

平成 27 年度
卒業論文

6.7GHz メタノールレーザーの強度変動の周期解析に用いた Lomb-Scargle 法の精度検証

茨城大学理学部理学科物理学コース
12s2001n
石井 啓太

概要

大質量星の形成段階における進化過程を詳細に観測できるプローブとして 6.7GHz メタノールメーザーに着目している。このメーザーの特徴として、単調増減や突発的、周期的など様々な傾向に分類される強度変動現象が挙げられるが、これを多数天体に対し、観測研究を行うことで、励起源となりうる大質量（原始）星本体の光度変動現象を、その出現時期と共に明らかにできることが期待される。そこで、茨城大学では、32 m 電波望遠鏡を用いて、461 天体という多数天体を 2012 年 12 月 30 日から継続的にモニターしている。その中で、特に周期的な強度変動を示す天体に着目した。現在、茨城大学では周期解析法として離散的で不等間隔なデータに適応可能な Lomb-Scargle (L-S) 法を採用（2015 年度修士課程 2 年安井氏のプログラム使用）している。本研究では、461 天体もの多数天体を取り扱っているため、上記 L-S 法により、強度変動の周期性をどの程度の精度で検出できるかの検証を行った。

目次

1	イントロダクション	1
1.1	大質量星	1
1.2	メーザー	2
1.3	研究目的	2
2	Lomb-Scargle 法	2
2.1	Lomb-Scargle 法	2
2.2	誤警報確率	2
3	解析プログラム	3
3.1	日立 32m 電波望遠鏡によるモニター観測	3
4	結果・考察	3
4.1	選出条件	3
4.2	結果	3
4.3	Lomb-Scargle 法で得られた周期と強度変動プロットを目視した時に見える周期が一致した天体	5
4.4	Lomb-Scargle 法で得られた周期と強度変動プロットを目視した時に見える周期が一致しなかった天体	47
5	まとめ	61
6	謝辞	62
付録 A	周期性のある天体の周期分布	62
付録 B	解析天体リスト	63

1 イントロダクション

1.1 大質量星

星形成領域や星形成過程の解明は、宇宙や銀河の成り立ちを研究することに繋がるため、天文学では重要なテーマの一つと言われている。

大質量星（太陽の約8倍以上の質量をもつ星）は、宇宙の進化において最も重要な役割を果たす天体といえる。大質量星が死ぬ間際に起こす超新星爆発によって様々な物質が宇宙空間にばらまかれ新たな星を形成する材料となったり、衝撃波によって星形成が促されるなど周囲の環境へ影響を及ぼすからである。加えて、爆発のあとには残骸として中性子星、時にはブラックホールが現れたりする。

しかし現在、大質量星の形成過程は完全に解明されていない。その理由として、

- ・大質量星は太陽と同じくらいの質量の星に比べて数をはるかに少ないこと
- ・寿命が約 10^7 年以下で進化のタイムスケールも非常に短いこと
- ・観測領域が濃いガスやダストに覆われているため可視光での観測が困難であること

などが挙げられる。

1.2.1 メーザー

ガス密度の高い地球の大気のようなところでは粒子同士の衝突が支配的（熱平衡状態）であり、2つの準位間の粒子数（ n_1, n_2 ）の比は、ボルツマン分布で、次のように与えられる。ここで、準位1と準位2では、準位1の方がより低いエネルギーレベルである。

$$\frac{n_1}{n_2} = \exp\left(\frac{-h\nu}{kT}\right)$$

ここで、 g_1, g_2 は統計的重み、 h はプランク関数、 ν は周波数、 k はボルツマン定数、 T は励起温度である。上の式は必ず1より小さくなり、統計的重み当たりの粒子数は下のエネルギー準位の方が多くなる。しかし、宇宙空間のような粒子数密度の低い場所では粒子同士の衝突よりも、自発放射や誘導放射が支配的な場合

がある。このときは、必ずしも $\frac{n_2}{g_2} < \frac{n_1}{g_1}$ とはならず、上のエネルギー準位の方に

より多く分布する場合がある。このような状態は反転分布と呼ばれる。この状態から、誘導放射によって低い準位へカスケード的に遷移することによって起こる強い放射（輝線）のことを、メーザーと呼ぶ。原理的には光のレーザーと同じである。

メーザーをおこす分子種としては、OH、H₂O、CH₃OH などがある。

1.2.2 6.7GHz メタノールメーザー

メタノールメーザーのうち、静止周波数が

6668.5192 ± 0.0008 MHz (Breckenridge & Kukolich 1995) であるものを

6.7GHz メタノールメーザーと呼ぶ。この6.7GHz メタノールメーザーは、大質量星形成領域にのみ付随し、全メーザーの中で2番目に明るい。加えて、このメーザーを起こしている分子ガス領域のサイズが数天文単位と非常にコンパクトなため、VLBIなどの高い空間分解能観測により、大質量星形成領域の空間分布を観測できる。そのため大質量星の形成過程を解明するための有力なツールとされている。

過去の観測により、6.7GHz メタノールメーザーの中には強度変動を示す天体が検出され、それが周期性を持つものも発見されている (Goedhart et al. 2004)。6.7GHz メタノールメーザーの周期的な強度変動について、その周期と大質量星の光度変動の周期には相関関係があると考えられているため、その詳細を調べることは大質量星形成領域の詳細を知る手掛かりとなる。しかし、未だ大質量星形成領域の詳細を知るまでには至っていない。

表 1 既知の周期的な強度変動を示す 6.7GHz メタノールレーザー

天体名	周期[day]	参考文献
G 006.18-00.35	180.5	Sugiyama et al. 2015
G 009.62+00.19	243	Goedhart et al. 2014
G 012.68-00.18	307	Goedhart et al. 2004
G 012.88+00.48	29.5	Goedhart et al. 2009
G 014.23-00.50	23.7	Sugiyama et al. 2015
G 022.36+00.06	179.3	Szymczak et al. 2015, 2011
G 024.14+00.00	188.9	Sugiyama et al. 2015
G 025.41+00.10	244.7	Szymczak et al. 2015
G 26.52-00.26	172.2	Sugiyama et al. 2015
G 28.02-00.44	111.5	Sugiyama et al. 2015
G 030.40-00.29	220.1	Sugiyama et al. 2015
G 033.64-00.21	200.8	Sugiyama et al. 2015
G 036.70+00.09	53.4	Sugiyama et al. 2015
G 037.47-00.11	67.9	Sugiyama et al. 2015
G 037.55+00.20	237	Araya et al. 2010
G 045.47+00.13	195.6	Szymczak et al. 2015
G 073.06+01.80	159	Szymczak et al. 2015
G 075.76+00.34	119.9	Szymczak et al. 2015
G 108.75-00.96	164.2	Sugiyama et al. 2015
G 111.53+00.76	171.9	Sugiyama et al. 2015
G 174.19-00.09	45.5	Sugiyama et al. 2015
G 188.94+00.88	416	Goedhart et al. 2004
G 196.45+01.67	668	Goedhart et al. 2004
G 328.23-00.54	220.5	Goedhart et al. 2014
G 331.13-00.24	509	Goedhart et al. 2014
G 338.93-00.06	132.8	Goedhart et al. 2014
G 339.62-00.12	200.3	Goedhart et al. 2014
G 358.46-00.39	220	Maswanganye et al. 2015
IRS22198+6336	34.6	Fujisawa et al. 2014

1.3 研究目的

本研究の目的は、日立 32m 電波望遠鏡によるモニター観測で得られた 6.7GHz メタノールレーザーの強度変動のデータから、周期的な変動を示す天体を定量的に求める方法の精度を検証することである。これまで、周期性の有無の判定や周期の導出は、モニター観測で得られたデータを目視して行われるなど定性的な方法であった。今回我々は、それらを定量的に判断する方法を採用し、これまでの方法と比較することで、その精度を検証する。

2 Lomb-Scargle 法

2.1 Lomb-Scargle 法

本研究では、モニター観測によって得られた各日の 6.7GHz メタノールレーザーの強度変動を時系列データとして扱う。ここでいう強度とは、正確に言えばフラックス密度[Jy]である。

信号処理などでは、連続信号から一定の間隔でサンプリングした離散信号を扱ったりするが、天文の分野では、天候や巨大な観測機器の問題から等間隔の時間でデータを取るのには現実的ではない。今回扱うデータも不等間隔に得られたデータである。今回使用する Lomb-Scargle 法は、離散的で不等間隔なデータにも対応可能であり、等間隔で得られたデータと等価のピリオドグラムを求めることができる。

2.2 誤警報確率(false-alarm-probability)

今回使用した解析プログラムでは、その周期にどれだけ有意性があるかを示す指標として誤警報確率(false-alarm-probability)を採用している。これは観測値が雑音のみであるにも関わらず、周期的信号があると誤って判断してしまう確率である。この確率を α と置くと、

$$\alpha = 1 - \{1 - \exp(-z)\}^M$$

と書ける。ここで z はピリオドグラム の値、 M は計算に用いる(=出力される)周波数の数である。この誤警報確率が低いほど、解析によって導出された周期は信頼性が高いと言える。例えば、誤警報確率 $\alpha=0.1$ だった場合、導出された周期は 90%信頼できる、ということである。

3 解析プログラム

正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムをコンピュータを用いて計算する手法について、本研究で用いた正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムを計算するための C 言語プログラム `lsperiodogram` は、茨城大学大学院理工学研究科の安井氏が作成したものを使用させて頂いた(付録)。正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムの計算に当たる C 言語プログラムの関数は `lsperiodogram` 中の関数 `period` である。

3.1 日立 32m 電波望遠鏡によるモニター観測

今回計算に用いたデータは、2012 年 12 月 30 日から現在まで、6.7GHz メタノールメーザーを日立 32m 電波望遠鏡で 461 天体に対してモニター観測して得られたものである。モニター観測とは、同じ天体に対して何度も観測を行うことである。観測の期間は主に 3 つに分かれており、第 1 期が 2012 年 12 月 30 日-2014 年 1 月 10 日、第 2 期が 2014 年 5 月 7 日-2015 年 8 月 24 日、第 3 期が 2015 年 9 月 18 日-である。観測対象の 461 天体は赤緯-30 度以北のもので、9-10 日に 1 度の頻度で観測を行った。しかし、第 3 期では、より短い周期の強度変動を観測するため、対象の天体を 143 に絞り、観測頻度も 4-5 日に 1 度となっている。また一部ではあるが、毎日観測している天体もある。積分時間は基本的には 300 秒であるが、一部の天体で 60 秒のものがある。以下にモニター観測のパラメータを示す。

表 2 概要

望遠鏡	日立 32m 電波望遠鏡
期間	第 1 期：2012/12/30 - 2014/1/10 第 2 期：2014/5/7 - 2015/8/24 第 3 期：2015/9/18 -
観測頻度	第 1,2 期：1 回/9-10 日 第 3 期：1 回/4-5 日(一部：1 回/1 日)
積分時間	300[s] (一部：60[s])
検出感度(3 σ)	~0.9[Jy]
観測周波数帯	6664 - 6672[MHz]
ビームサイズ	4.6[arcmin]
速度分解能	0.044[km/s]

4 結果・考察

4.1 選出条件

日立 32m 電波望遠鏡でモニター観測されている 461 天体をプログラムを用いて解析したが、そのうち下で述べる 2 つの条件を満たす天体のみを周期変動天体と定め、今回の研究対象とした。解析を行ったデータは 2012 年 12 月 30 日から 2015 年 12 月 17 日までのものである。

- ① 正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムによって得られた最大値が、誤警報確率 ≤ 0.001 であること。

② ①で得られた強度変動の周期が、観測期間の 1/3 より短いこと。
 二つの条件について、後に載せてある正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムは、各視線速度成分ごとのデータが連続的であるように描いているが、それは実際は各周波数帯の離散的なデータを線でむすぶことによって成り立っている。つまり、解析の誤差により本来の周期が、得られた最大値の点の隣の点である可能性がある。今回はそれを踏まえて、条件①と最大値の隣の点の周期が観測期間の 1/3 より短いものを周期変動天体と定めている。

4.2 結果

今回の研究で上の条件を満たした天体は 43 個であった。そのうち新検出された天体が 19 個、先行研究で得られていた周期と今回の解析で得られた周期が誤差の範囲で一致した天体は 19 個、一致しなかった天体が 1 個あった。加えて、正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムで得られた周期と強度変動プロットから目視で推測される周期が異なる天体が 4 個あった。今回の研究の目的は Lomb-Scargle 法の精度を検証することなので、新検出された天体についてはここでは詳しく考察しない。

表 3 新検出の周期変動天体

天体名	視線速度 V_{LSR} [km/s]	周期 [day]	観測期間 [day]
G 0.167-04	13.69	45.0	1081
G 0.315-02	18.27	239.3	1077
G 9.215-02	45.53	44.5	935
G 12.18-01	17.33	195.3	1074
G 12.19-00	50.91	124.7	935
G 12.20-01	17.33	195.3	1074
G 16.83+00	64.02	186.7	934
	64.93	186.7	934
G 26.59-00	18.38	70.2	947
G 28.28-03	41.46	233.9	935
G 32.03+00	92.73	58.0	1073
	104.29	58.0	1073
	105.03	58.0	1073
G 33.40+00	98.61	31.6	1073
	99.05	31.6	1073
	99.47	31.6	1073
	104.21	31.6	1073
	104.88	31.6	1073
	105.25	31.6	1073
	107.60	31.6	1073
G 35.02+03	46.23	270.0	1072
G 35.79-01	61.50	33.2	1073
	62.00	33.2	1073
G 36.10+05	83.98	154.0	1074
G 37.54+02	84.54	237.6	1069
	84.92	237.6	1069
	87.39	237.6	1069
	87.84	237.6	1069
G 45.49+01	59.66	194.4	1069
G 73.04+18	-2.52	154.0	1078
	6.01	154.0	1078
G 352.6-10	5.86	210.5	947
G 358.9-00	-15.9	145.8	947

4.3 Lomb-Scargle 法で得られた周期と強度変動プロットを目視した時に見える周期が一致した天体

4.3.1 G 6.189-03

表 4 に G 6.189-03 の各視線速度成分の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムによって得られた最大値を持つ周波数の誤警報確率、周期を載せる。ただし、周期に関しては条件①、②を満たす成分のみ載せた。

図 1 はフレア期と静穏期のスペクトルである。赤線がフレア期、青線が静穏期である。図 2 には、G6.189-03 の正規化ピリオドグラムのスペクトルを示す。図 3 は、各速度成分の日ごとのフラックス密度の変化のグラフ（強度変動プロット）である。

表 4 G 6.189-03 の解析結果

視線速度[km/s]	誤警報確率	周期[day]
-37.18	0.000089	179.01
-36.20	0.000498	179.01
-35.69	0.000000	179.01
-34.48	0.001330	-
-34.12	0.694098	-
-32.68	0.028696	-
-32.12	0.301508	-
-31.57	0.206933	-
-31.32	0.415397	-
-30.17	0.599506	-
-28.57	0.000881	-
-26.49	0.755008	-

G 6.189-03 は 12 個の速度成分が同定されている。このうち 4 個の成分が、誤警報確率 ≤ 0.001 であった。

視線速度-28.57[km/s]の成分は導出周期が 716.0 日であった。観測期間が 1074 日なので、視線速度-28.57[km/s]の成分は条件②を満たさない。ただし、今後もモニター観測は続けられるため、観測期間が延びることにより条件②を満たすことになるかもしれない。

他 3 個の成分について、視線速度-37.2[km/s]、-36.2[km/s]、-35.7[km/s]の成分は導出周期が 179.0 日であり、隣り合う独立周期との差は+16.3 日、-13.8 日である。この隣り合う独立周期とは、正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムが最大値をとる周波数の両隣の周波数の逆数のことである。すなわち、導出周期の誤差とも解釈できる。そして、先行研究で得られていた周期は 180.5 日なので、これは導出周期の誤差の範囲内と言えるだろう。図 4 のグラフを見ても周期はおよそ 179.0 日と読み取れると思われ、この天体に対しての Lomb-Scargle 法の適用は狙い通りの結果を導けたと思われる。

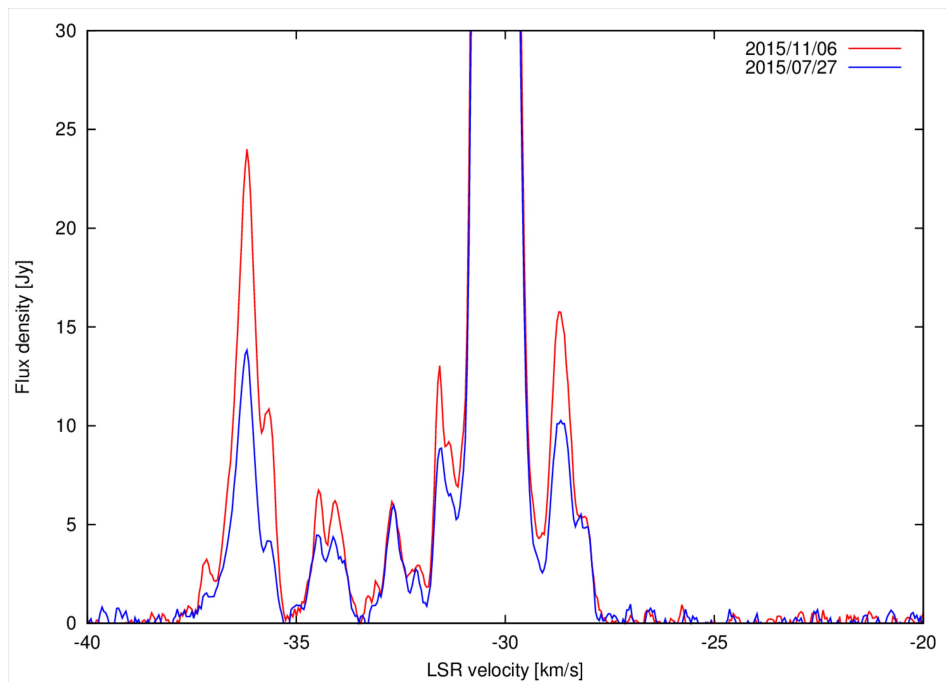


図1 G6.189-03 のスペクトル(赤がフレア期、青が静穏期)

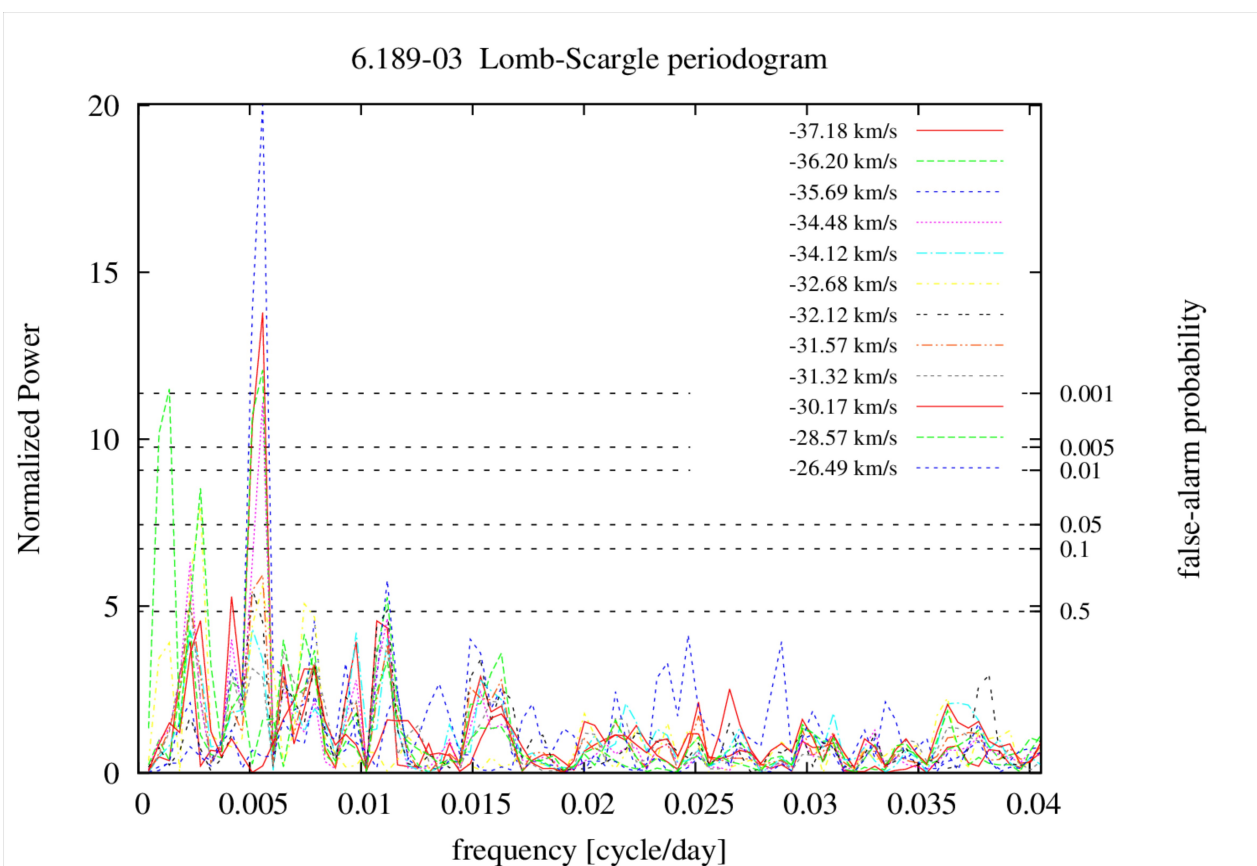


図2 G 6.189-03 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル

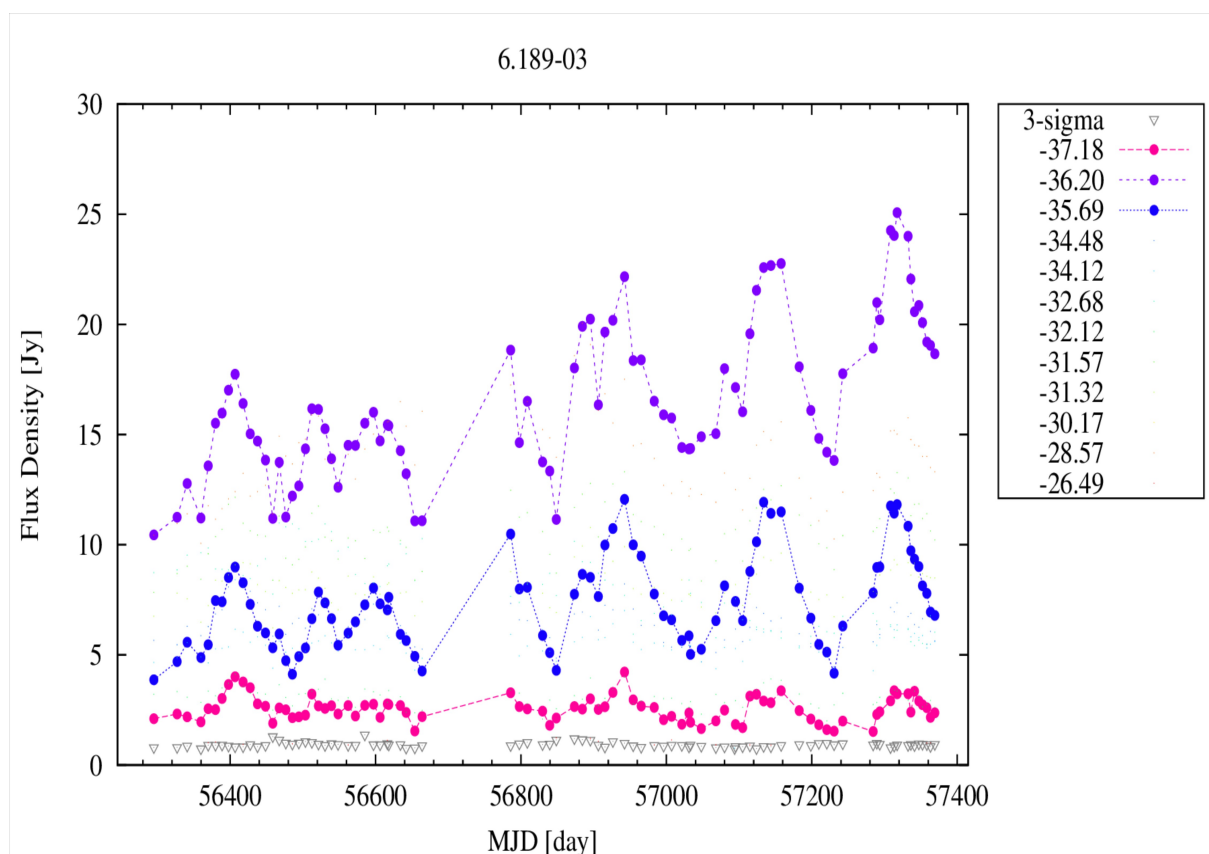


図3 G 6.189-03 の強度変動プロット

4.3.2 G 9.621+01

G 9.621+01 は 16 個の速度成分が同定されている。このうち 15 個の成分が、誤警報確率 ≤ 0.001 であった。

視線速度 $-3.04[\text{km/s}]$ の成分は導出周期が 1082.0 日、視線速度 $-0.21[\text{km/s}]$ の成分は 432.8 日、 $5.39[\text{km/s}]$ 、 $6.51[\text{km/s}]$ の成分は導出周期が 360.7 日であり、隣り合う独立周期との差は $+72.1$ 日、 -51.6 日である。観測期間が 1082 日なので、上記の 4 個の成分は条件②を満たさない。ただし、今後もモニター観測は続けられるため、観測期間が延びることにより条件②を満たすことになるかもしれない。

他 11 個の成分について、視線速度 $7.28[\text{km/s}]$ の成分は導出周期が 166.5 日であった。新検出の成分かもしれない。視線速度 $1.32[\text{km/s}]$ 、 $3.26[\text{km/s}]$ 、 $8.74[\text{km/s}]$ の成分は導出周期が 120.2 日、視線速度 $-1.86[\text{km/s}]$ 、 $-0.81[\text{km/s}]$ 、 $0.41[\text{km/s}]$ 、 $2.43[\text{km/s}]$ 、 $4.10[\text{km/s}]$ 、 $4.98[\text{km/s}]$ 、 $8.09[\text{km/s}]$ の成分は導出周期が 240.4 日であった。周期 240.4 日は単純に周期 120.2 日の 2 倍である。そして先行研究で得られていた周期は 243 日である。本来の周期が 120.2 日である可能性も否定できない。図 6 のグラフを見ても周期はおよそ 120.2 日と読み取れると思われ、この天体に対しての Lomb-Scargle 法の適用は良い結果を導いたと思われる。

表 5 G 9.621+01 の解析結果

視線速度[km/s]	誤警報確率	周期[day]
-5.46	0.703477	-
-3.04	0.000000	1082.0
-1.86	0.000000	240.4
-0.81	0.000000	240.4
-0.21	0.000010	432.4
0.41	0.000000	240.4
1.32	0.000000	120.2
2.43	0.000000	240.2
3.26	0.000000	120.2
4.10	0.000000	240.4
4.98	0.000000	240.4
5.39	0.000000	360.7
6.51	0.000000	360.7
7.28	0.000504	166.5
8.09	0.000000	240.4
8.74	0.000000	120.2

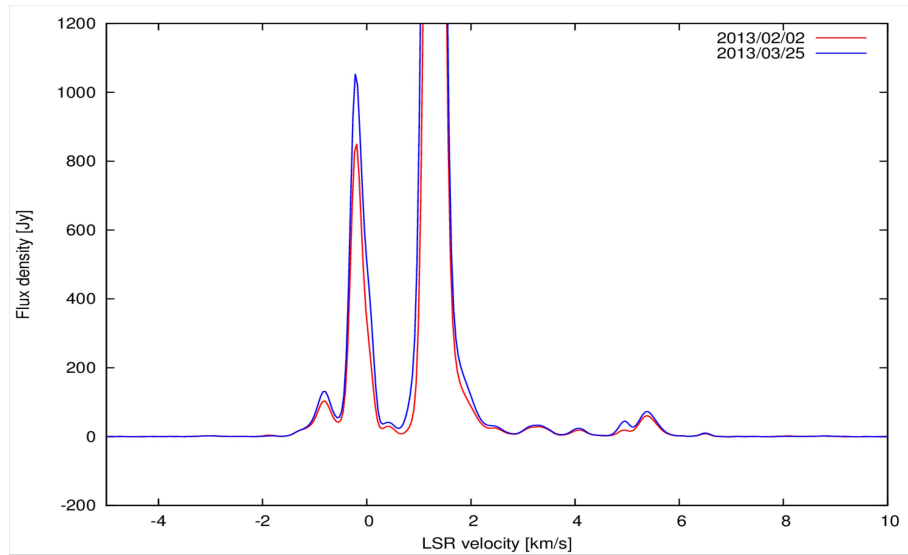


図 4 G 9.621 のスペクトル

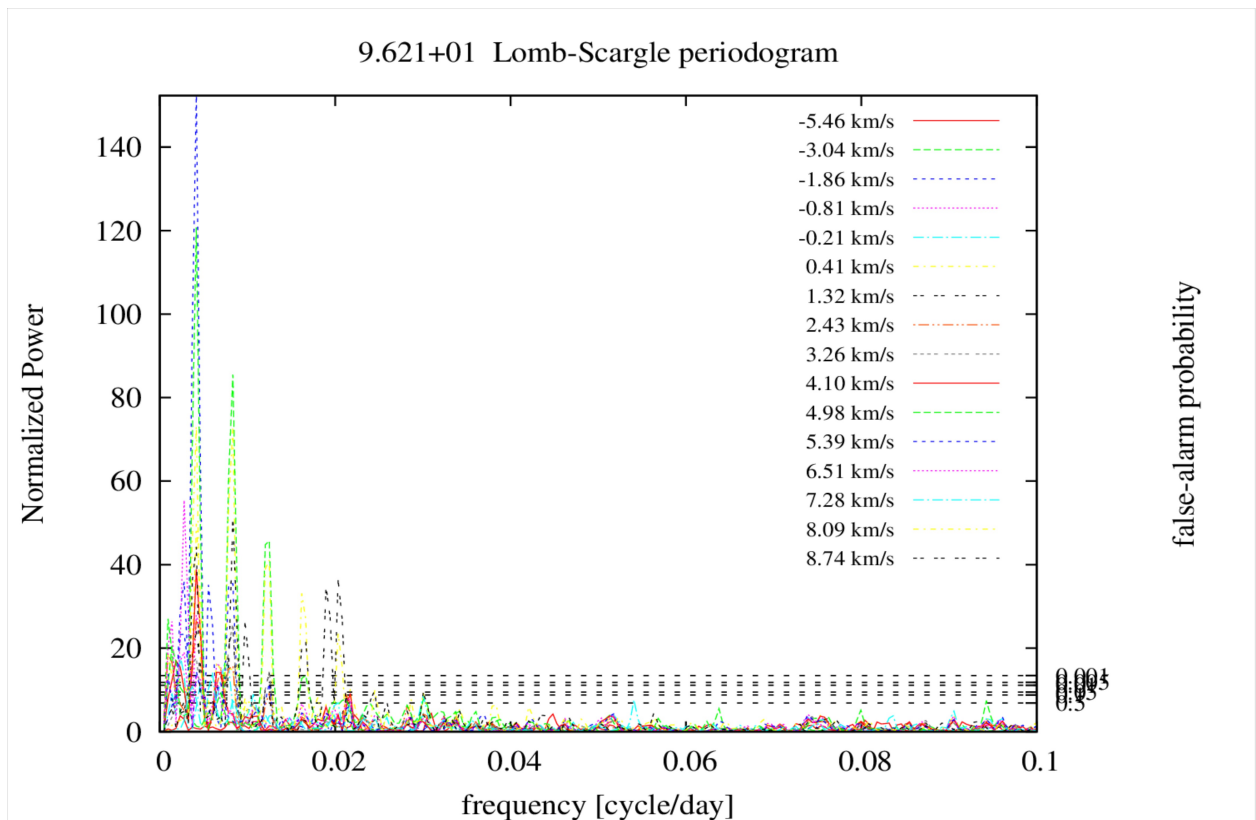


図5 G 9.621+01 の正規化 Lobb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル

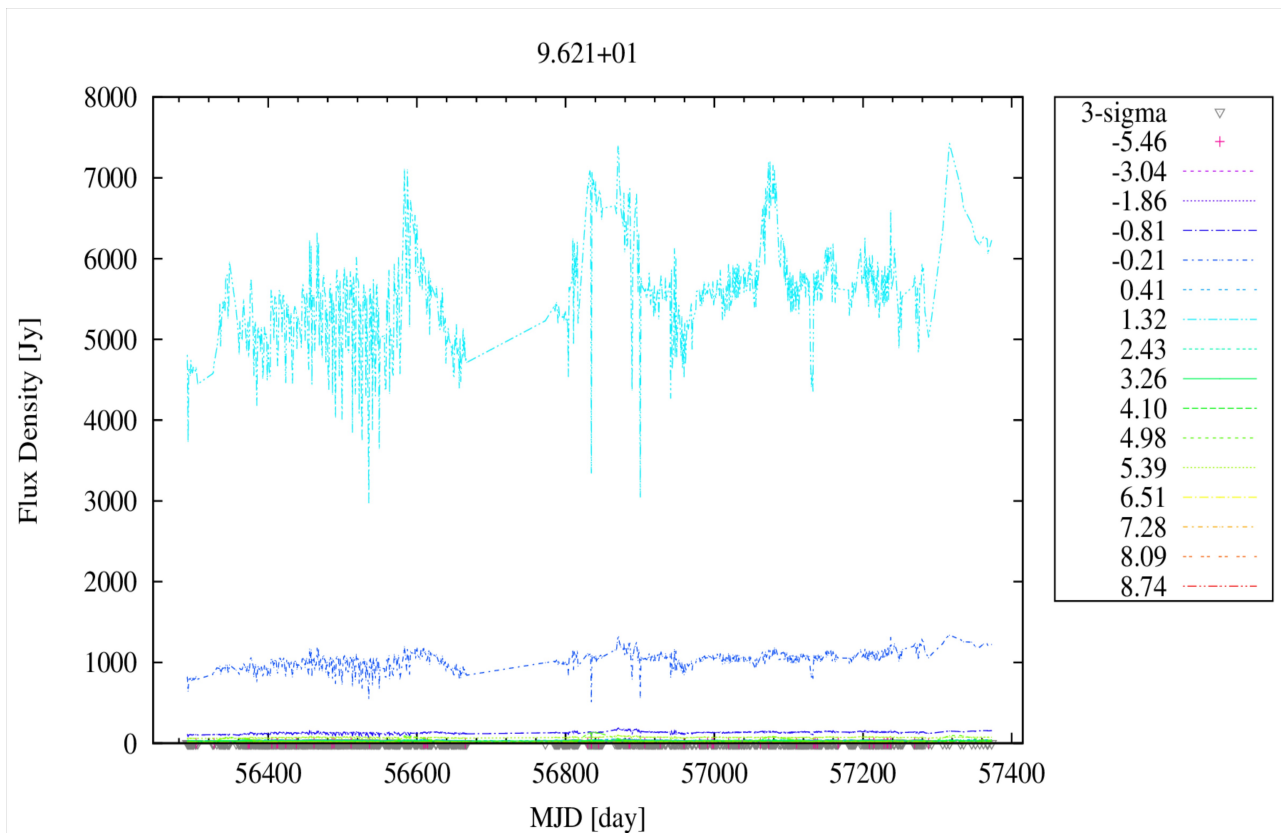


図 6-1 G 9.621+01 の強度変動プロット

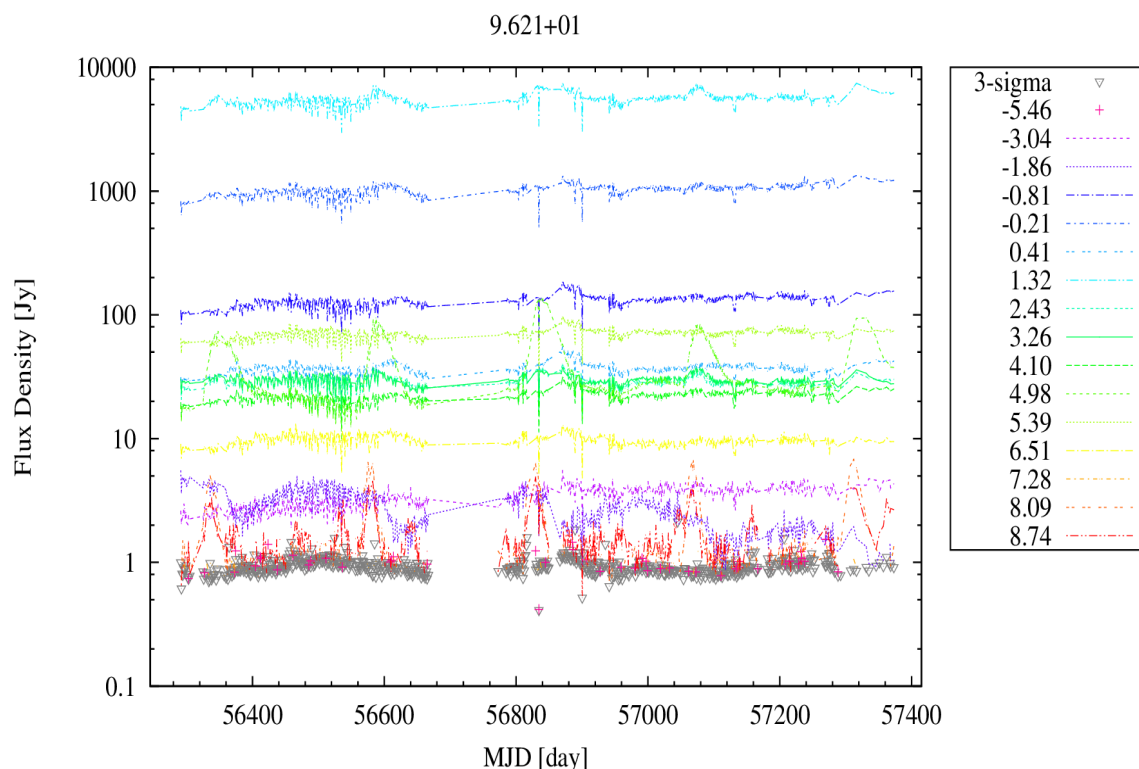


図 6-2 G 9.621+01 の強度変動プロット(log スケール)

