

修士学位論文

日立 32 m 電波望遠鏡を用いた 6.7 GHz メタノールメーザー源
の高頻度モニター観測による短周期強度変動天体の研究

2017 年度
(平成 29 年度)

茨城大学大学院理工学研究科

理学専攻

16NM156S

山口貴大

論文要旨

大質量星 ($\geq 8 M_{\odot}$) は中小質量星と比べて観測が困難であり、その形成過程は未だ十分に解明されていない。そこで本研究では、6.7 GHz メタノールメーザーに着目した。6.7 GHz メタノールメーザーは大質量星形成領域以外での検出例がほとんどないため、大質量星形成の指標として精力的な観測が行われている。観測された 6.7 GHz メタノールメーザーのうちいくつかは周期的な強度変動を示すものが見つかっており、今までに 20 天体確認されている。この周期変動を説明するモデルとしては様々なものが提唱されているが、特に Inayoshi et al. (2013) で提唱されている脈動不安定モデルでは、急激な質量降着の下で成長する大質量原始星の脈動によって説明できると提唱している。さらにこのモデルでは、原始星の脈動周期と光度との間に一定の相関関係 (周期-光度関係) が成り立つことが理論的に予測されている。この関係を用いれば、原始星の脈動周期から光度や半径、質量降着率などの様々な物理量が導出可能となることが期待されている。この関係を観測的に検証するためにはまず、6.7 GHz メタノールメーザーの周期変動を測定する必要がある。しかし、周期変動を検出し得るほどの十分な期間と頻度で観測が行われた天体は、これまでに 6.7 GHz メタノールメーザー放射が検出されている天体数約 1000 天体に対して 20%にも満たない程度と非常に少なく、統計的な調査を行うにはサンプルが小さすぎる。そこで茨城大学電波天文観測研究室では、周期変動天体の数を増やすことを目的の一つとして、日立 32 m 電波望遠鏡を用いてモニター観測を実施している。このモニター観測は 2012 年 12 月 30 日から現在にかけて大きく四つの期間に分けて実施されており、特に 2015 年 9 月 18 日から 2017 年 3 月 7 日まで (第 3 期) の期間ではより短周期的な強度変動を捉えるため、143 天体に対し各天体 4 日に 1 回程度という高頻度なモニター観測が実施された。

本研究では、第 3 期に実施した高頻度なモニター観測によって得られた観測データについて周期解析を行い、短周期強度変動天体の検出を目指した。周期解析には、Lomb-Scargle 法という不等間隔な離散的データに対して適用可能な周期解析法を実装した C 言語プログラム (安井靖堯, 2016, 茨城大学修士論文) を使用した。

周期解析の結果、検出された周期変動天体は 143 天体中 37 天体であり、それらの導出周期は 14.8 日-163.9 日であった。そのうち、既知の周期変動天体であるが、別の速度成分で周期変動を新検出した天体や、既知とは別の周期が導出された準新検出天体は 11 天体であった。また、本解析によって新検出、つまり、第 3 期の観測データに対する周期解析によって初めて検出することができた周期変動天体は、20 天体であった。特に、今まで検出例が少なかった、50 日未満の短い周期を持つ強度変動天体の検出にも成功した。つまり、短周期強度変動天体の数を増やすことができた。

さらに、新検出の周期変動天体 20 天体について光度の導出を行い、周期-光度関係の観測的な検証を行った。光度の導出には、赤外線天文衛星 IRAS によって測定された 4 波長におけるフラックス密度の値の情報と、年周視差法、または運動学的方法によって導出された天体までの距離の情報を使用した。そして、導出された光度と、周期解析によって導出された周期を用いて、周期-光度関係の観測的な検証を行った。しかし、明確な傾向は見つからず、現時点では観測的に周期-光度関係を見出すことはできなかった。今後は、脈動不安定モデルの適用できる天体数の増加、年周視差法による距離の計測、そして、IRAS よりも精度のよい赤外線観測データの使用によって、周期-光度関係の観測的な検証が可能となることを期待したい。

ABSTRACT

I studied about the 6.7 GHz methanol maser emission which is a tracer of massive star forming regions. It is known that the 6.7 GHz methanol maser sometimes shows periodic flux variations in $\sim (10\text{--}10^3)$ days. In order to find a new periodic 6.7 GHz methanol maser source, our laboratory team are carrying out monitoring observations of a sample of 442 6.7 GHz methanol maser sources with the Hitachi 32 m telescope. I find 20 new periodic methanol maser sources based on Lomb-Scargle periodogram. The sources have periods from 14.8 days to 163.9 days. I also compared Period-Luminosity Relation derived from our observations with a theoretical prediction (Inayoshi et al. 2013), but no clear correlation of period with luminosity was found.

目次

第 1 章 序論.....	3
1.1 大質量星.....	3
1.1.1 大質量星形成過程.....	3
1.1.2 大質量星形成領域におけるメーザー現象.....	5
1.2 メーザー現象.....	6
1.2.1 メーザーの原理.....	6
1.2.2 様々な種類のメーザー.....	8
1.2.3 6.7 GHz メタノールメーザー.....	9
1.3 研究目的.....	10
1.3.1 脈動不安定モデル (Inayoshi et al. 2013)	10
1.3.2 周期変動天体の観測の現状.....	11
1.3.3 研究目的	13
第 2 章 観測.....	15
2.1 観測概要.....	15
2.2 観測対象天体の選出方法.....	16
2.3 高頻度観測の利点.....	17
第 3 章 解析.....	18
3.1 Lomb-Scargle 法.....	18
3.2 誤警報確率.....	20
3.3 周期変動天体の選出条件.....	22
第 4 章 結果.....	24
4.1 検出された全周期変動天体.....	24
4.2 新検出の周期変動天体.....	25
4.3 周期の分布.....	35
第 5 章 考察.....	36
5.1 比較的長周期の新検出天体.....	36
5.2 周期-光度関係の観測的検証.....	41
5.2.1 脈動不安定モデルが適用可能な天体の選出.....	41
5.2.2 光度の導出に向けて.....	43

5.2.3	フラックス密度の調査.....	44
5.2.4	距離の調査・導出.....	45
5.2.5	光度の導出.....	48
5.2.6	周期 - 光度関係の観測的検証.....	49
第 6 章 まとめ.....		51
謝辞.....		52
付録 A 日立モニター観測第 3 期観測天体リスト.....		54
付録 B 新検出の周期変動天体の周期解析結果.....		57
付録 C 全周期変動天体リスト.....		99
参考文献.....		106

第1章 序論

1.1 大質量星

本節は「シリーズ現代の天文学 6 “星間物質と星形成”」(福井康雄 他 2008)を参考に記述する。

1.1.1 大質量星形成過程

宇宙は多くの銀河から構成され、銀河は恒星と星間物質から構成される。恒星は星間物質の高密度部分である星間分子雲から形成され、恒星内部の原子核が核融合することによって進化する。そして、そのような進化を経て、恒星は再び星間空間に戻って星間物質となる。このように恒星は、宇宙において最も基本的で重要な構成要素である。恒星は、質量によって中小質量星 ($< 8 M_{\odot}$) と大質量星 ($\geq 8 M_{\odot}$) の二つに大別される。このうち、中小質量星は地球の近傍に数多く存在し、比較的観測が容易である。そのため、詳細な観測によって中小質量星形成過程の理解は進んでいる。また、理論的には、流体力学の数値計算によって自己重力下での星間物質の振る舞いをシミュレーションすることが可能であり、観測との比較を通して、以下のような標準的な形成過程のシナリオが確立されている。

- 1) 高密度な分子雲コアの重力崩壊の結果、内部に原始星が形成される。
- 2) 外層の物質の降着により、原始星は質量が増加して成長する。
- 3) 降着が終了すると中心星はケルビン - ヘルムホルツ収縮により収縮し、内部温度が上昇する。
- 4) 水素核燃焼による発熱で重力収縮が止まり、主系列星となる。

一方で、大質量星の場合、中小質量星に比べて観測が困難なため、形成過程の理解があまり進んでいない。観測が困難な理由としては、第一に、そもそも大質量星の絶対数が少ない上に進化のタイムスケールが短い ($< 10^7$ yr) ため、サンプルが小さいことが挙げられる。このため、対象が遠方 (> 1 kpc) にしか見つからず、高分解能な観測が要求される。第二に、形成領域が高密度な星間物質に埋もれているため、可視光での観測が困難であることが挙げられる。また、このような観測的な困難に加え、大質量星の形成過程の理解のためにはより本質的な問題も解決しなければならない。具体的には、上記の中小質量星に対する標準形成シナリオと同様の降着進化により数 $10 M_{\odot}$ 以上の大質量星が形成されないと考えると、以下のような問題が生じる。

- a. 小質量星の典型的な降着率 $10^{-5} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ で、大質量星の典型的な寿命 2–3 百万年程度の間降着が続いたとしても、 $20\text{--}30 M_{\odot}$ 程度までしか成長できない。
- b. 典型的な降着率のとき、質量が約 $8 M_{\odot}$ に達すると中心星は主系列星になり、やがて星の輻射圧によって降着が妨げられてしまう。

よって、中小質量星の形成過程を単純に時間的に延長しただけでは大質量星は形成されない。

そこで現在では、主として二つの形成過程のシナリオが提唱されている。まず、第一のシナリオが降着説である。この降着説では、大質量星も中小質量星と同様に降着進化によって質量を獲得するものの、その際の降着率が極めて大きいとする。この場合、輻射圧による降着の妨げが少なくなり、数 $10 M_{\odot}$ 以上の大質量星の形成も可能となる。また、実際には降着物質は角運動量を持つために原始星周囲に降着円盤を形成する。このため、原始星から見て円盤方向は非常に光学的に厚く、円盤に垂直な方向は光学的に薄くなる。これにより、輻射は円盤に垂直な方向に強く円盤方向に弱くなり、円盤に沿った降着は妨げられずに継続できる。第二のシナリオが合体説である。これは、星団中央部の星密度が高い環境で、星同士の衝突・合体が起こった結果、大質量星が形成される、というシナリオである。しかし、このような衝突・合体が起こるような星密度が高い環境は未だに発見されておらず、実際に星同士の合体が効率よく起こるかも確認されていない。

大質量星形成過程には諸説あるが、降着説に基づくと、現時点では大質量星は以下の進化過程を経て形成され则认为られている。

- 1) 星なし大質量分子雲コア
- 2) 形成途上の中小質量原始星を含むが大質量星原始星のない大質量分子雲コア
- 3) 大質量星原始星を含む若い星団
- 4) 大質量主系列星を含む若い星団

1) の星なし大質量分子雲コアは、巨大分子雲内において周囲より高密度で低温な領域であり、このような領域で大質量星が生まれる。分子雲コアの中心部分では、自己重力及び周囲の外圧の働きにより収縮して中心星が形成される。2) は、中心星への質量降着が進み、中心星が成長していく途中の段階である。この時点では中心星の質量は太陽の数倍程度であると考えられる。3) は、さらに中心星への質量降着が進み、中心星が大質量に到達した段階である。4) は、中心星の質量が十分大きくなり、星の中心で水素の核融合反応が始まって主系列星として輝き始める段階である。この段階では、主系列星から放出される紫外線により周囲に存在する水素が電離を起こし、 H II 領域（電離水素領域）が形成される。

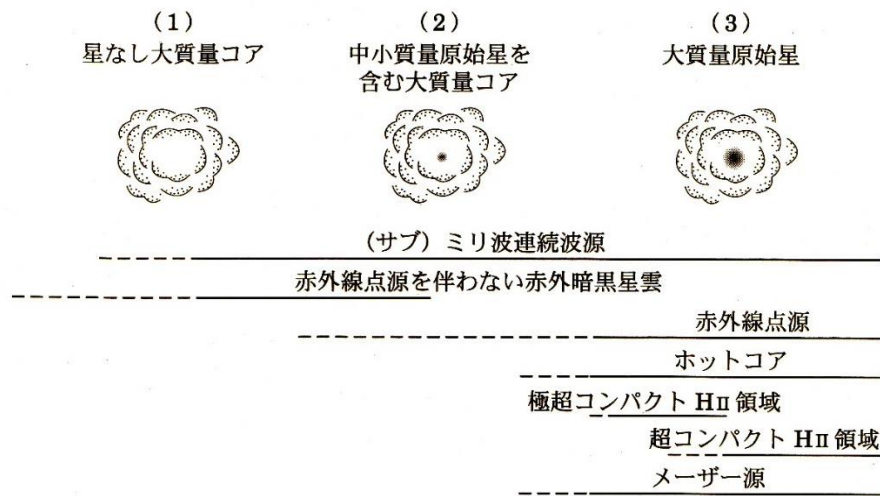


図 1.1：大質量星の進化段階及び指標となる天体（「シリーズ現代の天文学 6 “星間物質と星形成”」より引用）。

以上で述べてきたように、大質量星形成過程の解明のためには解決すべき問題が数多く存在する。しかし、大質量星は、以下のような点で、星間空間、さらには銀河とその進化に物理的・化学的に大きな影響を与える。そのため、大質量星形成過程を解明することは、銀河規模での現象の理解に不可欠である。

- 表面温度が高いために紫外線量が大きく、周囲のガスを電離・加熱する。
- 星風と呼ばれるガス流を発生して周囲の物質を圧縮する。
- 進化の終末で超新星爆発を起こし、星間空間に膨大なエネルギーを与え、同時に爆発時に重元素を生成・供給する。

1.1.2 大質量星形成領域におけるメーザー現象

大質量形成領域では、しばしば、水酸基メーザー (OH)、水メーザー (H_2O)、メタノールメーザー (CH_3OH) などの様々なメーザー現象が確認されている。メーザーは放射強度が非常に強いため、超長基線干渉計法 (VLBI; Very Long Baseline Interferometer) などの感度はあまり良くないが超高空間分解能が得られる観測によって、詳細な空間分布を得ることが可能である。また、メーザーは、周波数のドップラーシフトから得られる視線方向の速度と、固有運動による接線方向の速度の情報が観測可能であり、天体の 3 次元運動を理解する上で非常に有益な存在である。中でも、6.7GHz メタノールメーザーは、現在までにほとんどが大質量星形成領域で検出されているため、大質量星形成領域を選択的に観測するプローブとして有用である。そこで、次節では、この 6.7GHz メタノールメーザーについて詳しく見ていく。

1.2 メーザー現象

本節は「シリーズ現代の天文学 6 “星間物質と星形成”」(福井康雄 他 2008) 及び「シリーズ現代の天文学 16 “宇宙の観測Ⅱ—電波天文学”」(中井直正 他 2009) を参考に記述する。

