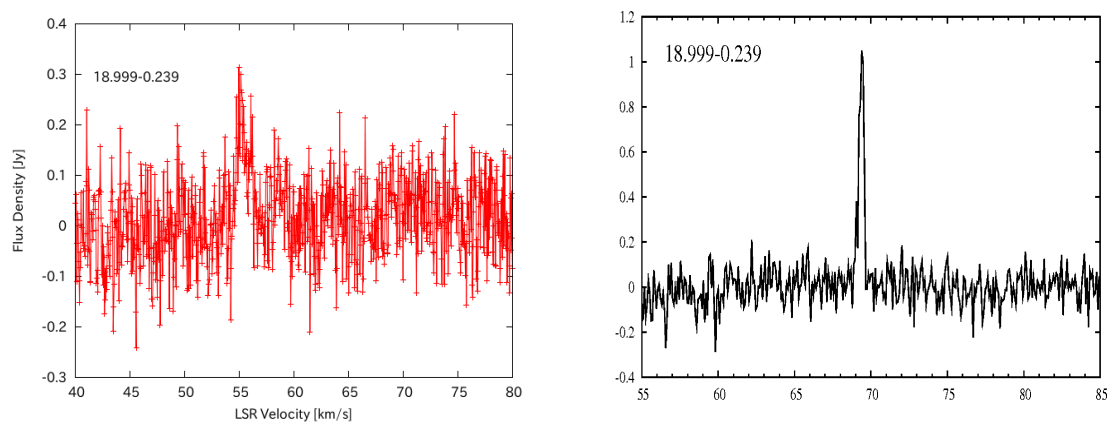


図 4-4 天体 18.999-0.239 左：本研究で得たプロフィール
右：母体カタログのプロファイル

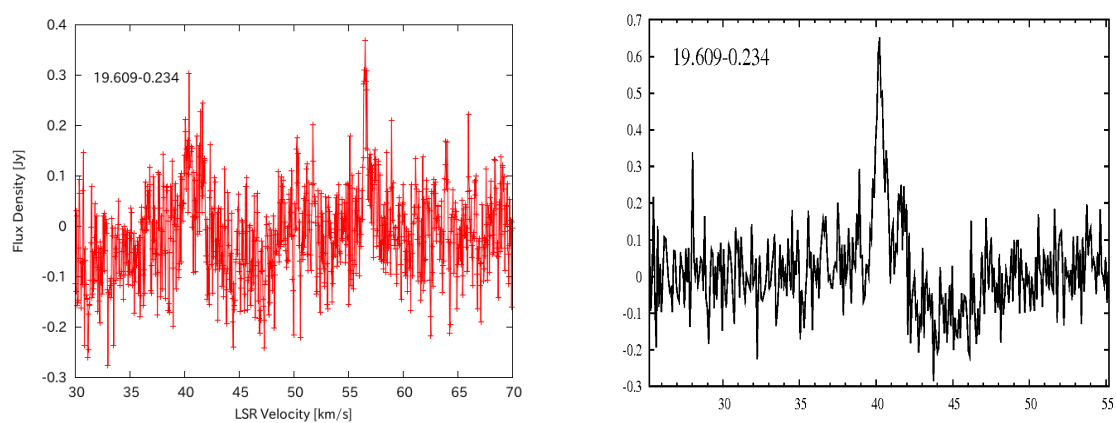


図 4-5 天体 19.609-0.234 左：本研究で得たプロフィール
右：母体カタログのプロファイル

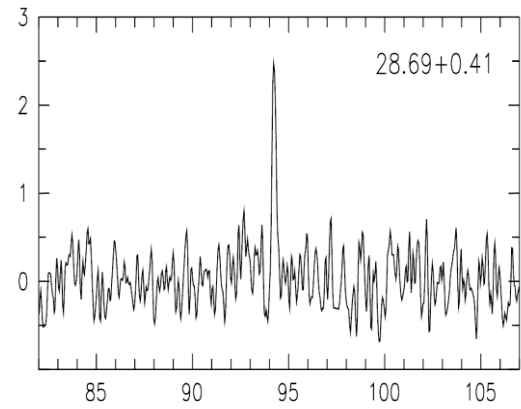
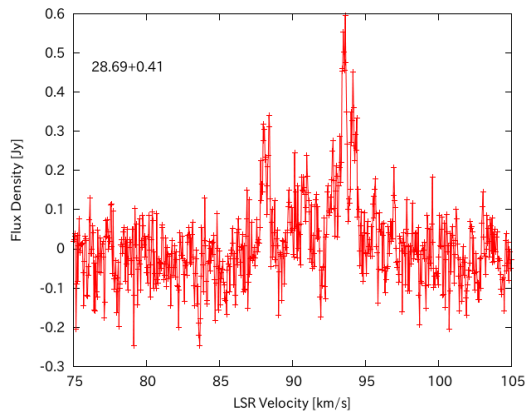