4.3.3 G 12.68-01

G 12.68-01 は 10 個の速度成分が同定されている。すべての成分が、誤警報確率 ≤ 0.001 であった。

視線速度 51.08[km/s]、54.86[km/s]、55.47[km/s]、57.19[km/s]、57.58[km/s]、58.48[km/s]、59.86[km/s] の成分は導出周期が 1074.1 日、視線速度 52.14[km/s]、60.68[km/s] の成分は導出周期が 716.0 日であった。観測期間が 1074 日なので、上記の 9 個の成分は条件②を満たさない。ただし、今後もモニター観測は続けられるため、観測期間が延びることにより条件②を満たすことになるかもしれない。

他 1 個の成分について、視線速度 59.08[km/s] の成分は導出周期が 268.5 日であり、隣り合う独立周期との差は +38.4 日、-29.8 日である。先行研究で得られていた周期は 307 日なので、これはほぼ導出周期の誤差の範囲内と言えるだろう。図 9 のグラフを見ても周期はおよそ 268.5 日と読み取れると思われ、この天体に対しての Lomb-Scargle 法の適用は狙い通りの結果を導けたと思われる。

表 6 G 12.68-01 の解析結果

視線速度[km/s]	誤警報確率	周期[day]
51.08	0.000015	1074.1
52.14	0.000488	716.0
54.86	0.000000	1074.1
55.47	0.000000	1074.1
57.19	0.000000	1074.1
57.58	0.000000	1074.1
58.48	0.000000	1074.1
59.08	0.000853	268.5
59.86	0.000000	1074.1
60.68	0.000007	716.0

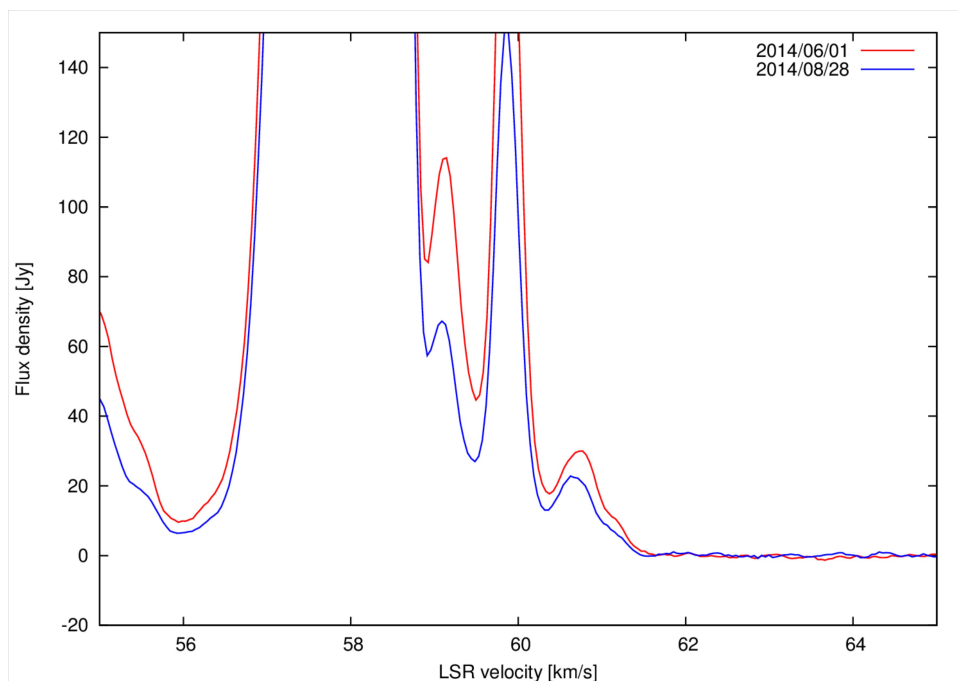


図 7 G 12.68-01 のスペクトル

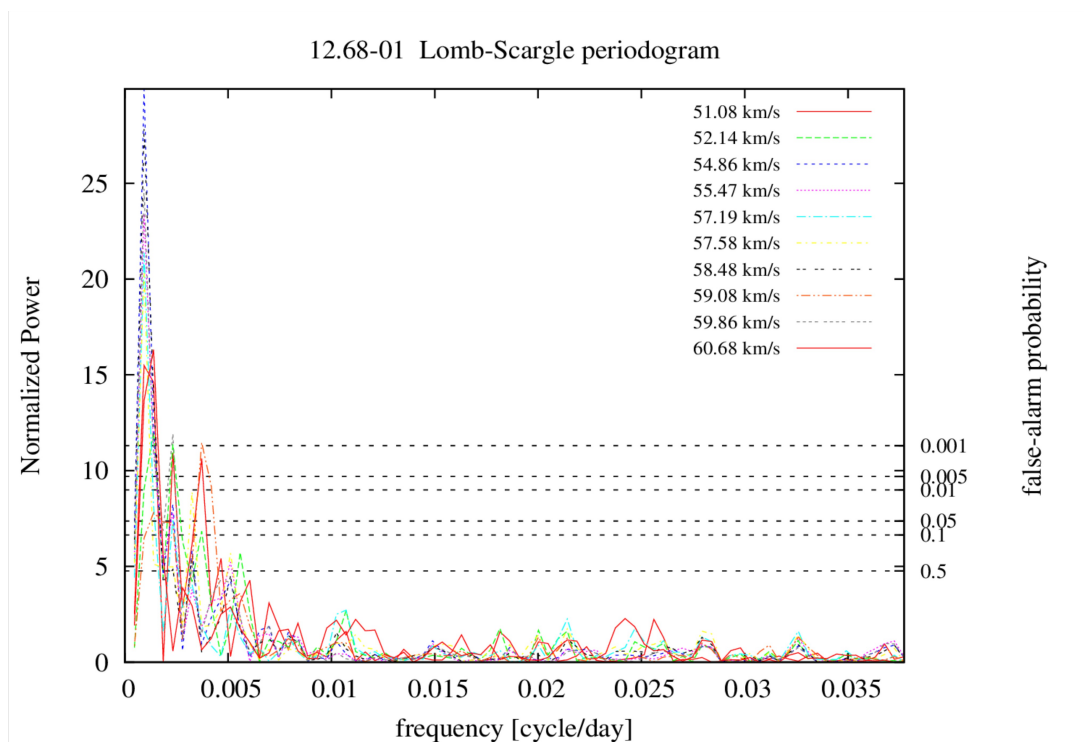


図 8 G 12.68-01 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラム のスペクトル

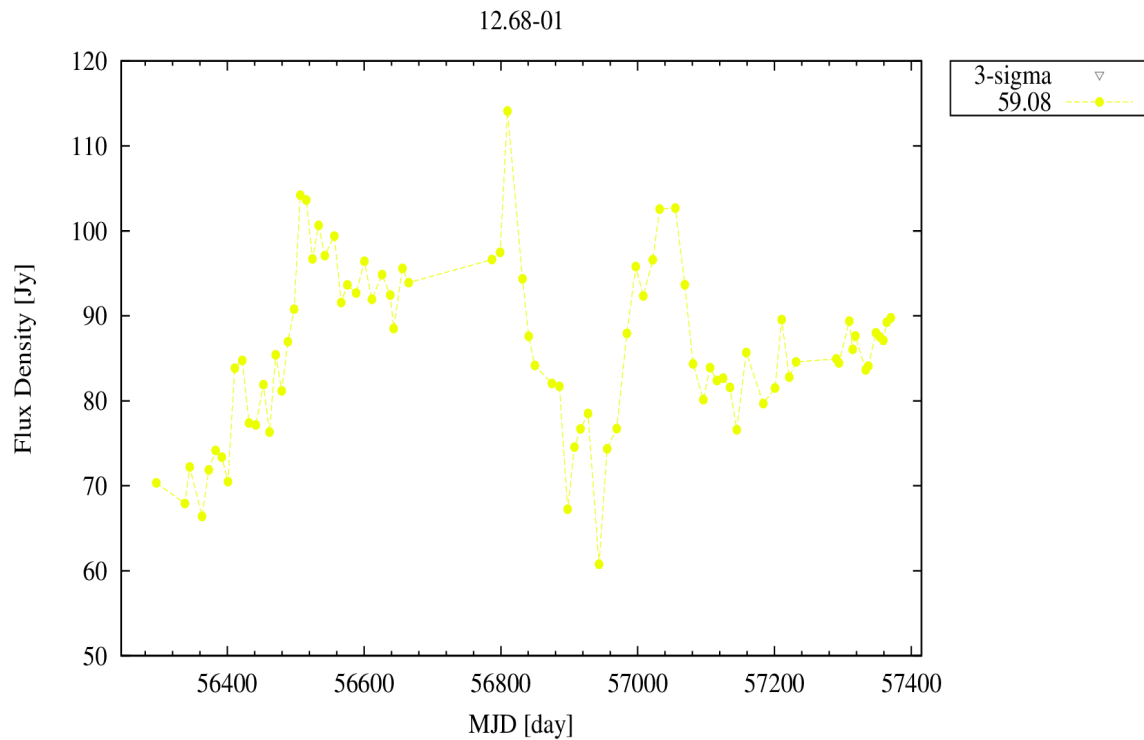


図 9 G 12.68-01 の強度変動プロット

4.3.4 G 12.88+04

G 12.88+04 は 11 個の速度成分が同定されている。このうち 8 個の成分が、誤警報確率 ≤ 0.001 であった。

視線速度 33.74[km/s]の成分は導出周期が 306.6 日であり、隣り合う独立周期との差は+51.1 日、-38.3 日である。観測期間が 1074 日なので、上記の 1 個の成分は条件②を満たさない。ただし、今後もモニター観測は続けられるため、観測期間が延びることにより条件②を満たすことになるかもしれない。

他 7 個の成分について、視線速度 29.59[km/s]、32.76[km/s]、34.72[km/s]、36.50[km/s]、38.16[km/s]、39.28[km/s]の成分は導出周期が 29.4 日であり、隣り合う独立周期との差は+0.4 日、-0.4 日である。先行研究で得られていた周期は 29.5 日なので、これは導出周期の誤差の範囲内と言えるだろう。図 12 のグラフを見ても周期はおよそ 29.4 日と読み取れると思われる。この天体に対しての Lomb-Scargle 法の適用は狙い通りの結果を導けたと思われる。

表 7 G12.88+04 の解析結果

視線速度[km/s]	誤警報確率	周期[day]
28.61	0.008290	-
29.21	0.002741	-
29.59	0.000643	29.4
29.97	0.172721	-
31.39	0.000021	29.4
32.76	0.000000	29.4
33.74	0.000611	306.6
34.72	0.000001	29.4
36.50	0.000000	29.4
38.16	0.000000	29.4
39.28	0.000002	29.4

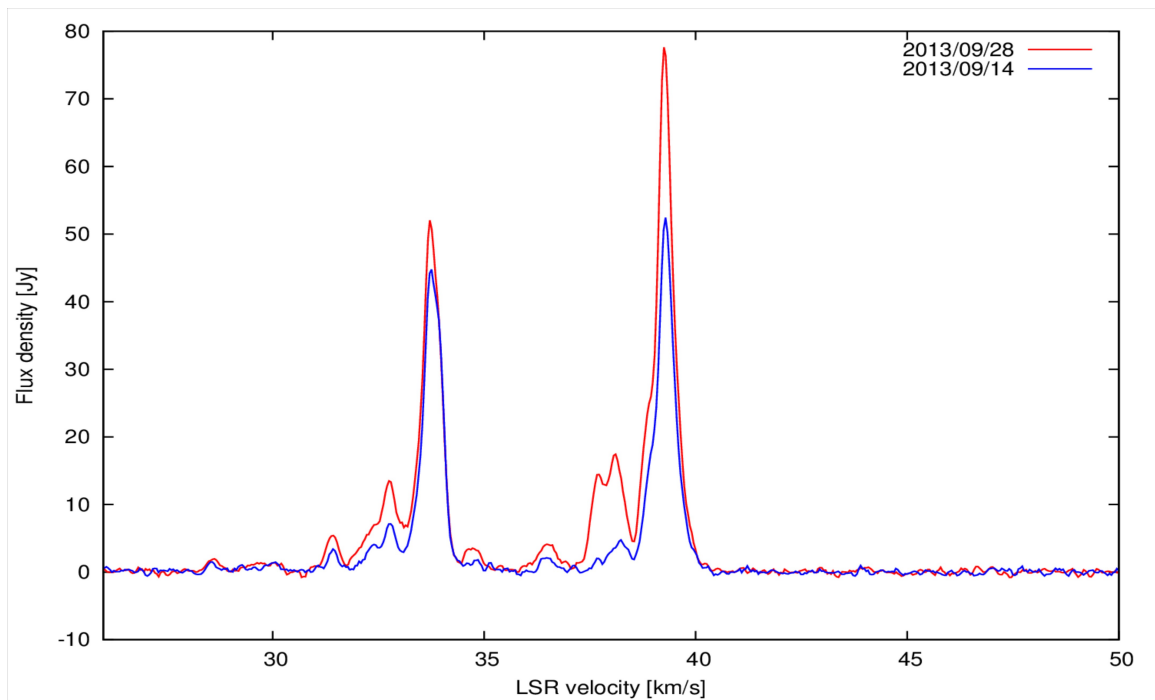


図 10 G 12.88+04 のスペクトル

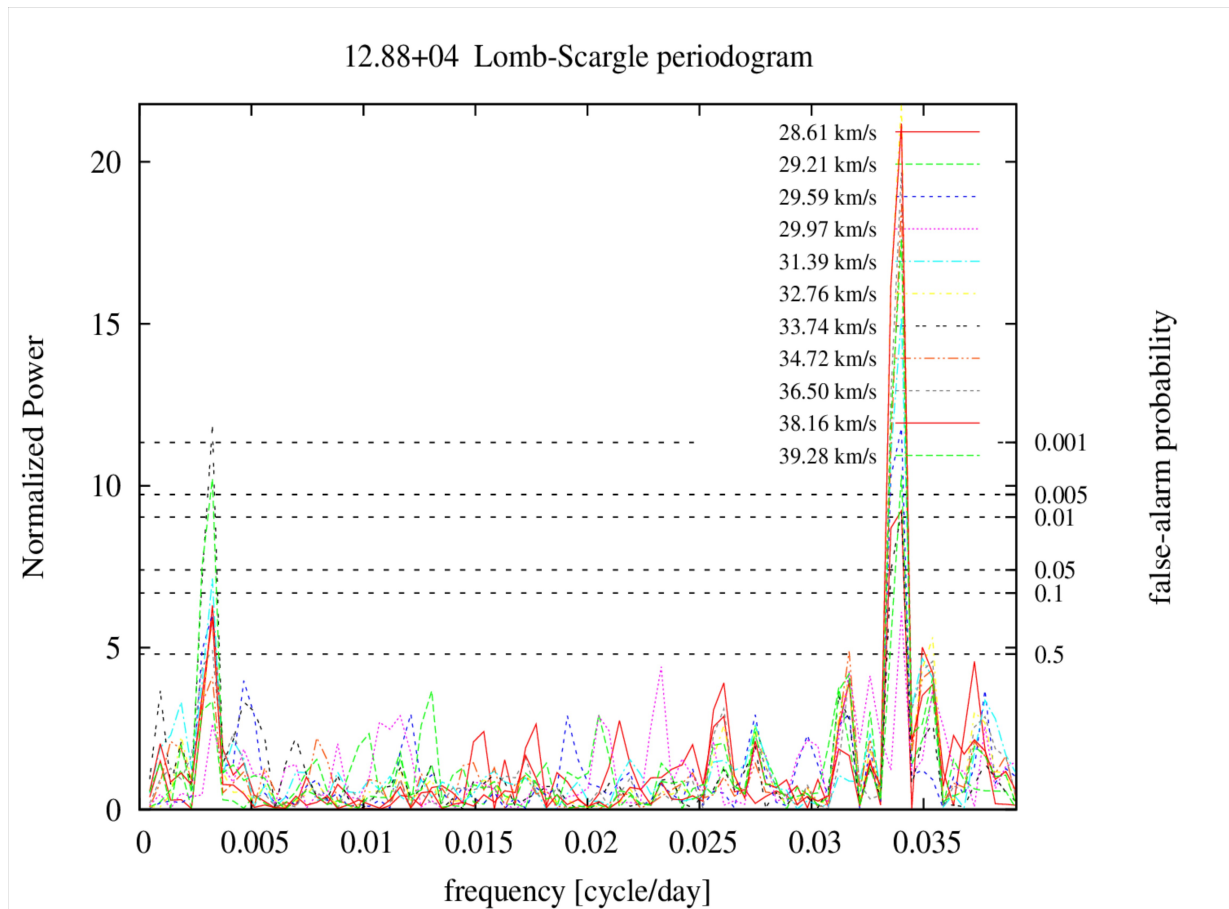


図 11 G 12.88+04 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル

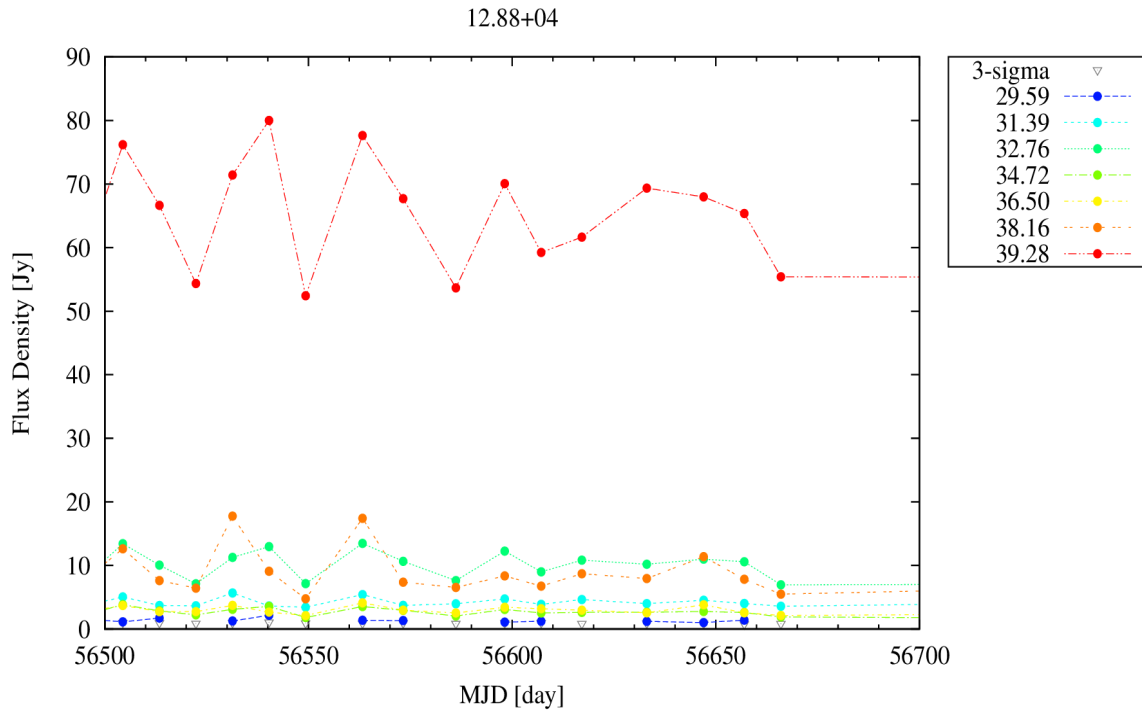


図 12 G 12.88+04 の強度変動プロット

4.3.5 G 14.23-05

G 14.23-05 は 9 個の速度成分が同定されている。このうち 8 個の成分が、誤警報確率 ≤ 0.001 であった。

視線速度 23.91[km/s]、24.69[km/s]の成分は導出周期が 717.4 日である。視線速度 20.98[km/s]の成分は 358.7 日であり、隣り合う独立周期との差は +71.7 日、-51.2 日である。視線速度 20.52[km/s]の成分は導出周期が 307.5 日であり、隣り合う独立周期との差は +51.2 日、-38.5 日である。観測期間が 1076 日なので、4 個の成分は条件②を満たさない。ただし、今後もモニター観測は続けられるため、観測期間が延びることにより条件②を満たすことになるかもしれない。

他 4 個の成分について、視線速度 22.30[km/s]の成分は導出周期が 269.0 日であった。視線速度 21.75[km/s]、23.46[km/s]の成分は導出周期が 195.7 日であった。これらは新検出の成分かもしれない。視線速度 25.30[km/s]の成分は導出周期が 23.9 日であった。そして先行研究で得られていた周期は 23.7 日なので、これは導出周期の誤差の範囲内と言えるだろう。

図 15 のグラフを見ても周期はおよそ 23.9 日と読み取れると思われ、この天体に対しての Lomb-Scargle 法の適用は狙い通りの結果を導けたと思われる。

表 8 G 14.23-05 の解析結果

視線速度[km/s]	誤警報確率	周期[day]
20.52	0.000000	307.5
20.98	0.000000	358.7
21.32	0.154858	-
21.75	0.000030	195.7
22.30	0.000000	269.0
23.46	0.000000	195.7
23.91	0.000000	717.7
24.69	0.000000	717.7
25.30	0.000000	23.9

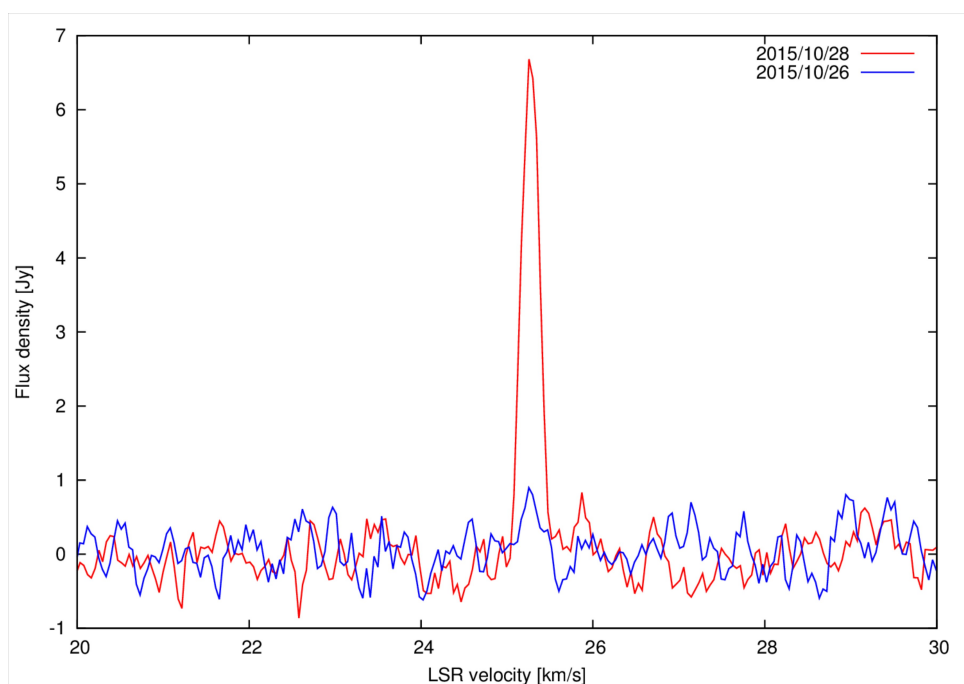


図 13 G 14.23-05 のスペクトル

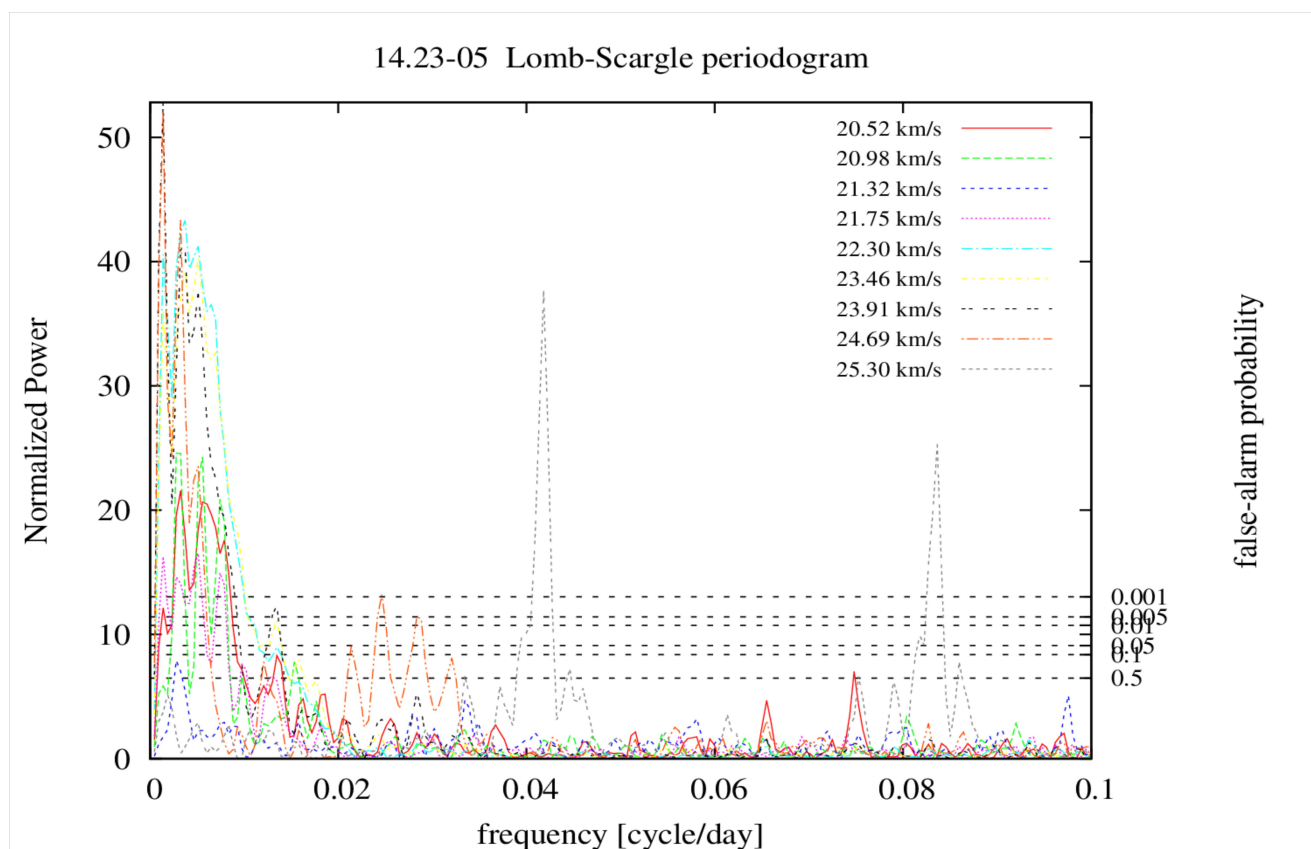


図 14 G 14.23-05 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル

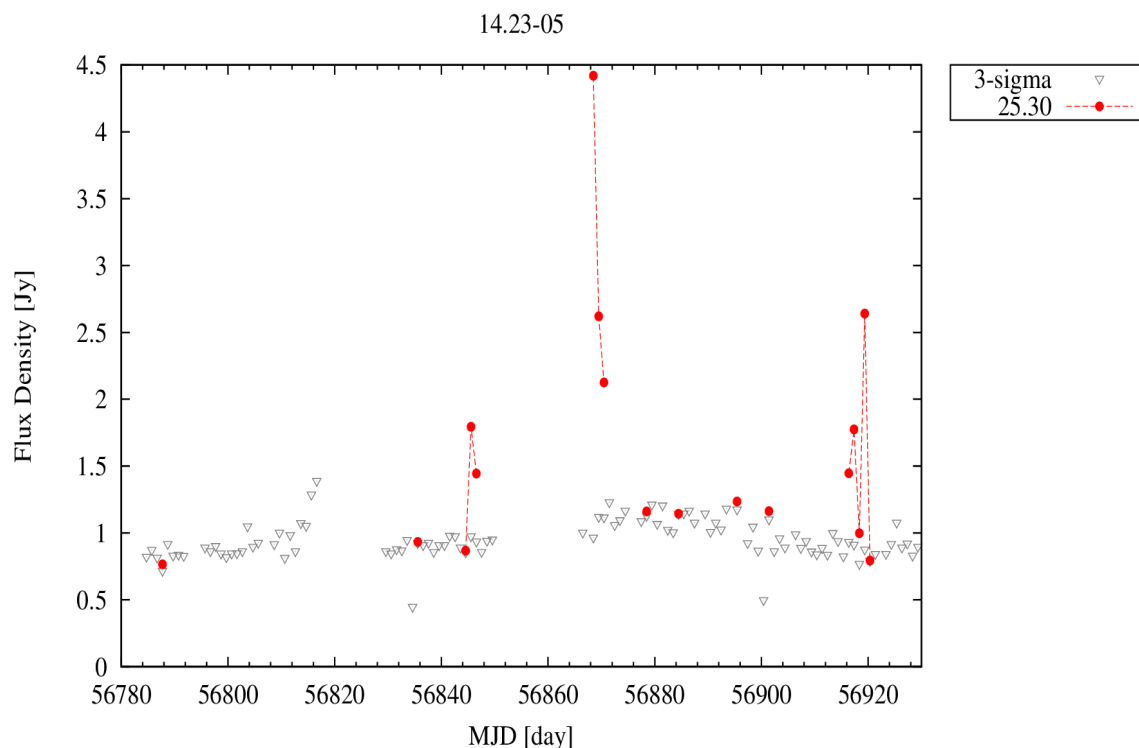


図 15 G 14.23-05 の強度変動プロット

4.3.6 G 22.36+00

G 22.36+00 は 9 個の速度成分が同定されている。このうち 5 個の成分が、誤警報確率 ≤ 0.001 であった。

視線速度 78.91[km/s]、80.24[km/s]、80.88[km/s]、81.20[km/s]、81.50[km/s]の成分は導出周期が180.2日であり、隣り合う独立周期との差は+16.3日、-13.9日である。先行研究で得られていた周期は179.3日なので、これは導出周期の誤差の範囲内と言えるだろう。図 18 のグラフを見ても周期はおよそ180.2日と読み取れると思われ、この天体に対してのLomb-Scargle法の適用は狙い通りの結果を導けたと思われる。

表 9 G 22.36+00 の解析結果

視線速度[km/s]	誤警報確率	周期[day]
78.91	0.000000	180.2
80.24	0.000000	180.2
80.88	0.000000	180.2
81.20	0.000001	180.2
81.50	0.000001	180.2
83.53	0.001610	-
85.02	0.237443	-
85.65	0.365309	-
88.50	0.065533	-

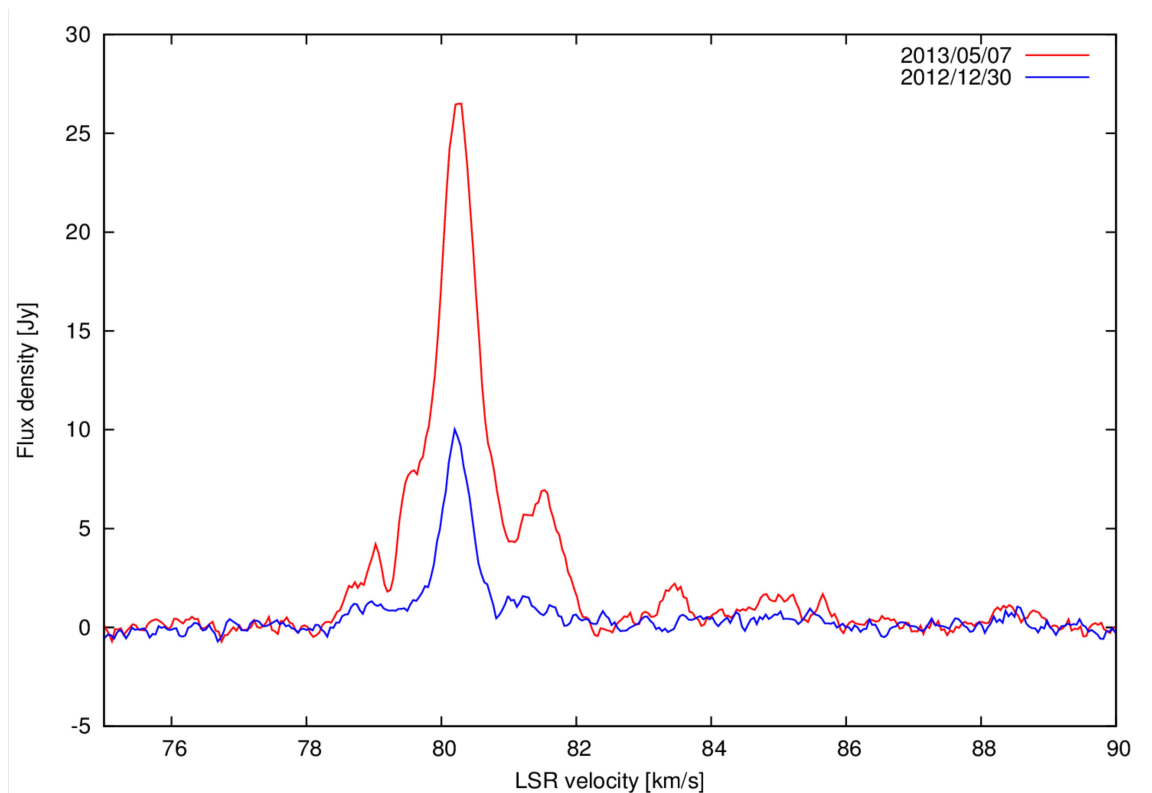


図 16 G 22.36+00 のスペクトル

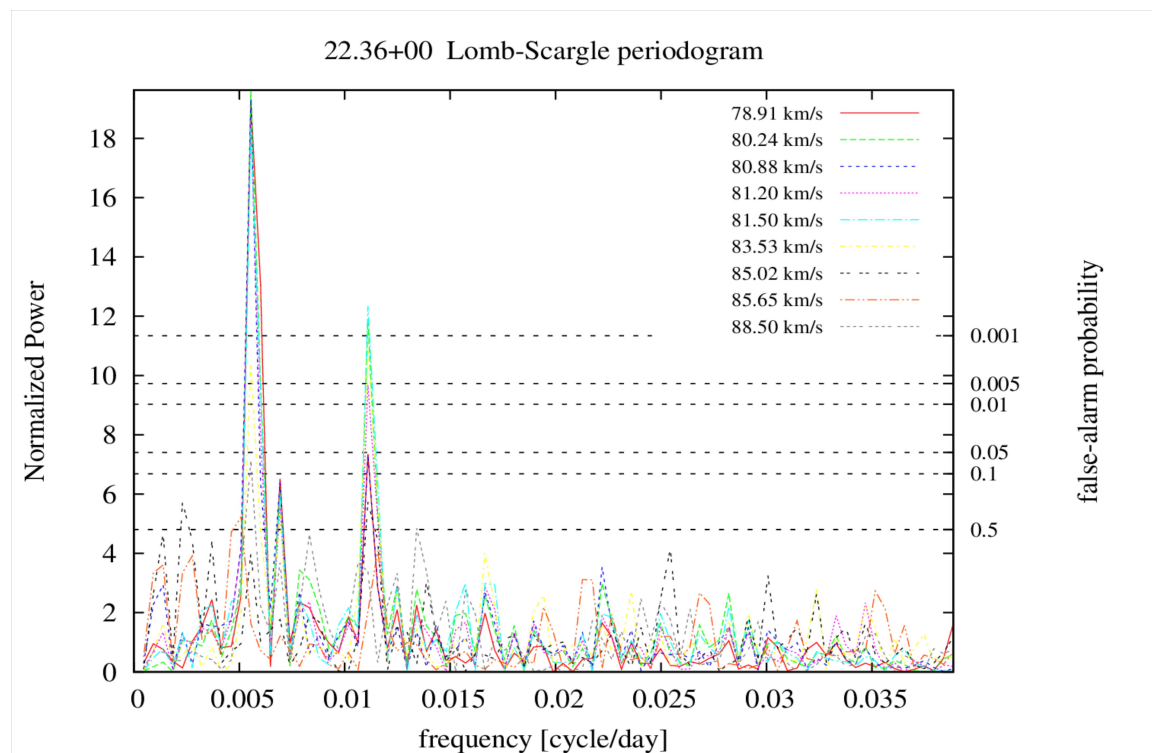


図 17 G 22.36+00 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル

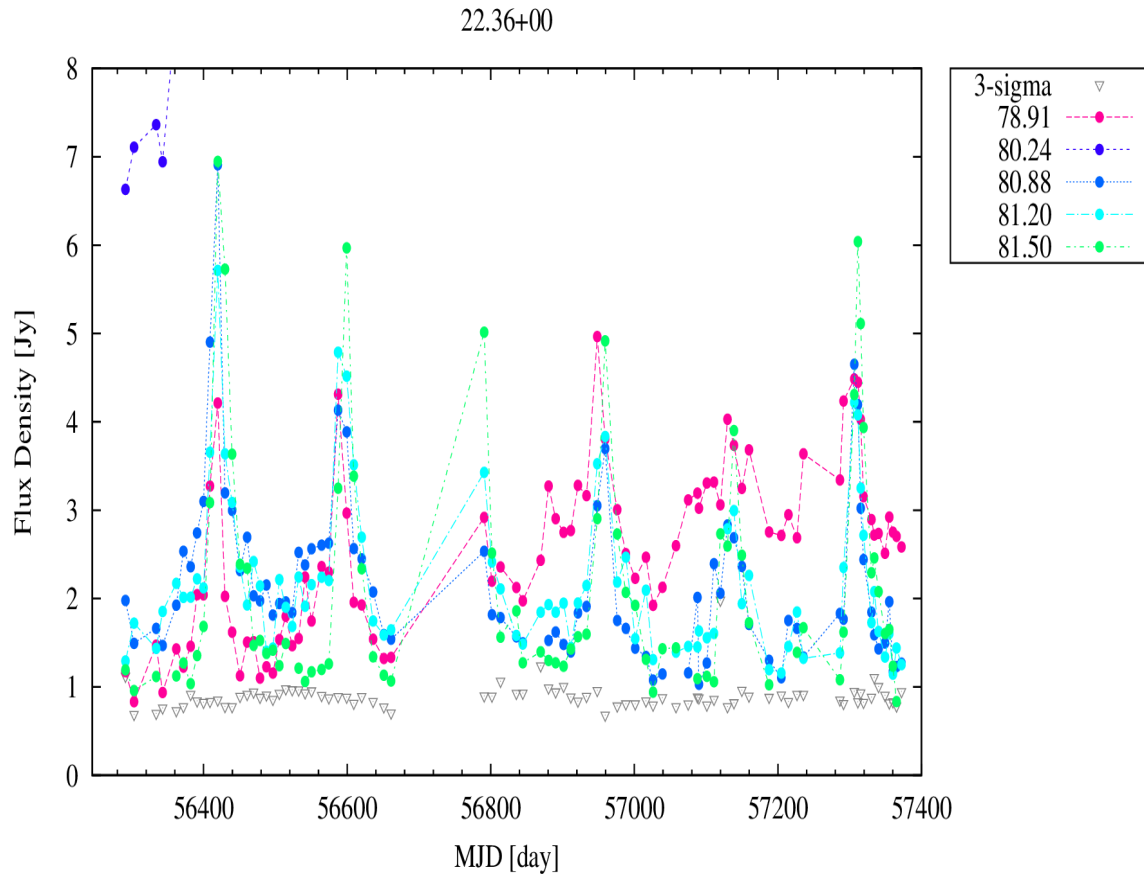


図 18 G 22.36+00 の強度変動プロット

4.3.7 G 24.14+00

G 24.14+00 は 3 個の速度成分が同定されている。すべての成分が、誤警報確率 ≤ 0.001 であった。

視線速度 17.71[km/s]の成分は導出周期が 431.2 日であった。観測期間が 1082 日なので、上記の 1 個の成分は条件②を満たさない。ただし、今後もモニター観測は続けられるため、観測期間が延びることにより条件②を満たすことになるかもしれない。