1.2.1 メーザーの原理

メーザー (MASER; Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) とは、二つの準位間で上の準位の方により多くの粒子が存在する (反転分布) 状態のとき、連続的に粒子が下の準位へ遷移して誘導放射し、強い放射を出す電波領域の特徴的な現象のことである。原理的には、可視領域のレーザー (LASER) と同じ現象である。

まず、メーザーの原理を理解するために、電磁波と物質の相互作用について考える。一定量の物質が周波数 ν の放射を出す能力を表す指標として放射係数 ε_ν 、周波数 ν の放射をどれだけ吸収するかを表す指標として吸収係数 κ_ν を導入する。これらの係数を用いて、強度 I_ν の電磁波が物質中を距離 ds だけ進んだときの強度変化 dI_ν は、

$$\frac{dI_\nu}{ds} = \varepsilon_\nu - \kappa_\nu I_\nu \quad (1.1)$$

と書ける。これが輻射輸送の基本式である。

ここで、物質を構成する粒子が二つのエネルギー準位 1 と 2 の二つのエネルギー準位をもち、その間を遷移できるとする。それぞれの準位でのエネルギーの値は (E_1, E_2) とし (ただし、 $E_2 > E_1$)、また、2 準位間の遷移に伴い放射、吸収される電磁波強度の周波数依存性は、 $\nu_0 = (E_2 - E_1)/h$ に鋭いピークをもつ曲線 $\varphi(\nu)$ で表されたとする。この $\varphi(\nu)$ は、プロファイル関数と呼ばれ、 $\int_0^\infty \varphi(\nu) d\nu = 1$ を満たす。

エネルギー準位間の遷移には三つの素過程が存在し、各過程が起こる確率はアインシュタイン係数と呼ばれる量で記述される。まず、第一は、自発放射と呼ばれる過程である。これは、周囲からの影響を受けずに準位 2 の粒子が準位 1 へ遷移し、その際に電磁波 (光子) を放出する現象である。その確率はアインシュタイン A 係数 A_{21} で表される。第二の過程は、吸収である。これは、準位 1 の粒子が電磁波を吸収して準位 2 へと遷移する現象であり、その確率は入射する電磁波の強度に比例する。このとき現れる比例係数をアインシュタイン B 係数と呼び、 B_{12} と表す。そして、第三は、誘導放射と呼ばれる過程である。これは、準位 2 の粒子に電磁波が入射したとき、準位 1 へと遷移すると同時に、入射した電磁波と全く同じ周波数と位相をもつ電磁波を放出する現象である。その確率は、吸収と同様に、入射する電磁波の強度に比例する。このとき現れる比例係数もアインシュタイン B 係数と呼ばれ、 B_{21} と表す。素過程の確率を表す三つのアインシュタイン係数は独立ではなく、以下のような関係がある。

$$g_1 B_{12} = g_2 B_{21} \quad (1.2)$$

$$A_{21} = \frac{2h\nu^3}{c^2} B_{21} \quad (1.3)$$

ここで、 (g_1, g_2) はそれぞれ準位 1 と準位 2 の統計的重み、 $h = 6.63 \times 10^{-27} [\text{erg} \cdot \text{s}]$ はプランク定数、 $c = 3.00 \times 10^8 [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ は光速である。

また、吸収と誘導放射はどちらも入射する電磁波の強度に依存するため、両者を合わせて一つの吸収係数 κ_ν に組み込むことができ、

$$\kappa_\nu = \frac{h\nu}{4\pi} 4\varphi(\nu) n_1 B_{12} \left(1 - \frac{n_2/g_2}{n_1/g_1} \right) \quad (1.4)$$

と書ける。ここで、 (n_1, n_2) はそれぞれ準位 1 と準位 2 の粒子数である。

以上を踏まえて、レーザーの原理について考える。地球の大気のようにガスの密度が高いところでは通常、粒子同士の衝突が支配的であり（熱平衡状態）、二つの準位間の粒子数の比は次式のようなボルツマン分布で与えられる。

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{g_2}{g_1} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right) \quad (1.5)$$

ここで、 T はガス温度、 $k = 1.38 \times 10^{-16} [\text{erg} \cdot \text{K}^{-1}]$ はボルツマン定数である。この式を変形すると、

$$\frac{n_2/g_2}{n_1/g_1} = \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right) < 1 \quad (1.6)$$

となり、必ず 1 より小さくなる。よって、統計的重みあたりの粒子数 n_i/g_i ($i = 1, 2$) は下のエネルギー準位の方が多くなる。しかし、ガスの密度が低い希薄な宇宙空間では、粒子同士の衝突よりも自発放射や誘導放射や吸収の方が支配的になる場合がある。このとき、必ずしも $n_2/g_2 < n_1/g_1$ とはならず、上のエネルギー準位の方に粒子が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。

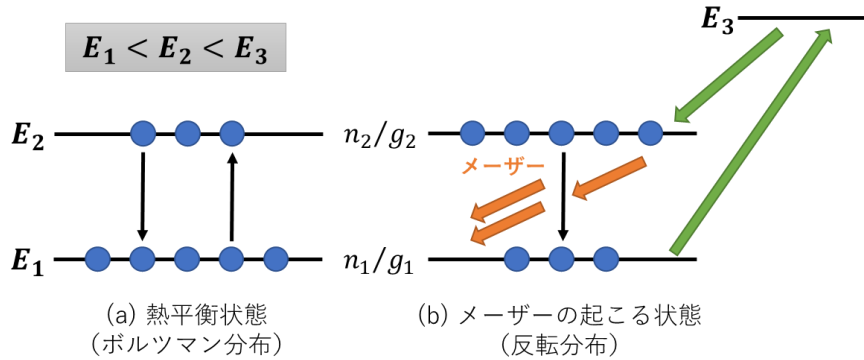


図 1.2 : 熱平衡状態（ボルツマン分布）とレーザーの起こる状態（反転分布）の模式図。
 式(1.2)より吸収と誘導放射の起こる確率は等しいため、2 準位を考えただけでは反転分布は実現されない。そこで、図のように 3 準位を考え、粒子が一旦準位 1 から準位 3 になり、そこから準位 2 に落ちることによって準位 1 と準位 2 の間で反転分布が実現される。

反転分布では $n_2/g_2 > n_1/g_1$ となるため、式(1.6)の左辺は 1 より大きくなる。よって、式(1.4)より吸収係数 κ_ν は負となる。このとき、式(1.1)の右辺の第 2 項は正となり、これは入射した放射強度が増幅されることを意味する。これがメーザーと呼ばれる現象である。

反転分布の状態は非常に不安定であり、外から二つの準位間のエネルギー差に相当するエネルギー $h\nu_{21}$ を持った電波が入射してくると、上の準位にある粒子がすぐに下の準位へ落ちて周波数 ν_{21} の電波を誘導放射する。そしてさらにこの放射がとなりの分子に入射して同様な放射を起こす。このように、メーザー放射はカスケード的に増幅され、非常に強い放射を出す。一般にメーザー放射は以下のような特徴がある。

- 強度が局所熱平衡状態に比べて非常に強い。
- 電波源の広がり（メーザースポット）が極めて小さく点状である。
- 直線または円偏光している。
- スペクトル線の周波数幅が熱運動による幅より小さい場合が多い。
- 電波の位相がそろっている。

1.2.2 様々な種類のメーザー

メーザーは、分子の種類によって増幅できる電波の周波数が異なる。1.1.2 項でも述べたように、大質量形成領域では、水酸基 (OH)、水 (H_2O)、メタノール (CH_3OH) などの分子が強いメーザーを出すことが知られている。このうち、メタノールメーザーは、1971 年、Orion-KL 領域から 25 GHz 帯で初めて観測された (Barrett et al. 1971)。メタノールメーザーは、メーザー源の分布が輝線によって大きく異なるため、class I と class II の 2 種類に分類されており (Menten 1991a)、それぞれの特徴は以下の表 1.1 の通りである。

表 1.1 : class I、class II メタノールメーザーの特徴。

	class I	class II
主な周波数帯	9.9, 25.0, 36.2, 44.1, 84.5, 95.2, 146.6 GHz	6.7, 12.2, 20.0, 23.1, 37.7, 38.3, 38.5 GHz
超コンパクト H II 領域、赤外線源への付随	付随しない (1 pc 程度離れている)	付随する (より若い天体に付随するものも多数存在)
発生領域	大質量原始星をとりまくガスと、分子流やジェットとの境界	分子流やジェットの中、降着円盤上
励起機構	衝突励起	放射励起

1.2.3 6.7 GHz メタノールメーザー

メタノールメーザーの中でも、本研究の対象となる 6.7 GHz メタノールメーザーは、1991 年に初めて観測された (Menten 1991b)。6.7 GHz メタノールメーザーを起こしている分子ガス領域のサイズは数 au と非常にコンパクトであり、観測される輝度温度は $\sim 10^{12}$ K まで到達するという特徴がある (Menten 1992)。また、6.7 GHz メタノールメーザーは大質量星形成領域以外での検出例がほとんどないため、大質量星形成の指標として精力的な観測が行われている。

長期間にわたるモニター観測により、6.7 GHz メタノールメーザーは様々な強度変動を示すことが知られている。例えば、単調的な強度変動、周期的な強度変動、突発的な強度変動などが確認されている。その中でも、周期的な強度変動を示す 6.7 GHz メタノールメーザーは Goedhart らの観測で初めて発見され (Goedhart et al. 2003)、それ以降盛んに観測が行われている。周期的な強度変動の要因はまだ明確にはわかっていないが、大質量原始星ごく近傍の天体変動現象に起因していると考えられている。そのため、周期的な強度変動を示す 6.7 GHz メタノールメーザーを調査することは、大質量原始星やその周囲で起こっている現象の解明につながると期待されている。

以降、簡単のため、周期的な強度変動のことを周期変動、周期的な強度変動を示す 6.7 GHz メタノールメーザーのことを周期変動天体と呼ぶことにする。

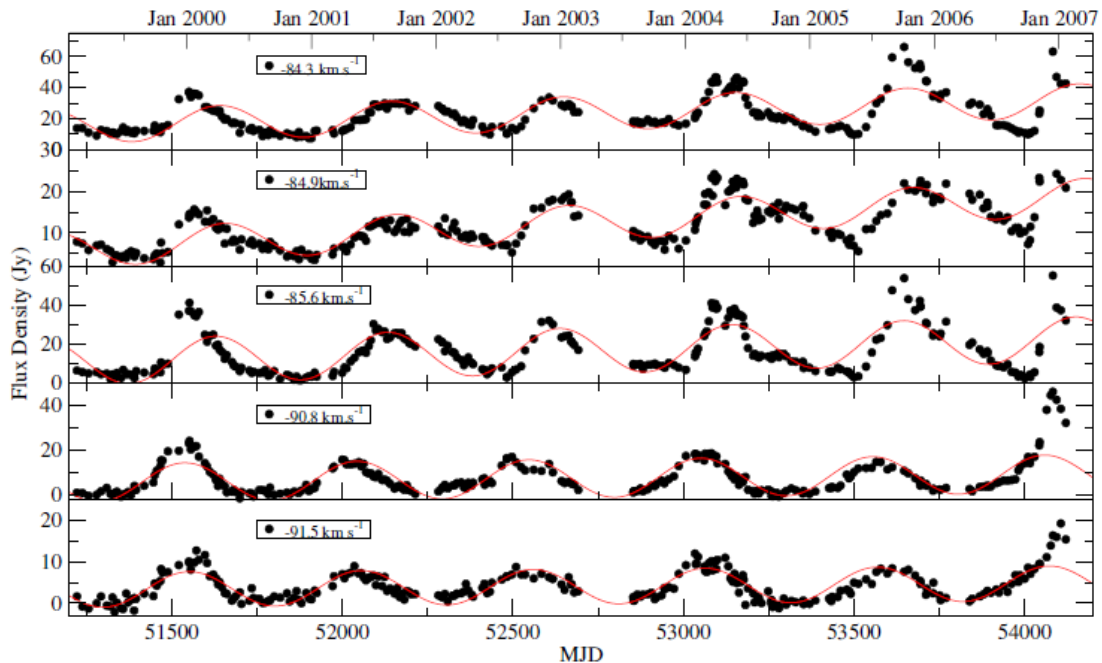


図 1.3 : 周期変動天体の例。G 331.3-0.24 の 5 個の速度成分について、横軸を観測日、縦軸を強度 (フラックス密度) としてプロットしてある (Goedhart et al. 2007 より引用)。

1.3 研究目的

1.3.1 脈動不安定モデル (Inayoshi et al. 2013)

6.7 GHz メタノールメーザーが周期変動を起こす要因については、いくつかの理論的なモデルが提唱されている。そのうちの一つに、Inayoshi らによって提唱された脈動不安定モデルがある (Inayoshi et al. 2013)。このモデルでは、周期変動は、急激な質量降着 ($\dot{M}_* \gtrsim 10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$) の下で成長する大質量原始星の脈動によって説明できると提唱している。主なメカニズムは以下の通りである。

- 1) 質量降着によって原始星は進化し、その半径は質量の増加に伴って徐々に増加する。
- 2) 原始星の半径が最大に広がったとき、原始星は不安定となり脈動を始める。この脈動不安定は、 κ 機構というメカニズムによって引き起こされる。
- 3) 原始星の脈動によって周囲のダストの温度が変動する。
- 4) 6.7 GHz メタノールメーザーは暖められたダストの赤外線放射によって励起されるため、ダストの温度の変動は 6.7 GHz メタノールメーザーの強度変動を引き起こす。
- 5) 原始星が輻射によってエネルギーを放出して収縮するようになると (ケルビン - ヘルムホルツ収縮)、原始星は安定し、脈動は終わる。

このモデルでは、数 10 日–数 100 日の連続的な周期変動について説明が可能であるとしている。また、原始星の脈動周期と光度との間に以下のような周期–光度関係 (Period-Luminosity Relation) があることを予測している。

$$\log \frac{L}{L_{\odot}} = 4.62 + 0.98 \log \left(\frac{P}{100 \text{ days}} \right) \quad (1.7)$$

ここで、 L は原始星の光度、 $L_{\odot} = 3.839 \times 10^{26} \text{ [W]}$ は太陽光度であり、 P は原始星の脈動周期である。図 1.4 に、周期–光度関係を表すグラフを示した。太線は式(1.7)で表される理論的な周期–光度関係であり、白黒のプロットは観測値である。この図より、短い周期の観測点ほど式(1.7)の理論線付近にプロットされていることがわかる。このことは、脈動不安定モデルは $P \lesssim 0.5 \text{ yr}$ の短い周期の天体に対してより当てはまるということを示唆している。