図 4-6 天体 28.69+0.41 左：本研究で得たプロファイル
右：母体カタログのプロファイル

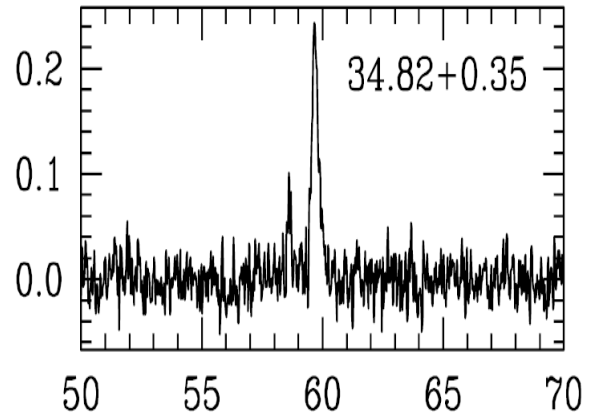
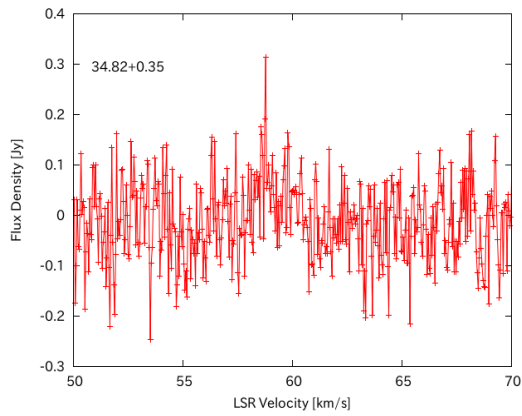


図 4-7 天体 34.82+0.35 左：本研究で得たプロファイル
右：母体カタログのプロファイル

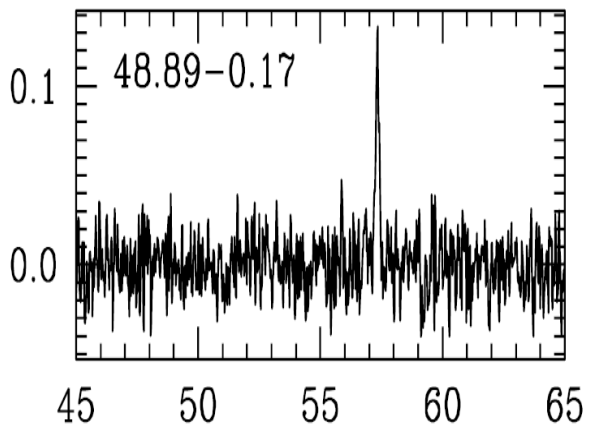
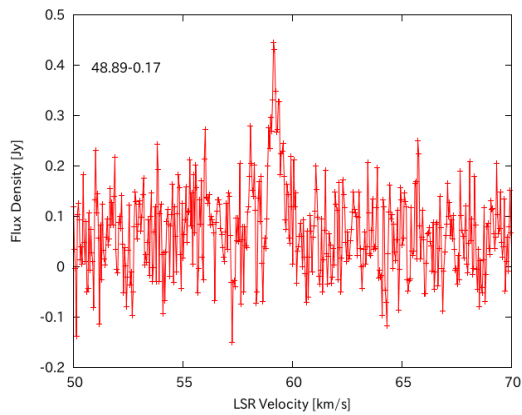


図 4-8 天体 48.89-0.17 左：本研究で得たプロファイル
右：母体カタログのプロファイル

4.2 他天体の空間的混入について

4.2.1 ビームサイズ

アンテナは電波が到来する方向により感度が異なる。一般に、アンテナパターンは感度が最大になる方向を含む感度の広がりをも主ビームもしくは、主ローブ、その周囲のより感度の低い広がりをもサイドローブと呼ぶ。さらにアンテナは主ビームから大きく離れたところ方向にも多少の感度がある。

主ビームの指向性の鋭さは、単一鏡観測の場合は角度分解能に相当する。その指標として主ビームの感度が半分になるまでの角度の広がり θ を使い

$$\theta_{HPBW} = K \frac{\lambda}{D}$$

と表す。ここでは、 λ は観測波長（今回の場合は 6.7GHz）、 D はアンテナの開口直径、 K は主ビームによる関数である。もしも、主ビームの形がガウス関数に近い場合は、1 程度の値になる。今回は、 $K=1.2$ として計算した。今回使用した日立アンテナ、母体カタログにて使用された Alecibo, Parkes, Torun のビームサイズを表にまとめる。

観測局	ビームサイズ
日立	4.6'
Arecibo	0.56'
Parkes	2.7'
Torun	5.4'