他 2 個の成分について、視線速度 17.52[km/s]、19.29[km/s]の成分は導出周期が 179.7 日であり、隣り合う独立周期との差は+16.3 日、-13.9 日である。そして先行研究で得られていた周期は 188.9 日なので、これは導出周期の誤差の範囲内と言えるだろう。

図 21 のグラフを見ても周期はおおよそ 179.7 日と読み取れると思われ、この天体に対しての Lomb-Scargle 法の適用は狙い通りの結果を導けたと思われる。

表 10 G 24.14+00 の解析結果

視線速度[km/s]	誤警報確率	周期[day]
17.52	0.000101	179.7
17.71	0.000097	431.2
19.29	0.000000	179.7

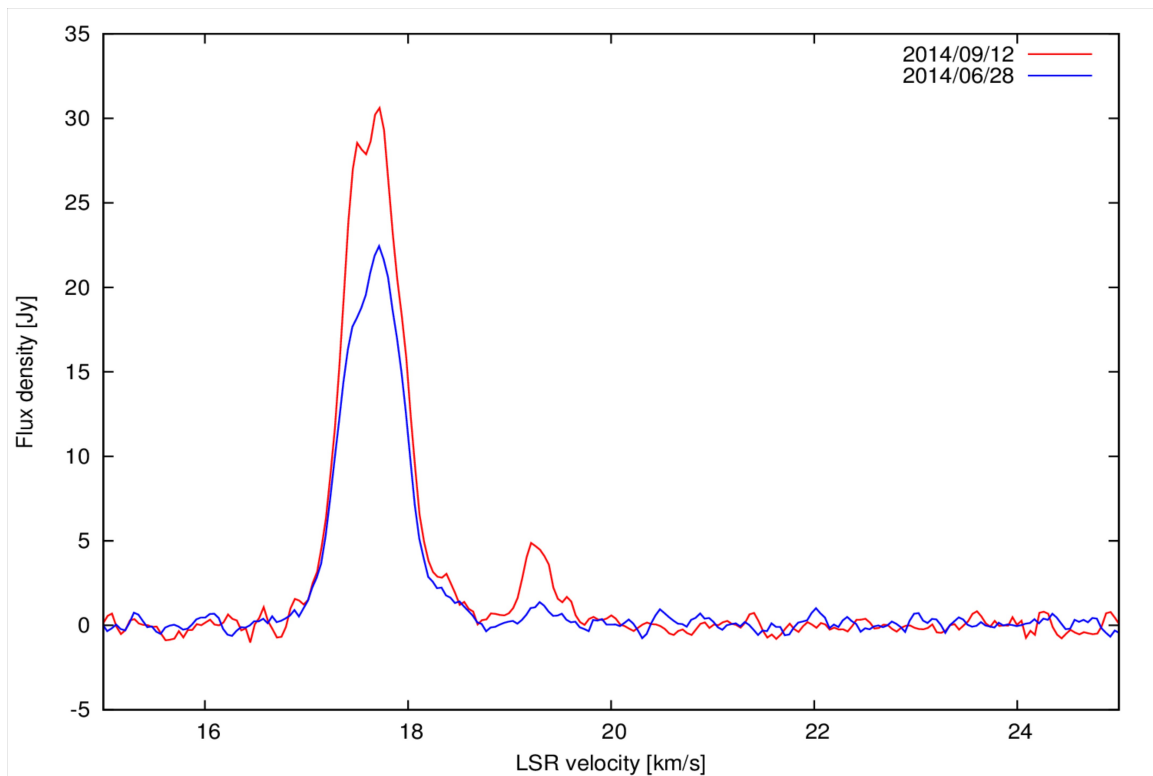


図 19 G 24.14+00 のスペクトル

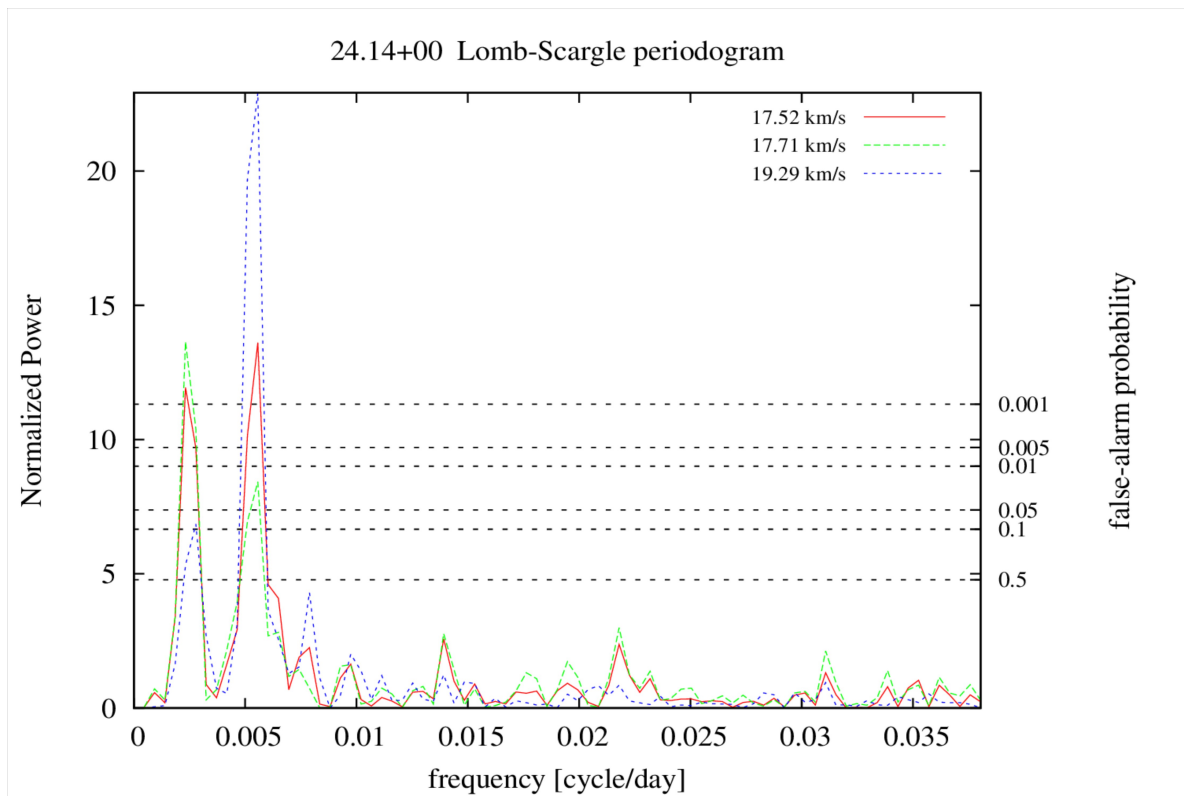


図 20 G 24.14+00 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル

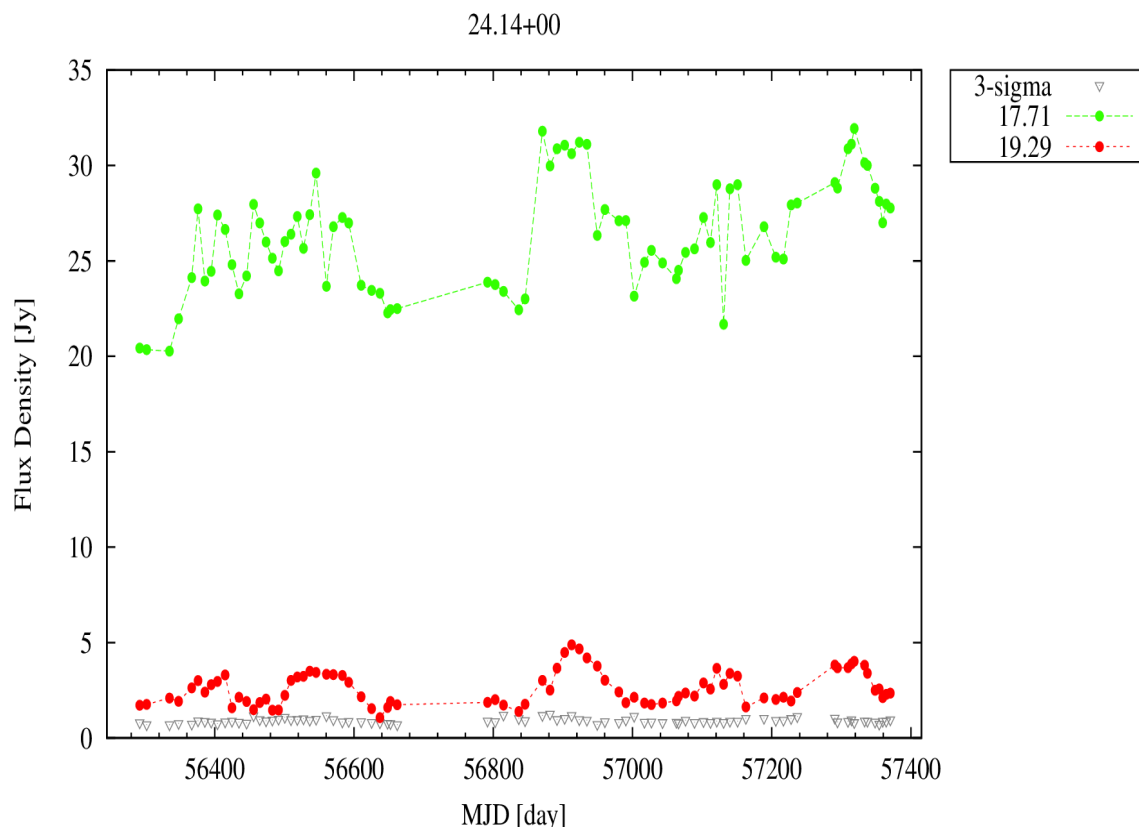


図 21 G 24.14+00 の強度変動プロット

4.3.8 G 25.41+01

G 25.41+01 は 5 個の速度成分が同定されている。このうち 3 個の成分が、誤警報確率 ≤ 0.001 であった。

視線速度 95.43[km/s]の成分は導出周期が 359.7 日であり、隣り合う独立周期との差は+72 日、-51.4 日である。観測期間が 1079 日なので、上記の 1 個の成分は条件②を満たさない。ただし、今後もモニター観測は続けられるため、観測期間が延びることにより条件②を満たすことになるかもしれない。

他 2 個の成分について、視線速度 94.75[km/s]の成分は導出周期が 239.8 日であり、隣り合う独立周期との差は+54 日、-24 日である。視線速度 97.05[km/s]の成分は導出周期が 215.8 日であり、隣り合う独立周期との差は+24 日、-19.6 日である。この 2 つの速度成分の周期は隣り合う独立周期であり、導出周期の誤差と考えられる。そして先行研究で得られていた周期は 244.7 日であるので、これはほぼ導出周期の誤差の範囲内と言えるだろう。図 24 のグラフを見ても周期はおおよそ 239.8 日と読み取れると思われ、この天体に対しての Lomb-Scargle 法の適用は狙い通りの結果を導けたと思われる。

表 11 G 25.41+01 の解析結果

視線速度[km/s]	誤警報確率	周期[day]
89.73	0.769759	-
93.27	0.918225	-
94.75	0.000000	239.8
95.43	0.000984	359.7
97.05	0.000402	215.8

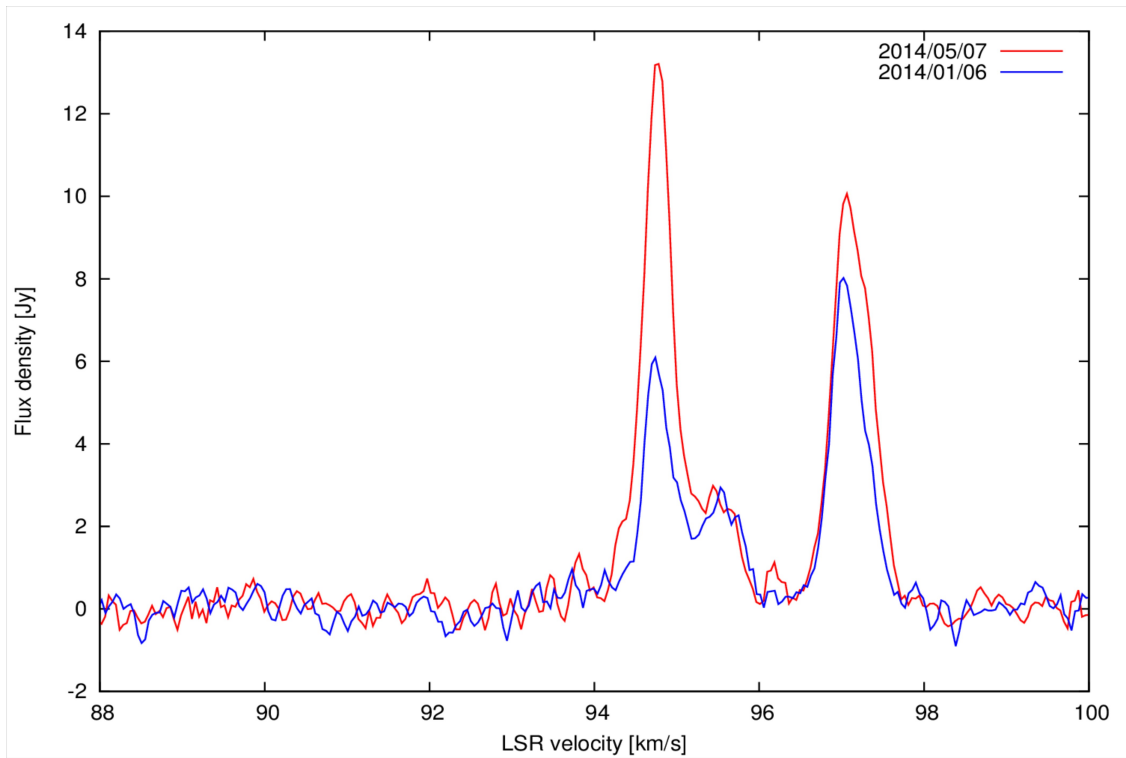


図 22 G 25.41+01 のスペクトル

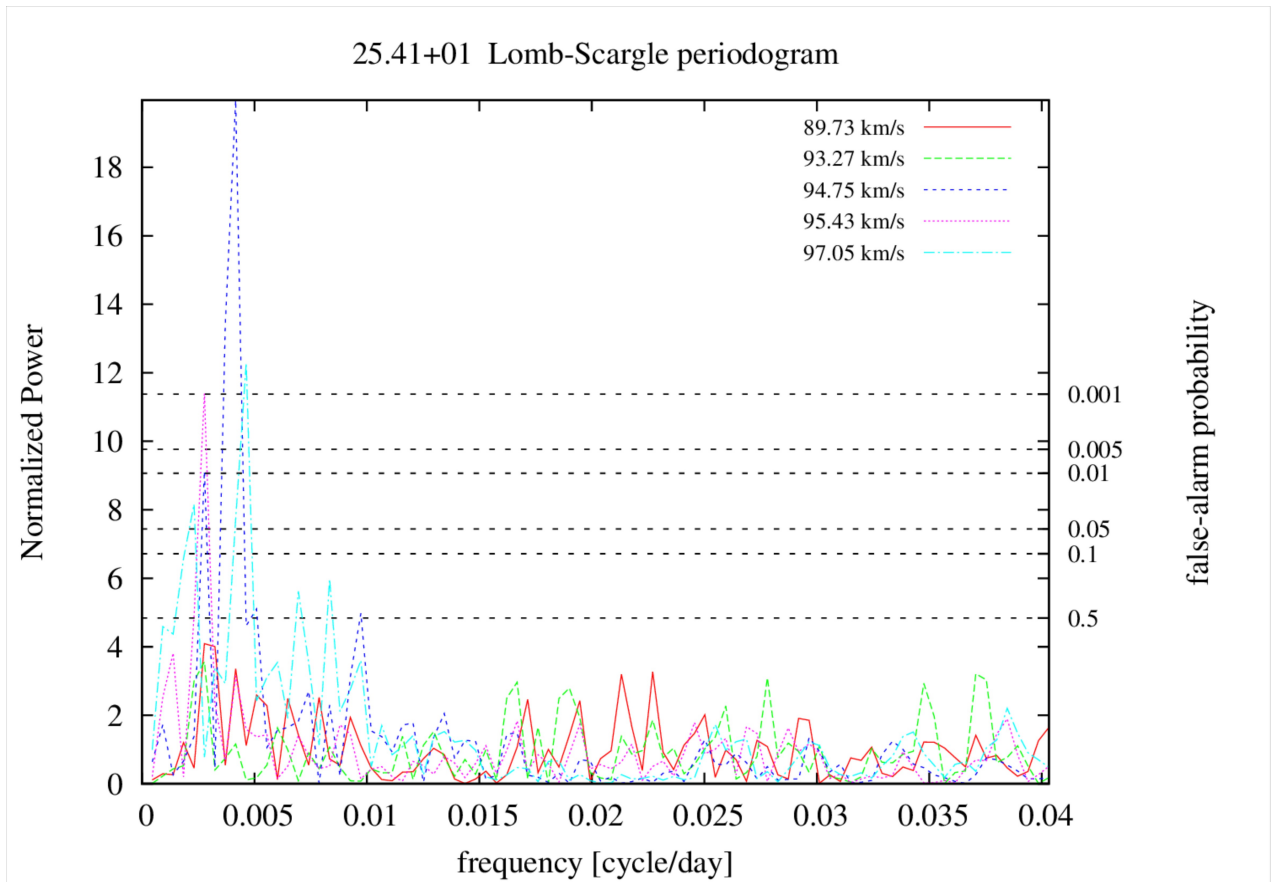


図 23 G 25.41+01 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル

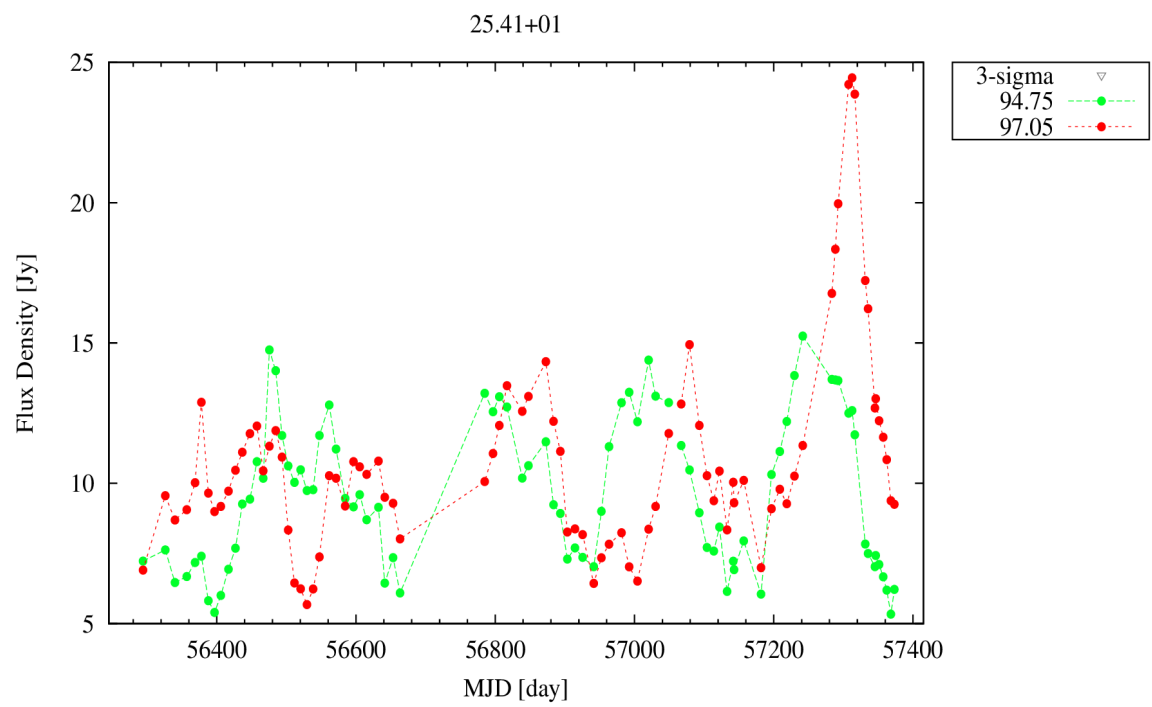


図 24 G 25.41+01 の強度変動プロット

4.3.9 G 26.52-02

G 26.52-02 は 9 個の速度成分が同定されている。このうち 1 個の成分が、誤警報確率 ≤ 0.001 であった。

視線速度 109.59[km/s]の成分は導出周期が 179.8 日であり、隣り合う独立周期との差は+16.4 日、-13.8 日である。そして先行研究で得られていた周期は 172.2 日なので、これは導出周期の誤差の範囲内と言えるだろう。図 27 のグラフを見ても周期はおよそ 179.8 日と読み取れると思われ、この天体に対しての Lomb-Scargle 法の適用は狙い通りの結果を導けたと思われる。

表 12 G 26.52-02 の解析結果

視線速度[km/s]	誤警報確率	周期[day]
103.35	0.016777	-
103.80	0.066310	-
104.22	0.008950	-
105.38	0.625548	-
106.11	0.784426	-
107.10	0.944294	-
107.70	0.931374	-
108.27	0.333451	-
109.59	0.000001	179.8

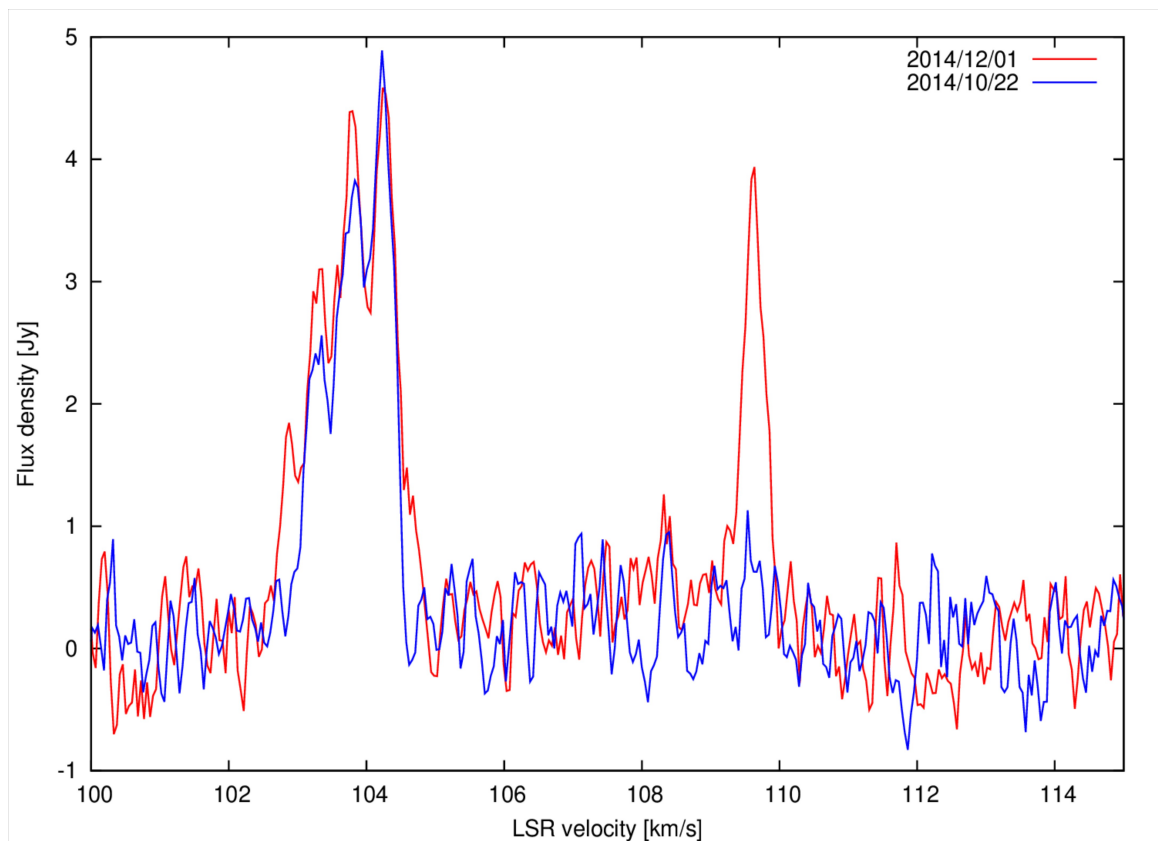


図 25 G 26.52-02 のスペクトル

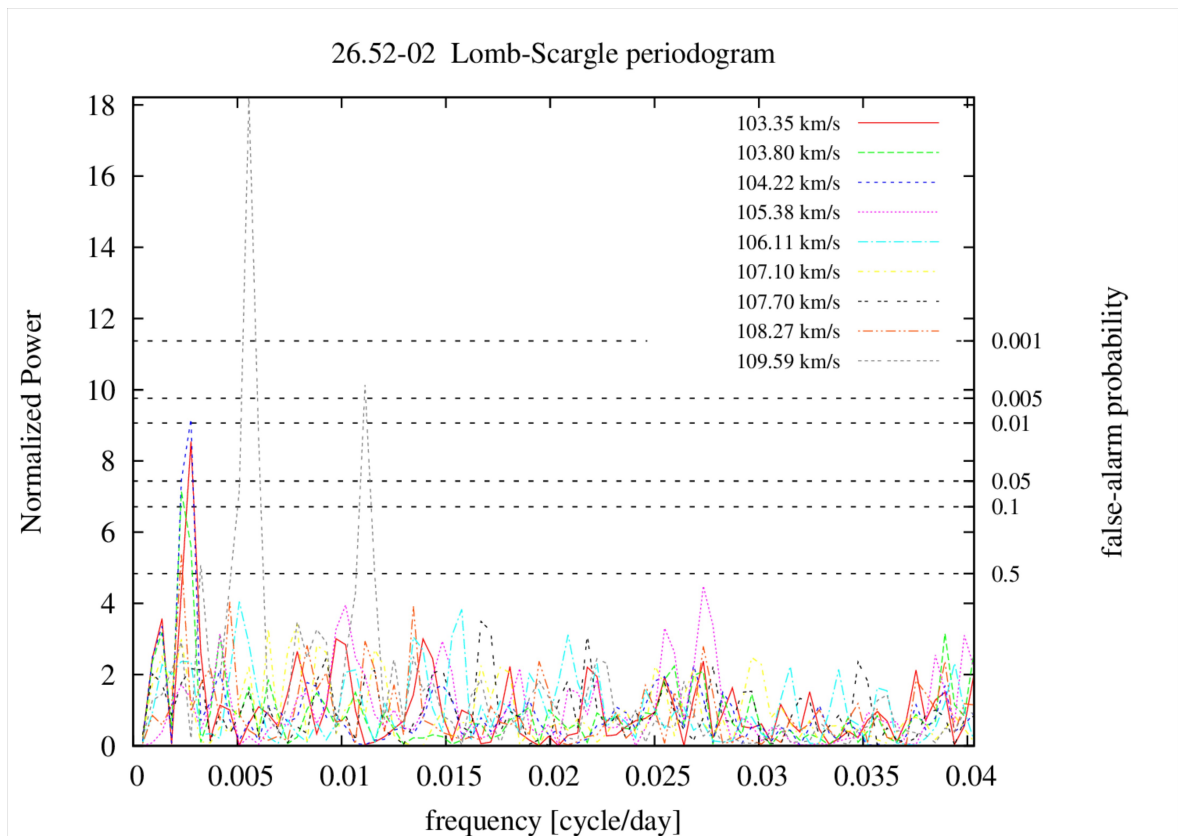


図 26 G 26.52-02 のピリオドグラムのスペクトル

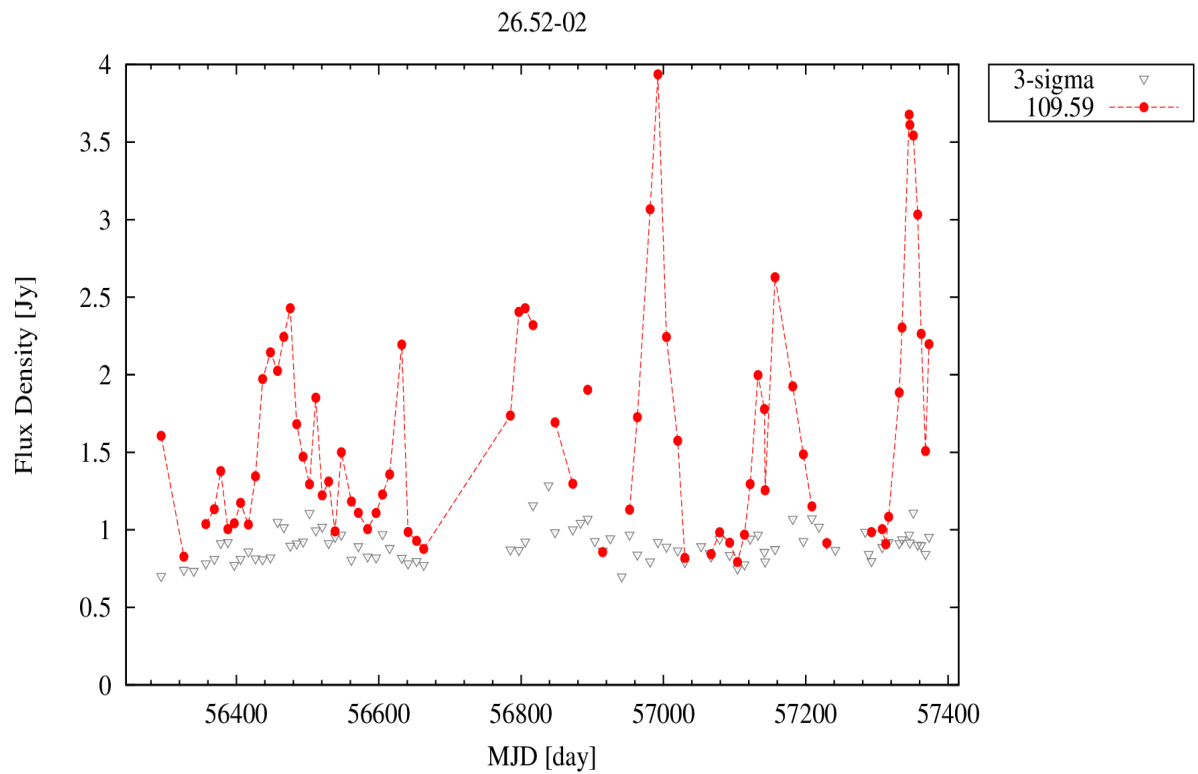


図 27 G 26.52-02 の強度変動プロット

4.3.10 G 28.02-04

G 28.02-04 は 6 個の速度成分が同定されている。このうち 3 個の成分が、誤警報確率 ≤ 0.001 であった。

視線速度 16.19[km/s]、17.01[km/s]、24.70[km/s]の成分は導出周期が 113.1 日であり、隣り合う独立周期との差は+6.2 日、-5.7 日である。そして先行研究で得られていた周期は 111.5 日なので、これは導出周期の誤差の範囲内と言えるだろう。図 30 のグラフを見ても周期はおよそ 113.1 日と読み取れると思われる。この天体に対しての Lomb-Scargle 法の適用は狙い通りの結果を導けたと思われる。

表 13 G28.02-04 の解析結果

視線速度[km/s]	誤警報確率	周期[day]
16.19	0.000817	113.1
17.01	0.000005	113.1
17.75	0.410905	-
23.66	0.732870	-
24.70	0.000023	113.1
25.58	0.115319	-