さらに、光度だけではなく、質量や半径、質量降着率といったような原始星の各物理量も脈動周期に依存すると予測している。そのため、原始星の脈動に起因すると考えられる周期変動天体の周期を測定することによって、間接的に大質量原始星の各物理量を推定することができる期待される。大質量星形成領域は遠方 ($> 1 \text{ kpc}$) に位置する上に、原始星やその周辺の構造は小スケール ($< \text{数 au}$) である。そのため、ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) のような高分解能な干渉計でさえ、直接観測によってこれらの物理量を求めることは困難である。しかし、式(1.7)のような関係を用いれば、単一鏡の観測によって間接的に物理量を推定できるようになるため、周期変動天体を観測することは大変有意義である。

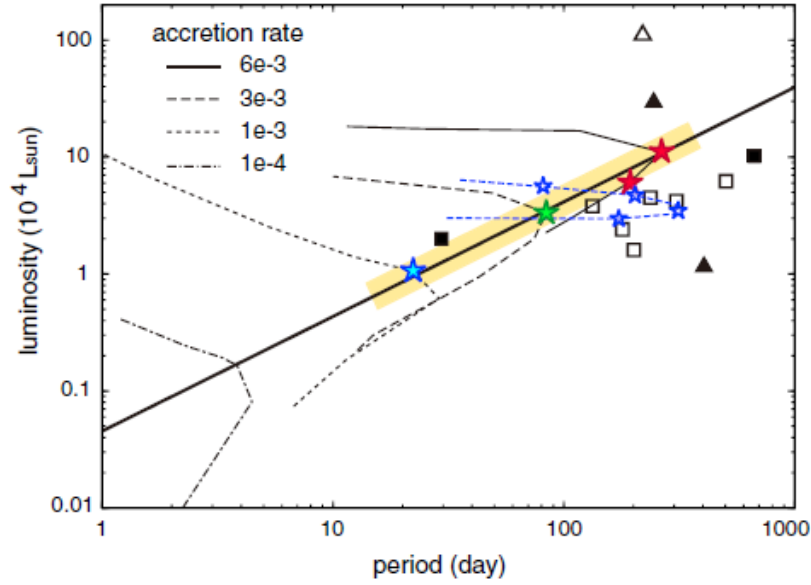


図 1.4 : 周期－光度関係 (Inayoshi et al. 2013 より引用)。太線は式(1.7)で表される理論的な周期－光度関係であり、4 本の黒の細線は様々な質量降着率における進化トラックを表している。なお、これらは球状降着を仮定したときの進化トラックであるが、青線は円盤降着を仮定したときの質量降着率 $10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ の進化トラックである。また、星印のプロットは脈動不安定点であり、黄色の網掛けは不安定帯を表している。そして、白黒のプロットは観測値を表しており、黒塗りは天体までの距離を年周視差によって求めたもの、白抜きは運動学的距離によるものである。さらに、三角のプロットは H II 領域付随の天体を表している。

1.3.2 周期変動天体の観測の現状

式(1.7)のような周期－光度関係は、理論的に予測されたものである。そのため、まずはこの関係を観測的に検証する必要がある。しかしながら、現状では、周期変動天体の観測例は少なく、圧倒的にサンプルが小さすぎる。過去の研究では、約 1000 天体で 6.7 GHz メタノールメーザー源が見つかっており、そのうち、十分な観測期間かつ十分な観測頻度での観測例は約 200 天体以下であった。さらにそのうち、見つかった周期変動天体は 20 天体のみであった。それを以下の表 1.2 にまとめた。また、この 20 天体の周期の分布を以下の図 1.5 に示した。

表 1.2 : 既知の周期変動天体。

天体名	周期 [day]	参考文献
G 009.62+0.19	243.3	Goedhart et al. 2004, 2014
G 012.68-0.18	307	Goedhart et al. 2004
G 012.88+0.48	29.5	Goedhart et al. 2009
G 022.36+0.06	178.2	Szymczak et al. 2011 ,2015
G 025.41+0.10	245	Szymczak et al. 2015
G 037.54+0.21	237	Araya et al. 2010
G 045.47+0.13	195.6	Szymczak et al. 2015
G 073.04+1.80	159	Szymczak et al. 2015
G 075.76+0.34	119.9	Szymczak et al. 2015
G 109.86+2.10	84–87	Szymczak et al. 2014
G 188.95+0.89	395	Goedhart et al. 2004, 2014
G 196.45–1.68	668	Goedhart et al. 2004
G 316.64–0.09	321	Goedhart et al. 2004
G 328.24–0.55	220.5	Goedhart et al. 2004, 2014
G 331.13–0.24	509	Goedhart et al. 2004, 2014
G 338.93–0.06	132.8	Goedhart et al. 2004, 2014
G 339.62–0.12	200.3	Goedhart et al. 2004, 2014
G 339.98–0.42	246	Maswanganye et al. 2016
G 358.46–0.39	220	Maswanganye et al. 2015
IRAS 22198+6336	34.6	Fujisawa et al. 2014

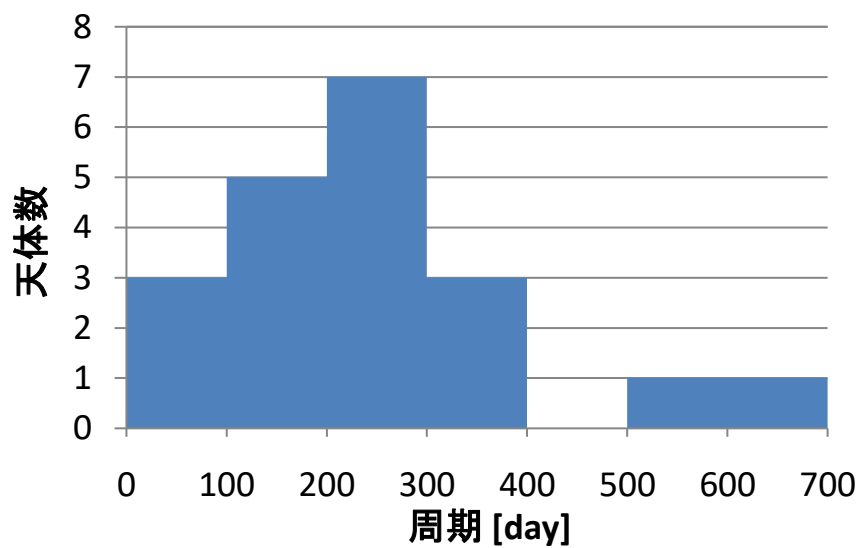


図 1.5 : 既知の周期変動天体における周期の分布。

1.3.3 研究目的

茨城大学電波天文観測研究室では、6.7 GHz メタノールメーザーの強度変動を統計的に調査するために、茨城県日立市にある 32 m 電波望遠鏡を用いてモニター観測を実施している。モニター観測とは、同じ天体に対し、ある期間継続して何度も観測を行うことである。前項でも述べたとおり、これまでに見つかった周期変動天体は 20 天体のみであり、式 (1.7) のような周期-光度関係を観測的に検証するにはサンプルが小さすぎる。そこで、このモニター観測では、周期変動天体の数を増やすことを目的の一つとしている。モニター観測は 2012 年 12 月 30 日から現在にかけて大きく四つの期間に分けて実施しており、それぞれの具体的な観測期間や、周期変動天体の数を増やすという観点から主な目的について以下の表 1.3 にまとめた。

表 1.3 : モニター観測の期間と主な目的。

	第 1 期・第 2 期	第 3 期	第 4 期
期間	2012/12/30–2014/01/10 2014/05/07–2015/08/24	2015/09/18–2017/03/07	2017/06/14–現在
天体数	442	143	442
頻度	各天体 9 日に 1 回程度	各天体 4 日に 1 回程度	各天体 5 日に 1 回程度 または 45 日に 1 回程度
目的	50 日–200 日周期の 周期変動天体の検出	短周期 (50 日未満) の 周期変動天体の検出	第 1 期・第 2 期では達成 できてない長周期の周期 変動天体の検出

周期変動天体の検出数を増やすためには、まず、モニター観測データに対して周期解析を行い、周期性があるかどうかを調べる必要がある。第 1 期と第 2 期の観測データに関しては、国立天文台の杉山孝一郎氏によって既に周期解析が行われており、周期変動天体が新たに 22 天体見つかった。それを以下の表 1.4 にまとめた。また、既知の周期変動天体において、別の速度成分で周期変動を新検出した天体や、既知とは異なる周期が導出された天体は 4 天体見つかった。それを表 1.5 にまとめた。

しかし、第 3 期の観測データに関しては、まだ詳細な周期解析が行われていなかった。そこで本研究では、まず、第 3 期の観測データに対して周期解析を行い、短周期の周期変動天体（以降、短周期強度変動天体と呼ぶ）の数を増やすことを目指した。さらに、見つかった短周期強度変動天体について、脈動不安定モデルが適用できる天体を選出し、その天体の光度を導出した。そして、最終的には、周期 - 光度関係の観測的な検証を行った。

表 1.4：日立 32 m 電波望遠鏡を用いたモニター観測（第 1 期・第 2 期）で新たに検出された周期変動天体。

天体名	周期 [day]
G 006.18-0.35	180
G 012.02-0.03	147, 213
G 012.19-0.03	121
G 012.20-0.10	197
G 014.23-0.50	23.9
G 016.83+0.07	197
G 020.24+0.08	291
G 024.14+0.00	189
G 025.65+1.04	165
G 025.82-0.17	165
G 026.52-0.26	172
G 028.02-0.44	111
G 028.28-0.36	249
G 030.40-0.29	220
G 033.64-0.21	119, 201
G 034.39+0.24	29.2
G 035.02+0.35	252
G 036.70+0.09	53.4
G 108.75-0.96	164
G 174.19-0.09	46.9
G 351.77-0.53	292
G 358.90-0.03	140

表 1.5：既知の周期変動天体において、日立 32 m 電波望遠鏡を用いたモニター観測（第 1 期・第 2 期）で、別の速度成分で周期変動を新検出した天体や、既知とは別の周期が導出された天体。4 列目に、周期変動を新検出した速度成分である場合は“新検出”、既知とは別の周期が導出された速度成分である場合は“別周期”と記載している。

天体名	既知周期 [day]	導出周期 [day]	新検出 or 別周期
G 009.62+0.19	243.3	120, 133, 167	新検出
G 012.68-0.18	307	249	別周期
G 025.41+0.10	245	211	別周期
G 196.45-1.68	668	142	別周期（一部新検出）

第2章 観測

2.1 観測概要

茨城大学電波天文観測研究室では、茨城県日立市・高萩市に位置する 2 台の 32 m 電波望遠鏡（それぞれ日立局、高萩局と呼ぶ）の運用を行っており、これらの望遠鏡を用いた研究も盛んに行われている。日立局では、1.3.3 項でも述べたように、6.7 GHz メタノールメーザーの強度変動を統計的に調査することを目的としてモニター観測を実施している。このモニター観測は 2012 年 12 月 30 日から開始し、現在も継続中である。表 1.3 に示したように観測期間は大きく四つに分けられるが、そのうち、本研究では 2015 年 9 月 18 日から 2017 年 3 月 7 日まで（第 3 期）の観測データを使用した。この第 3 期における観測パラメータを表 2.1 にまとめた。また、第 3 期観測対象 143 天体のリストは付録 A に記載した。



図 2.1：茨城県日立市・高萩市に位置する 2 台の 32 m 電波望遠鏡。写真左が高萩局、右奥が日立局である。

表 2.1：日立局モニター観測第 3 期における観測パラメータ。

望遠鏡	日立 32 m 電波望遠鏡
観測期間	2015/09/18–2017/03/07（第 3 期）
観測天体数	143
観測頻度	4 日に 1 回程度
空間分解能	~4.6 [arcmin]
周波数	6664–6672 [MHz]
分光点数	8192
速度分解能	0.044 [km/s]
積分時間	300 [s]
検出感度 (3σ)	~0.9 [Jy]

ただし、観測頻度について、アンテナトラブルや機器メンテナンス等により、表 2.1 の通りではない場合もある。また、既知の周期変動天体や周期変動の兆候が見られた天体については、詳細な調査を行うために、より観測頻度を上げている天体も一部ある。

2.2 観測対象天体の選出方法

日立局のモニター観測第 1 期と第 2 期の対象天体は、現在までに見つかっている 6.7 GHz メタノールメーザー源約 1000 天体のうち、北半球の日立局で観測可能な 442 天体（赤緯 ≥ -30 deg）であった。さらに第 3 期では、観測頻度を上げてより短周期の周期変動を捉えるために、第 1 期と第 2 期の対象天体 442 天体から 143 天体に絞って観測を行った。天体数を絞る際は、変動指数（modulation index）と信号雑音比（signal-to-noise ratio）という二つの指標を用いることで、十分な強度をもち、かつ有意な強度変動を示していると思われる 143 天体を選出した。

まず、強度変動の有無を判断する指標として、各天体の各速度成分に対して、第 1 期・第 2 期の全観測値の標準偏差 σ を平均 μ で割った、

$$I_{\text{mod}} = \frac{\sigma}{\mu} \quad (2.1)$$

を変動指数 I_{mod} と定義する。選出条件は $I_{\text{mod}} \geq 0.30$ とし、この場合、天体の速度成分は有意に強度変動を示していると判断した。

次に、十分な強度をもつかどうかを判断する指標として、各天体の各速度成分に対して、第 1 期・第 2 期の観測期間中の強度の最大値 S_{max} と観測装置由来の雑音の rms 値 σ との比、

$$SNR = \frac{S_{\text{max}}}{\sigma} \quad (2.2)$$

を信号雑音比 SNR と定義する。選出条件では $SNR \geq 7$ とし、この場合、天体の速度成分が十分な強度をもつと判断した。

つまり、第 3 期の観測対象天体は、第 1 期と第 2 期の観測対象天体 442 天体から、次の二つの条件を満たす速度成分をもつ 143 天体を選出した。

- 1) $I_{\text{mod}} \geq 0.30$
- 2) $SNR \geq 7$

2.3 高頻度観測の利点

第3期では、第1期・第2期よりも天体数を絞ったことで、より高頻度な観測が可能となった。高頻度観測の利点は、より短周期の周期変動を捉えることができる点にある。この利点を理解するための例として、図2.2にG 024.64–0.33の第2期と第3期の強度変動プロットを示した。この図から、第3期は第2期よりも観測点が増えたことで、より詳細な強度変動の様子を捉えたことがわかる。実際にこの天体は、第1期・第2期のデータに対する周期解析では周期性が検出されなかったが、本研究にて行った第3期のデータに対する周期解析では周期性が検出された（15.2日周期）。このように高頻度観測は、短周期強度変動天体の検出に適している。そこで、私は、高頻度な第3期の観測データのみに対して周期解析を行い、短周期強度変動天体の検出を目指した。