表 4-1：主な観測局のビームサイズ

4.2.2 離角

他天体の混入を調べるために離角と呼ばれる概念を導入する。離角というのは、地球から見て 2 つの天体の天球上の隔たりを表したものである。この概念を、新たな速度成分が見えた 8 天体に対して導入した。2 つの天体の銀径を l_1, l_2 、銀緯を b_1, b_2 、とするとこのように求めることができる

$$\text{離角} = \sqrt{(l_2 - l_1)^2 + (b_2 - b_1)^2}$$

4.2.3 他天体の空間的混入について

アンテナのビームサイズと離角を用いて、他天体の混入がないか考察する。ビームサイズの大きさと、対象天体に対する離角を比べ、ビームサイズ > 離角であれば他天体の映り込みは少ないと考えられる。新たな速度成分が見えた 8 天体

各々に対して、1 番近くに存在している天体を対象に計算した。その結果が表である。

天体名	銀径 deg	銀緯 deg	離角 arcmin
06.539-0.108	6.53932	-0.10845	5.76
06.588-0.108	6.58775	-0.19194	
10.8222-0.102	10.82225	-0.10302	13.3
10.886+0.123	10.88565	0.12278	
12.776+0.128	12.77619	0.12812	19.2
12.681-0.182	12.68061	-0.18231	
18.999-0.239	18.99933	-0.2387	12
19.009-0.029	19.00857	-0.02931	
19.609-0.234	19.60894	-0.2343	6.6
19.612-0.234	19.61208	-0.11976	
28.69+0.41	28.69146	0.41116	7.8
28.53+0.12	28.80964	0.36021	
34.82+0.35	34.82056	0.35389	12.3
34.74-0.09	35.02474	0.34969	
48.89-0.17	48.89167	-0.17445	6.4
48.90-0.27	48.90218	-0.27344	

表 4-2：新たな速度成分の見えた天体とその近くの天体の離角

結果をみて分かるように、日立アンテナのビームサイズは 4.6' であるので、8 天体すべてにおいてビームサイズ<離角であった。このことより、新たに速度成分が見えた 8 天体は新たに見えた成分においては他天体が写り込んでいる可能性は低いと考えられる。したがって、これらの天体は長時間データを積分することにより見えた新たな速度成分であると考えられる。

5. まとめ

2013 年茨城局日立アンテナにおいて、6.7GHz メタノールメーザーの大規模観測が行われた。そのデータを解析し、1 年分のデータを各天体において平均化したプロファイルを作成しカタログにした。その結果、全 431 天体のうち、377 天体のプロファイルを作成し、8 天体の新たな速度成分の発見をした。12 天体においてはノイズがレベルよりも有意に高いレベルの信号を検出できなかった。42 天体においてはアンテナのサイドローブに他の天体が混入してしまい空間的に分離できなかった。また、29 天体においては、ピーク強度が 0.5[Jy]程度の非常に強度の弱い天体であった。このような天体においては、これから強度変動が強くみられる可能性があるため、これからも観測を続けていく必要があるだろう。

参考文献

- J.A.Green et al. , 2010, MNRAS, 409, 913
J.A.Green et al. , 2012, MNRAS, 420, 3108
Y. Xu et al. , 2009, A&A, 507, 1117
Y. Xu et al. , 2008, A&A, 485, 729
A. J. Walsh, 1997, MNRAS, 291, 261
J. L. Caswell et al. , 1995, MNRAS, 272, 96
J. L. Caswell et al., 2012, MNRAS, 404, 1029
J. D. Pandian et al., 2007, APJ, 656, 255
J. D. Pandian et al., 2011, APJ, 730, 55
M. Szymczak et al. , 2000, A&A, 143, 269
M. Szymczak et al., 2002, A&A, 392, 277
杉山孝一郎, 元木業人, 藤沢健太, 他 山口大学研究グループ, 茨城 32m 電波望遠鏡を用いた 6.7GHz メタノールメーザーの大規模モニター観測
杉山孝一郎, 元木業人, 藤沢健太, 他 山口大学研究グループ, 茨城 32m 電波望遠鏡を用いた 6.7GHz メタノールメーザーの大規模モニター観測～簡易結果報告～
赤羽賢司, 海部宣男, 田原博人, 宇宙電波天文学, 共立出版社, 1988
福井康雄, 犬塚修一郎, 大西利和, 中井直正, 舞原俊憲, 水野亮 編, シリーズ現代の天文学.6 星間物質と星形成, 日本評論社, 2008
中井直正, 坪井昌人, 福井康雄 編, シリーズ現代の天文学.6 宇宙観測Ⅱ, 日本評論社, 2009
堀源一郎, 日江井栄一郎, 若生康二郎 編, 天文の辞典, 朝倉書店, 1995
澤田昭浩, 2005, 平成 17 年度山口大学大学院理工学研究科物理・情報科学専攻, 修士論文
杉山孝一郎, 2007, 平成 19 年度山口大学大学院理工学研究科物理・情報科学専攻, 修士論文