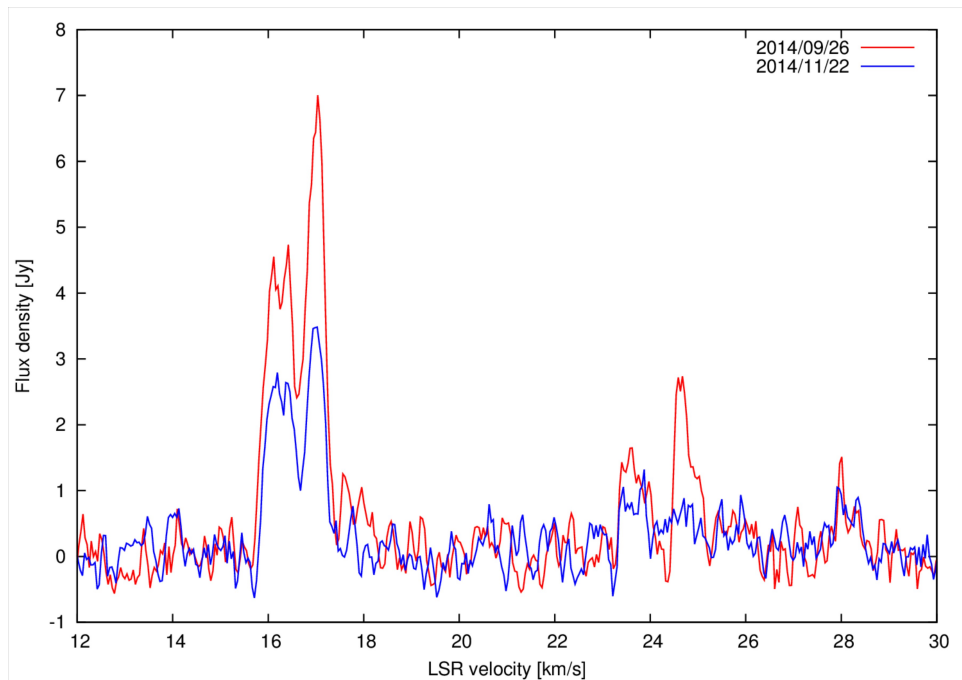


図 28 G28.02-04 のスペクトル

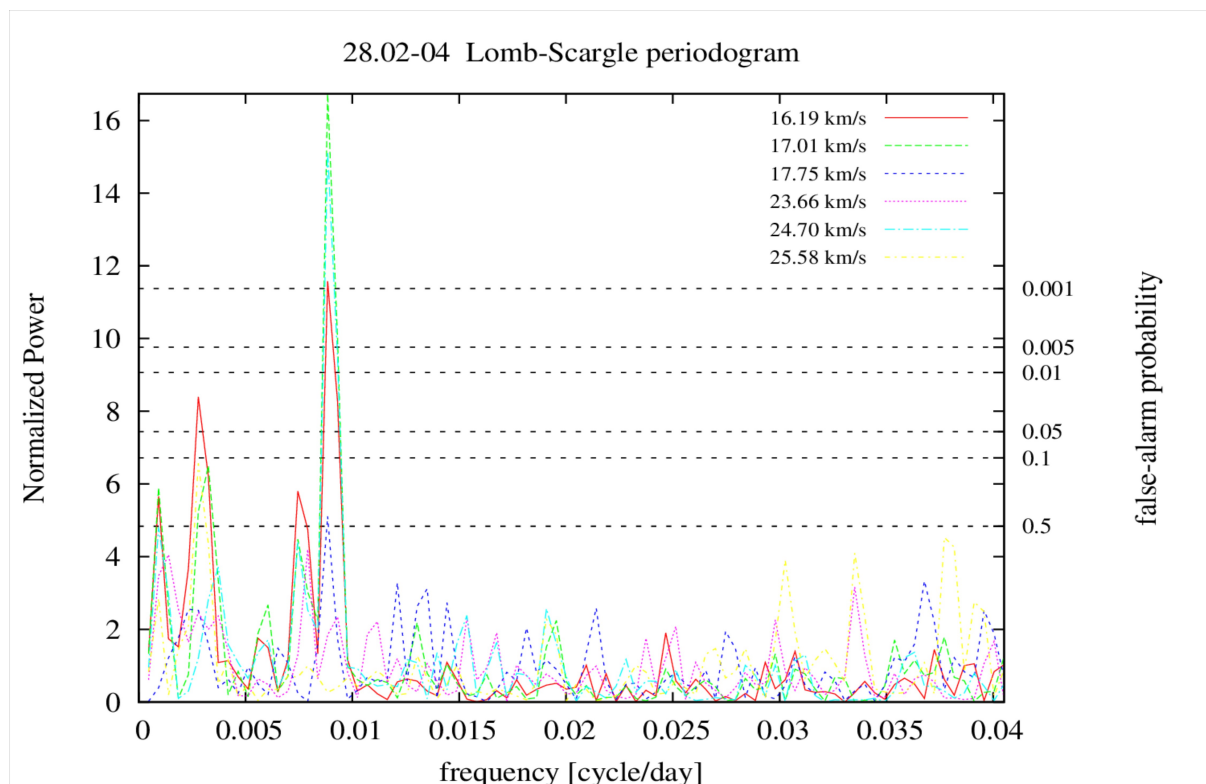


図 29 G 28.02-04 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル

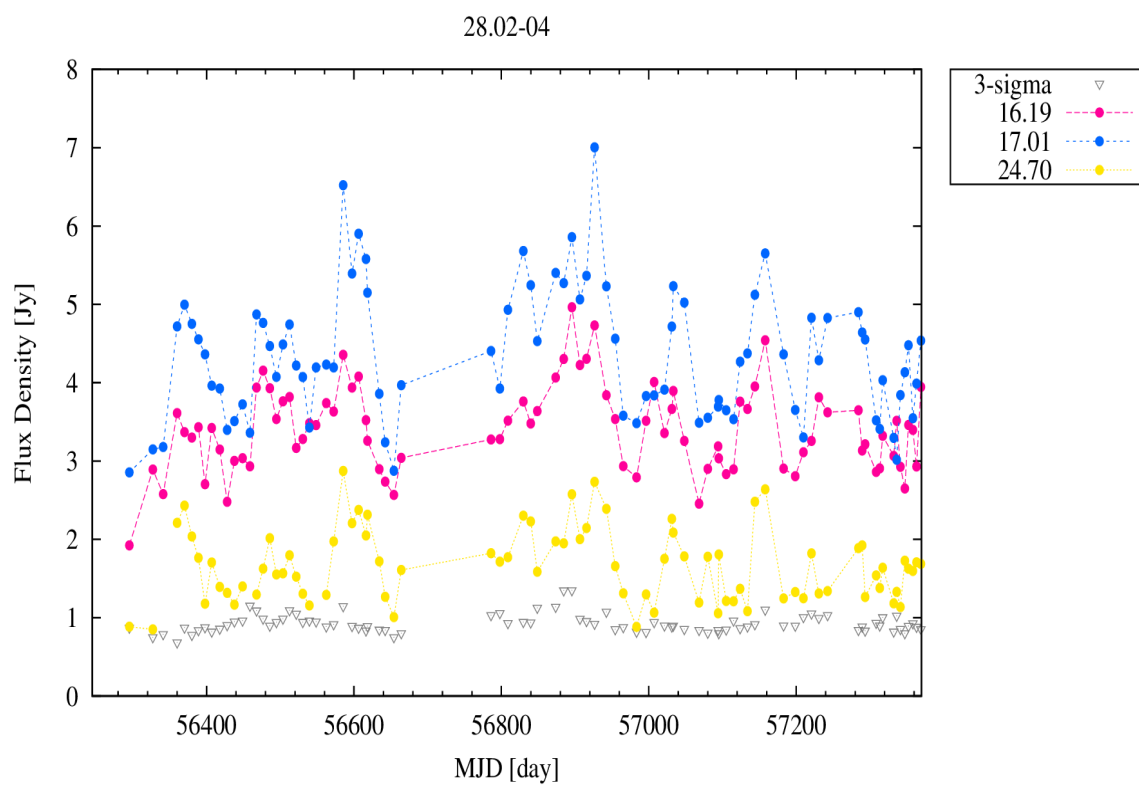


図 30 G 28.02-04 の強度変動プロット

4.3.11 G 30.40-02

G 30.40-02 は9個の速度成分が同定されている。このうち2個の成分が、誤警報確率 ≤ 0.001 であった。視線速度 104.29[km/s]、105.03[km/s]の成分は導出周期が214.6日であり、隣り合う独立周期との差は+23.9日、-19.5日である。そして先行研究で得られていた周期は220.1日なので、これは導出周期の誤差の範囲内と言えるだろう。図 33 のグラフを見ても周期はおよそ214.6日と読み取れると思われ、この天体に対しての Lomb-Scargle 法の適用は狙い通りの結果を導けたと思われる。

表 14 G 30.40-02 の解析結果

視線速度[km/s]	誤警報確率	周期[day]
98.17	0.010010	-
100.41	0.004071	-
101.31	0.833381	-
101.56	0.891795	-
101.91	0.720442	-
103.02	0.400405	-
103.67	0.196860	-
104.29	0.000044	214.6
105.03	0.000000	214.6

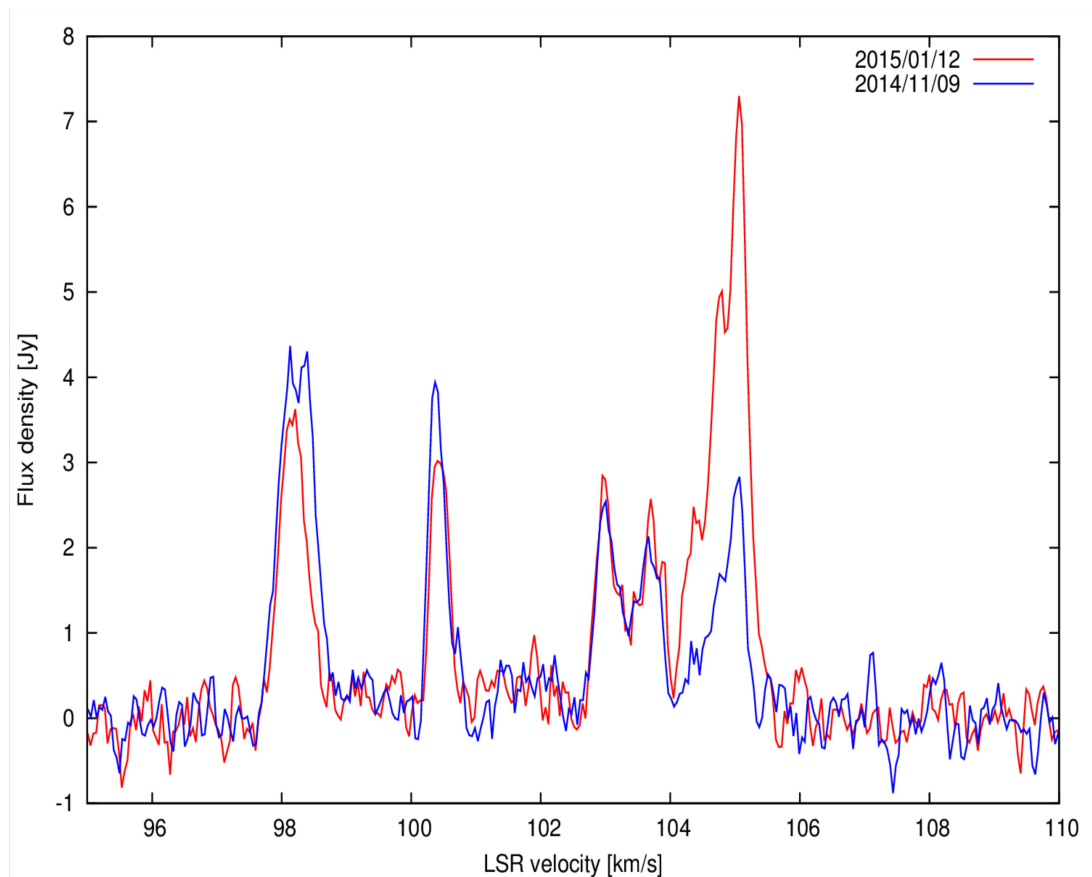


図 31 G 30.40-02 のスペクトル

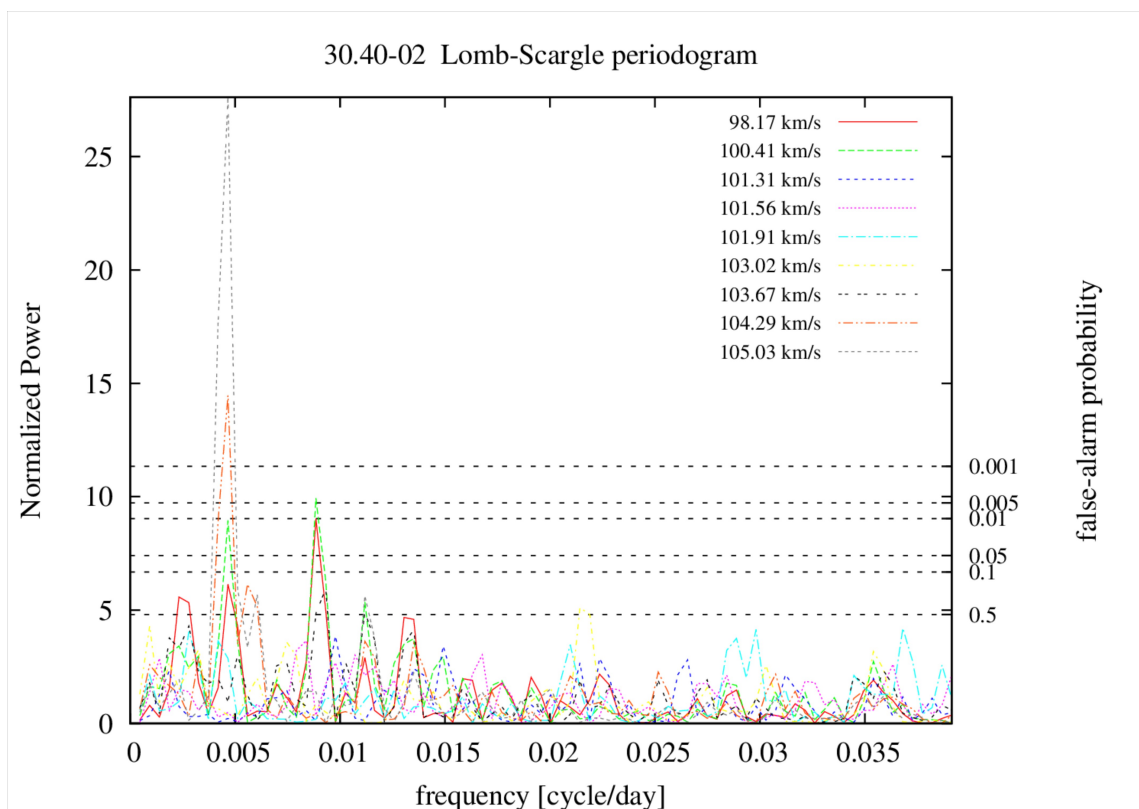


図 32 G 30.40-02 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムの特クトル

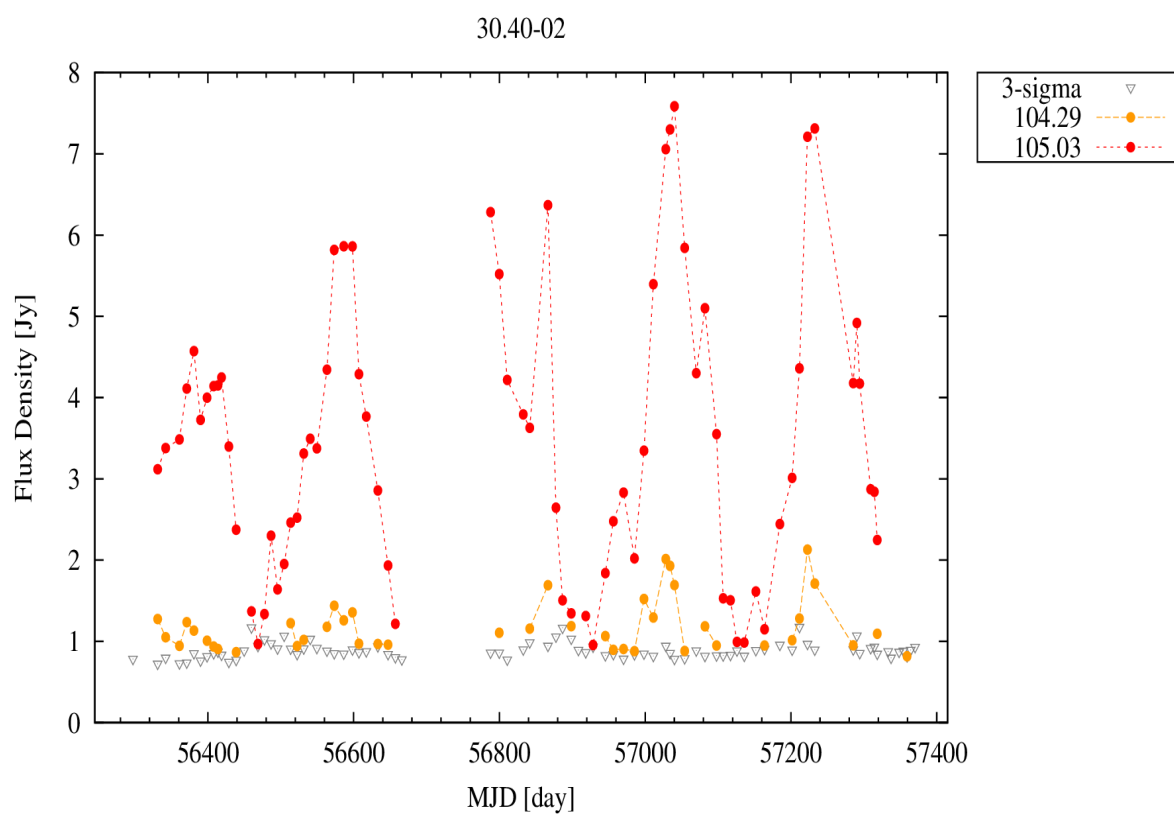


図 33 G 30.40-02 の強度変動プロット

4.3.12 G 34.39+02

G 34.39+02 は 8 個の速度成分が同定されている。このうち 2 個の成分が、誤警報確率 ≤ 0.001 であった。

視線速度 55.67[km/s]、60.47[km/s]の成分は導出周期が 29.4 日であり、隣り合う独立周期との差は+0.4 日、-0.4 日である。そして先行研究で得られていた周期は 29.5 日なので、これは導出周期の誤差の範囲内と言えるだろう。図 36 のグラフを見ても周期はおよそ 29.4 日と読み取れると思われ、この天体に対しての Lomb-Scargle 法の適用は狙い通りの結果を導けたと思われる。

表 15 G 34.39+02 の解析結果

視線速度[km/s]	誤警報確率	周期[day]
55.67	0.000068	29.4
57.90	0.055871	-
59.96	0.017793	-
60.47	0.000002	29.4
60.82	0.113334	-
61.39	0.008590	-
62.54	0.022013	-
63.43	0.012563	-

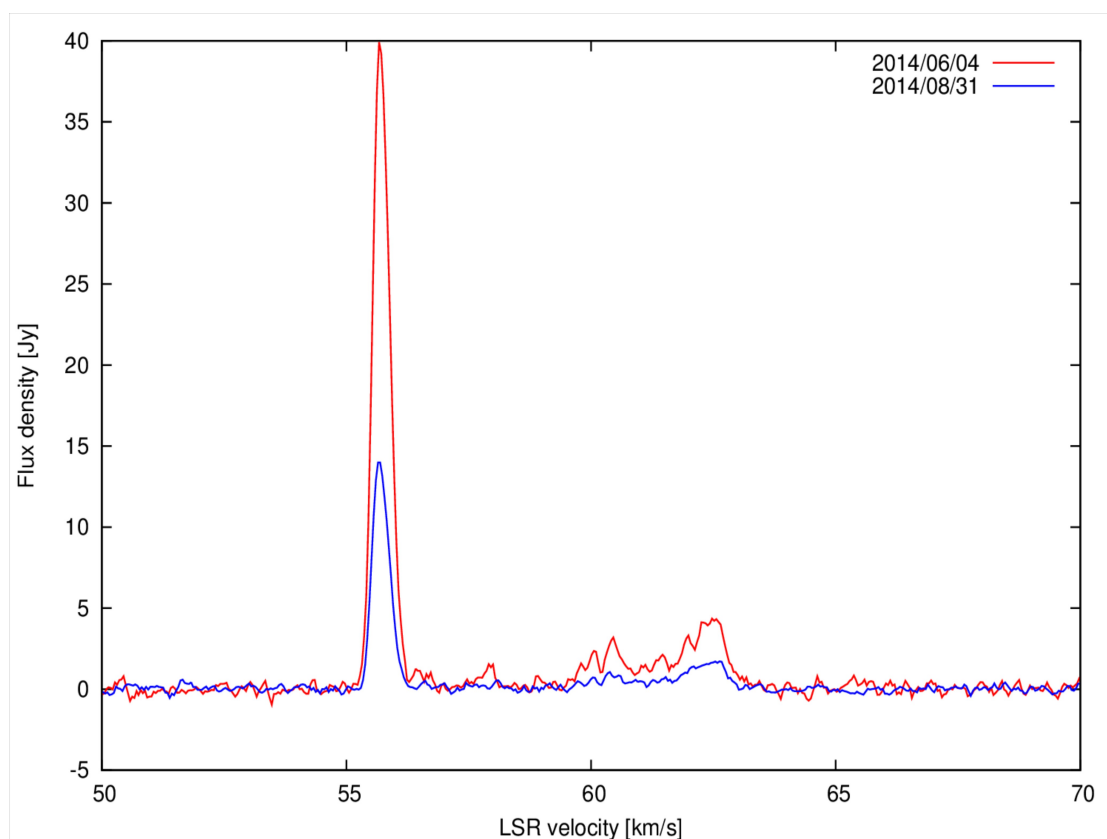


図 34 G 34.39+02 のスペクトル

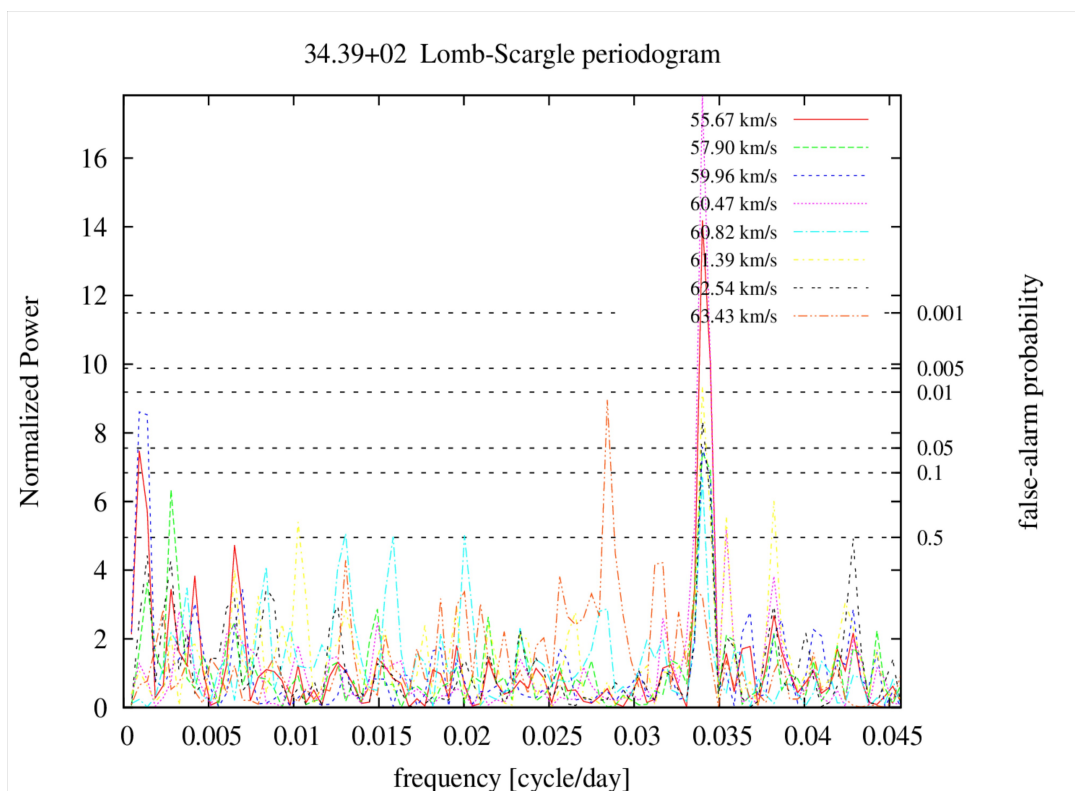


図 35 G 34.39+02 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル

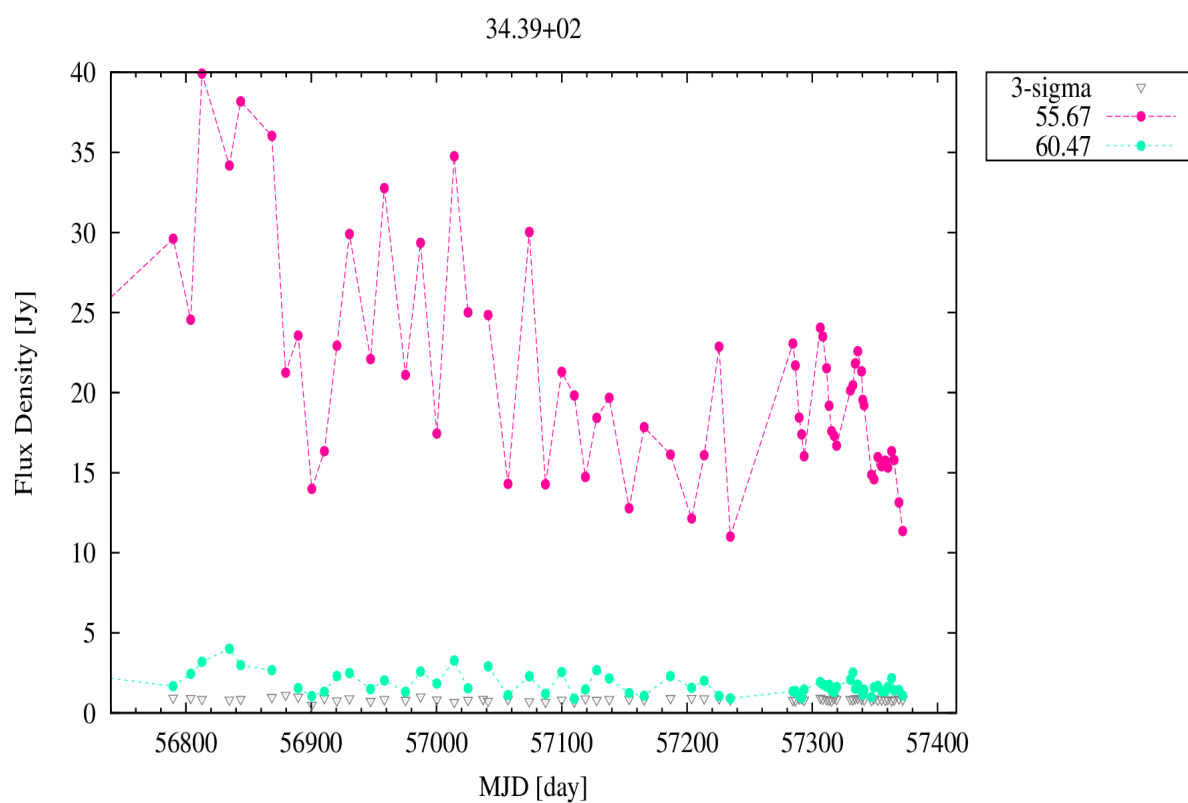


図 36 G 34.39+02 の強度変動プロット

4.3.13 G 36.70+00

G 36.70+00 は7個の速度成分が同定されている。このうち5個の成分が、誤警報確率 ≤ 0.001 であった。

視線速度 53.11[km/s]、53.65[km/s]、55.10[km/s]、62.10[km/s]、62.93[km/s]の成分は導出周期が53.7日であり、隣り合う独立周期との差は+1.4日、-1.3日である。そして先行研究で得られていた周期は53.4日なので、これは導出周期の誤差の範囲内と言えるだろう。図39のグラフを見ても周期はおよそ53.7日と読み取れると思われ、この天体に対してのLomb-Scargle法の適用は狙い通りの結果を導けたと思われる。

表 16 G 36.70+00 の解析結果

視線速度[km/s]	誤警報確率	周期[day]
52.23	0.624900	-
52.56	0.909106	-
53.11	0.000004	53.7
53.65	0.000000	53.7
55.10	0.000000	53.7
62.10	0.000000	53.7
62.93	0.000051	53.7

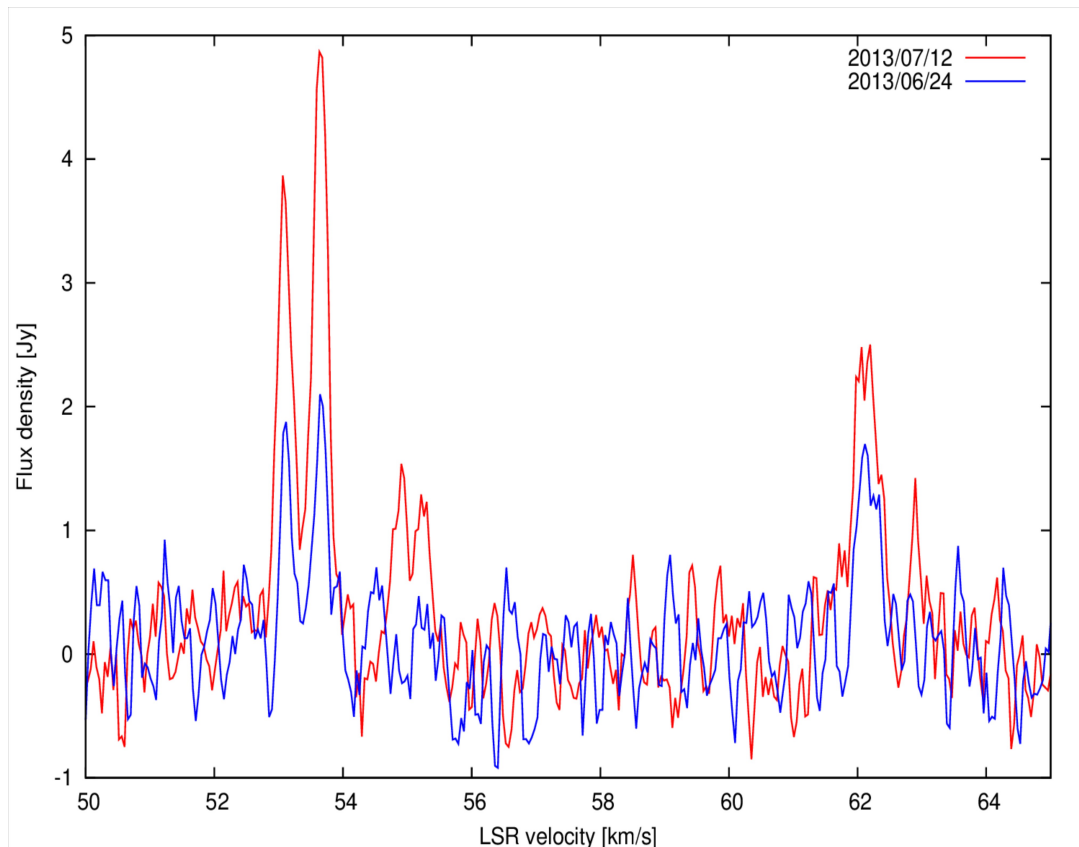


図 37 G 36.70+00 のスペクトル

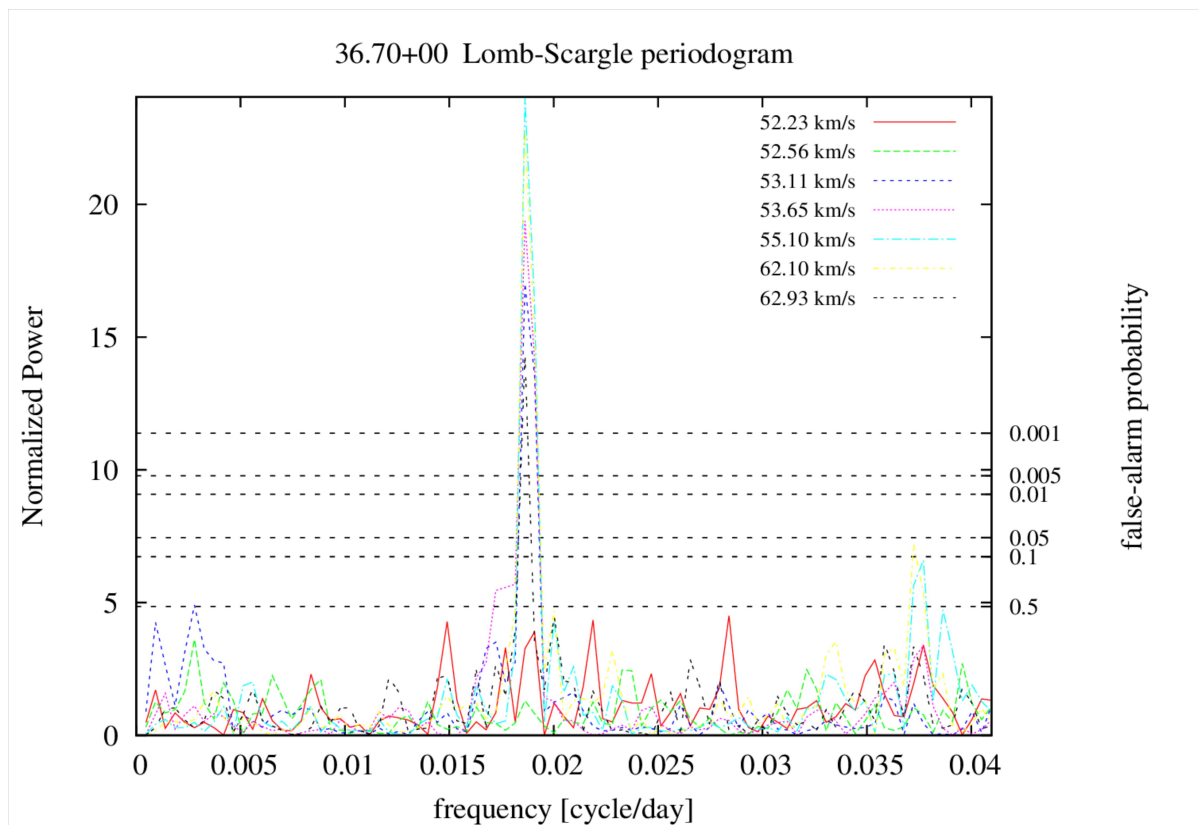


図 38 G 36.70+00 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムの特クル

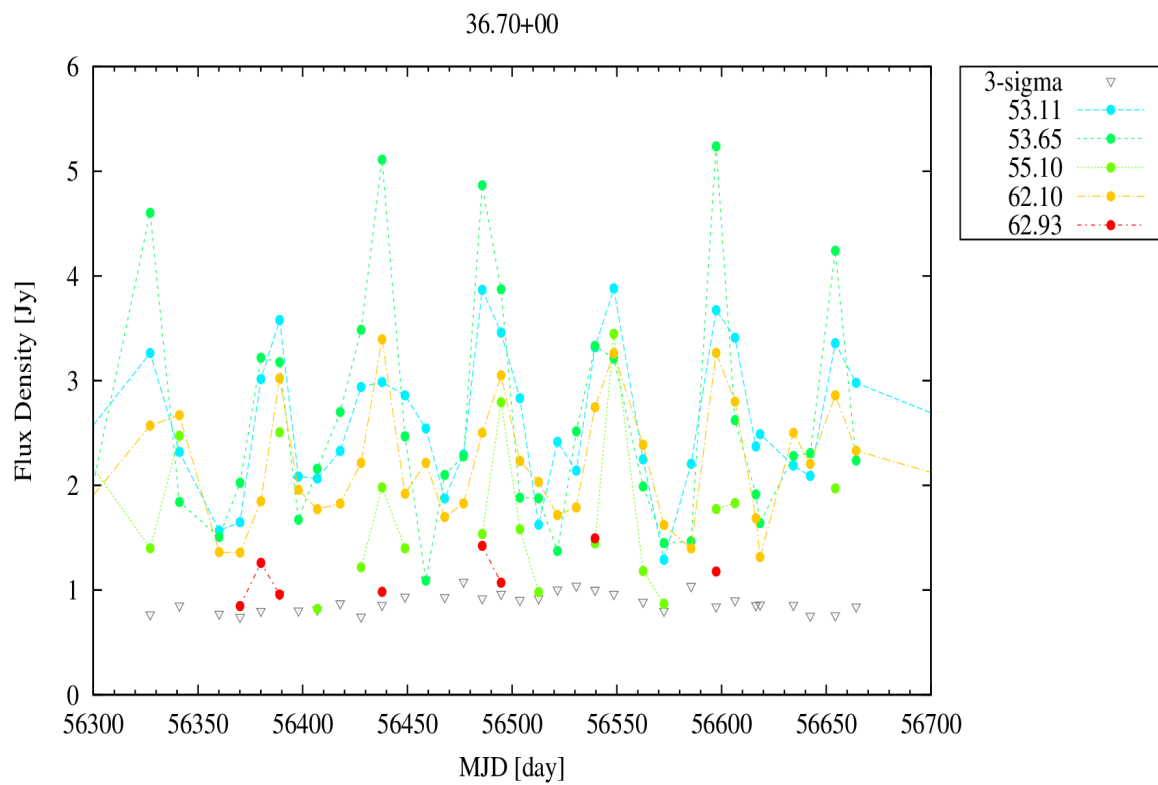


図 39 G 36.70+00 の強度変動プロット

4.3.14 G 37.47-01

G 37.47-01 は 13 個の速度成分が同定されている。このうち 3 個の成分が、誤警報確率 ≤ 0.001 であった。

視線速度 62.08[km/s]、62.55[km/s]の成分は導出周期が 357.4 日であり、隣り合う独立周期との差は+71.4 日、-51.1 日であった。観測期間が 1072 日なので、上記の 2 個の成分は条件②を満たさない。ただし、今後もモニター観測は続けられるため、観測期間が延びることにより条件②を満たすことになるかもしれない。