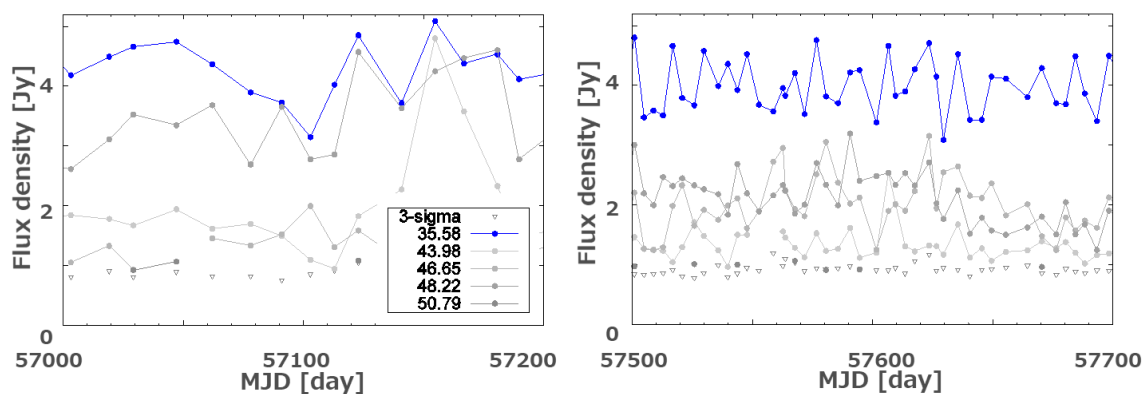


図 2.2 : G 024.64–0.33 の第2期と第3期の強度変動プロット。左が第2期、右が第3期の強度変動プロットである。

第3章 解析

本研究では、短周期強度変動天体の数を増やすため、日立局のモニター観測によって得られた第3期の観測データに対して周期解析を行った。周期解析には、安井靖堯氏（2016, 茨城大学修士論文）によって日立局のデータ解析用に作成された C 言語プログラムを使用した。このプログラムでは、Lomb-Scargle 法という、不等間隔な離散的データに対して適用可能な周期解析法が実装されている。

3.1 Lomb-Scargle 法

通常、信号処理や時系列解析では、連続信号から一定の間隔でサンプリングした離散的信号を取り扱い、データ取得点の間は等間隔であることが多い。しかし、天文観測では、観測装置の不調や天候の影響などにより、等間隔の時間で観測を行うことは難しく、データ点とデータ点の間は不等間隔になってしまうことが多い。本研究で用いた観測データも不等間隔の離散的データである。Lomb-Scargle 法は、このような不等間隔な離散的データに対しても適用可能な解析法であり、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。そのため、Lomb-Scargle 法は近年、観測データの周期（周波数）解析法として広く用いられている。

Lomb-Scargle 法は、Lomb (1976) と Scargle (1982) によって提唱された周期解析法である。ここでは、この方法の大まかな原理について解説する。詳細については、Lomb (1976)、Scargle (1982)、及び安井靖堯氏（2015 年度, 茨城大学修士論文）の論文に記載されている。

まず、任意の観測間隔で得られた N_0 個の離散的な時系列データ $X(t_i)$ ($i = 1, 2, \dots, N_0$) に対し、パワースペクトルの推定に当たるピリオドグラムを記述する。通常、このようなデータの離散フーリエ変換 (DFT) は、

$$\begin{aligned} DFT(\omega_n) &= \sum_{j=1}^{N_0} X(t_j) \exp(-i\omega_n t_j) \\ &= \sum_{j=1}^{N_0} X(t_j) \exp\left(-i \frac{2\pi n}{\Delta t N_0} t_j\right) \end{aligned} \quad (3.1)$$

と表される。ここで、 ω_n は周波数を表し、 $n = 1, 2, \dots, N_0$ である。これを用いて、パワースペクトルの推定に当たるピリオドグラムは、

$$P(\omega_n) = \frac{1}{N_0} |DFT(\omega_n)|^2 \quad (3.2)$$

と表される。

次に、等間隔の観測データ $X(t_i)$ が正規分布に従う雑音 $R(t_i)$ のみの場合を考える。この場合、ピリオドグラムの確率分布は指数分布となり、あるピリオドグラム値 x の確率分布関数 $f(x)$ は、

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_0^2} \exp\left(-\frac{x}{\sigma_0^2}\right) \quad (3.3)$$

と表される。ここで、 σ_0^2 は観測データ $X(t_i) = R(t_i)$ の分散である。この分散 σ_0^2 は、観測データ $X(t_i) = R(t_i)$ の平均値

$$\bar{X} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} X(t_i) \quad (3.4)$$

を用いて、

$$\sigma_0^2 = \frac{1}{N_0 - 1} \sum_{i=1}^{N_0} (X(t_i) - \bar{X})^2 \quad (3.5)$$

と表される。

一方、不等間隔の観測データ $X(t_i) = R(t_i)$ のピリオドグラムの確率分布は指数分布になるとは限らない。しかし、ピリオドグラムに修正を加えることで、等間隔の観測データ $X(t_i) = R(t_i)$ のピリオドグラムと同様に確率分布を指数分布にすることができる。この修正を加えたピリオドグラムは、

$$P_X(\omega) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\left[\sum_{j=1}^{N_0} X(t_j) \cos \omega(t_j - \tau) \right]^2}{\sum_{j=1}^{N_0} \cos^2 \omega(t_j - \tau)} + \frac{\left[\sum_{j=1}^{N_0} X(t_j) \sin \omega(t_j - \tau) \right]^2}{\sum_{j=1}^{N_0} \sin^2 \omega(t_j - \tau)} \right\} \quad (3.6)$$

で表される。これを **Lomb-Scargle** ピリオドグラムと呼ぶ。ここで、 ω は周波数を表し、 τ は、

$$\tan(2\omega\tau) = \frac{\sum_{j=1}^{N_0} \sin 2\omega t_j}{\sum_{j=1}^{N_0} \cos 2\omega t_j} \quad (3.7)$$

を満たすものとする。このとき、分散 σ_0^2 が 1 でない観測データ $X(t_i) = R(t_i)$ の場合は、観測データ $X(t_i) = R(t_i)$ の分散 σ_0^2 を用いて、

$$P_N(\omega) = \frac{P_X(\omega)}{\sigma_0^2} \quad (3.8)$$

と正規化することにより、確率分布を指数分布にすることができる。これを、正規化 **Lomb-Scargle** ピリオドグラムと呼ぶ。式(3.6)と式(3.8)を用いた周期解析法を **Lomb-Scargle** 法と呼ぶ。

Lomb-Scargle ピリオドグラムは、以下のような特性を持つために、観測間隔が不等間隔な離散的データであっても、等間隔なデータと等価のピリオドグラムを求めることができる。

- a. τ を用いることによって、時間シフトに対して不変となる。
- b. 観測データを、最小二乗法を用いて $\sin$ カーブにフィットさせることと等価になる。

なお、独立周波数の数について、等間隔の観測データの場合は、ピリオドグラムによって求められる独立周波数の数 N は $N_0/2$ で与えられる。ここで、データ数 N_0 を変えずに、独立周波数の周波数分解能を高くしたい場合は、元の時系列に、

$$X(t_i) = 0, \quad j = N_0 + 1, \dots, M \quad (3.9)$$

となる $M - N_0$ 個の 0 点を挿入し、元の時系列の時間軸の拡大を行う。これにより、周波数分解能を 0 点挿入前より高くすることができる。この作業はデータ数を M 個にしたことに相当し、 $M = mN_0$ (m は 2 以上の整数) とすることを m 倍にオーバーサンプリング (補間) するという。オーバーサンプリングを行ったとき、独立周波数の数は $mN_0/2$ 個となる。

一方で、不等間隔の観測データの場合、Lomb-Scargle ピリオドグラムによって求められる独立周波数の数は、厳密には等間隔の観測データの場合と同じにはならない。しかし、データがほぼ等間隔の場合やオーバーサンプリングが十分になされる場合は、 N は $N_0/2$ に非常に近づくといえるため、等間隔の観測データの場合と同様に $N = N_0/2$ と考える。

3.2 誤警報確率

ピリオドグラムを計算することは、観測データに含まれている周波数成分を求めることである。例えば、観測データに含まれる雑音以外の周波数成分が ω_0 であるとき、ピリオドグラム $P_X(\omega_0)$ は大きな値を取り得る。つまり、ピリオドグラムが最も大きな値を取る周波数成分を見つけることができれば、その周波数の逆数を取った値を観測データの周期とみなすことができる。しかし、ピリオドグラムがどのくらい大きな値をとれば有意な値といえるかどうかは、ピリオドグラムを計算するだけでは評価できない。そこで、Lomb-Scargle ピリオドグラムの値の有意性を評価するために、統計学の仮説検定という考え方を用いる。

統計学の仮説検定では、まず、帰無仮説と、その逆の対立仮説を立てる。通常、帰無仮説には否定 (棄却) したい仮説を立て、対立仮説には肯定 (採択) したい仮説を立てる。帰無仮説を棄却するか否かは、ある基準を下回るか否かで判定する。この基準となる確率のことを有意水準という。仮説検定では、有意水準をある小さな値 (例えば 0.01、0.05 など) に設定し、帰無仮説の下で有意水準よりも小さな確率をもつ事象は「稀にしか起こらないこと」と判断する。そして、「稀にしか起こらないこと」が起こった場合は、偶然起こったとは考えにくい (= 有意である) として、そもそも最初に設定した帰無仮説が間違っていたと判断する。その結果、帰無仮説を棄却し、対立仮説を採択するのである。ここで、帰無仮説が正しいにもかかわらず誤って棄却してしまうことを第一種の過誤という。第一種の過誤を犯してしまう確率は、有意水準の定義より、有意水準と一致する。

以上の考え方を用いて Lomb-Scargle ピリオドグラムの値の有意性を評価する。まず、帰無仮説として「観測データが正規分布する雑音のみである」という仮説を立て、対立仮説と

して「観測データは雑音以外である」という仮説を立てる。3.1 節で述べたように、帰無仮説の下では、Lomb-Scargle ピリオドグラムの確率分布は指数分布となる（ここでは簡単のため、雑音の分散 σ_0^2 が 1 の場合を考えるが、そうではない場合も正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムを用いることで、確率分布は指数分布になる）。よって、ある周波数 ω におけるピリオドグラムの値 $P_X(\omega)$ が z より小さくなる確率は、

$$f(z) = \int_0^z \exp(-z') dz' = 1 - \exp(-z) \quad (3.10)$$

と書ける。これを独立周波数の数 N にわたって評価すると、それぞれの周波数におけるピリオドグラムの値が全て z より小さくなる確率は、

$$F(z) = [1 - \exp(-z)]^N \quad (3.11)$$

と書ける。すなわち、いずれかのピリオドグラムの値が z より大きくなる確率は、

$$\alpha = 1 - [1 - \exp(-z)]^N \quad (3.12)$$

と書ける。今評価したいのは、ピリオドグラムの値がどのくらい大きな値をとれば有意な値といえるかどうかであるから、この確率 α を有意水準として用いることができる。式(3.13)より、有意水準として α をある小さな値に設定すると、それに対応する z の値 (z_0 とする) が決まる。式(3.13)を $z = z_0$ について解くと、

$$z_0 = -\ln[1 - (1 - \alpha)^{1/N}] \quad (3.13)$$

となる。ここで、有意水準 α よりも小さな確立をもつ事象、つまりピリオドグラムの値が z_0 を超えることは「稀にしか起こらないこと」と判断する。そして、ピリオドグラムの値が z_0 を超えた場合は、偶然起こったとは考えにくい（＝有意である）として、帰無仮説を棄却することができる。その結果、対立仮説「観測データは雑音以外である」を採択する。先ほど、有意水準は第一種の過誤を犯す確率と一致すると述べた。今の場合、第一種の過誤は、「観測データが雑音のみであるにもかかわらず、雑音以外（＝信号）である」と判断してしまう確率である。信号検出理論の観点では、「雑音を信号である」と判断してしまう確率のことを誤警報確率（false alarm probability）と呼ぶ。つまり、有意水準、第一種の過誤を犯す確率、誤警報確率はすべて同じ確率である。ここでの議論は、信号検出理論の観点をもつので、以降は有意水準 α のことを誤警報確率と呼ぶことにする。誤警報確率が小さいほど、Lomb-Scargle ピリオドグラムの値の信頼性は高く、有意であると言える。

以上の議論より、誤警報確率 α を Lomb-Scargle ピリオドグラムの値の有意性を評価する指標として用いることにする。具体的には、誤警報確率 α をある小さな値（0.01、0.001 など）で固定し、そのときの z の値 z_0 を閾値として扱うことにする。すなわち、Lomb-Scargle ピリオドグラムの値が z_0 を超えていれば有意に検出されたと明確に判断する基準を設けることに相当する。

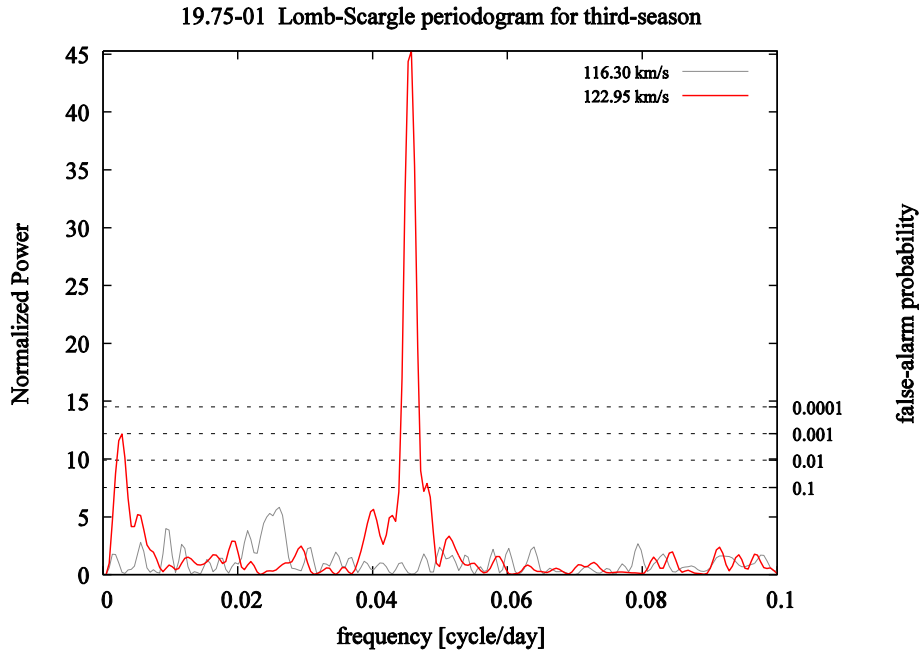


図 3.1：周期解析プログラムによって導出できる正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトルの例。この図は、G 019.75–0.12 のもの横軸は周期の逆数に相当する周波数、左縦軸は正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムの値を表す。そして、右縦軸は誤警報確率 α を表し、 α をある小さな値 (0.01、0.001 など) に設定したときの閾値が一目でわかるようになっている。なお、 α は百分率ではなく、1 に対する割合であることに注意する。ピリオドグラムの値がこの閾値を超えていれば、その値は信頼性が高い (有意である) といえる。

3.3 周期変動天体の選出条件

Lomb-Scargle ピリオドグラムでは、オーバーサンプリング (補間) を行うことで、周波数分解能を高くすることができる。例えば、2 倍にオーバーサンプリングを行えば、周波数分解能を $1/2$ にすることができる。安井靖堯氏の周期解析プログラムでは、解析時に何倍にオーバーサンプリングするかを `ofac` という引数で指定できるようになっている。引数 `ofac` は、3.1 節で与えた m に相当する。3.1 節でも述べたように、 m 倍にオーバーサンプリングを行ったとき、独立周波数の数は $mN_0/2$ 個となるため、この周期解析プログラムで導出される独立周波数の数 N_{out} は、

$$N_{\text{out}} = \text{ofac} \times \frac{N_0}{2} \quad (3.14)$$

となる。本解析では `ofac` = 4、つまり 4 倍にオーバーサンプリングを行って解析を実施したため、 $N_{\text{out}} = 2N_0$ である。

そして、周期解析を行い、ある速度成分が以下の三つの条件を満たす場合にその成分は周期性があると判断し、周期性があると判断された成分を含む天体を周期変動天体とした。

- 1) 正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムの最大値 $P_N(\omega_p)$ が、誤警報確率 $\alpha < 0.0001$ を満たすこと。
- 2) 条件 1) で導出された周期 $1/\omega_p$ が、天体の全観測期間に 3 周期以上含まれること。
- 3) 第 3 期の観測期間中の強度の最大値 $S_{\max}$ と観測装置由来の雑音の rms 値 σ との比 (信号雑音比) が $S_{\max}/\sigma > 7$ を満たすこと。

何倍にオーバーサンプリングを行うか、また、誤警報確率をいくつに設定するかについては、Goedhart et al. (2014) を参考にした。Goedhart et al. (2014) では、様々な周期解析法での結果との比較を通じて、Lomb-Scargle 法におけるこれらの値について、 $\text{ofac} = 4$ 、 $\alpha < 0.0001$ と設定することを保守的であるとしている。そのため、本解析でもこれらの値を用いた。

また、条件 2) を課すのは、導出周期の再現性を評価するためである。強度が一定である観測データのピリオドグラムは、 $\omega = 0$ に最大値をもつことが期待される。しかし、非周期的な強度変動は連続スペクトルとして $\omega = 0$ 以外でもピリオドグラムが大きな値をとる恐れがある。そこで、導出周期の再現性を評価するために、条件 2) として、導出周期が観測期間に数回分 (ここでは 3 回分) 含まれる周期であるという条件を課した。さらに、ある程度強度をもつ天体であるかどうかを評価するために、条件 3) を課した。

以上の条件と、観測パラメータ (観測頻度と観測期間) より、本解析でどのくらいの周期が導出可能であるかを予測することができる。サンプリング定理より、観測データの間隔 (観測頻度に相当) Δt が等間隔である場合、導出可能な最小周期は $2\Delta t$ であり、最大周期は観測期間に等しい。よって、第 3 期の観測データの間隔は 4 日程度、観測期間は最大で 2015 年 9 月 18 日から 2017 年 3 月 7 日 (MJD では 57283 日から 57819 日に相当) の 537 日間であるから、導出可能な最小周期は 8 日であり、最大周期は 537 日である。しかし、条件 2) を課すことで導出可能な最大周期は観測期間の $1/3$ となるため、537 日の $1/3$ の 179 日となる。つまり、本解析での導出可能周期は、8 日–179 日である。一方で、第 1 期・第 2 期では、観測データの間隔は 9 日程度、観測期間は最大で 2012 年 12 月 30 日から 2015 年 8 月 24 日 (MJD では 56291 日から 57258 日に相当) の 968 日間であるから、条件 2) も考慮すると導出可能周期は 18 日–323 日である。このことから、第 3 期観測データに対する周期解析は、第 1 期・第 2 期観測データに対する周期解析と比較して、より短い周期の導出に適していることがわかる。

第4章 結果

4.1 検出された全周期変動天体

周期解析の結果、3.3 節の三つの選出条件を満たし検出された周期変動天体は、第 3 期観測対象 143 天体のうち 37 天体であり、それらの導出周期は 14.8 日–163.9 日であった。そのうち、既知の周期変動天体であるが、別の速度成分で周期変動を新検出した天体や、既知とは別の周期が導出された天体（準新検出天体と呼ぶことにする）は 11 天体であった。また、本解析によって新検出、つまり、第 3 期の観測データに対する周期解析によって初めて検出することができた周期変動天体は、20 天体であった。図 4.1 には、検出された周期変動天体の内訳を示した。

表 4.1 に、準新検出天体の一覧を示した。この表では、周期変動を新検出した速度成分や、既知とは別の周期が導出された速度成分のみを記載している。4 列目に、周期変動を新検出した速度成分である場合は“新検出”、既知とは別の周期が導出された速度成分である場合は“別周期”と記載している。また、3 列目には導出周期を記載しているが、ある速度成分で、三つの選出条件を満たす正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラム値が複数ある場合は、その中で最も信頼性の高いといえるピリオドグラム値が最大のときの周期を採用している。さらに、導出周期の誤差として、隣り合う独立周期との差を示している。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。隣り合う独立周期（もしくは独立周波数）との差は、独立周波数の数 N_{out} で決まるため、データ数 N_0 で決まる。以降も、導出周期として、正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムが最大値をとる周波数の逆数を採用し、導出周期の誤差として、隣り合う独立周期との差を用いることにする。

新検出の周期変動天体については、次節で詳細に紹介する。

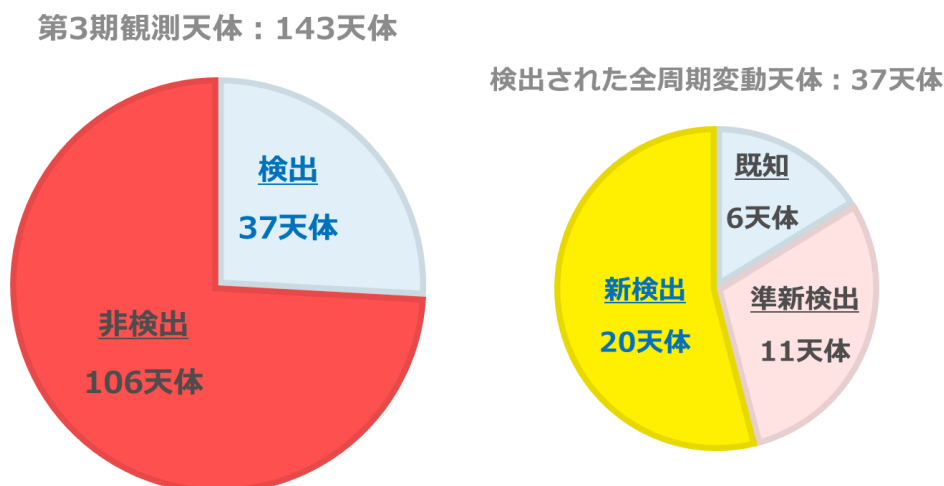


図 4.1 : 検出された周期変動天体の内訳。

表 4.1：準新検出天体の一覧。

天体名	視線速度 V_{lsr} [km/s]	周期 T (誤差+, -) [day]	新検出 or 別周期
G 006.18-0.35	-31.33	163.9 (+13.7, -11.7)	新検出
G 009.62+0.19	1.33	119.0 (+7.0, -6.3)	別周期
	2.38	112.7 (+6.3, -5.6)	別周期
	3.27	119.0 (+7.0, -6.3)	別周期
	8.74	53.6 (+1.4, -1.3)	別周期
G 025.82-0.17	99.57	71.0 (+2.4, -2.3)	別周期
G 028.02-0.44	16.19	112.1 (+6.2, -5.6)	新検出
G 030.40-0.29	98.13	112.1 (+6.2, -5.6)	新検出
	100.41	112.1 (+6.2, -5.6)	新検出
G 033.64-0.21	58.96	153.0 (+11.8, -10.2)	別周期
	59.29	142.8 (+10.2, -8.9)	新検出
	59.62	52.2 (+1.3, -1.3)	新検出
	60.32	142.8 (+10.2, -8.9)	新検出
	60.98	142.8 (+10.2, -8.9)	別周期
	62.69	126.0 (+7.9, -7.0)	新検出
	63.19	133.9 (+8.9, -7.9)	新検出
G 034.39+0.24	61.45	29.3 (+0.4, -0.4)	新検出
G 037.54+0.21	87.40	125.3 (+7.8, -7.0)	新検出
	87.83	125.3 (+7.8, -7.0)	別周期
G 174.19-0.09	3.77	112.5 (+6.3, -5.6)	新検出
	4.56	125.8 (+7.9, -7.0)	新検出
	4.77	46.5 (+1.0, -1.0)	新検出
G 188.95+0.89	-3.82	163.9 (+13.7, -11.7)	新検出
G 196.45-1.68	15.42	66.7 (+2.2, -2.0)	別周期
	15.88	66.7 (+2.2, -2.0)	別周期

4.2 新検出の周期変動天体

本解析での新検出の周期変動天体は 20 天体であり、それらの導出周期は 14.8 日–163.9 日であった。表 4.2 に新検出の周期変動天体の一覧を示した。この表には、新検出天体の天体名、同定されている速度成分数、三つの選出条件を満たし周期性が検出された成分数、周期性が検出された速度成分の視線速度、そして導出周期を記載している。視線速度について、同行に記載の視線速度は、導出周期が同じであることを意味している。

表 4.2 : 新検出天体の一覧。

天体名	成分数	周期成分数	視線速度 V_{lsr} [km/s]	周期 T (誤差+, -) [day]
G 000.16-0.44	1	1	13.70	47.6 (+1.2, -1.0)
G 010.88+0.12	14	1	15.22	106.7 (+5.6, -5.1)
G 012.90-0.26	8	1	36.95	25.4 (+0.3, -0.3)
G 014.33-0.63	6	1	21.55	71.1 (+2.5, -2.3)
G 019.75-0.12	2	1	122.95	21.9 (+0.2, -0.2)
G 024.54+0.32	8	5	106.35, 106.87, 107.72, 109.29, 110.02	163.9 (+13.7, -11.7)
G 024.64-0.33	5	1	35.59	15.2 (+0.1, -0.1)
G 0.24.93+0.08	8	1	46.62	133.9 (+8.9, -7.9)
G 032.03+0.06	11	4	94.14	55.5 (+1.5, -1.4)
			92.75, 94.82, 95.51	57.0 (+1.6, -1.5)
G 032.11+0.09	16	1	92.83	56.1 (+1.5, -1.4)
G 033.40+0.01	17	10	97.56, 97.84, 98.62, 99.04, 99.44, 104.14, 104.89, 105.24, 105.68, 107.58	31.4 (+0.5, -0.5)
G 033.86+0.01	6	2	60.88, 63.46	73.5 (+2.6, -2.4)
G 035.79-0.17	13	2	61.55, 62.02	33.4 (+0.5, -0.5)
G 037.47-0.11	13	1	54.49	68.7 (+2.3, -2.1)
G 049.60-0.25	13	1	63.04	106.7 (+5.6, -5.1)
G 052.66-1.09	6	3	65.18	14.8 (+0.1, -0.1)
			56.36, 65.88	14.9 (+0.1, -0.1)
G 081.76+0.59	14	2	3.87, 4.59	163.9 (+13.7, -11.7)
G 123.05-6.31	5	5	-36.07, -35.50, -29.32, -28.73, -28.15	163.9 (+13.7, -11.7)
G 183.34-0.59	4	3	-4.86	64.6 (+2.0, -1.9)
			-15.19, -14.61	68.8 (+2.3, -2.1)
G 192.60-0.05	13	3	5.01	112.3 (+6.2, -5.6)
			5.29	118.6 (+7.0, -6.2)
			5.92	125.5 (+7.8, -7.0)

以下には、新検出の 20 天体のうち、例として 3 天体（G 032.03+0.06、G 052.66-1.09、G 123.05-6.31）について詳細な周期解析の結果を示した。その他の 17 天体の結果については、付録 B に記載した。具体的には、それぞれの天体について、主に二つの表と三つの図を示した（付録 B も同様）。一番目の表には、その天体の同定されている速度成分を示し、二番目の表には、選出条件を満たす速度成分について、ピリオドグラム of 最大値 $P_N(\omega_p)$ 、誤警報確率 α 、導出周期 T を示した。また、一番目の図には、全速度成分のフラックス密度を観測期間にわたって積分したラインプロファイルを示した。なお、この図には、選出条件を満たす速度成分上に縦線を挿入してある。二番目の図には、各速度成分の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトルを示し、選出条件を満たす成分のみ色を付けて表示した。この図に示されるスペクトルは、正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムの値を線でつないだものであり、実際は離散スペクトルであることに注意する。さらに三番目の図には、各速度成分のフラックス密度の時間変動を示し、二番目の図と同様、選出条件を満たす速度成分のみ色を付けて表示した。ただし、一番目の図と三番目の図について、より詳細な情報を捉えるために、縦軸または横軸を拡大した図も示す場合がある。なお、三つの図において、同じ速度成分は同じ色で統一して示した。

● G 032.03+0.06

G 032.03+0.06 は、11 個の速度成分が同定されている。そのうち、4 個の速度成分が選出条件を満たし、55.5 日、または 57.0 日の周期が導出された。以下に、G 032.03+0.06 の解析結果をまとめた。

表 4.3 : G 032.03+0.06 の速度成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	92.75, 94.14, 94.82, 95.51, 96.58, 96.83, 97.43, 98.43, 99.53, 100.94, 102.30
---------------------------------	--