他 1 個の成分について、視線速度 54.52[km/s]の成分は導出周期が 69.2 日であり、隣り合う独立周期との差は+2.3 日、-2.2 日である。そして先行研究で得られていた周期は 67.9 日なので、これは導出周期の誤差の範囲内と言えるだろう。図 42 のグラフを見ても周期はおよそ 69.2 日と読み取れると思われ、この天体に対しての Lomb-Scargle 法の適用は狙い通りの結果を導けたと思われる。

表 17 G 37.47-01 の解析結果

視線速度[km/s]	誤警報確率	周期[day]
49.99	0.990707	-
52.50	0.752965	-
53.97	0.177752	-
54.52	0.000238	69.2
56.83	0.165854	-
57.17	0.116813	-
58.44	0.014676	-
59.40	0.003697	-
59.99	0.016936	-
61.26	0.006717	-
61.68	0.002974	-
62.08	0.000800	357.4
62.55	0.000084	357.4

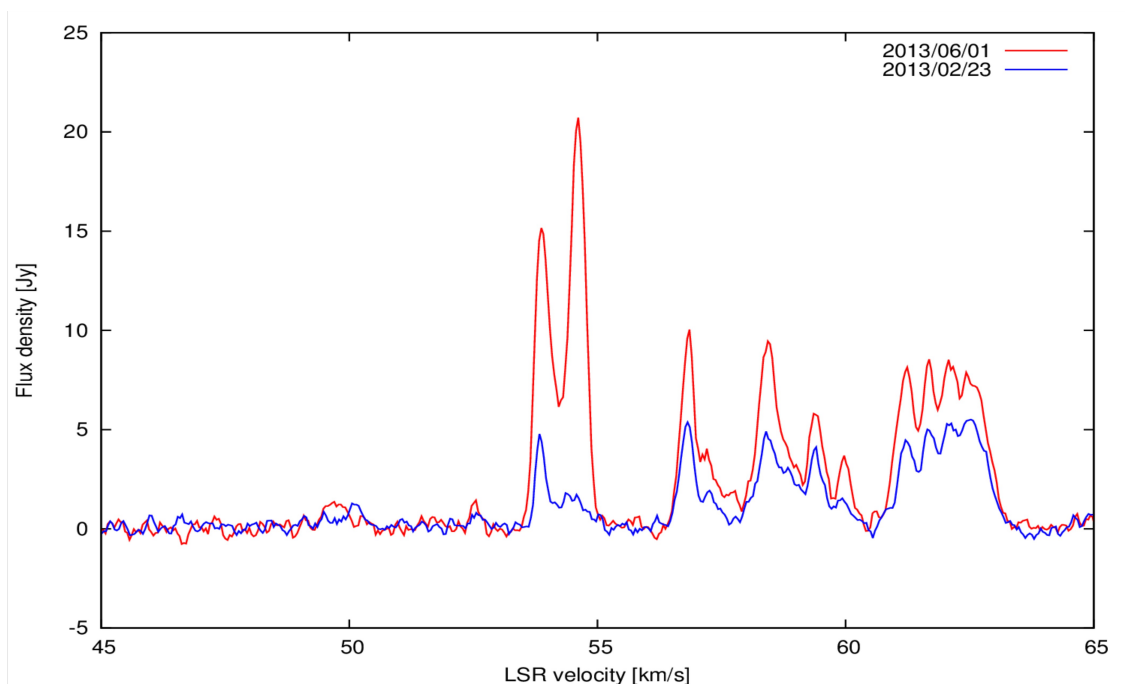


図 40 G 37.47-01 のスペクトル

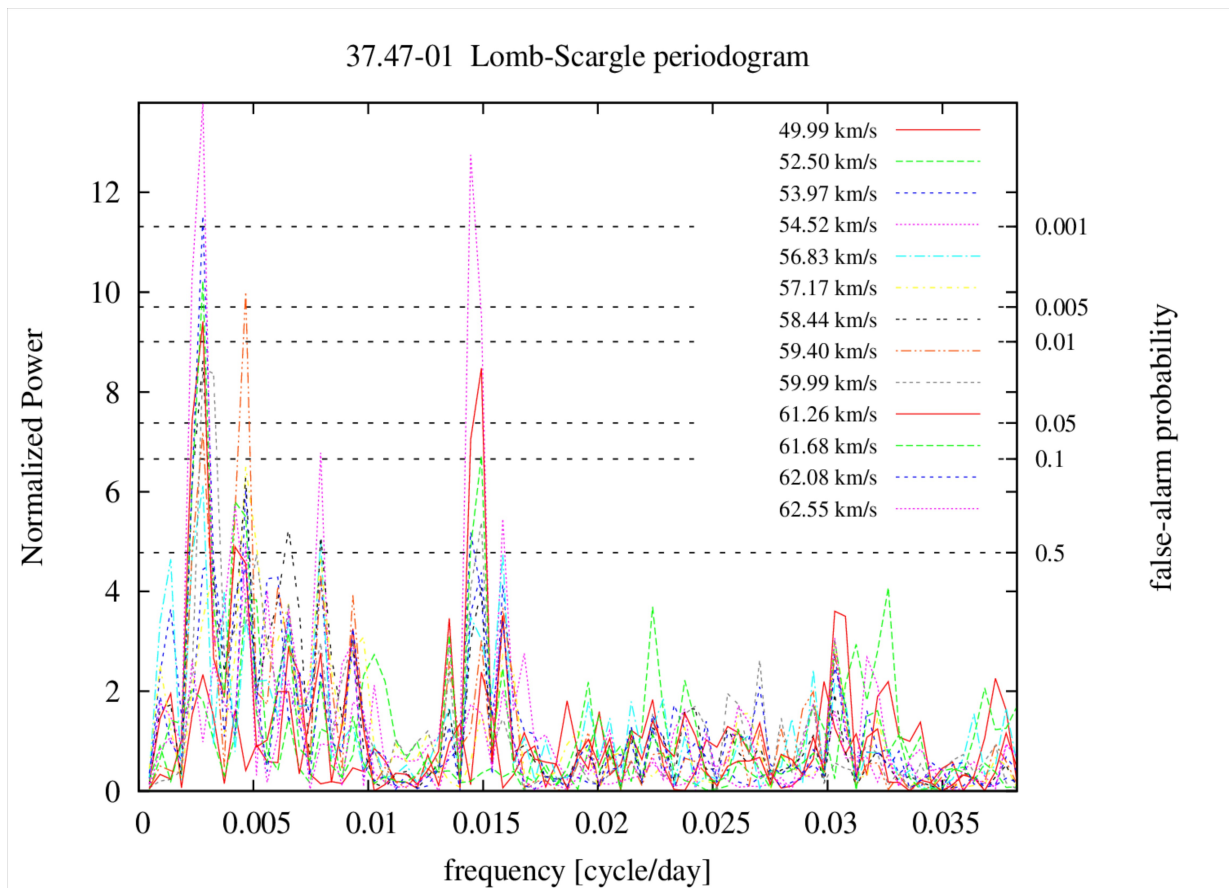


図 41 G 37.47-01 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル

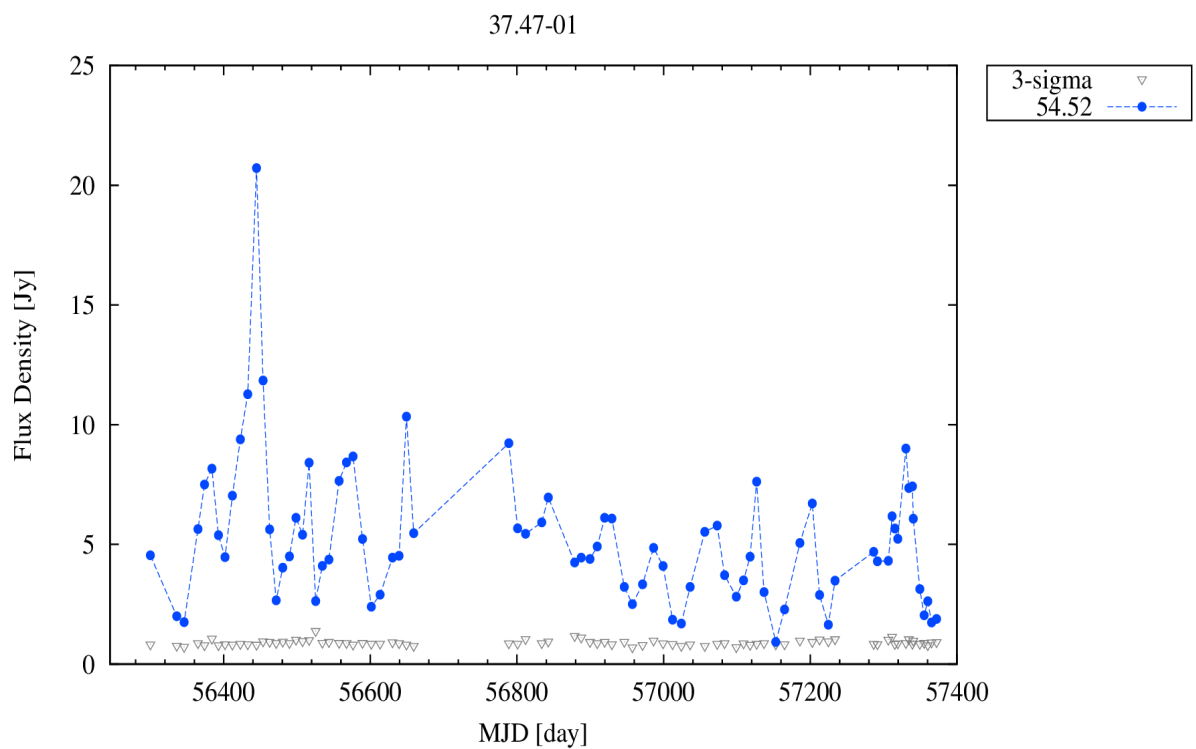


図 42 G 37.47-01 の強度変動プロット

4.3.15 G 45.47+01

G 45.47+01 は 8 個の速度成分が同定されている。このうち 5 個の成分が、誤警報確率 ≤ 0.001 であった。視線速度 57.29[km/s]の成分は導出周期が 429.6 日であった。観測期間が 1074 日なので、上記の 1 個の成分は条件②を満たさない。ただし、今後もモニター観測は続けられるため、観測期間が延びることにより条件②を満たすことになるかもしれない。

他 4 個の成分について、視線速度 59.65[km/s]、64.35[km/s]、65.09[km/s]、65.82[km/s]の成分は導出周期が 195.3 日であり、隣り合う独立周期との差は +19.5 日、-16.3 日であった。そして先行研究で得られていた周期は 195.6 日なので、これは導出周期の誤差の範囲内と言えるだろう。図 45 のグラフを見ても周期はおよそ 195.3 日と読み取れると思われ、この天体に対しての Lomb-Scargle 法の適用は狙い通りの結果を導けたと思われる。

表 18 G 45.47+01 の解析結果

視線速度[km/s]	誤警報確率	周期[day]
57.29	0.000104	429.6
58.01	0.247968	-
59.65	0.000002	195.3
62.30	0.067642	-
64.35	0.000889	195.3
65.09	0.000021	195.3
65.82	0.003514	195.3
66.28	0.020229	-

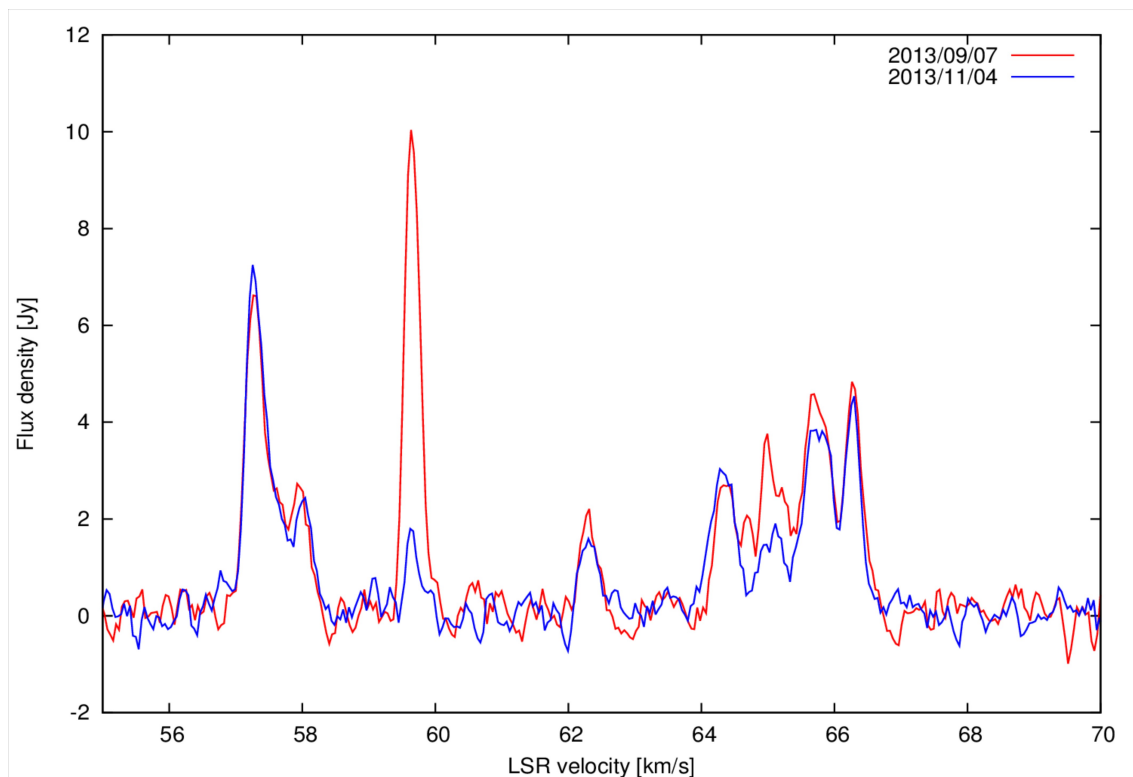


図 43 G 45.47+01 のスペクトル

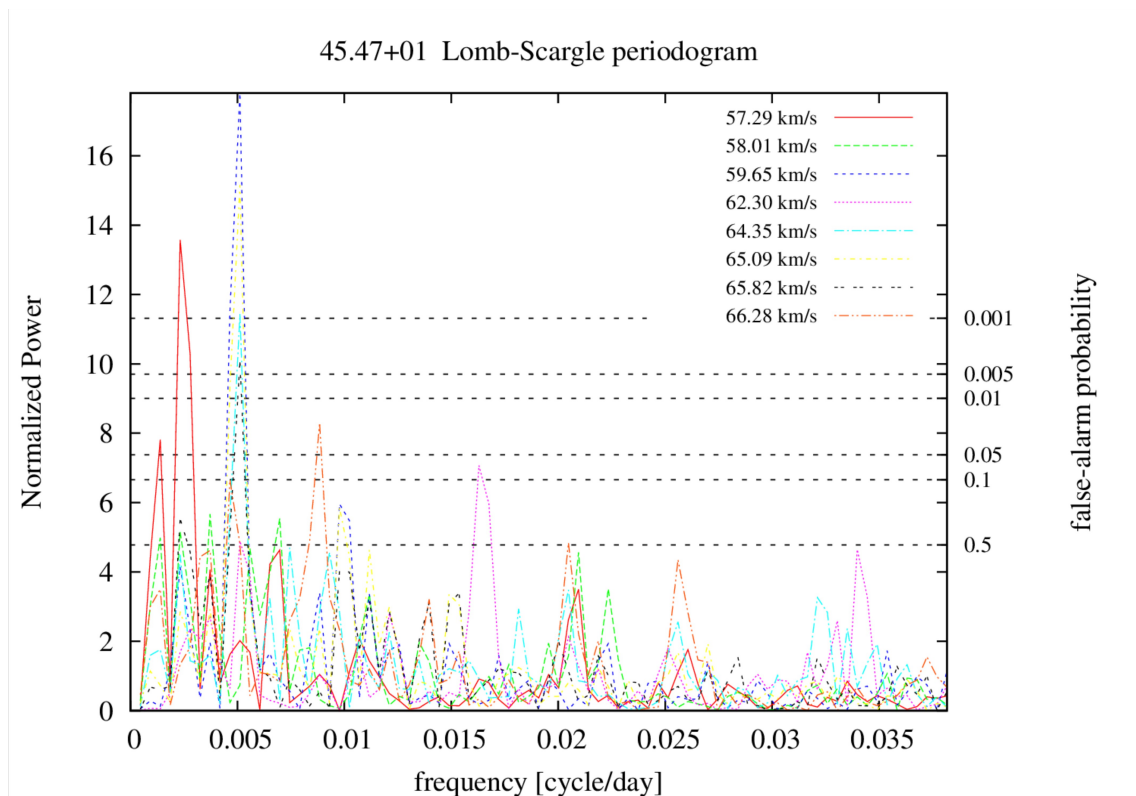


図 44 G 45.47+01 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル

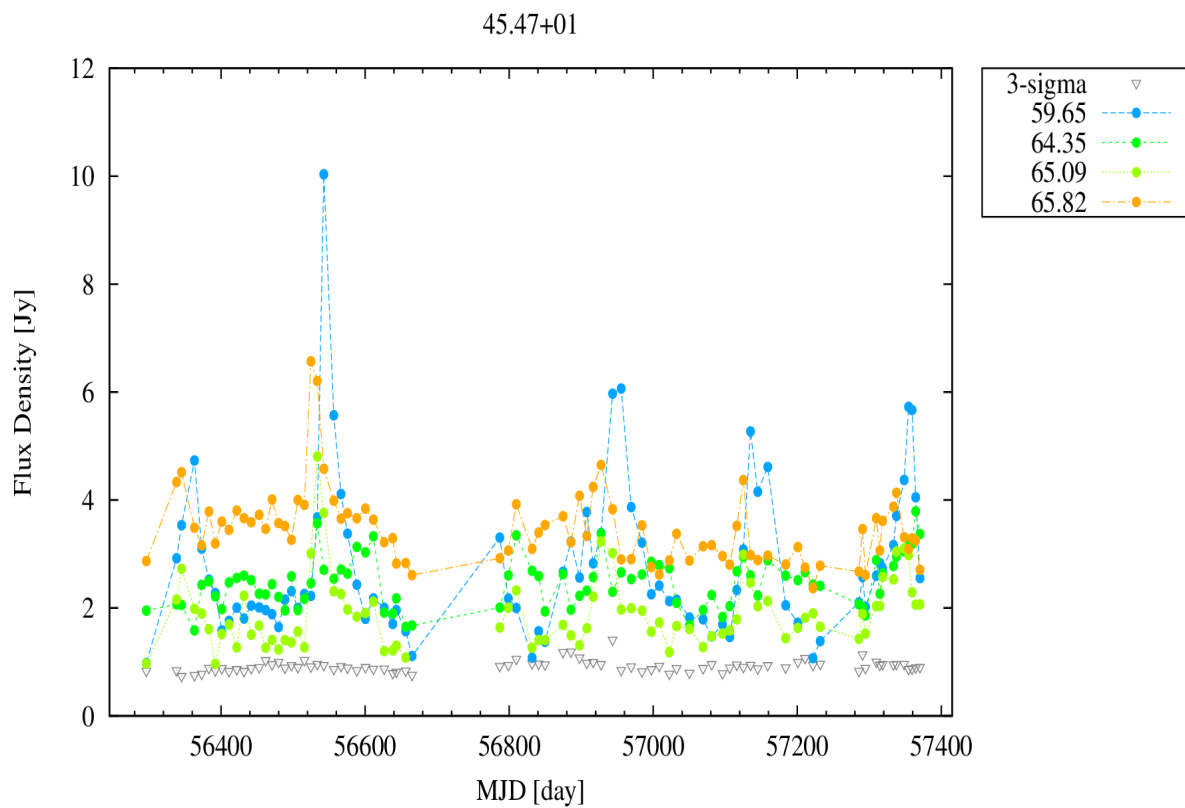


図 45 G 45.47+01 の強度変動プロット

4.3.16 G 75.76+03

G 75.76+03 は 8 個の速度成分が同定されている。このうち 6 個の成分が、誤警報確率 ≤ 0.001 であった。

視線速度 $-2.59[\text{km/s}]$ 、 $0.17[\text{km/s}]$ の成分は導出周期が 359.3 日であり、隣り合う独立周期との差は $+71.9$ 日、 -51.3 日であった。視線速度 $-1.52[\text{km/s}]$ 、 $0.68[\text{km/s}]$ の成分は導出周期が 1078.0 日であった。観測期間が 1078 日なので、上記の 4 個の成分は条件②を満たさない。ただし、今後もモニター観測は続けられるため、観測期間が延びることにより条件②を満たすことになるかもしれない。

他 2 個の成分について、視線速度 $-10.87[\text{km/s}]$ 、 $-9.38[\text{km/s}]$ の成分は導出周期が 119.8 日であり、隣り合う独立周期との差は $+7$ 日、 -6.3 日であった。そして先行研究で得られていた周期は 119.9 日なので、これは導出周期の誤差の範囲内と言えるだろう。図 48 のグラフを見ても周期はおよそ 119.8 日と読み取れると思われ、この天体に対しての Lomb-Scargle 法の適用は狙い通りの結果を導けたと思われる。

表 19 G 75.76+03 の解析結果

視線速度 $[\text{km/s}]$	誤警報確率	周期 $[\text{day}]$
-10.87	0.000457	119.8
-9.38	0.000028	119.8
-2.59	0.000631	359.3
-1.95	0.001704	-
-1.52	0.000008	1078.0
-0.38	0.001585	-
0.17	0.000968	359.3
0.68	0.000314	1078.0

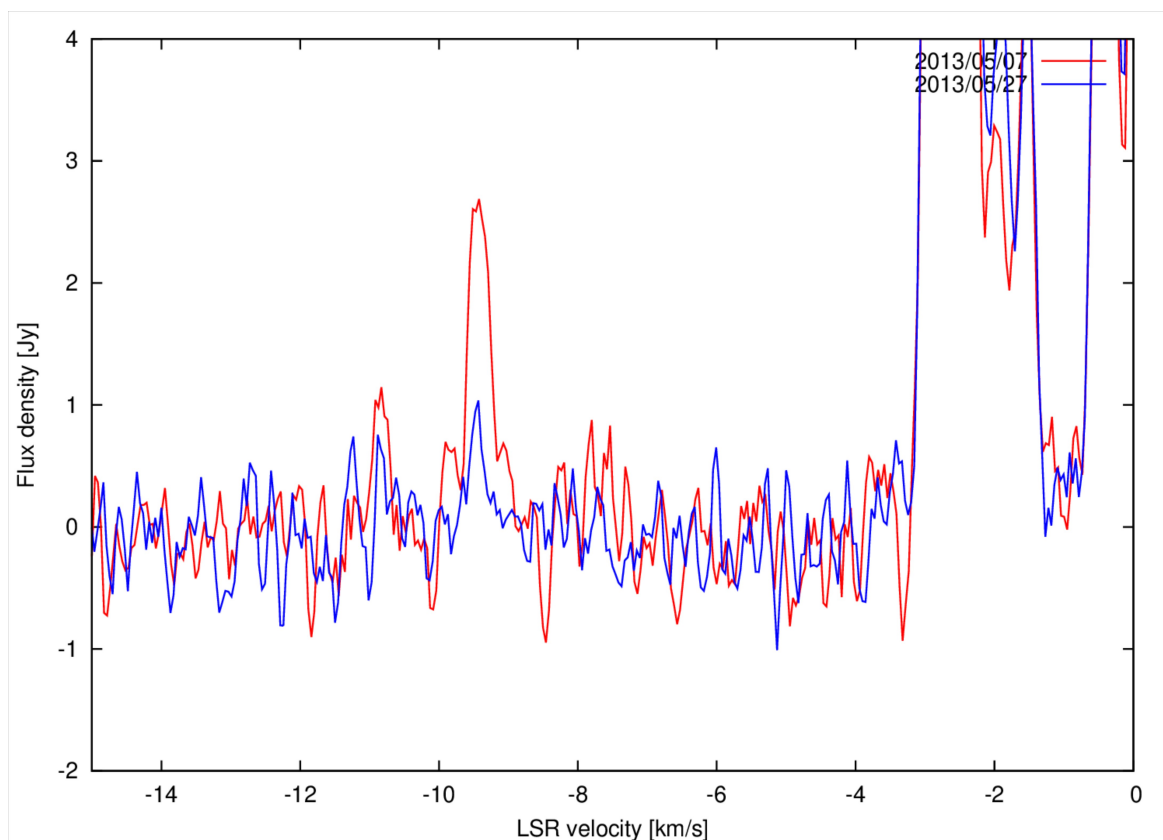


図 46 G 75.76+03 のスペクトル

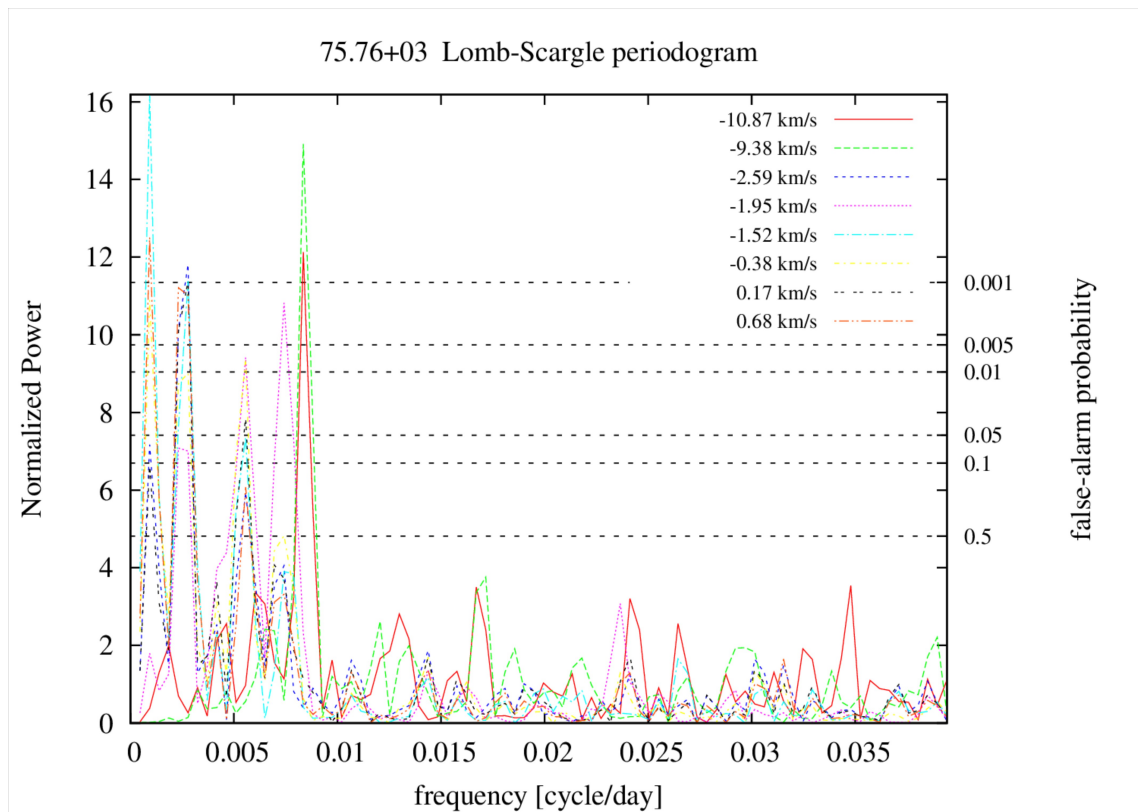


図 47 G 75.76+03 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムの特クトル

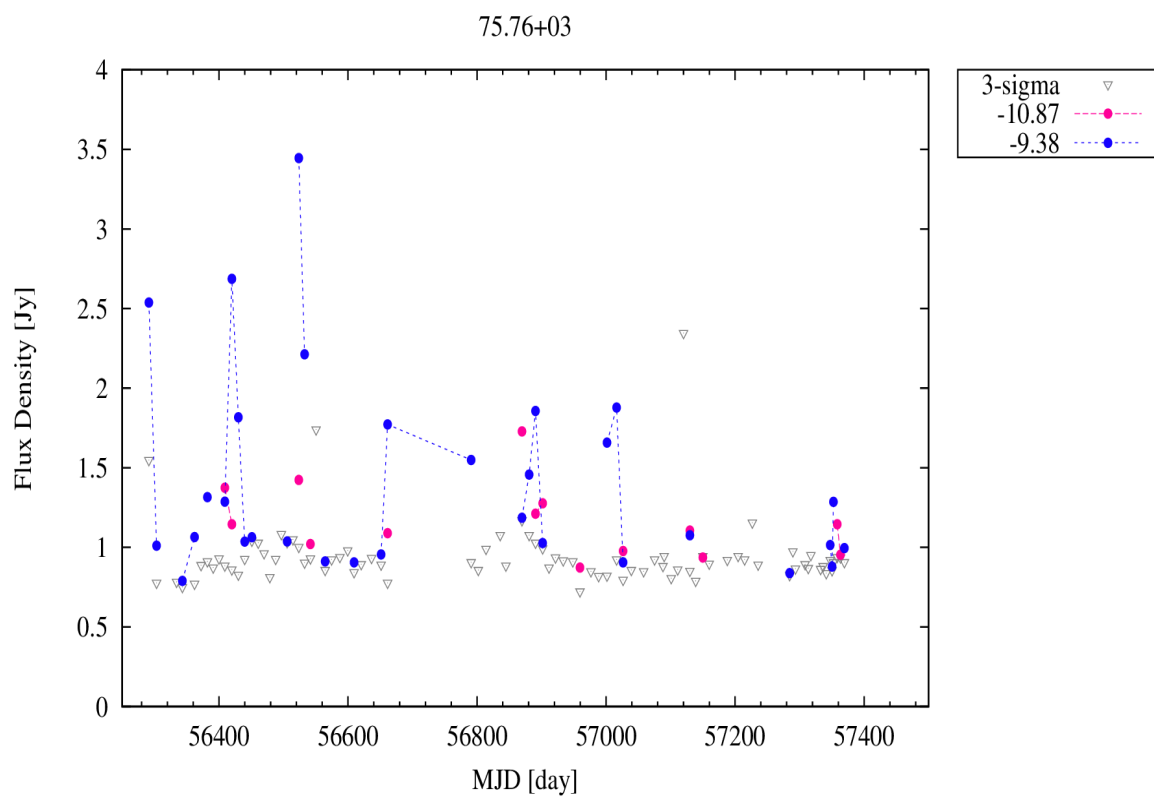


図 48 G 75.76+03 の強度変動プロット

4.3.17 G108.7-09

G108.7-09 は 4 個の速度成分が同定されている。このうち 1 個の成分が、誤警報確率 ≤ 0.001 であった。

視線速度 $-45.57[\text{km/s}]$ の成分は導出周期が165.9日であり、隣り合う独立周期との差は+13.8日、-11.9日であった。先行研究で得られていた周期は164.2日なので、これは導出周期の誤差の範囲内と言えるだろう。図 51 のグラフを見ても周期はおよそ165.9日と読み取れると思われ、この天体に対しての Lomb-Scargle 法の適用は狙い通りの結果を導けたと思われる。

表 20 G 108.7-09 の解析結果

視線速度[km/s]	誤警報確率	周期[day]
-55.79	0.317734	-
-54.66	0.458381	-
-47.30	0.619897	-
-45.57	0.000199	165.9

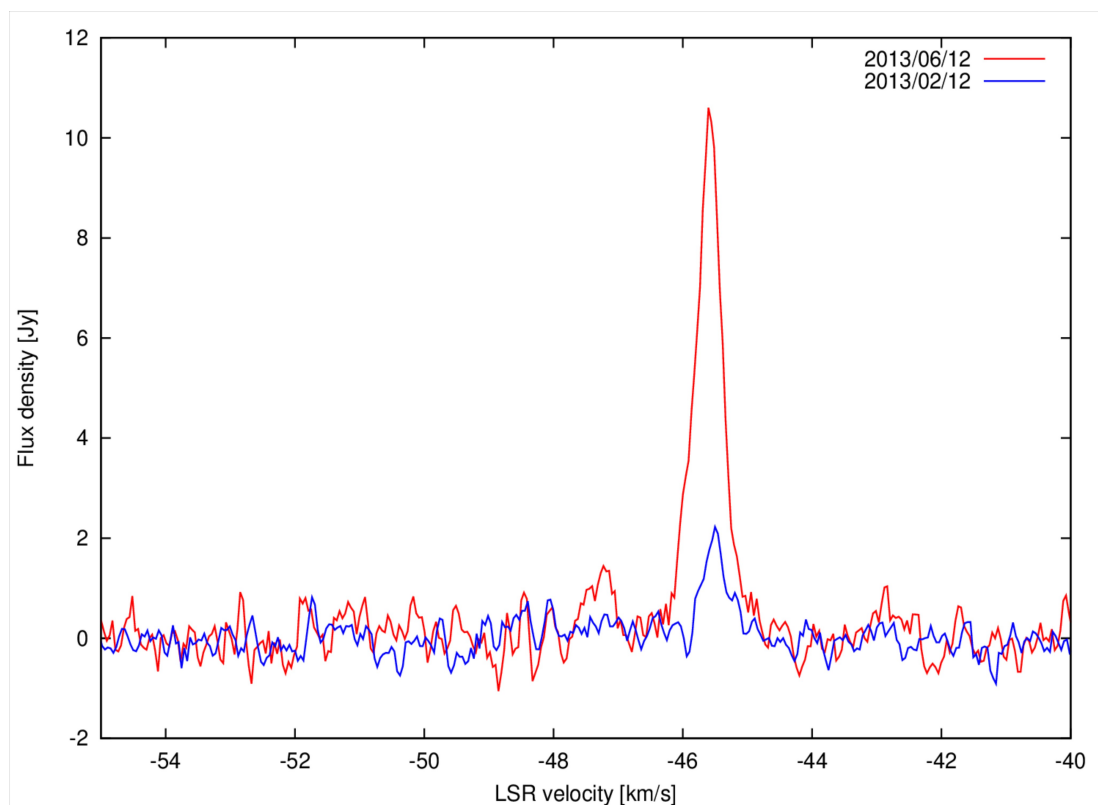


図 49 G 108.7-09 のスペクトル

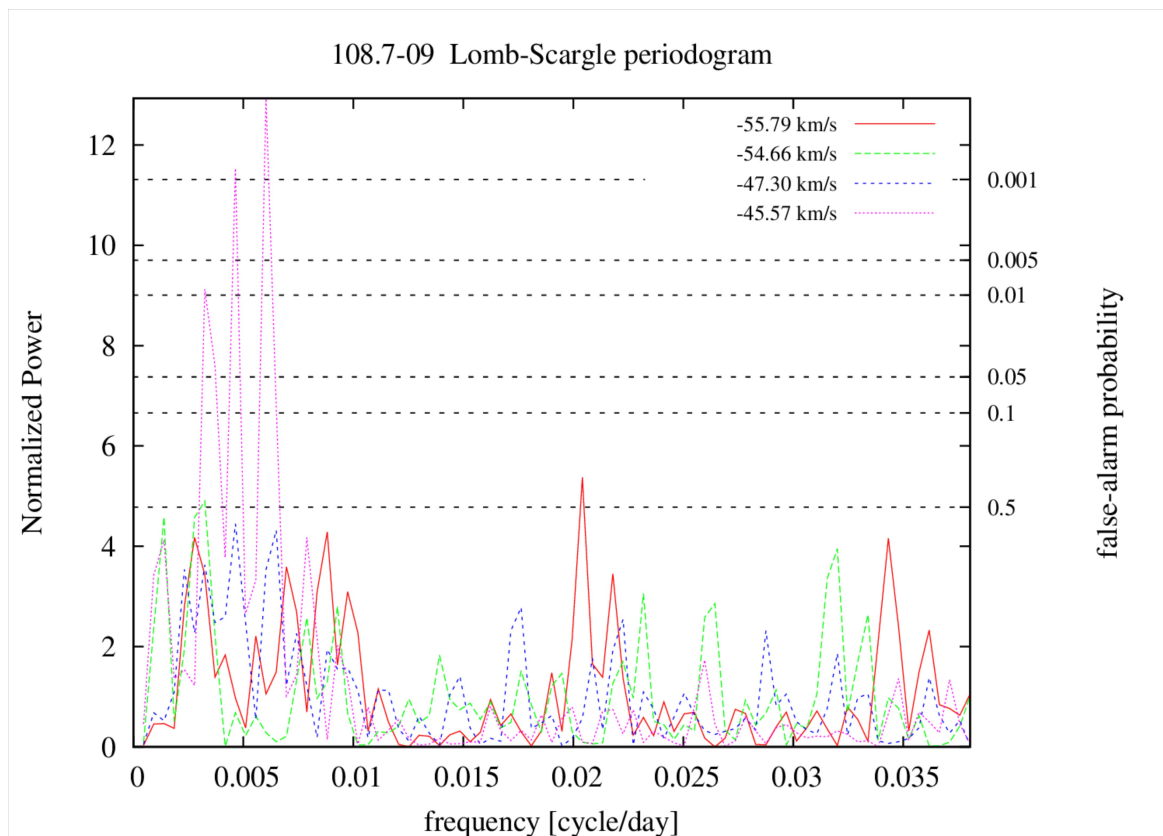


図 50 G 108.7-09 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムの特クトル

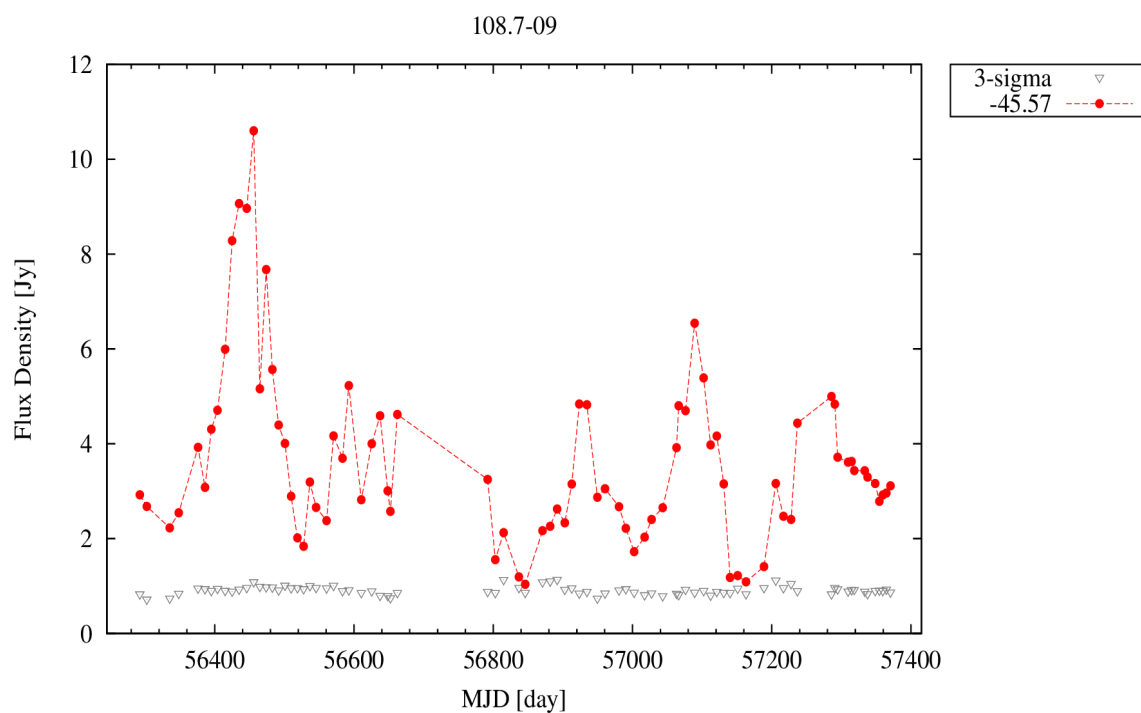


図 51 G 108.7-09 の強度変動プロット

4.3.18 G 174.1-00

G 174.1-00 は 6 個の速度成分が同定されている。すべての成分が、誤警報確率 ≤ 0.001 であった。

視線速度 0.37[km/s]の成分は導出周期が 309.2 日であり、隣り合う独立周期との差は+51.5 日、-38.7 日であった。視線速度 1.48[km/s]の成分は 432.8 日、3.77[km/s]、4.55[km/s]の成分は導出周期が 721.4 日、視線速度 4.82[km/s]の成分は導出周期が 1082.0 日であった。観測期間が 1082 日なので、上記の 5 個の成分は条件②を満たさない。ただし、今後もモニター観測は続けられるため、観測期間が延びることにより条件②を満たすことになるかもしれない。