表 4.4 : G 032.03+0.06 の周期変動成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	ピリオドグラムの 最大値 $P_N(\omega_p)$	誤警報確率 α	周期 T (誤差+, -) [day]
92.75	26.26	$< 0.1 \times 10^{-5}$	57.0 (+1.6, -1.5)
94.14	18.13	0.1×10^{-5}	55.5 (+1.5, -1.4)
94.82	23.69	$< 0.1 \times 10^{-5}$	57.0 (+1.6, -1.5)
95.51	29.38	$< 0.1 \times 10^{-5}$	57.0 (+1.6, -1.5)

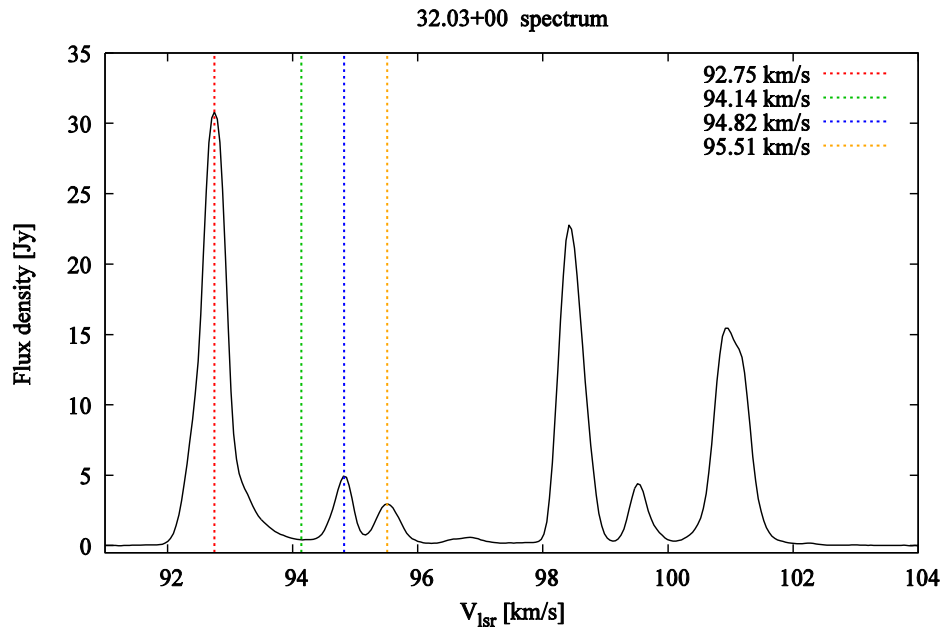


図 4.2 : G 032.03+0.06 のラインプロファイル。

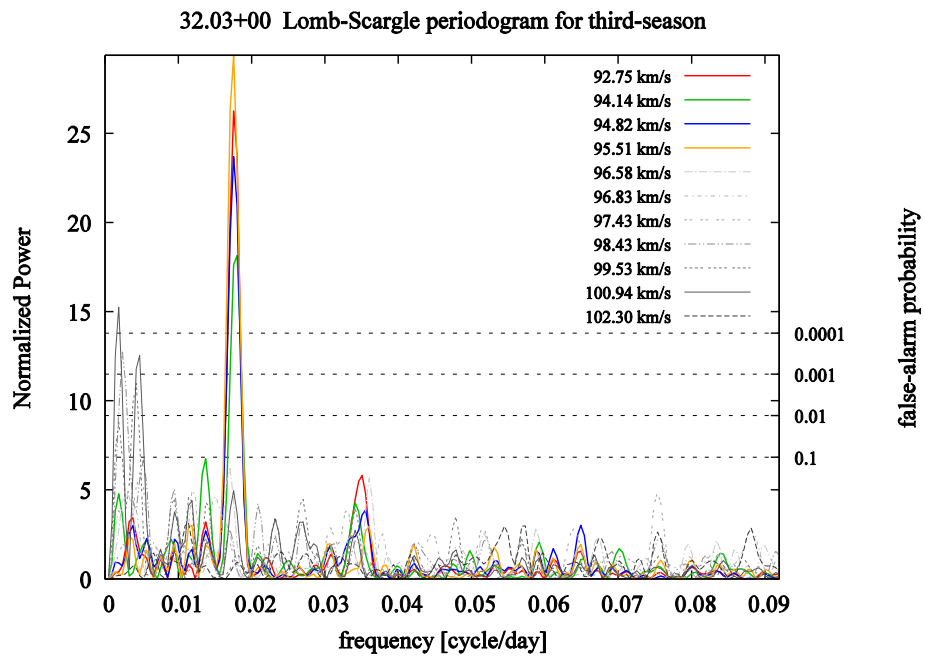


図 4.3 : G 032.03+0.06 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル。

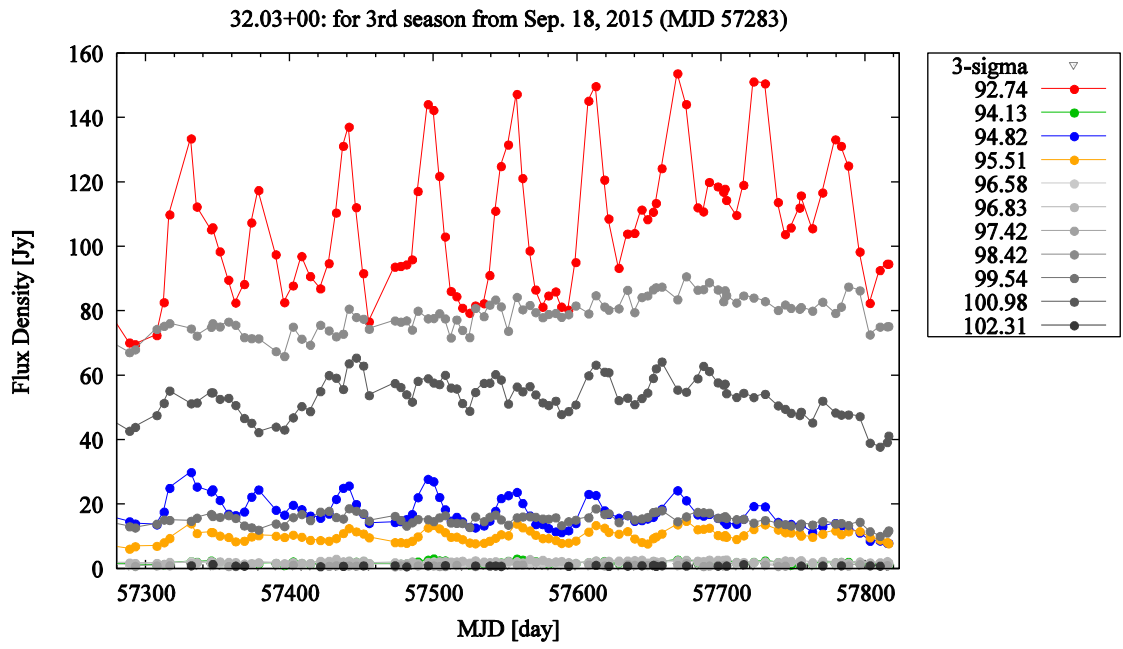


図 4.4 : G 032.03+0.06 の強度変動プロット。

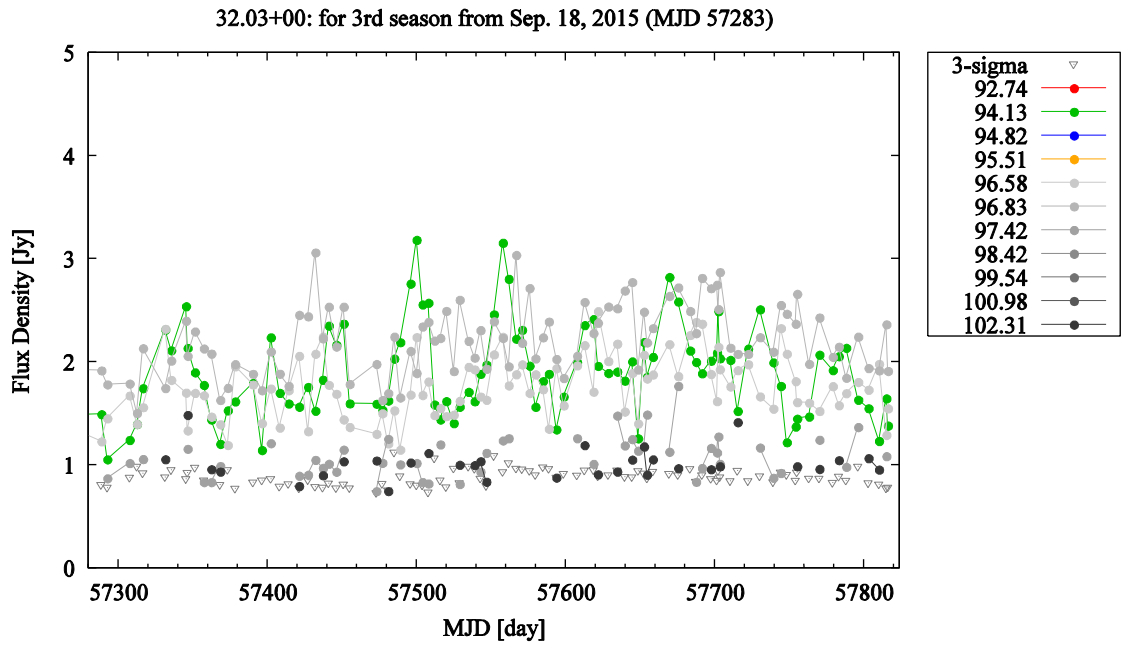


図 4.5 : G 032.03+0.06 の強度変動プロット。図 4.4 の縦軸を拡大したもの。

● G 052.66–1.09

G 052.66–1.09 は、6 個の速度成分が同定されている。そのうち、3 個の速度成分が選出条件を満たし、14.8 日、または 14.9 日の周期が導出された。14.8 日は、本解析で導出された周期の中で最も短い周期である。以下に、G 052.66–1.09 の解析結果をまとめた。

表 4.5 : G 052.66–1.09 の速度成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	56.36, 63.21, 65.18, 65.88, 66.56, 68.16
---------------------------------	--

表 4.6 : G 052.66–1.09 の周期変動成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	ピリオドグラムの 最大値 $P_N(\omega_p)$	誤警報確率 α	周期 T (誤差+, -) [day]
56.36	26.13	$< 0.1 \times 10^{-5}$	14.9 (+0.1, -0.1)
65.18	15.54	3.5×10^{-5}	14.8 (+0.1, -0.1)
65.88	16.81	1.0×10^{-5}	14.9 (+0.1, -0.1)

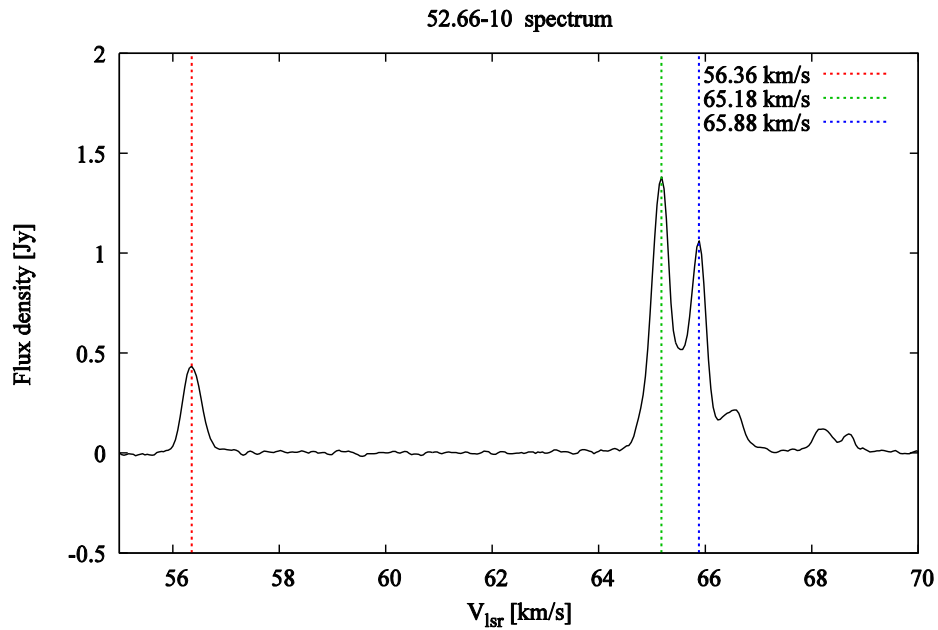


図 4.6 : G 052.66–1.09 のラインプロファイル。

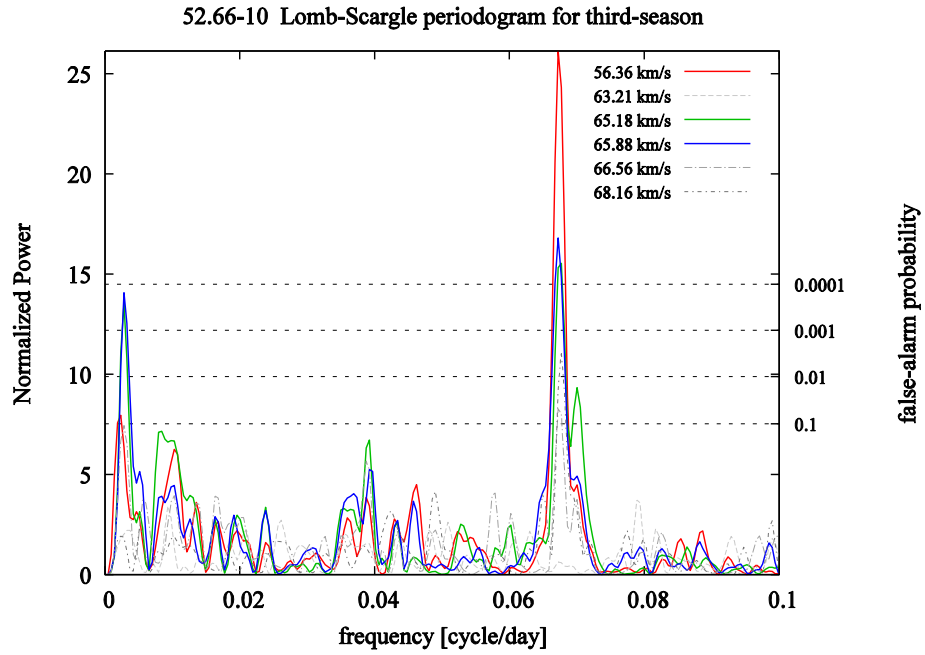


図 4.7 : G 052.66-1.09 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル。

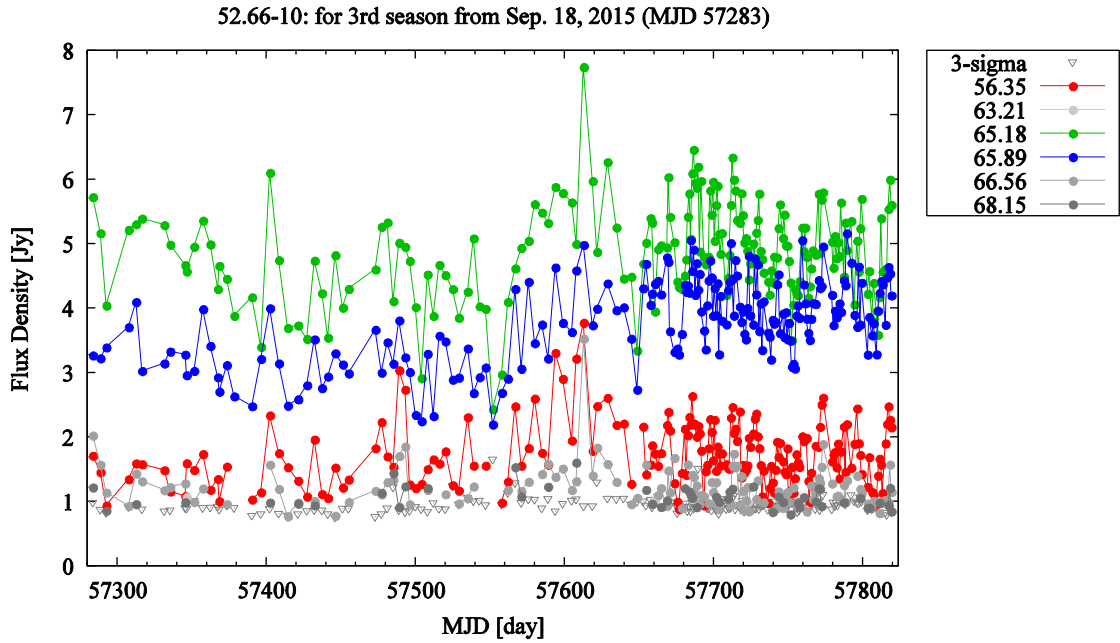


図 4.8 : G 052.66-1.09 の強度変動プロット。

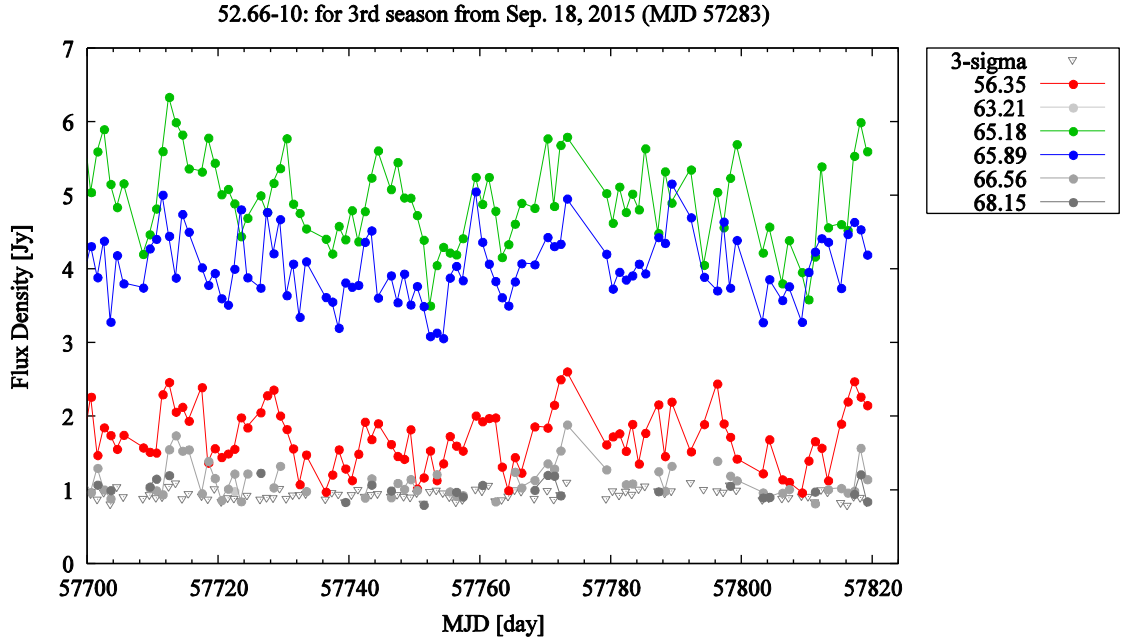


図 4.9 : G 052.66-1.09 の強度変動プロット。図 4.8 の縦軸と横軸を拡大したもの。

● G 123.05-6.31

G 123.05-6.31 は、5 個の速度成分が同定されている。このすべての速度成分が選出条件を満たし、いずれも 163.9 日の周期が導出された。163.9 日は、本解析で導出された周期の中で最も長い周期である。以下に、G 123.05-6.31 の解析結果をまとめた。

表 4.7 : G 123.05-6.31 の速度成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	-36.07, -35.50, -29.32, -28.73, -28.15
---------------------------------	--

表 4.8 : G 123.05-6.31 の周期変動成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	ピリオドグラムの 最大値 $P_N(\omega_p)$	誤警報確率 α	周期 T (誤差+, -) [day]
-36.07	16.42	0.8×10^{-5}	163.9 (+13.7, -11.7)
-35.50	16.59	0.7×10^{-5}	163.9 (+13.7, -11.7)
-29.32	18.13	0.1×10^{-5}	163.9 (+13.7, -11.7)
-28.73	18.51	0.1×10^{-5}	163.9 (+13.7, -11.7)
-28.15	19.20	0.1×10^{-5}	163.9 (+13.7, -11.7)

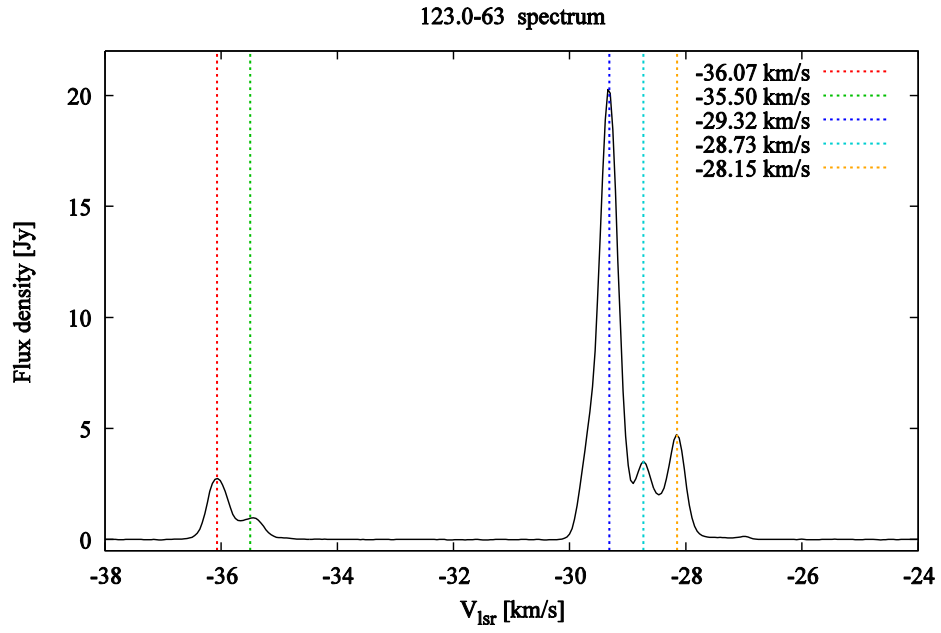


図 4.10 : G 123.05-6.31 のラインプロファイル。

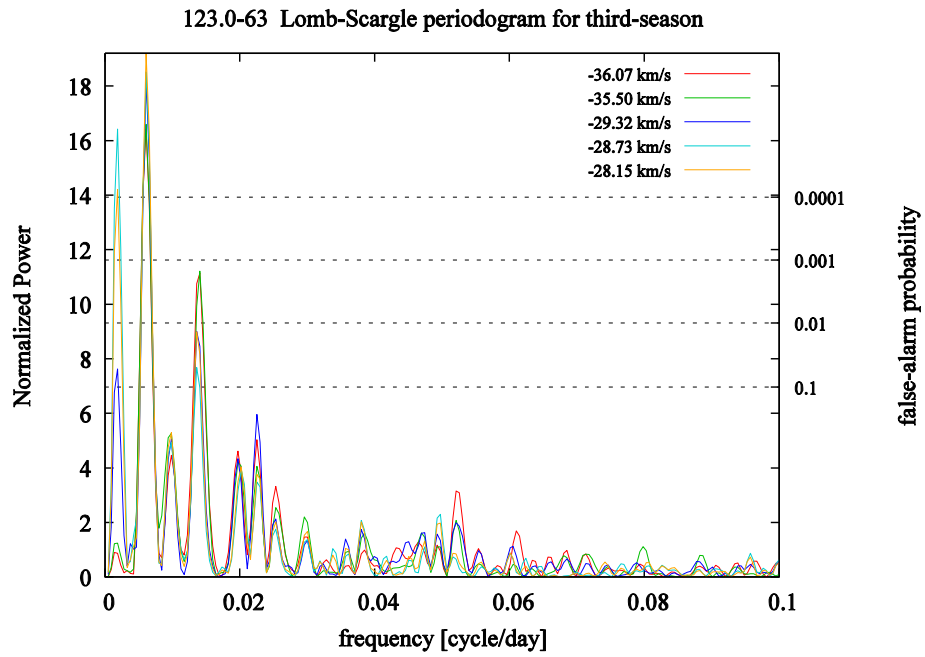


図 4.11 : G 123.05-6.31 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル。

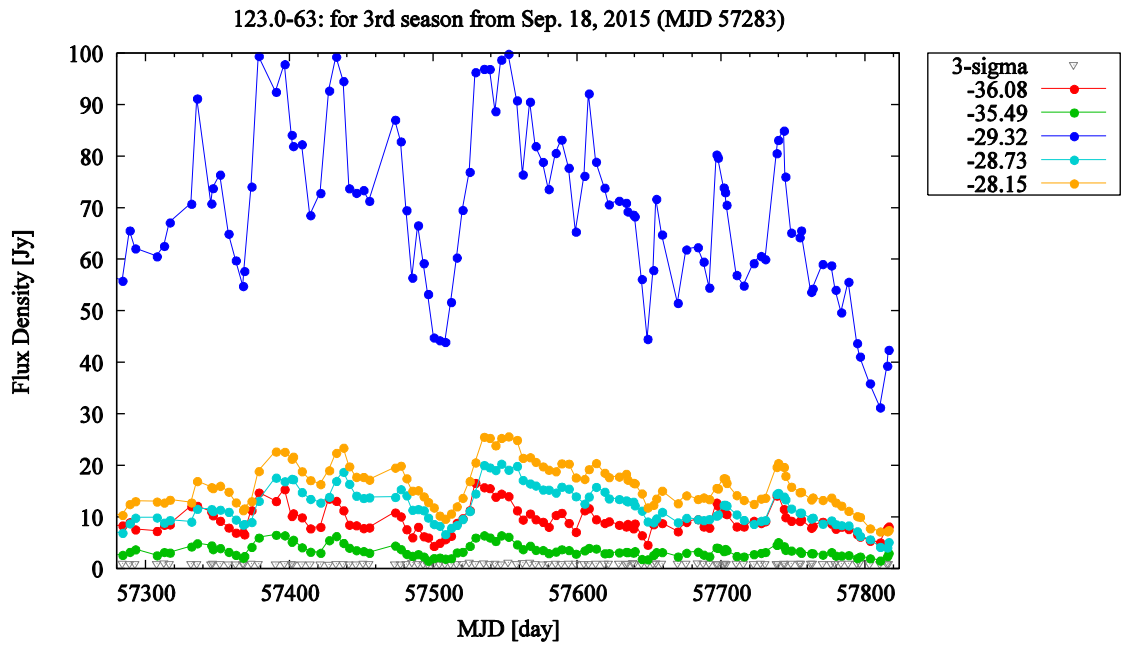


図 4.12 : G 123.05-6.31 の強度変動プロット。

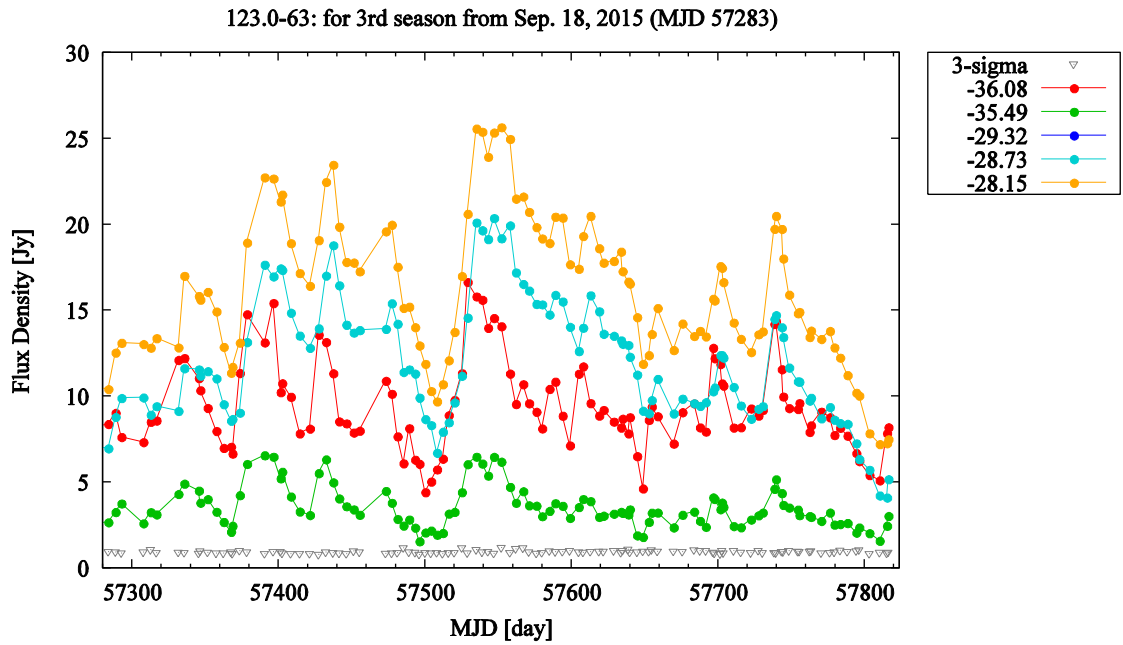


図 4.13 : G 123.05-6.31 の強度変動プロット。図 4.12 の縦軸を拡大したもの。

4.3 周期の分布

先行研究で検出された周期変動天体と、日立局モニター観測第 1 期・第 2 期のデータを用いた周期解析で検出された周期変動天体、そして第 3 期のデータを用いた本解析で新検出の周期変動天体についての周期の分布を以下の図 4.14 と図 4.15 に示した。ただし、同じ天体でも速度成分によって異なる周期が導出されている場合は、最も信頼性の高いといえる正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラム の値が最も大きい周期を採用している。また、ここでは、混乱を避けるため、準新検出天体は既知の天体として取り扱い、既知の周期を採用した。この図より、本解析によって短周期強度変動天体の数を増やすことに成功したことがわかる。全周期変動天体（62 天体）のリストについては、付録 C に記載した。