他 1 個の成分について、視線速度 2.04[km/s]の成分は導出周期が 47.0 日であり、隣り合う独立周期との差は+1.1 日、-1.0 日である。先行研究で得られていた周期は 45.5 日なので、これはほぼ導出周期の誤差の範囲内と言えるだろう。図 54 のグラフを見ても周期はおよそ 47.0 日と読み取れると思われ、この天体に対しての Lomb-Scargle 法の適用は狙い通りの結果を導けたと思われる。

表 21 G 174.1-00 の解析結果

視線速度[km/s]	誤警報確率	周期[day]
0.37	0.000004	309.2
1.48	0.000000	432.8
2.04	0.000000	47.0
3.77	0.000000	721.4
4.55	0.000000	721.4
4.82	0.000000	1082.0

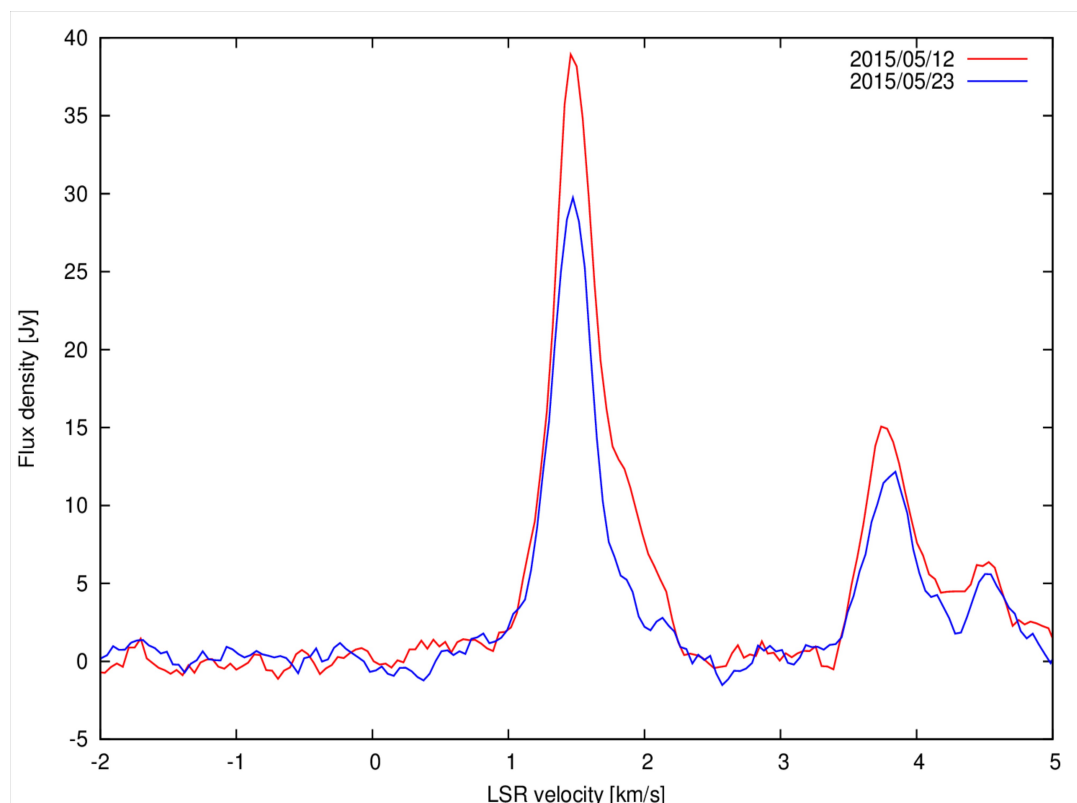


図 52 G 174.1-00 のスペクトル

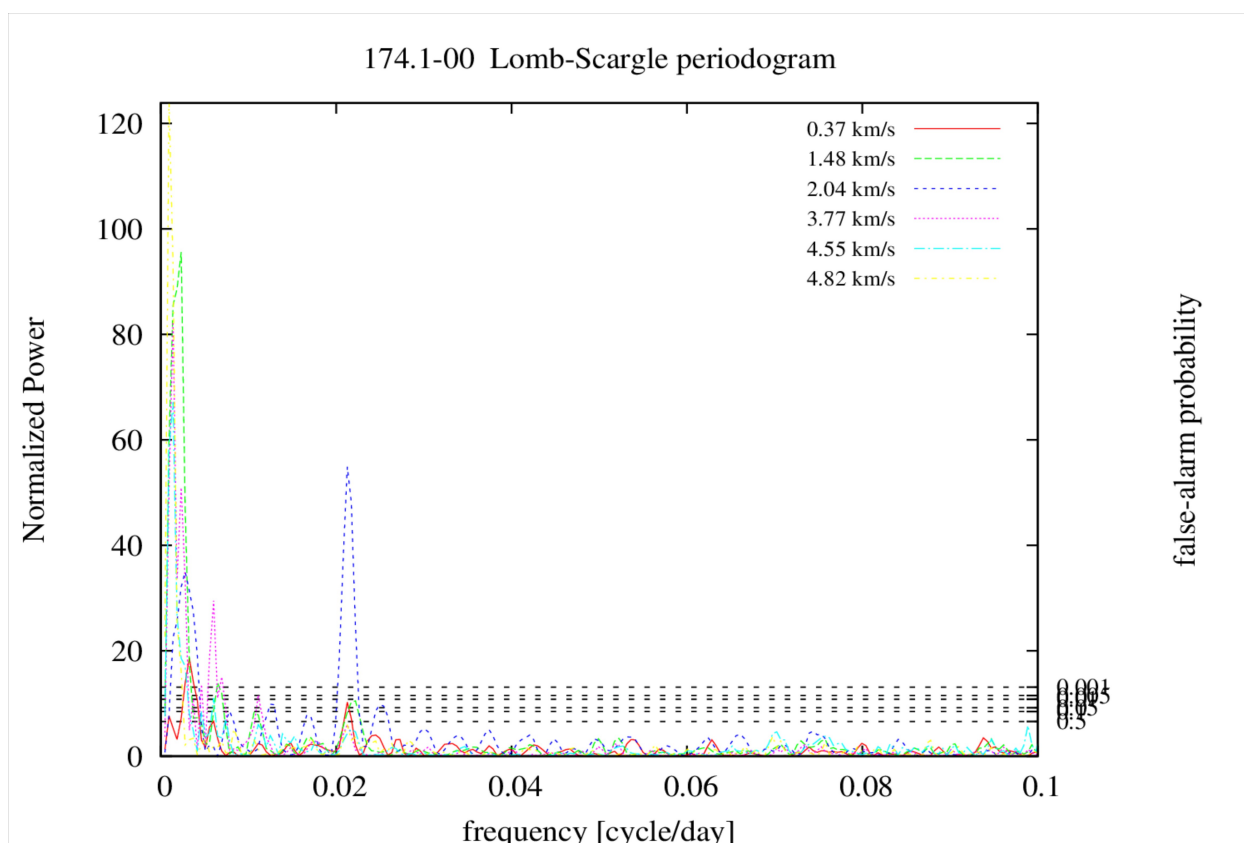


図 53 G 174.1-00 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムの特クトル

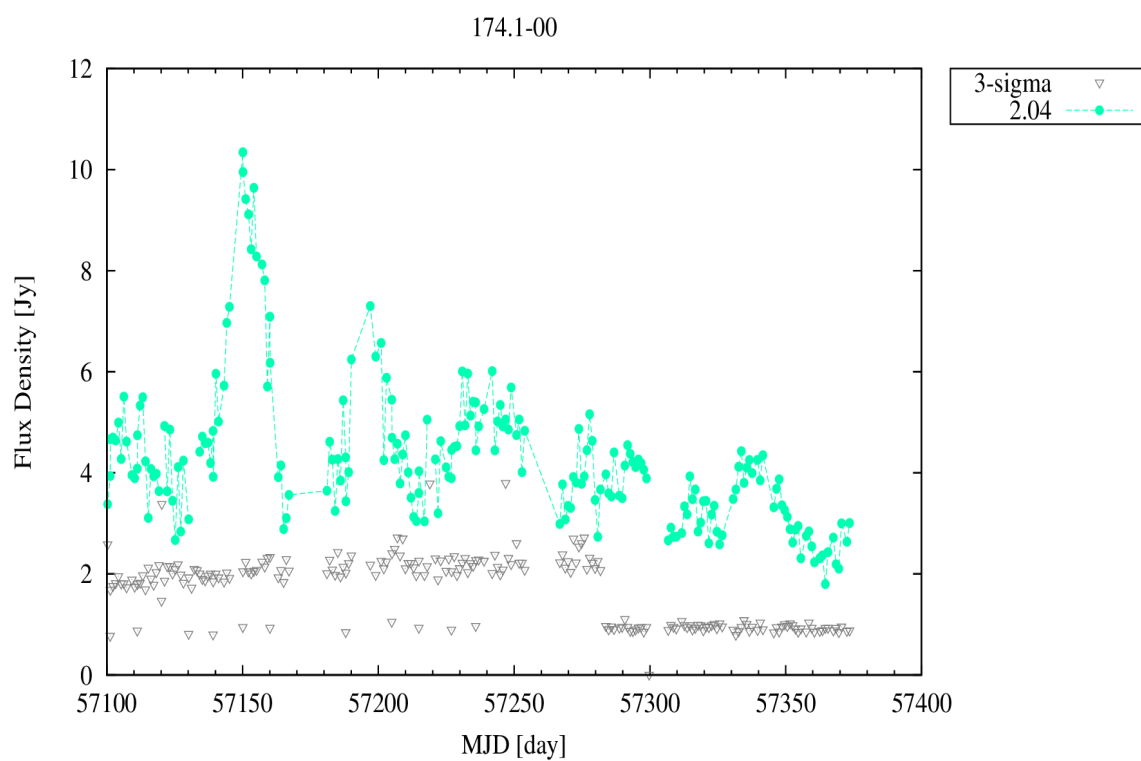


図 54 G 174.1-00 の強度変動プロット

4.3.19 G 196.4-16

G 196.4-16 は4個の速度成分が同定されている。すべての成分が、誤警報確率 ≤ 0.001 であった。

視線速度 15.88[km/s]の成分は導出周期が1080.0日であった。観測期間が1080日なので、上記の1個の成分は条件②を満たさない。ただし、今後もモニター観測は続けられるため、観測期間が延びることにより条件②を満たすことになるかもしれない。

他3個の成分について、視線速度 14.70[km/s]、15.15[km/s]、15.43[km/s]の成分は導出周期が144.0日であり、隣り合う独立周期との差は+10.2日、-9.0日である。G196.4-06について、Goedhart et al.(2004)によって、視線速度 14.73[km/s]の成分に周期 668日があると報告されている。しかし、G196.4-16は厳密な周期性を持つと分類しながらも、より長い期間観測されれば厳密な周期性は見つからない可能性もあると示唆している。Sugiyama et al. (2015)でも周期 132.5日と報告されている。こちらであれば、今回の解析結果とほぼ導出周期の誤差の範囲内と言えるだろう。

図57のグラフを見ても周期はおおよそ144.0日と読み取れると思われ、この天体に対してのLomb-Scargle法の適用は狙い通りの結果を導いたと思われる。

表 22 G 196.4-16 の解析結果

視線速度[km/s]	誤警報確率	周期[day]
14.70	0.000000	144.0
15.15	0.000000	144.0
15.43	0.000000	144.0
15.88	0.000000	1080.0

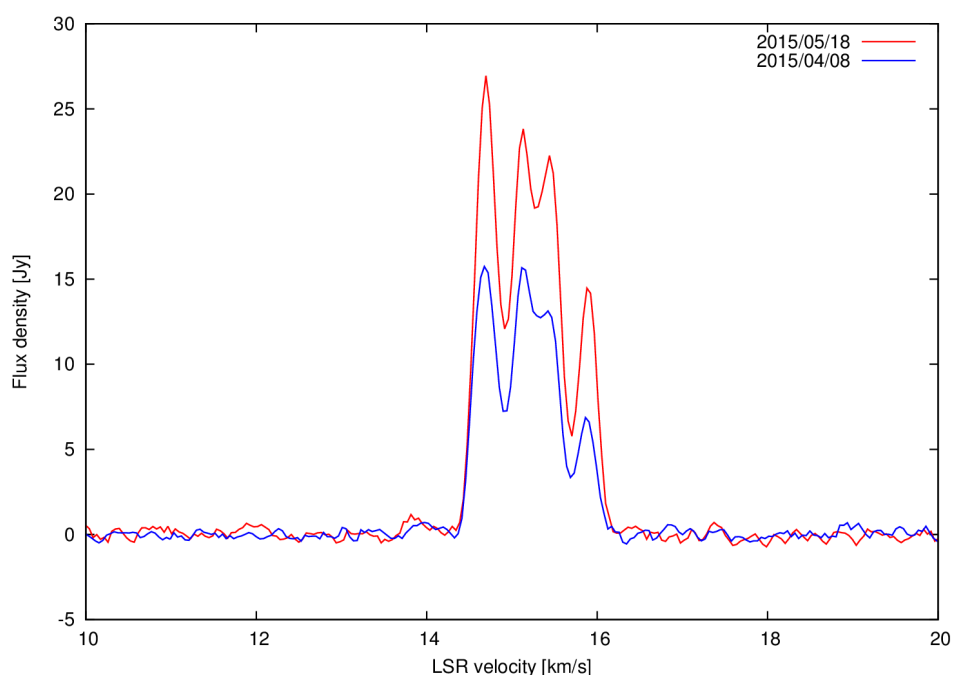


図 55 G 196.4-16 のスペクトル

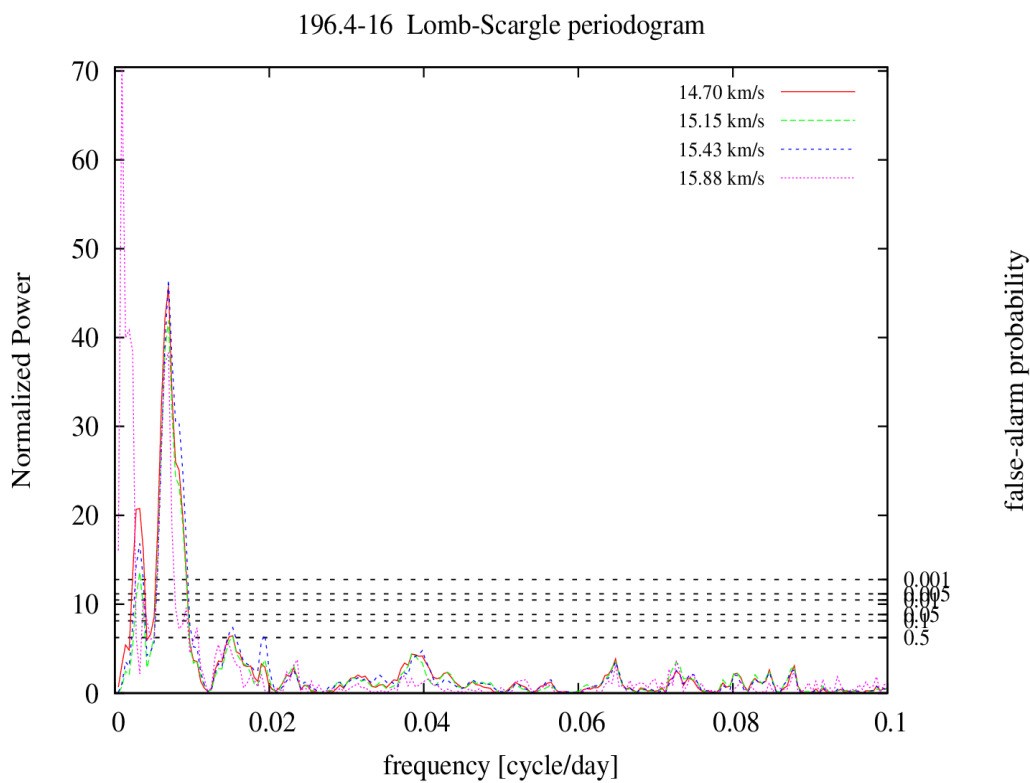


図 56 G196.4-16 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムの特クトル

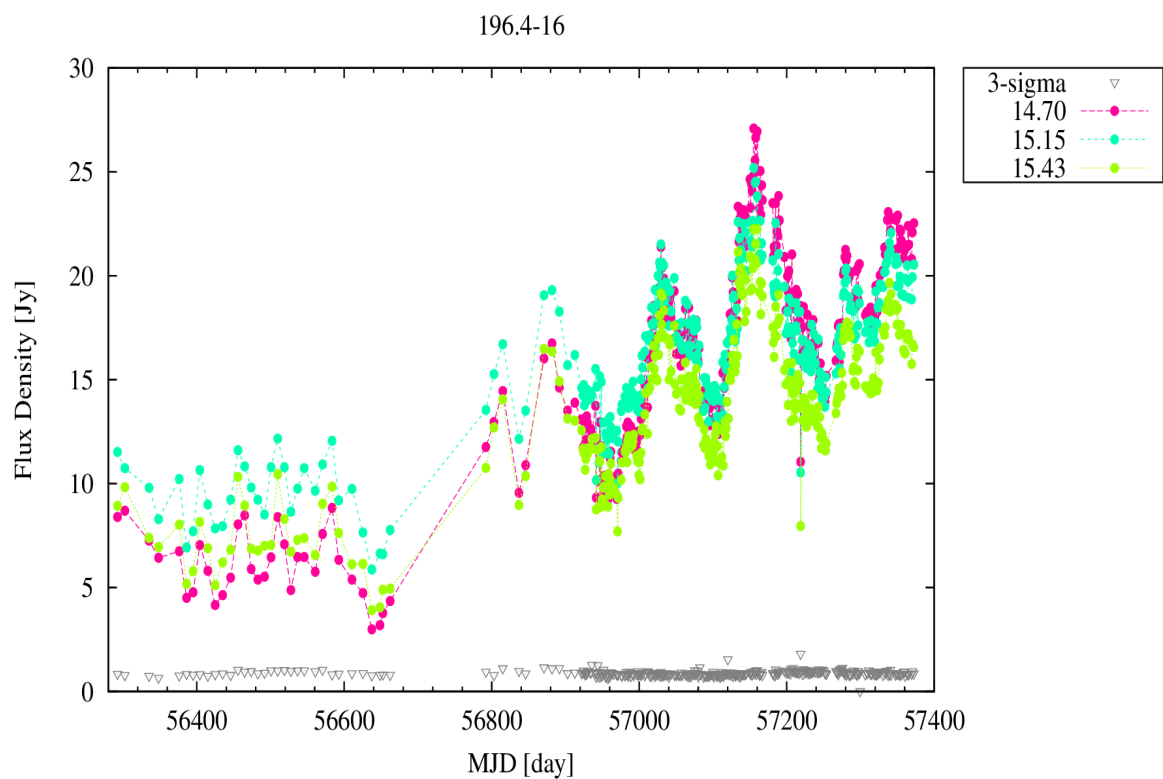


図 57 G196.4-16 の強度変動プロット

4.3.20 IRS22198

IRS22198 は 7 個の速度成分が同定されている。すべての成分が、誤警報確率 ≤ 0.001 であった。

視線速度 $-16.89[\text{km/s}]$ 、 $-16.07[\text{km/s}]$ 、 $-10.88[\text{km/s}]$ 、 $-9.19[\text{km/s}]$ 、 $-8.48[\text{km/s}]$ 、 $-7.30[\text{km/s}]$ の成分は導出周期が 34.3 日であり、隣り合う独立周期との差は $+0.6$ 日、 -0.5 日である。視線速度 $-15.50[\text{km/s}]$ の成分は導出周期が 34.9 日であり、隣り合う独立周期との差は $+0.6$ 日、 -0.6 日である。この 2 つの速度成分の周期は隣り合う独立周期であり、導出周期の誤差と考えられる。そして先行研究で得られていた周期は 34.6 日なので、これは導出周期の誤差の範囲内と言えるだろう。図 60 のグラフを見ても周期はおよそ 34.3 日と読み取れると思われ、この天体に対しての Lomb-Scargle 法の適用は狙い通りの結果を導けたと思われる。

表 23 IRS22198 の解析結果

視線速度 [km/s]	誤警報確率	周期 [day]
-16.89	0.000000	34.3
-16.07	0.000000	34.3
-15.50	0.000000	34.9
-10.88	0.000000	34.3
-9.19	0.000000	34.3
-8.48	0.000000	34.3
-7.30	0.000000	34.3

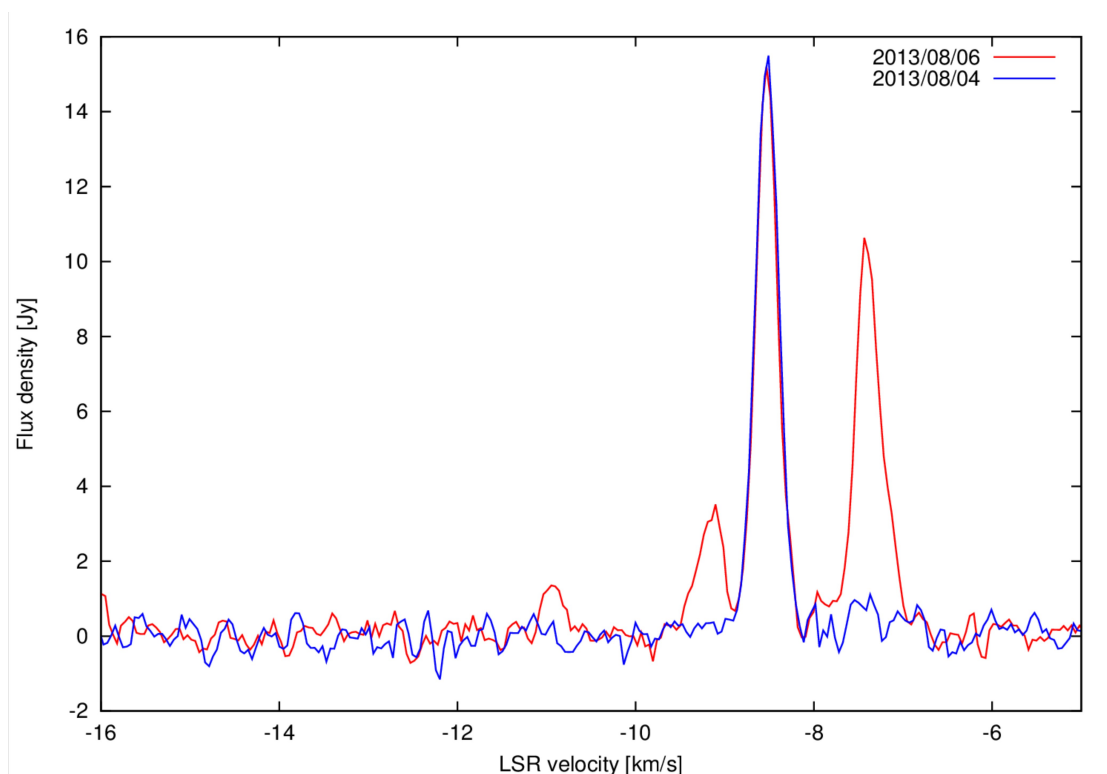


図 58 IRS22198 のスペクトル

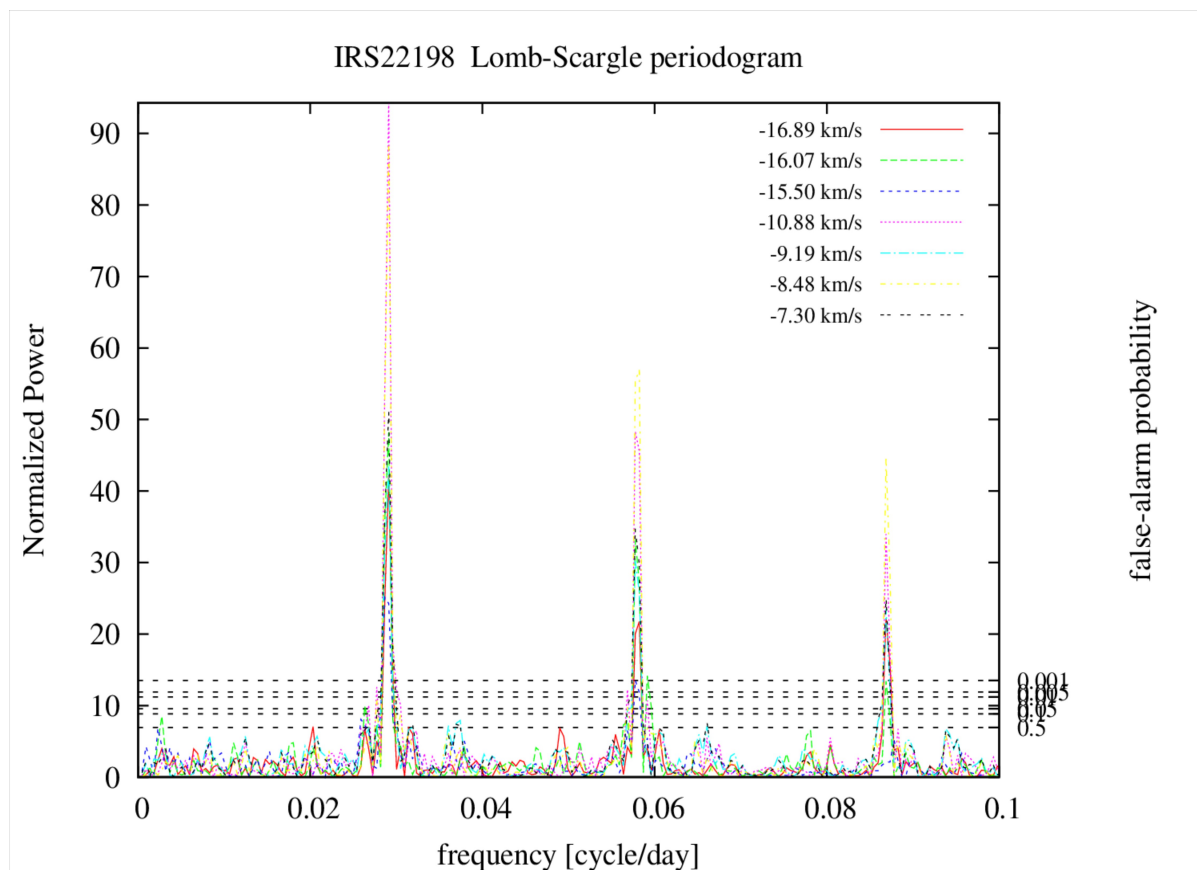


図 59 IRS22198 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムの特クトル

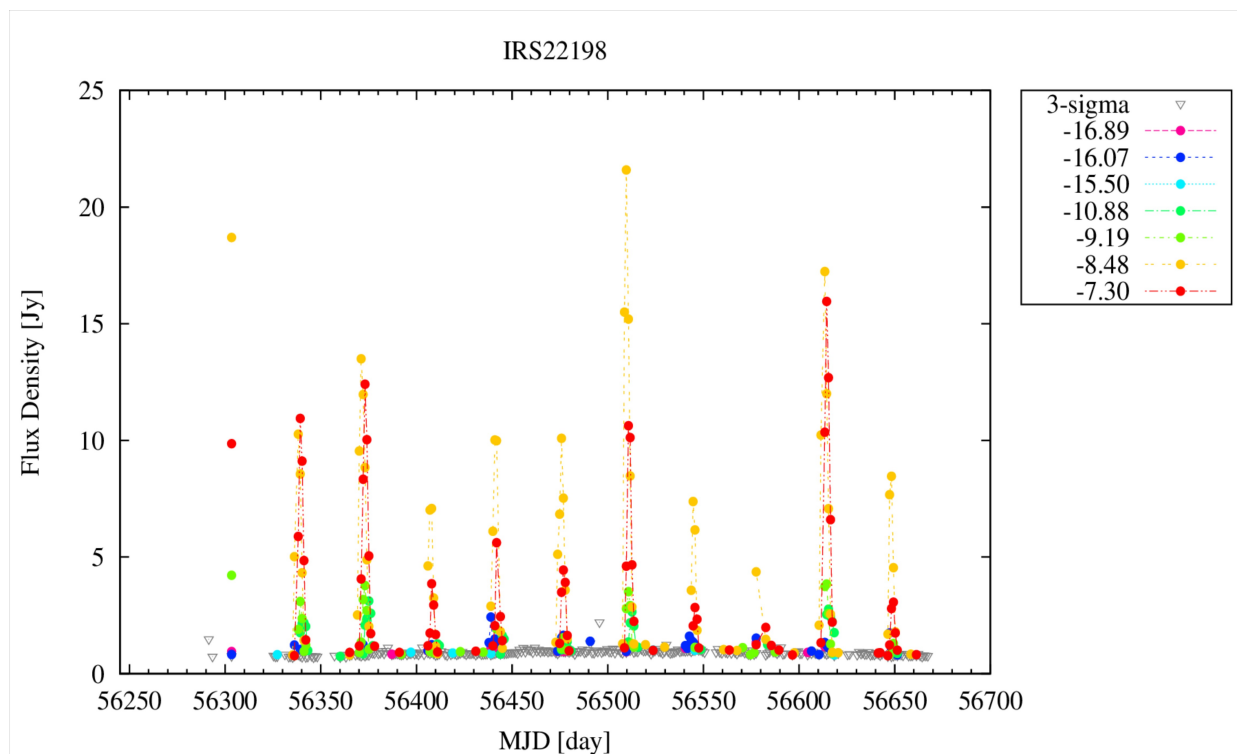


図 60 IRS22198 の強度変動プロット

4.3 先行研究で得られていた周期と今回の解析で得られた周期が一致しなかった天体

4.3.1 G 012.02-00.03

G012.02-00.03 は 10 個の速度成分が同定されている。このうち 6 個の成分が、誤警報確率 ≤ 0.001 であった。

視線速度 110.07[km/s]、111.19[km/s]の成分は導出周期が 1077.0 日、視線速度 106.31[km/s]、108.26[km/s]、110.59[km/s]の成分は導出周期が 718.0 日である。観測期間が 1080 日なので、上記の 5 個の成分は条件②を満たさない。ただし、今後もモニター観測は続けられるため、観測期間が延びることにより条件②を満たすことになるかもしれない。

他 1 個の成分について、視線速度 111.84[km/s]の成分は導出周期が 195.8 日であり、隣り合う独立周期との差は+19.6 日、-16.3 日であった。この成分は条件①、②どちらも満たしているが、図 62 のグラフを見てみると、195.8 日という周期を読み取るのは難しいと思われる。(G012.02-00.03 のスペクトルは、保存されているファイルを開くと Ubuntu が停止するため未掲載)

表 24 G012.02-00.03 の解析結果

視線速度[km/s]	誤警報確率	周期[day]
105.28	0.303726	-
105.48	0.890933	-
105.63	0.856296	-
106.31	0.000507	718.0
108.26	0.000000	718.0
110.07	0.000001	1077.0
110.59	0.000004	718.0
111.19	0.000000	1077.0
111.84	0.000013	195.8
112.76	0.097596	-

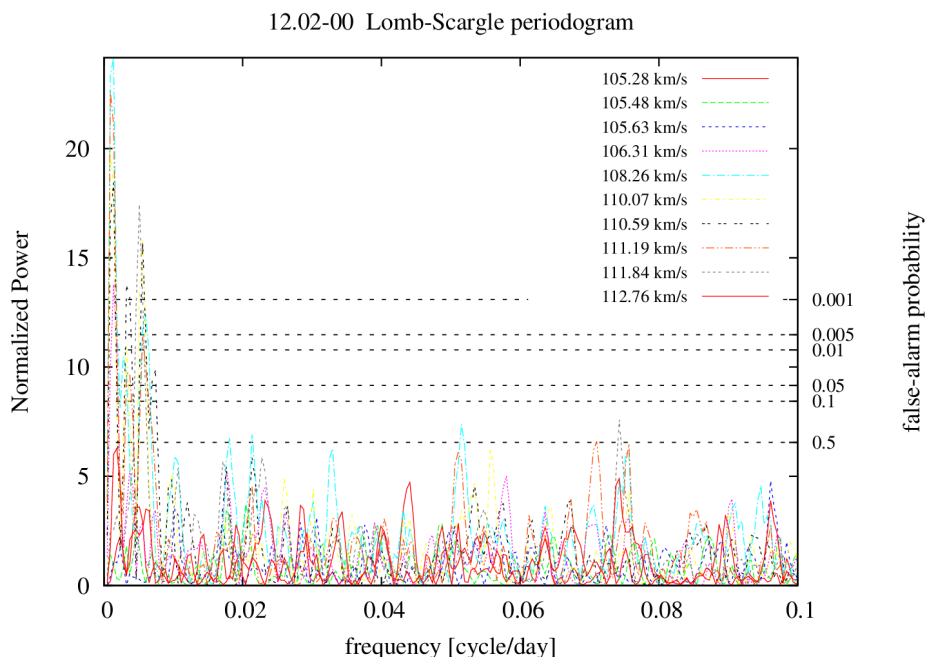


図 61 G 012.02-00.03 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムの特クトル

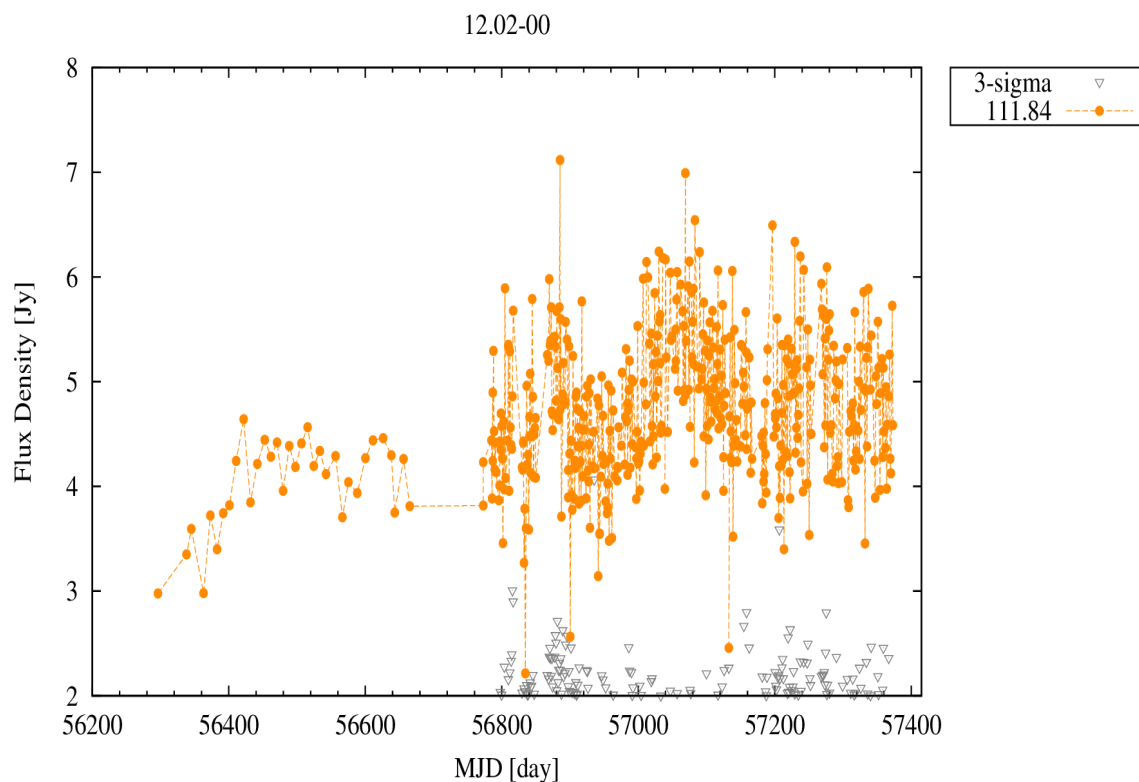


図 62 G 012.02-00.03 の強度変動プロット

この天体のデータは 300 秒積分のものと 60 秒積分のものが混ざっていたので、取る値にバラツキがあった。なので 60 秒積分のものを除外し、300 秒積分のもののみで、もう一度解析を行った。

その結果、誤警報確率 ≤ 0.001 となる速度成分は存在しなかった。
考察として、観測されたフラックス密度が小さかったため、60 秒積分の観測の信号雑音比(S/N)が悪いことが影響したのではないかと考えている。

表 25 G012.02-00.03 の解析結果(60 秒積分のものを除外)

視線速度[km/s]	誤警報確率	周期[day]
105.28	0.475502	-
105.48	0.244993	-
105.63	0.268385	-
106.31	0.009039	-
108.26	0.968977	-
110.07	0.619917	-
110.59	0.746092	-
111.19	0.651304	-
111.84	0.302510	-
112.76	0.005787	-

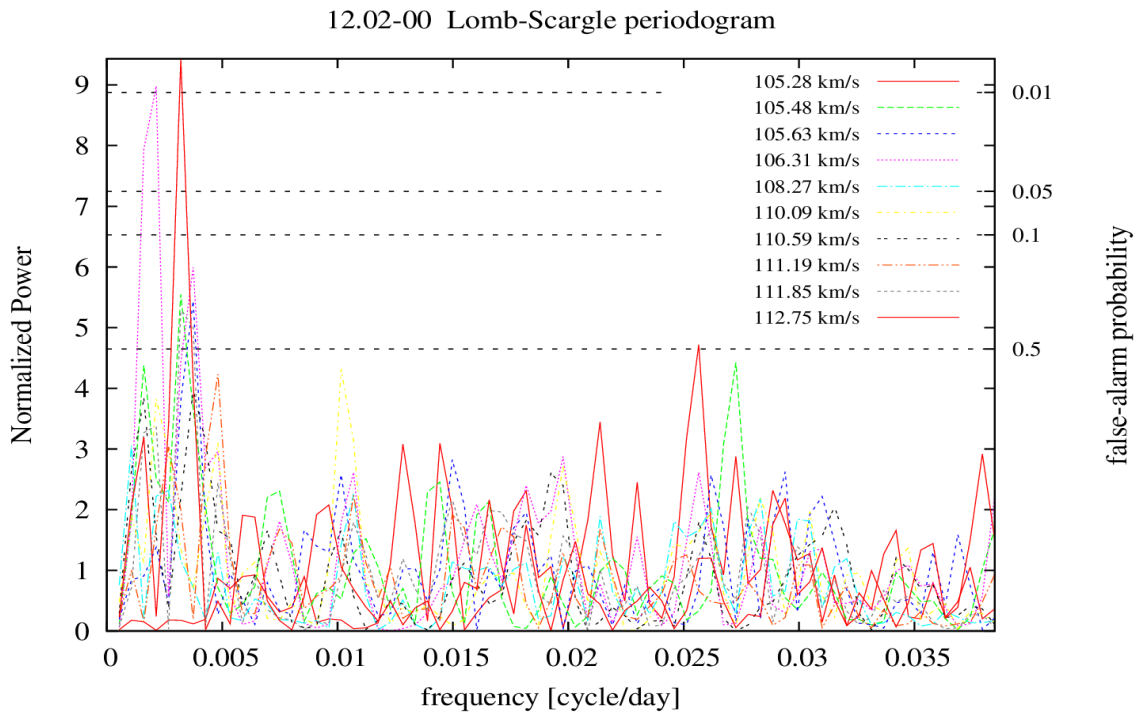


図 63 G 012.02-00.03 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムの特クトル
(60 秒積分のものを除外)

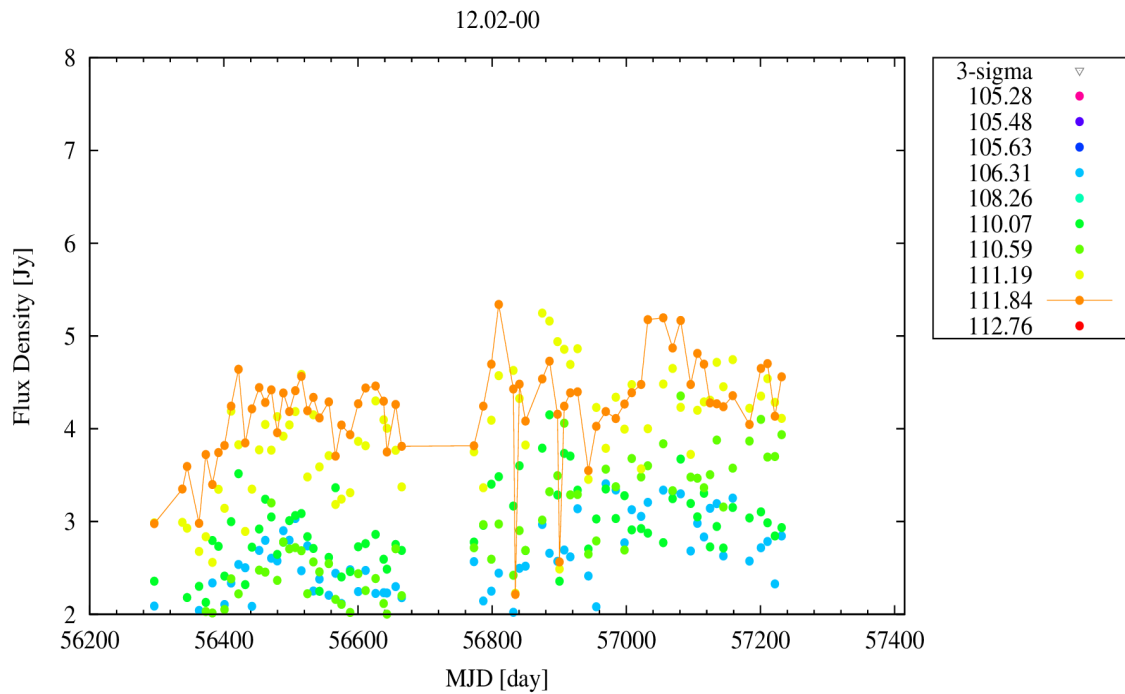


図 64 G 012.02-00.03 の強度変動プロット(60 秒積分のものを除外)

4.3.2 G033.64-00.21

G033.64-00.21 は 8 個の速度成分が同定されている。このうち 7 個の成分が、誤警報確率 ≤ 0.001 であった。

視線速度 59.30[km/s]、60.32[km/s]、60.93[km/s]の成分は導出周期が 716.1 日であった。視線速度 59.63[km/s]、63.16[km/s]の成分は導出周期が 429.7 日であった。観測期間が 1074 日なので、上記の 5 個の成分は条件②を満たさない。ただし、今後もモニター観測は続けられるため、観測期間が延びることにより条件②を満たすことになるかもしれない。

他 2 個の成分について、視線速度 58.94[km/s]の成分は導出周期が 179.0 日であり、隣り合う独立周期との差は+16.3 日、-13.7 日であった。視線速度 62.69[km/s]の成分は導出周期が 268.5 日であり、隣り合う独立周期との差は+38.4 日、-29.8 日であった。この成分は条件①、②どちらも満たしているが、図?のグラフを見てみると、それぞれ 195.8 日、268.5 日という周期を読み取るのは難しいと思われる。

考察としては、2 つの山の部分、そして 2 つの谷の部分で多くの相関を取るから(データが非常に密だから重みが付きすぎた可能性)周期性があると解析結果が示しているのではないかと考えている。

表 26 G033.64-00.21 の解析結果

視線速度[km/s]	誤警報確率	周期[day]
57.04	0.867124	-
58.94	0.000000	179.0
59.30	0.000000	716.1
59.63	0.000001	429.7
60.32	0.000000	716.1
60.93	0.000000	716.1
62.69	0.000000	268.5
63.16	0.000000	429.7

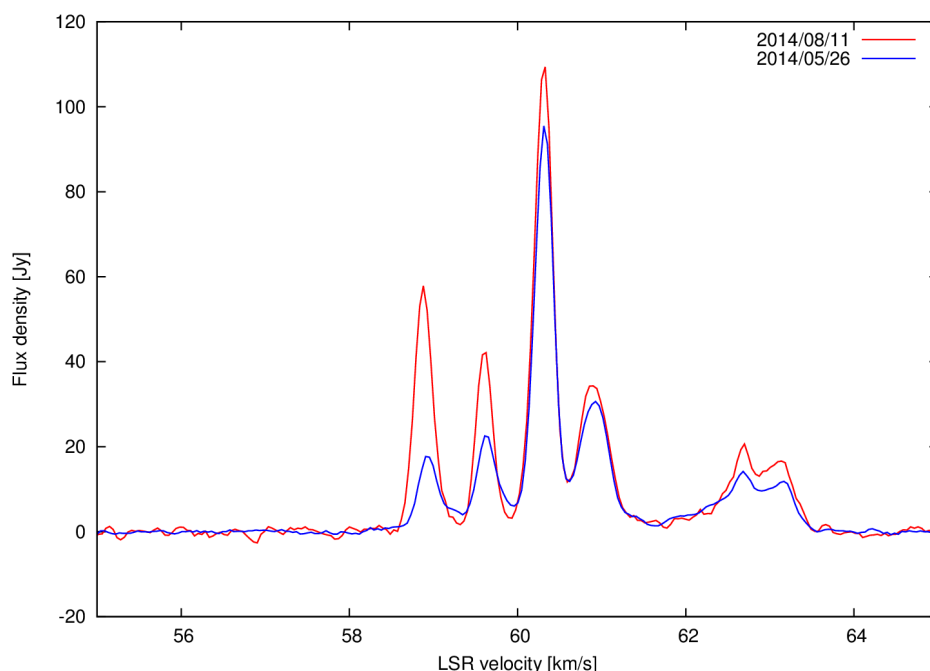


図 63 G033.64-00.21 のスペクトル

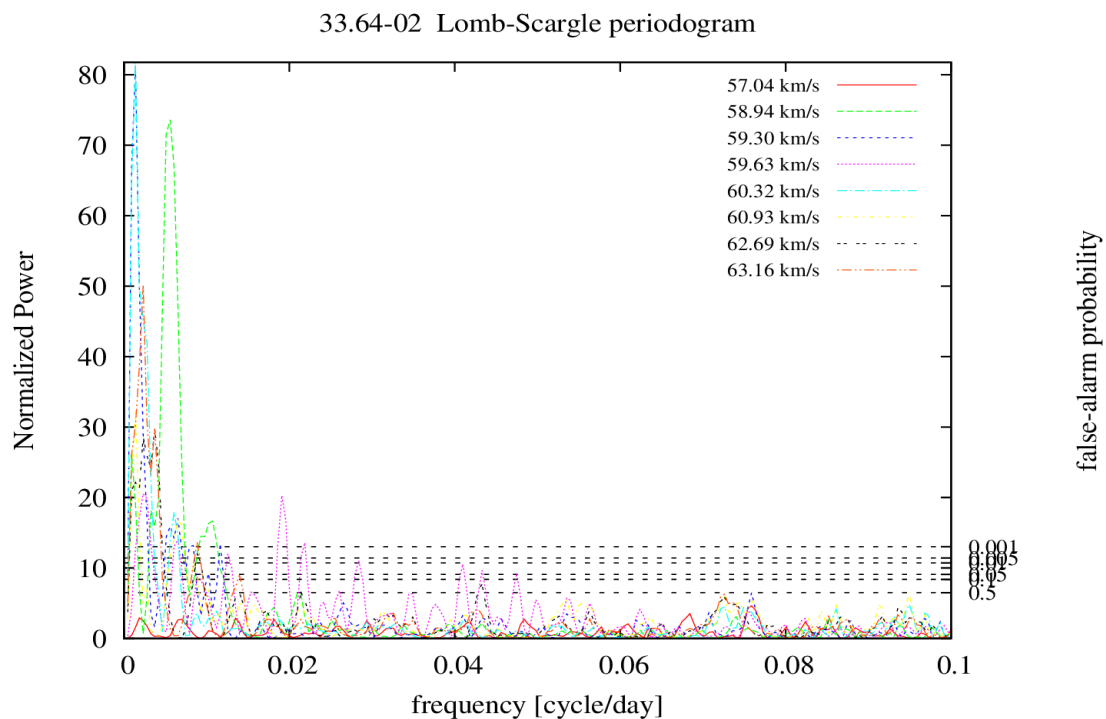


図 64 G033.64-00.21 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムの特クトル

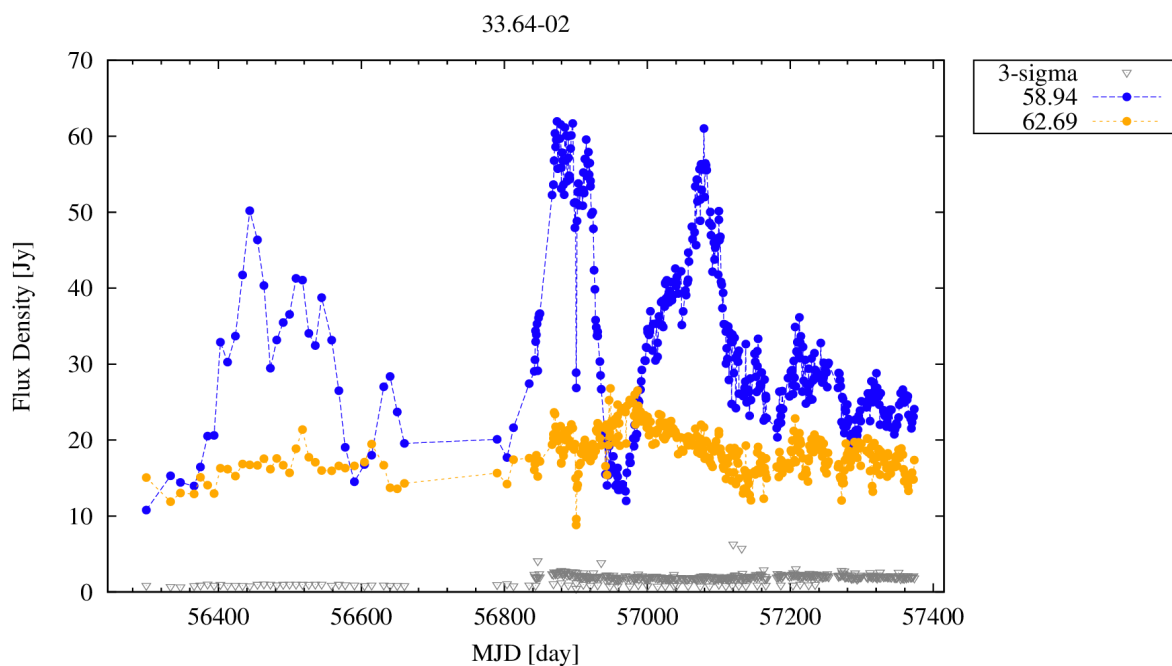


図 65 G033.64-00.21 の強度変動プロット

4.3.3 G111.53+00.76

G111.53+00.76 は 13 個の速度成分が同定されている。このうち 9 個の成分が、誤警報確率 ≤ 0.001 であった。

視線速度-61.32[km/s]、-57.56[km/s]、-57.34[km/s]の成分は導出周期が432.0日であった。視線速度-60.69[km/s]、-59.66[km/s]、-56.83[km/s]、-56.09[km/s]、-48.28[km/s]の成分は導出周期が360.0日であり、隣り合う独立周期との差は+72日、-51.4日であった。観測期間が1080日なので、上記の8個の成分は条件②を満たさない。ただし、今後もモニター観測は続けられるため、観測期間が延びることにより条件②を満たすことになるかもしれない。

他1個の成分について、視線速度-50.02[km/s]の成分は導出周期が166.2日であり、隣り合う独立周期との差は+13.8日、-11.9日であった。この成分は条件①、②どちらも満たしているが、図?のグラフを見てみると、166.2日という周期を読み取るのは難しいと思われる。

考察として、観測されたフラックス密度が小さかったため、雑音が影響したのではないかと考えている。

表 27 G111.53+00.76 の解析結果

視線速度[km/s]	誤警報確率	周期[day]
-61.32	0.000002	432.0
-60.69	0.000031	360.0
-59.66	0.000258	360.0
-58.07	0.002255	-
-57.56	0.000044	432.0
-57.34	0.000030	432.0
-56.83	0.000050	360.0
-56.09	0.000032	360.0
-52.81	0.134352	-
-52.58	0.009960	-
-50.02	0.000610	166.2
-48.84	0.001958	-
-48.28	0.000471	360.0

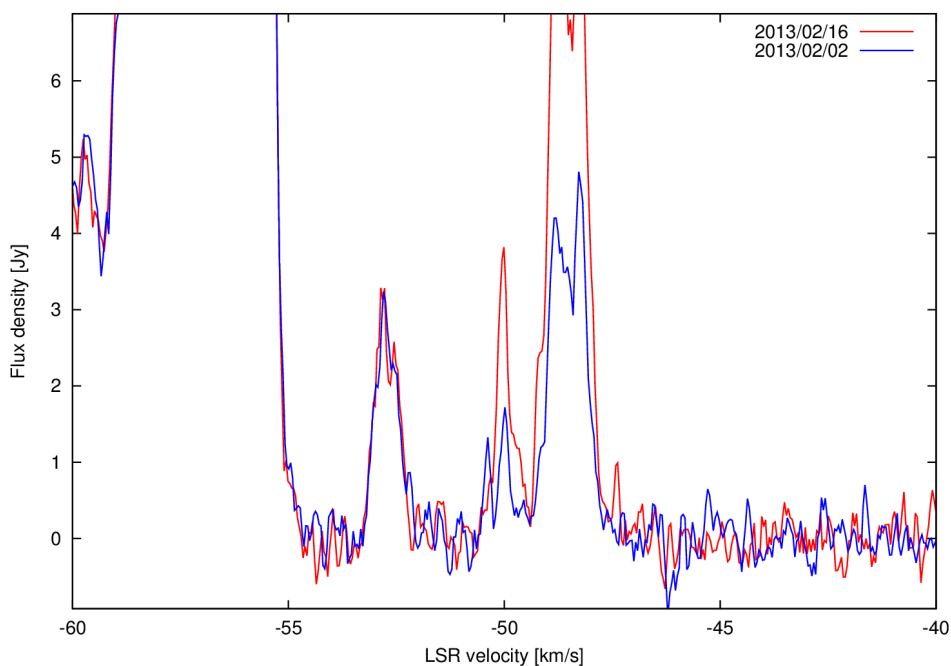


図 66 G111.53+00.76 のスペクトル

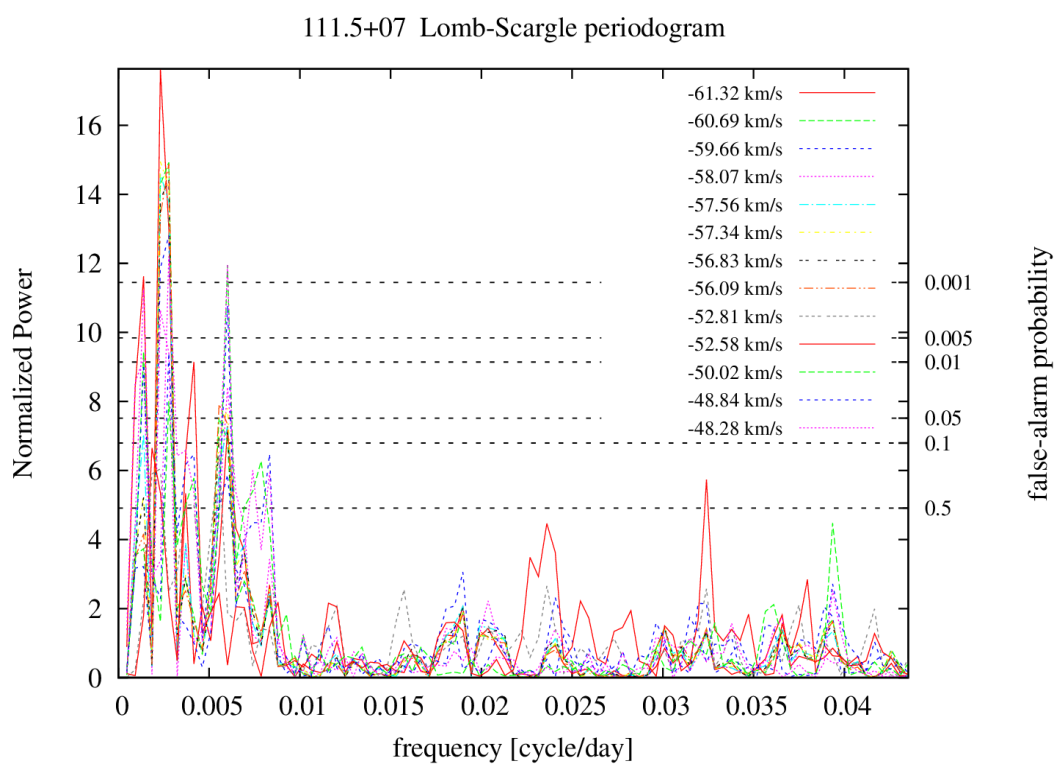


図 67 G111.53+00.76 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラム のスペクトル

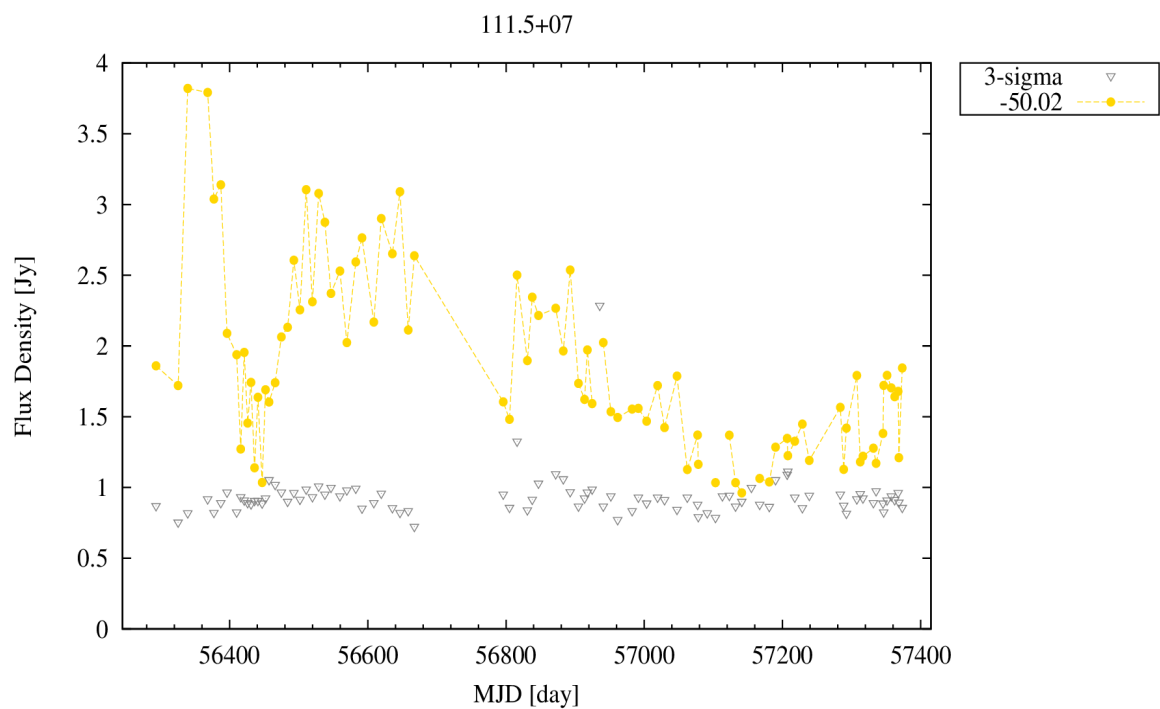


図 68 G111.53+00.76 の強度変動プロット

4.3.4 G192.60-00.04

G192.60-00.04 は 13 個の速度成分が同定されている。このうち 10 個の成分が、誤警報確率 ≤ 0.001 であった。

視線速度

2.37[km/s]、5.45[km/s]、5.67[km/s]、6.28[km/s]、8.14[km/s]の成分は導出周期が1081.0日であった。視線速度 4.75[km/s]の成分は導出周期が540.5日であった。視線速度 1.26[km/s]、1.80[km/s]の成分は導出周期が432.4日であった。視線速度 4.09[km/s]の成分は導出周期が360.3日であり、隣り合う独立周期との差は+72.1日、-51.4日であった。観測期間が1081日なので、上記の9個の成分は条件②を満たさない。ただし、今後もモニター観測は続けられるため、観測期間が延びることにより条件②を満たすことになるかもしれない。

他1個の成分について、視線速度 3.01[km/s]の成分は導出周期が98.3日であり、隣り合う独立周期との差は+4.7日、-4.3日であった。この成分は条件①、②どちらも満たしているが、図?のグラフを見てみると、98.3日という周期を読み取るのは難しいと思われる。

表 28 G192.60-00.04 の解析結果

視線速度[km/s]	誤警報確率	周期[day]
0.46	0.173511	-
1.26	0.000013	432.4
1.80	0.000247	432.4
2.37	0.000000	1081.0
3.01	0.000617	98.3
3.29	0.011814	-
4.09	0.000000	360.3
4.75	0.000003	540.5
5.45	0.000000	1081.0
5.67	0.000015	1081.0
6.28	0.000000	1081.0
7.56	0.072927	-
8.14	0.000000	1081.0

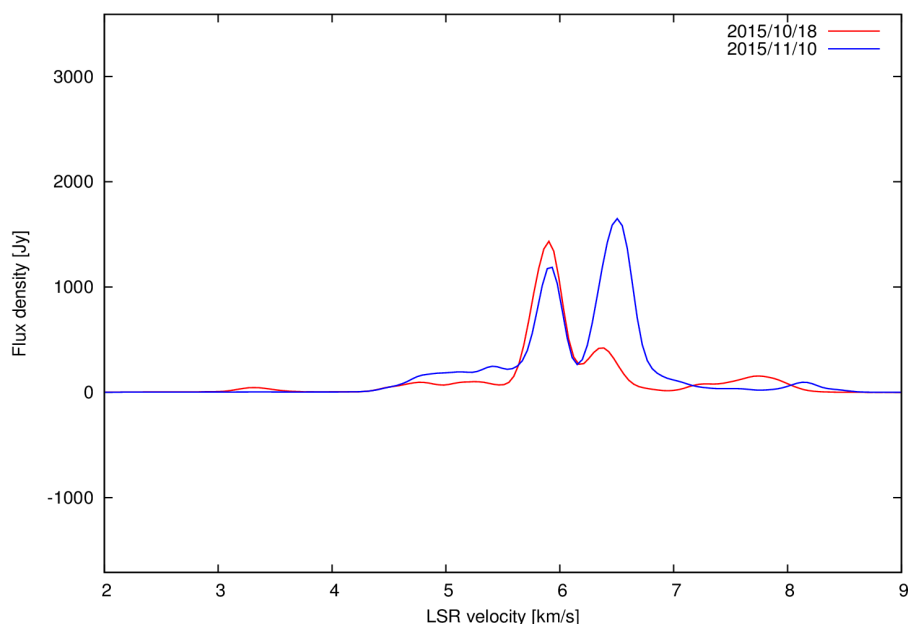


図 69 G192.60-00.04 のスペクトル

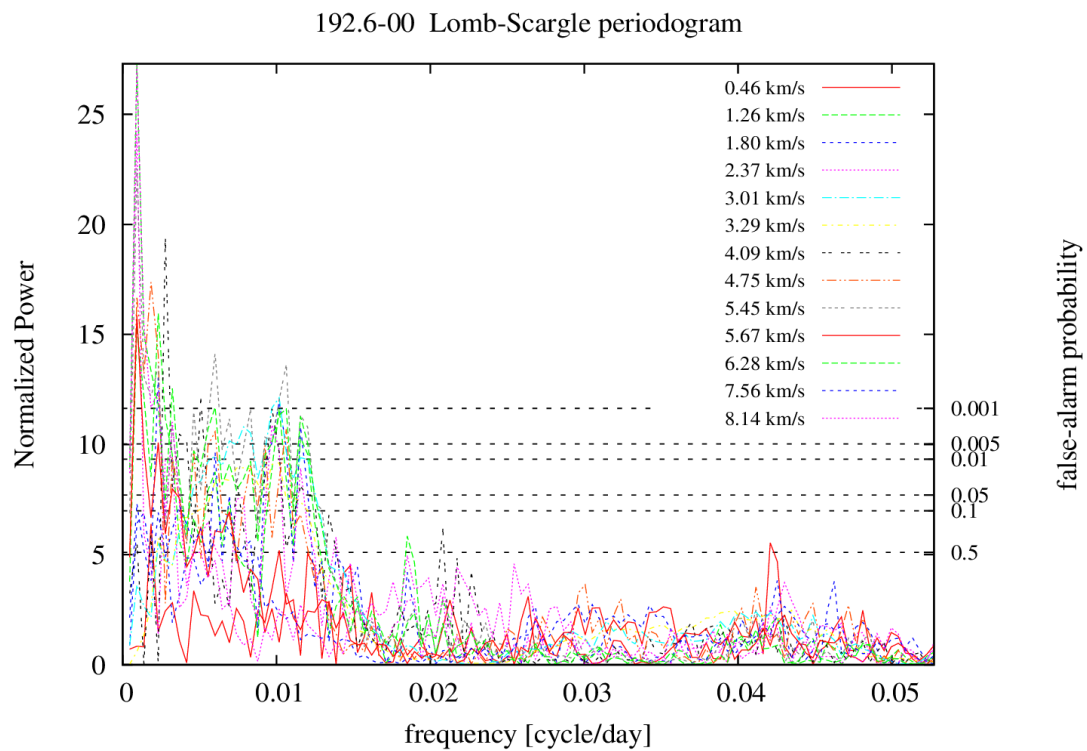


図 70 G192.60-00.04 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラム のスペクトル

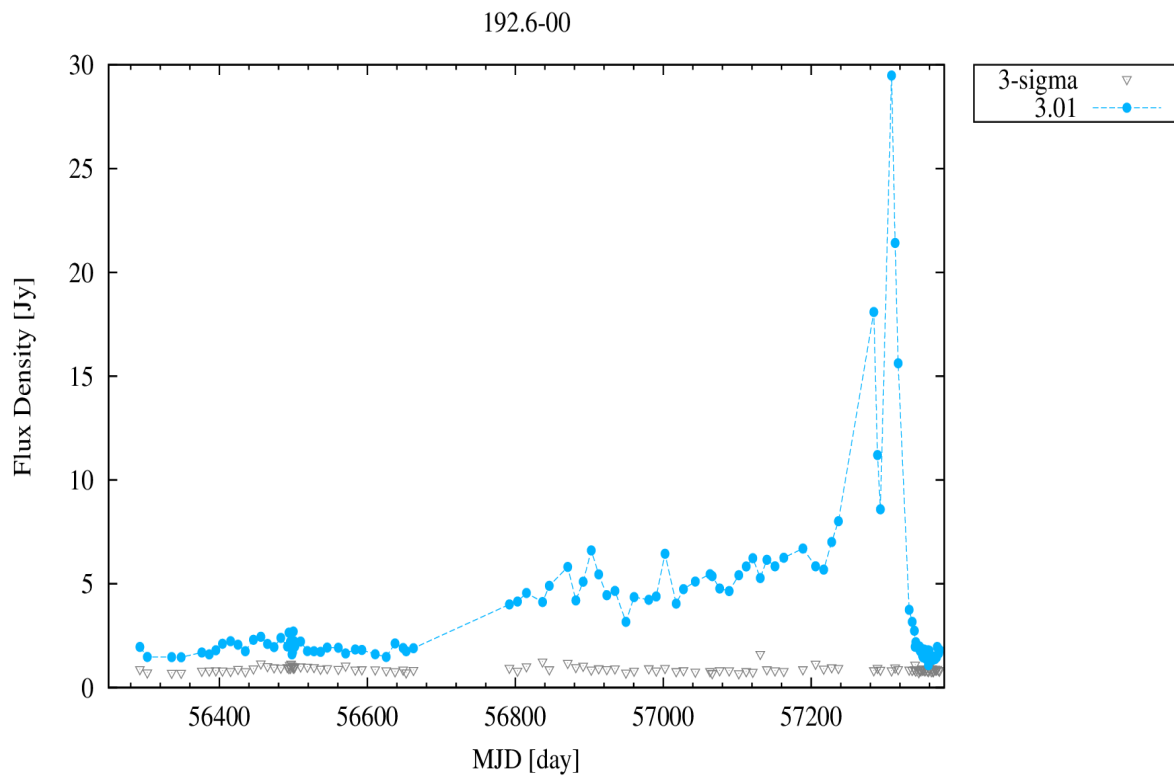


図 71 G192.60-00.04 の強度変動プロット

Lomb-Scargle 法は観測頻度の高い部分に重みをつけて結果を導出する方法なので、毎日観測している期間 MJD57339 から後のデータを除外し、加えて 3 つの期間に区切って再度解析を行いました。3 つの期間とは、第 1 シーズンのみの期間 MJD56292-MJD56662、第 2 シーズンから毎日観測している期間の前までの期間 MJD56792-MJD57336、第 1 シーズンから毎日観測している期間の前までの期間 MJD56292-MJD57336 である。

4.3.4.1 MJD56292-MJD56662

この期間は、強度変動プロットを見てみると、視線速度 3.01[km/s]の成分が約 50 日の周期があるように見える。重みが付いた部分にこの周期が隠れた可能性があるため、この期間で解析した。

解析の結果、3 つの成分が、誤警報確率 ≤ 0.001 であった。

視線速度 5.45[km/s]の成分は導出周期が 369.9 日であった。視線速度 4.75[km/s]、5.67[km/s]の成分は導出周期が 246.6 日であった。観測期間が 370 日なので、上記の 3 個の成分は条件②を満たさない。

視線速度 3.01[km/s]の成分について、解析の結果、条件①、②どちらも満たさなかった。一部の部分を注目してみると、約 50 日の周期があるように見えたが、期間全体を見てみると、周期性はないように見える。

表 29 G192.60-00.04 の解析結果(MJD56292-MJD56662)

視線速度[km/s]	誤警報確率	周期[day]
0.46	0.812885	-
1.26	0.788003	-
1.80	0.935490	-
2.37	0.241648	-
3.01	0.009022	246.6 (98.3)
3.29	0.074688	-
4.09	0.001536	-
4.75	0.000086	246.6
5.45	0.000038	369.9
5.67	0.000019	246.6
6.28	0.574270	-
7.56	0.924472	-
8.14	0.466954	-

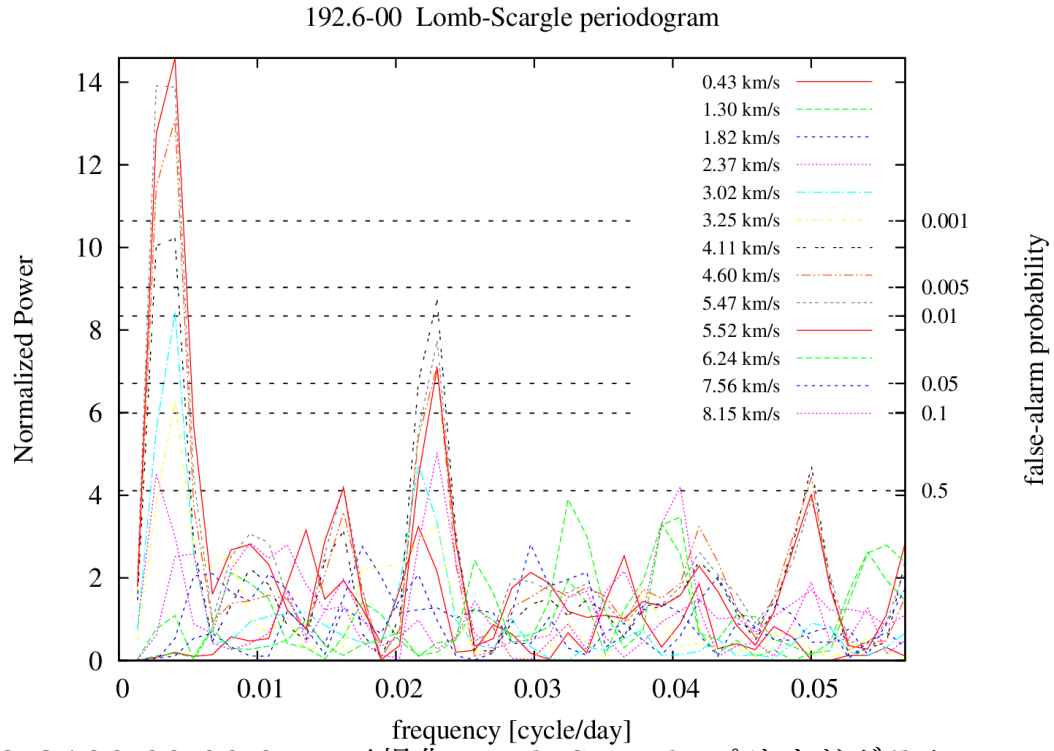


図 72 G192.60-00.04 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムの特クトル (MJD56292-MJD56662)

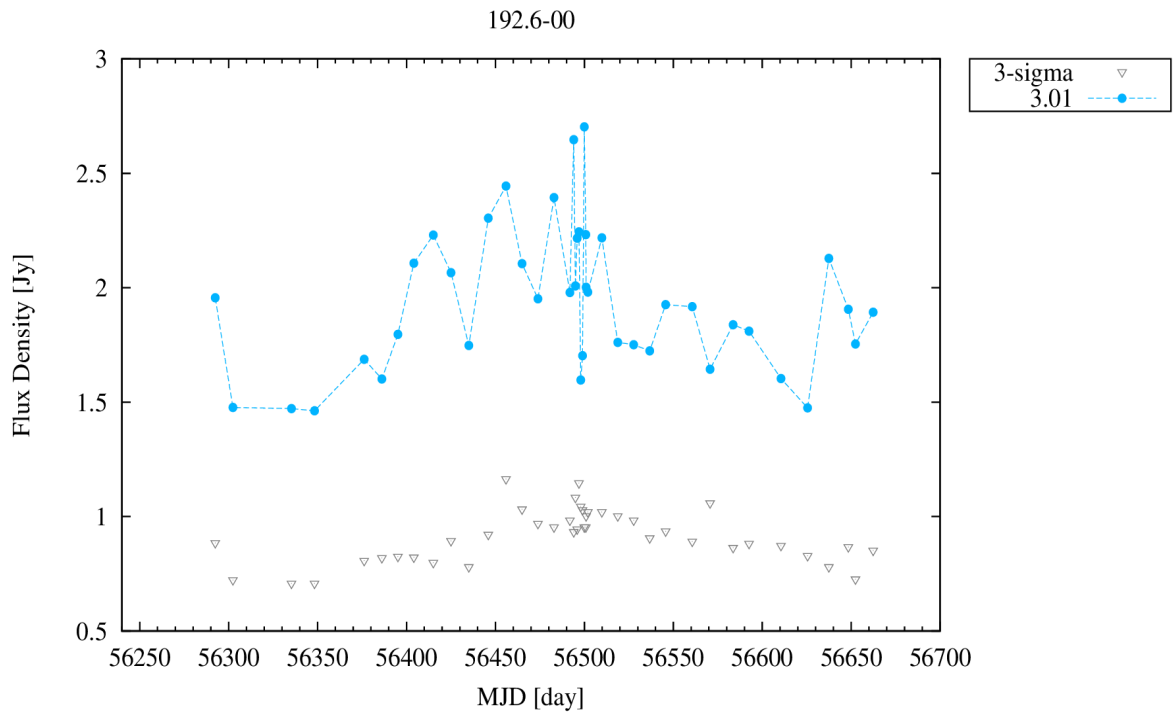


図 73-1 G192.60-00.04 の強度変動プロット (MJD56292-MJD56662)

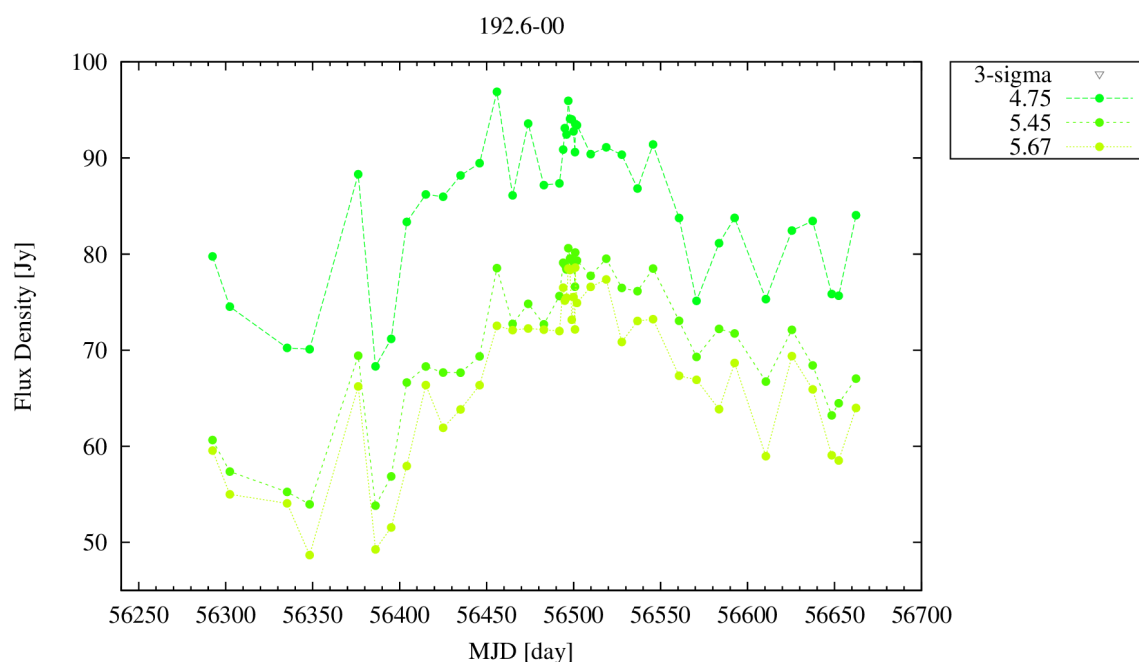


図 73-2 G192.60-00.04 の強度変動プロット(MJD56292-MJD56662)

4.3.4.2 MJD56792-MJD57336

この期間は、強度変動プロットを見てみると、周期性があるようには見えない。
解析の結果、2 個の成分が、誤警報確率 ≤ 0.001 であった。

視線速度 5.67[km/s]、8.14[km/s]の成分は導出周期が 544.5 日であった。観測期間が 544 日なので、上記の 2 個の成分は条件②を満たさない。

視線速度 3.01[km/s]の成分について、解析の結果、条件①、②どちらも満たさなかった。強度変動プロットを見て、周期性があるようには見えない。

表 30 G192.60-00.04 の解析結果(MJD56792-MJD57336)

視線速度[km/s]	誤警報確率	周期[day]
0.46	0.363829	-
1.26	0.173375	-
1.80	0.280513	-
2.37	0.183469	-
3.01	0.753601	544.5 (98.3)
3.29	0.068348	-
4.09	0.008209	-
4.75	0.030253	-
5.45	0.428125	-
5.67	0.000122	544.5
6.28	0.071573	-
7.56	0.006289	-
8.14	0.000106	544.5

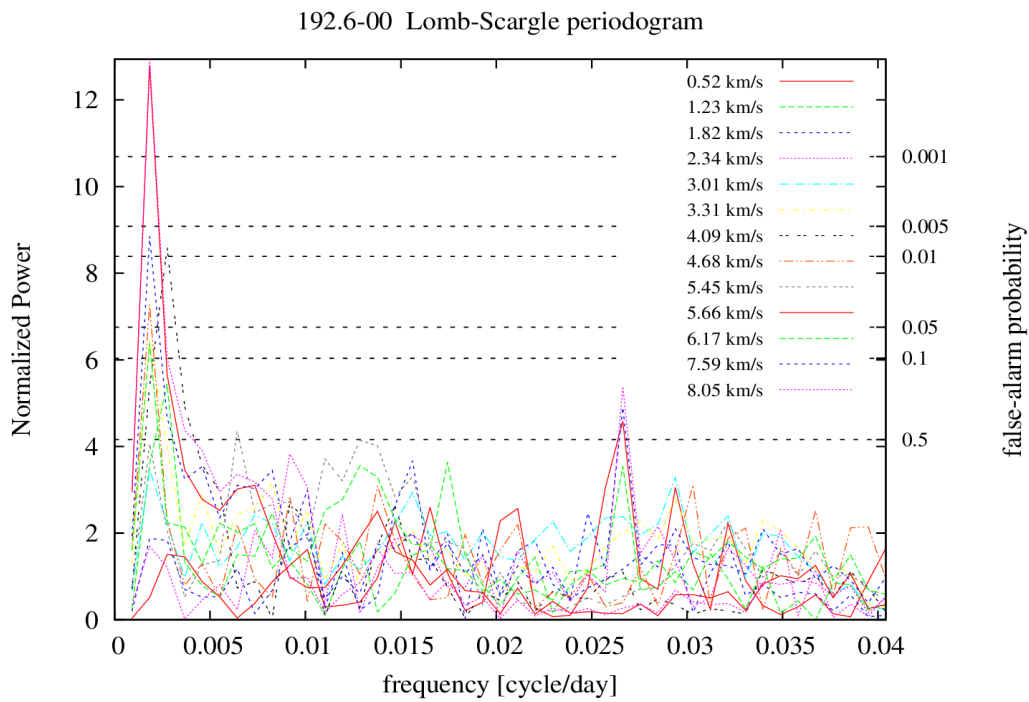


図 74 G192.60-00.04 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムの特クトル (MJD56792-MJD57336)

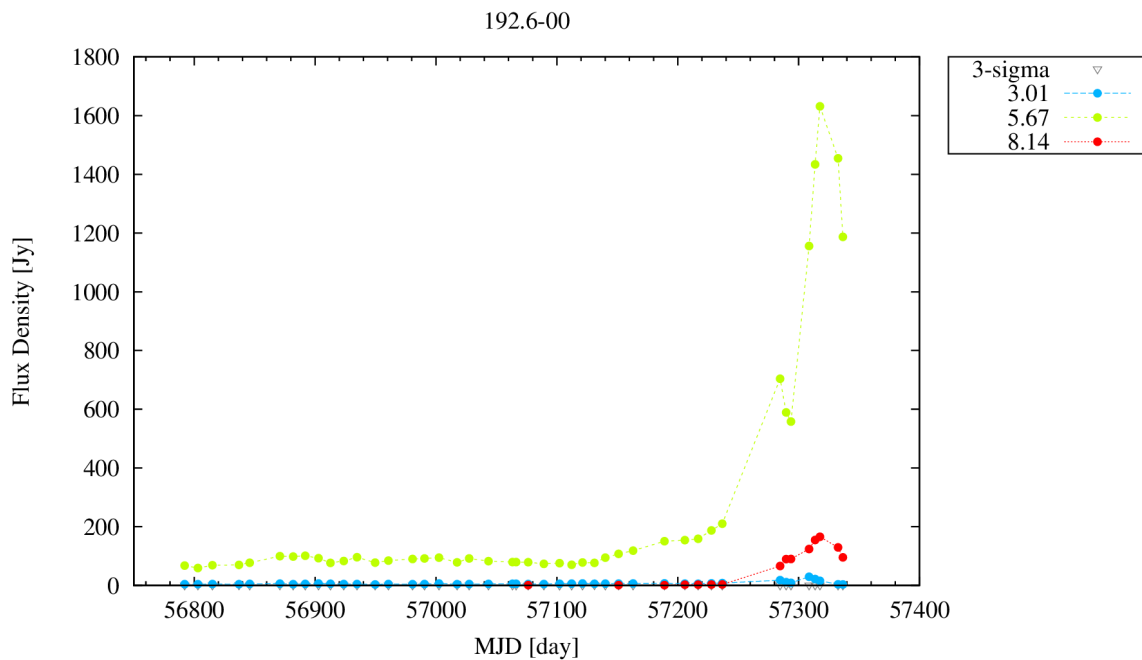


図 75-1 G192.60-00.04 の強度変動プロット (MJD56792-MJD57336)

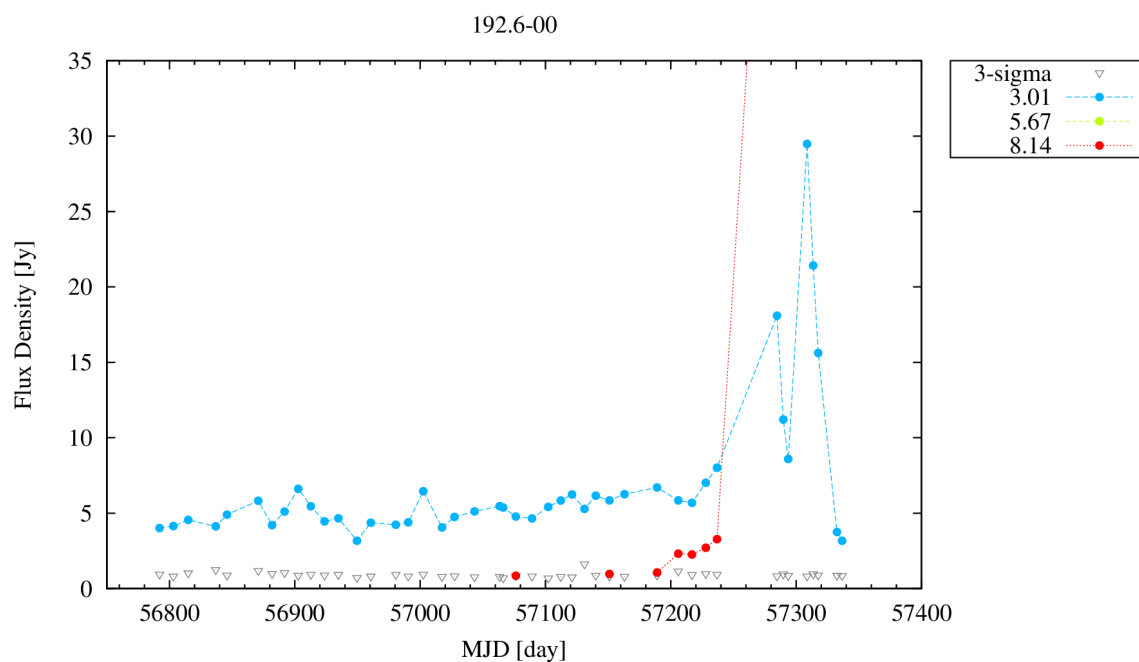


図 75-2 G192.60-00.04 の強度変動プロット(MJD56792-MJD57336)

4.3.4.3 MJD56292-MJD57336

この期間は、毎日観測している期間 MJD57339 からそれ以降のデータを除外した期間である。

解析の結果、4つの成分が、誤警報確率 ≤ 0.001 であった。

視線速度 2.37[km/s]、5.67[km/s]、8.14[km/s]の成分は導出周期が1044.1日であった。視線速度 4.09[km/s]の成分は導出周期が348.0日であり、隣り合う独立周期との差は+69.6日、-49.7日であった。観測期間が1044日なので、上記の4個の成分は条件②を満たさない。

視線速度 3.01[km/s]の成分について、解析の結果、条件①、②どちらも満たさなかった。強度変動プロットを見ても、周期性があるようには見えない。

表 40 G192.60-00.04 の解析結果(MJD56292-MJD57336)

視線速度[km/s]	誤警報確率	周期[day]
0.46	0.310834	-
1.26	0.003760	-
1.80	0.082225	-
2.37	0.000006	1044.1
3.01	0.508764	417.6 (98.3)
3.29	0.006157	-
4.09	0.000006	348.0
4.75	0.010943	-
5.45	0.172683	-
5.67	0.000141	1044.1
6.28	0.057819	-
7.56	0.002037	-
8.14	0.000139	1044.1

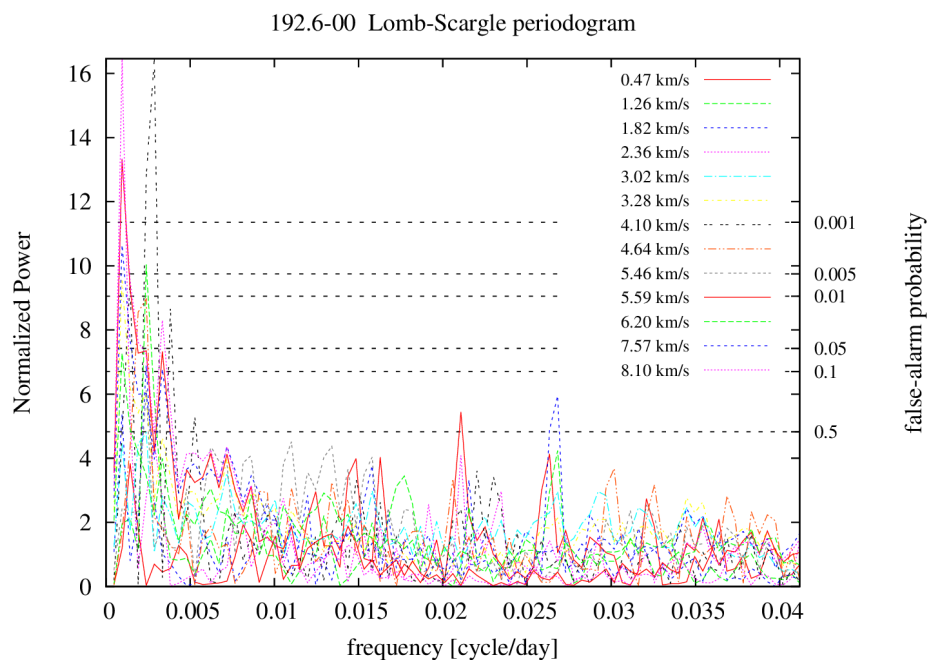
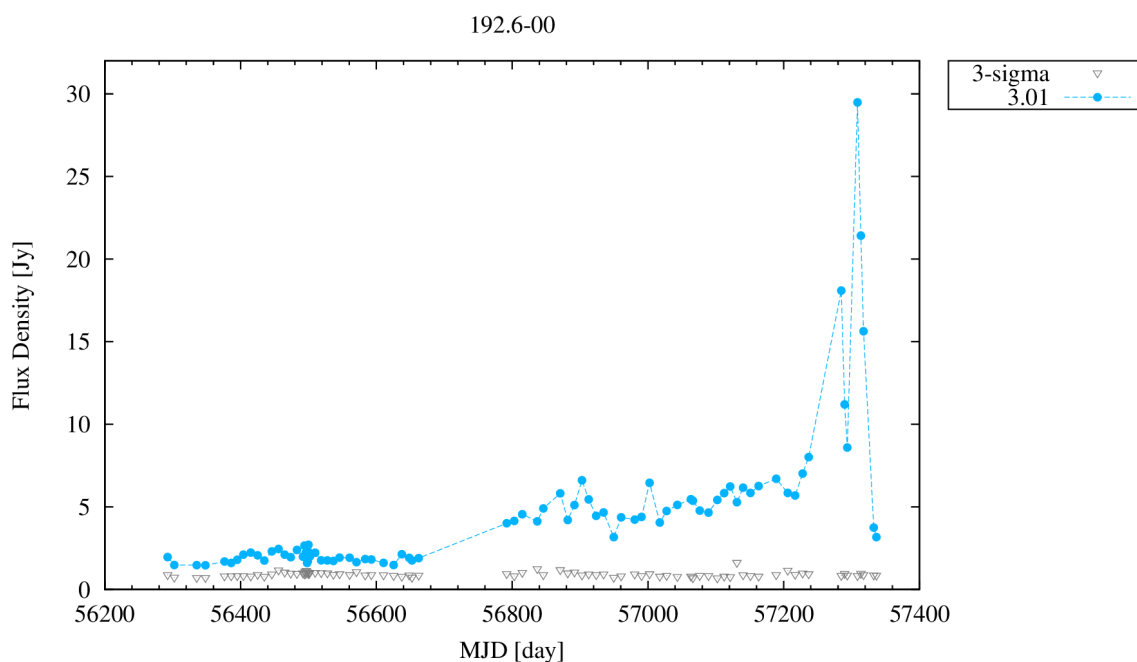


図 76 G192.60-00.04 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスเปクトル (MJD56292-MJD57336)



これらを含め、G192.60-00.04 の考察としては、毎日観測している期間 MJD57339 以降の観測頻度の高い部分に重みが付き過ぎた可能性は否定できない、ということである。

5 まとめ

今回の解析では、Lomb-Scargle 法で周期性があると判断された天体が 43 個

あった。そのうち、Lomb-Scargle 法で得られた周期と強度変動プロットを目視した時に見える周期が一致しなかった天体が 4 個あり、逆にこの 2 つに矛盾のない天体が 39 個あった。よって、Lomb-Scargle 法による周期解析の決定精度は $(39/43) \times 100\% = 90.7\%$ 程度である。よって Lomb-Scargle 法は離散的で不
等間隔なデータに対して、十分に精度の高い結果が出せる解析法であると思われる。

しかし、欠点として、信号雑音比が悪いと誤った結果を導く可能性がある点と、データが密な部分に重みが付き過ぎる点が挙げられる。1 つ目の欠点に対しての解決策としては、閾値を設け信号雑音比が悪い天体は除外することが挙げられる。2 つ目の欠点に対しての解決策としては、観測の頻度が急激に変化しないように間引いたデータで解析を行うこと、これ以降も観測を行いデータを増やすことが挙げられる。

今回の研究で、強度変動プロットを目視した際の周期性の有無は私の主観で判断していた。これは間違った結果を導いてしまう可能性も否定できない。よって今後は多数の眼を通じた検討により、周期性の有無を判断するということも行っていきたい。

6 謝辞

今回の研究にあたり、指導していただいた米倉氏、杉山氏並びにご協力いただいた研究室の先輩方に感謝致します。

付録 A 周期変動天体の周期分布

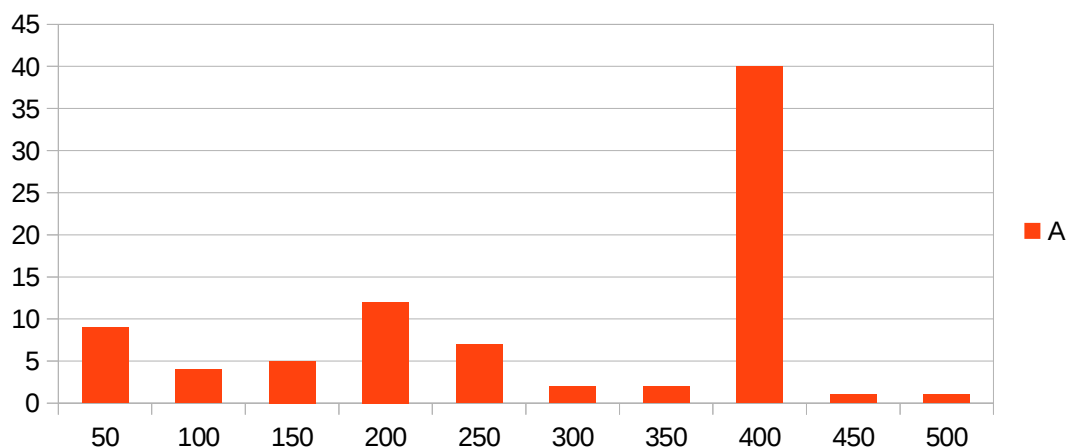


図 78 私が強度変動プロットを見て主観で周期性があると判断した天体の数
(縦軸：天体数、横軸：周期 50 の場合 0~50 日周期の天体)

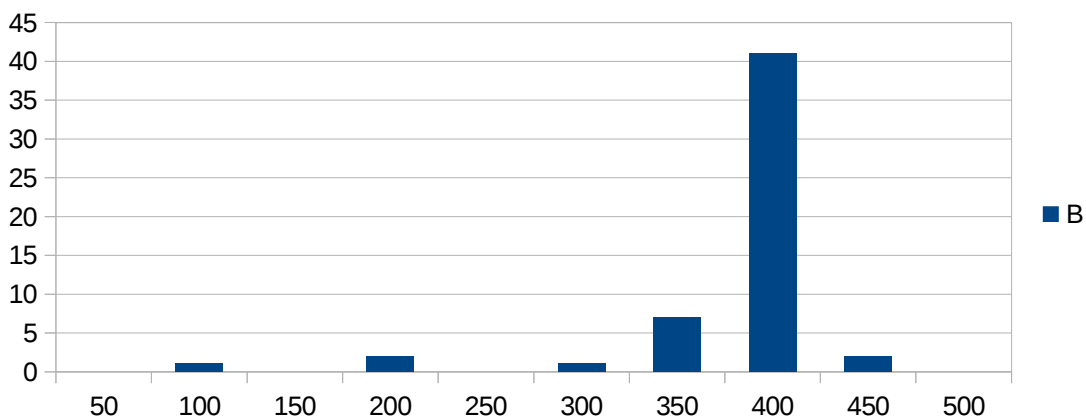


図 79 私が強度変動プロットを見て周期性がないと判断した天体の数

付録 B 解析天体リスト

G0.092+06	G9.621+01	G15.1-00
G0.167-04	G9.986-00	G15.60-02
G0.212-00	G10.09+07	G15.66-04
G0.315-02	G10.20-03	G16.11-03
G0.376+00	G10.28-01	G16.30-01
G0.409-05	G10.32-01	G16.40-01
G0.475-00	G10.32-02	G16.58-00
G0.496+01	G10.35-01	G16.66-03
G0.546-08	G10.44-00	G16.83+00
G0.645-00	G10.47+00	G16.85+06
G0.673-00	G10.72-03	G16.86-21
G0.836+01	G10.82-01	G16.97-00
G1.008-02	G10.88+01	G17.02-00
G1.147-01	G10.95+00	G17.02-24
G1.329+01	G10.627-0	G17.63+01
G1.719-00	G10.629-0	G17.86+00
G2.143+00	G11.03+00	G18.07+00
G2.521-02	G11.10-01	G18.15+00
G2.536+01	G11.49-14	G18.26-02
G2.591-00	G11.93-01	G18.34+17
G2.615+01	G11.93-06	G18.44+00
G2.703+00	G11.99-02	G18.46-00
G3.253+00	G11.903-0	G18.66+00
G3.312-03	G11.904-0	G18.73-02
G3.442-03	G12.02-00	G18.83-03
G3.502-02	G12.11-01	G18.87+00
G3.910+00	G12.18-01	G18.88-04
G4.393+00	G12.19-00	G18.99-02
G4.434+01	G12.20-01	G19.00-00
G4.569-00	G12.26-00	G19.24+02
G4.586+00	G12.4-10	G19.26+03
G4.676+02	G12.52+00	G19.36-00
G4.866-01	G12.62-00	G19.47+01
G5.618-00	G12.68-01	G19.49+01
G5.630-02	G12.77+01	G19.60-02
G5.657+04	G12.88+04	G19.61-01
G5.677-00	G12.90-00	G19.61+00
G5.885-03	G12.90-02	G19.66+01
G5.900-04	G13.17+00	G19.70-02
G6.189-03	G13.65-05	G19.75-01
G6.368-00	G13.69-01	G19.88-05
G6.539-01	G13.71-00	G20.08-01
G6.588-01	G13.8+00	G20.24+00
G6.610-00	G14.10+00	G20.7-00
G6.795-02	G14.23-05	G21.41-02
G6.881+00	G14.33-06	G21.57-00
G7.166+01	G14.39-00	G21.87+00
G7.601-01	G14.45-01	G22.05+02
G7.632-01	G14.49+00	G22.34-01
G8.139+02	G14.52+01	G22.36+00
G8.317-00	G14.60+00	G22.43-01
G8.683-03	G14.63-05	G23.01-04
G8.832-00	G14.99-01	G23.04-03
G8.872-04	G15.03-06	G23.19-03
G9.215-02	G15.09+01	G23.2+00

G23.24-02	G30.59-00	G37.76-01
G23.32-02	G30.59-01	G37.77-02
G23.39+01	G30.70-00	G38.03-03
G23.43-01	G30.76-00	G38.08-02
G23.48+00	G30.78+02	G38.12-02
G23.66-01	G30.82-00	G38.20-00
G23.70-01	G30.82+02	G38.26-00
G23.80+04	G30.86+01	G38.26-02
G23.91+00	G30.96-01	G38.56+01
G23.98-00	G30.98-00	G38.60-02
G24.00-01	G31.04+03	G38.66+00
G24.14+00	G31.06+00	G38.92-03
G24.33+01	G31.16+00	G39.10+04
G24.50-00	G31.28+00	G39.39-01
G24.54+03	G31.41+03	G39.54-03
G24.64-03	G31.58+00	G40.28-02
G24.67-01	G32.03+00	G40.41+07
G24.78+00	G32.11+00	G40.62-01
G24.93+00	G32.74-00	G40.94-00
G25.27-04	G32.80+01	G41.08-01
G25.38-01	G32.97+00	G41.12-01
G25.38-01	G33.09-00	G41.12-02
G25.38+00	G33.13-00	G41.16-02
G25.41+01	G33.40+00	G41.23-02
G25.53+03	G33.64-02	G41.27+03
G25.65+10	G33.68-02	G41.34-01
G25.70+00	G33.74-01	G41.58+00
G25.82-01	G33.86+00	G41.87-01
G26.52-02	G33.97-00	G42.03+01
G26.59-00	G34.10+00	G42.07+02
G26.60-02	G34.24+01	G42.30-03
G26.65+00	G34.39+02	G42.43-02
G27.21+02	G34.74-00	G42.70-01
G27.22+01	G34.78-13	G43.04-04
G27.28+01	G34.82+03	G43.08-00
G27.36-01	G35.02+03	G43.15+00
G27.78-02	G35.20-07	G43.17-00
G27.78+00	G35.20-17	G43.80-01
G27.86-02	G35.25-02	G43.87-07
G28.02-04	G35.39+00	G44.31+00
G28.14+00	G35.40+00	G44.64-05
G28.20-00	G35.59+00	G45.07+01
G28.28-03	G35.79-01	G45.44+00
G28.39+00	G36.02-02	G45.47+00
G28.53+01	G36.10+05	G45.47+01
G28.69+04	G36.64-02	G45.49+01
G28.81+03	G36.70+00	G45.57-01
G28.82+04	G36.84-00	G45.81-03
G28.83-02	G36.90-04	G46.07+02
G28.86+00	G36.92+04	G46.12+03
G29.31-01	G37.04-00	G48.89-01
G29.86-00	G37.38-00	G48.90-02
G29.95-00	G37.40+15	G48.99-03
G30.20-01	G37.47-01	G49.03-10
G30.30-01	G37.52-01	G49.27+03
G30.30+00	G37.54+02	G49.35+04
G30.40-02	G37.60+04	G49.41+03
G30.53+00	G37.74-01	G49.47-03

G49.48-04	G189.4-01
G49.49-03	G189.7+03
G49.57-03	G192.6-00
G49.60-02	G196.4-16
G49.62-03	G203.3+20
G50.00+05	G206.5-16
G50.29+06	G209.0-19
G50.78+01	G212.0-07
G52.20+07	G213.7-12
G52.66-10	G232.6+09
G52.92+04	GG351.2+0
G53.04+01	G351.7-05
G53.14+00	G352.6-10
G53.62+00	G353.2+0
G58.75+06	G353.4-03
G59.78+00	G354.6+04
G59.84+06	G358.8-00
G60.56-01	G358.9-00
G69.52-09	G358.9+00
G70.12+17	G358.9+01
G71.51-03	G359.1+00
G73.04+18	G359.4-04
G75.76+03	G359.6-02
G78.10+36	G359.9-04
G78.62+09	G357.9-0
G78.62+09	G359.9+01
G78.89+07	IRS22198
G79.75+09	
G80.85+04	
G81.76+05	
G81.87+07	
G84.95-06	
G85.40-00	
G90.90+15	
G94.58-17	
G97.52+31	
G98.02+14	
G106.8+53	
G108.1+55	
G108.7-09	
G109.8+21	
G109.9+19	
G110.2+26	
G111.2-07	
G111.5+07	
G121.2+06	
G123.0-63	
G133.9+10	
G136.8+11	
G168.0+08	
G173.4+24	
G173.6+28	
G173.7+23	
G174.1-00	
G183.3-05	
G188.7+10	
G188.9+08	
G189.0+07	

参考文献

- Araya, E. D., Hofner, P., Goss, W. M., et al. 2010, *ApJL*, 717, L133
- Cragg, D. M., Sobolev, A. M., & Godfrey, P. D. 2005, *MNRAS*, 360, 533
- Goedhart, S., Gaylard, M. J., & van der Walt, D. J. 2004, *MNRAS*, 355, 553
- Goedhart, S., Langa, M. C., Gaylard, M. J., & van der Walt, D. J. 2009, *MNRAS*, 398, 995
- Goedhart, S., Maswanganye, J. P., Gaylard, M. J., & van der Walt, D. J. 2014, *MNRAS* 437, 1808
- Breckenridge, S. M.; Kukolich, S. G. 1995, *ApJ*, 438, 504B
- Walsh, A. J.; Burton, M. G.; Hyland, A. R.; Robinson, G. 1998, *MNRAS*, 301, 640WM
- Szymczak, P. Wolak, A. Bartkiewicz, and H. J. van Langevelde 2011, *A&A*, 531, L3
- Szymczak, P. Wolak, A. Bartkiewicz 2015, *MNRAS* 448, 2284
- J.P. Maswanganye, M.J. Gaylard, S. Goedhart, D.J. van der Walt & R.S. Booth 2015, *MNRAS* 446, 2730
- Fujisawa K. et al., 2014, *PASJ*, 66, 788
- Inayoshi K., Sugiyama K., Hosokawa T., Motogi K., Tanaka K. E. I., 2013, *ApJ*, 769, L20
- Press W. H., Teukosky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P., 1992, *Numerical Recipes the Art of Scientific Computing*, 3rd edn. Cambridge Univ. Press, Cambridge, p. 1003
- van der Walt 2011, *AJ* 141:152
- Parfenov & Sobolev 2014, *MNRAS*, 444, 620
- Goedhart, M. Gaylard, J. van der Walt and M. Elitzur 2008, *ASPC*, 387, 124
- Scargle J. D., 1982, *ApJ*, 263, 835
- Lomb N. R., 1976, *Ap&SS*, 39, 447
- Horne, J.H., Baliunas, S.L. 1986, *ApJ* 302, 757
- Cumming, A., Geoffrey W. Marcy, R. Paul Butler 1999, *ApJ*, 526, 890
- Koen C. 1988, *ApJ*, 348, 700
- Schwarzenberg-Czerny A. 1996, *ApJ*, 460, 107
- Frescura, F.A.M., Engelbrecht, C.A., Frank, B.S. 2007
- Goedhart, M. Gaylard, J. van der Walt 2007, *AMEP*, 242
- Groth, E, J. 1975, *ApJ*, 29, 285
- Pandian, J.D, Momjian, E., Xu, Y., Menten, K.M., Goldsmith, P.F., 2011, *ApJ*, 730:55
- Yasui Y., 2016
- 福井康雄, 他 (2009) 「星間物質と星形成 シリーズ現代の天文学 第 6 巻」 日本評論社
- 中井直正, 他 (2009) 「宇宙の観測 II 電波天文学 シリーズ現代の天文学 第 13 巻」 日本評論家