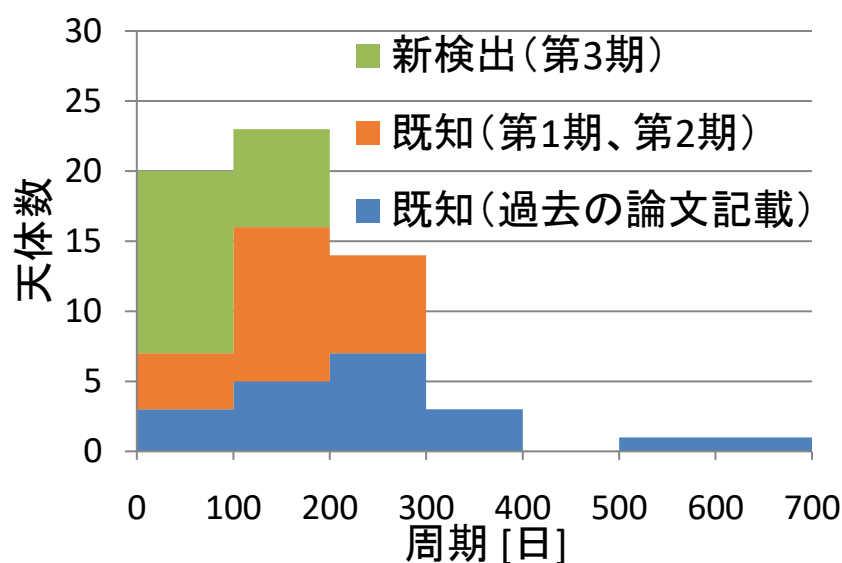


図 4.14 : 0 日-700 日の周期の分布。

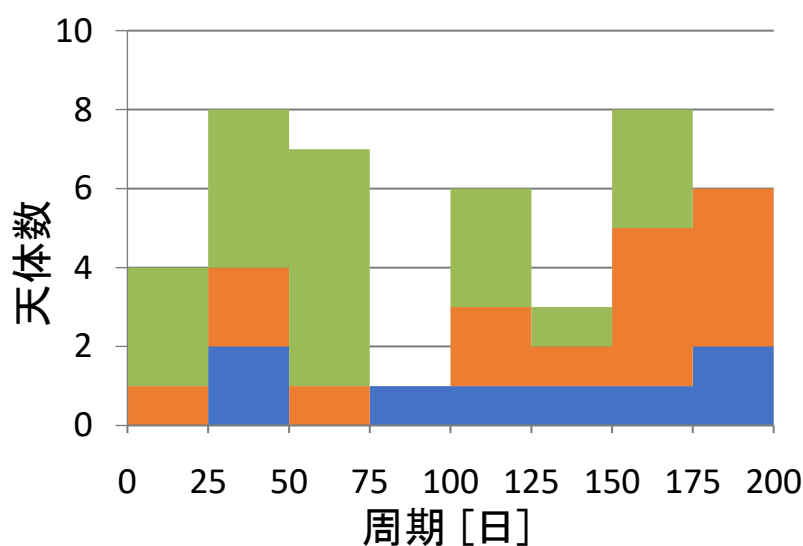


図 4.15 : 0 日-200 日の周期の分布。

第5章 考察

周期解析の結果、20 天体の周期変動天体を新検出することができた。特に、今まで検出例が少なかった、50 日未満の短い周期を持つ強度変動天体の検出にも成功した。つまり、短周強度変動天体の数を増やすことができた。

5.1 比較的長周期の新検出天体

本解析で新検出の周期変動天体 20 天体の中でも、100 日以上比較的長い周期をもつ天体もいくつかあった。このような天体は、観測頻度が各天体 9 日に 1 回程度の日立局モニター観測第 1 期・第 2 期のデータを用いた周期解析でも十分検出し得る。しかし、第 1 期・第 2 期のデータを用いた周期解析では検出されず、第 3 期のデータを用いた本解析で新検出となった。この原因について、4.2 節で紹介した、導出周期が 163.9 日の G 123.05-6.31 をもとに考察する。原因としては以下の三つが考えられる。

- a. 周期変動が第 3 期から始まった。
- b. 第 1 期・第 2 期では観測データのデータ数が少ないために、周期解析で非検出となった（第 1 期・第 2 期のデータ数は 75 個、第 3 期のデータ数は 111 個）。
- c. 第 1 期・第 2 期では観測頻度が低く観測データのデータ間隔が広いために、周期解析で非検出となった（第 1 期・第 2 期のデータ間隔は 9 日程度、第 3 期のデータ間隔は 4 日程度）。

まず、a について検証するため、第 1 期から第 3 期にかけての全期間の強度変動プロットと第 2 期から第 3 期にかけての強度変動プロットをそれぞれ以下の図 5.1、図 5.2 に示した。なお、図には、第 3 期の観測開始日（MJD : 57283 日）に縦線を挿入してある。これらの図より、周期 163.9 日の周期変動は、第 1 期・第 2 期よりも第 3 期から顕著に表れていることが確認できる。よって、第 1 期・第 2 期と第 3 期では観測頻度などの観測条件が異なるため断言はできないが、周期変動が第 3 期から始まった可能性も十分にあると考えられる。

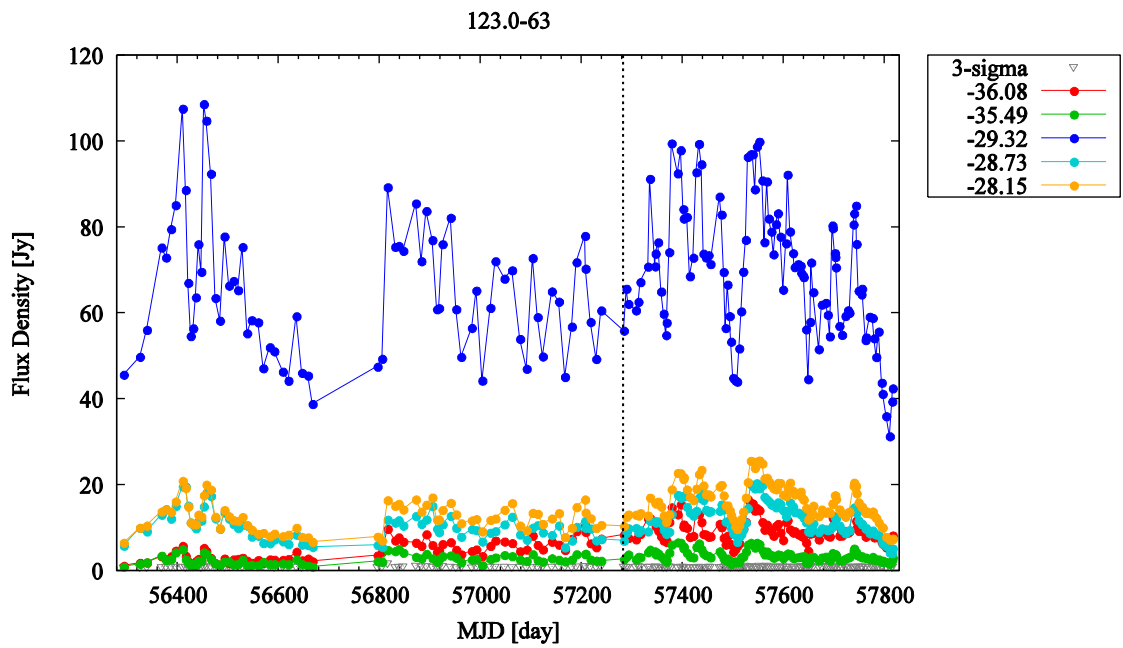


図 5.1 : G 123.05-6.31 の第 1 期から第 3 期にかけての全期間の強度変動プロット。

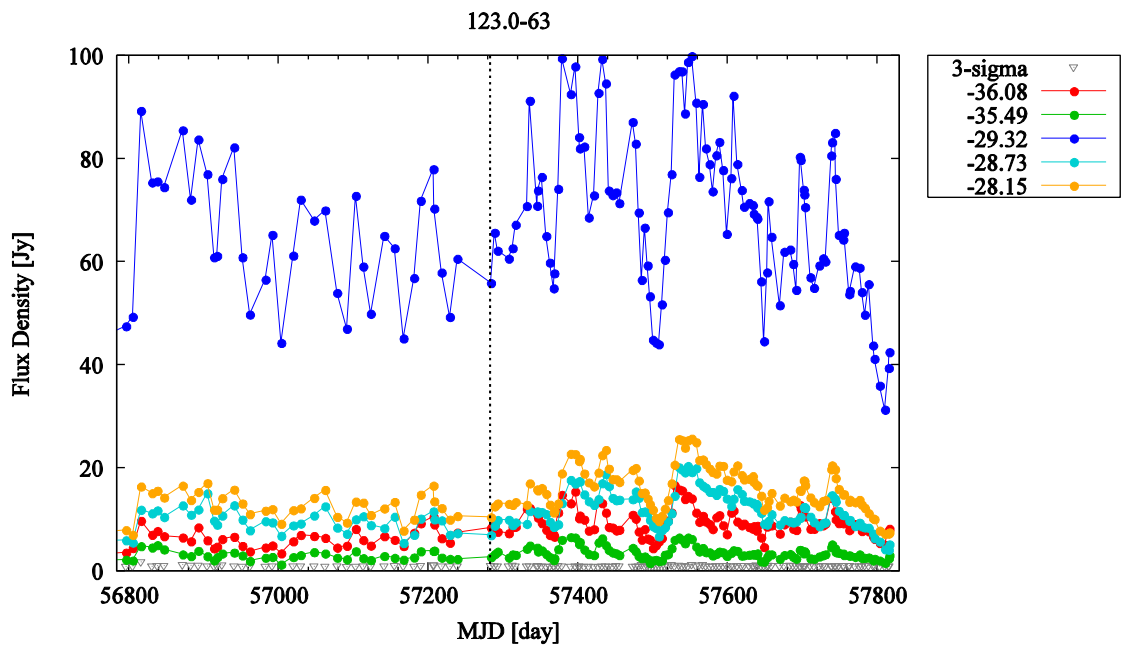


図 5.2 : G 123.05-6.31 の第 2 期から第 3 期にかけての強度変動プロット。

次に、b について検証するため、第 3 期の観測データを一部削除して第 1 期・第 2 期の観測データと同等のデータ数にしてから周期解析を行った。ただし、観測データのデータ間隔は元のまま変えていない、つまり、二つの観測データのデータ間隔は統一していない。周期解析の結果、G 123.05–6.31 の 5 個の速度成分のうち、2 個の速度成分が選出条件を満たし、いずれも 164.9 日の周期が導出された。この周期は、元々の第 3 期の観測データを用いて周期解析を行った場合とほぼ同じ周期である。以下に解析結果をまとめた。以上から、第 1 期・第 2 期の観測データのデータ数が少ないために周期解析で非検出となった可能性は低いと考えられる。

表 5.1 : G 123.05–6.31 の周期変動成分（第 3 期の観測データを一部削除した場合）。

視線速度 V_{sr} [km/s]	ピリオドグラム の 最大値 $P_N(\omega_p)$	誤警報確率 α	周期 T (誤差+, -) [day]
-28.73	17.07	0.3×10^{-5}	164.9 (+13.7, -11.7)
-28.15	16.33	0.6×10^{-5}	164.9 (+13.7, -11.7)

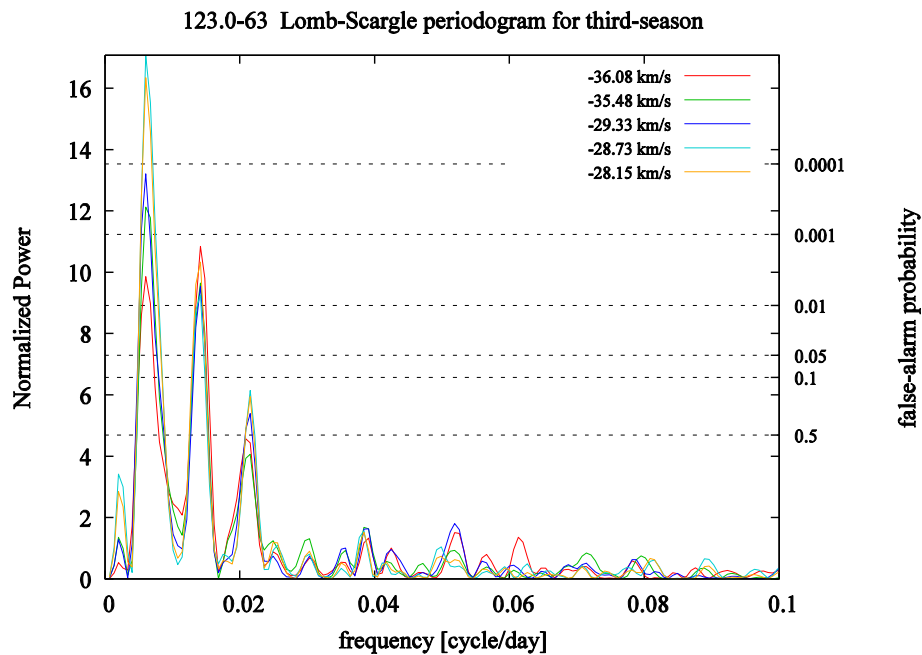


図 5.3 : G 123.05–6.31 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル（第 3 期の観測データを一部削除した場合）。

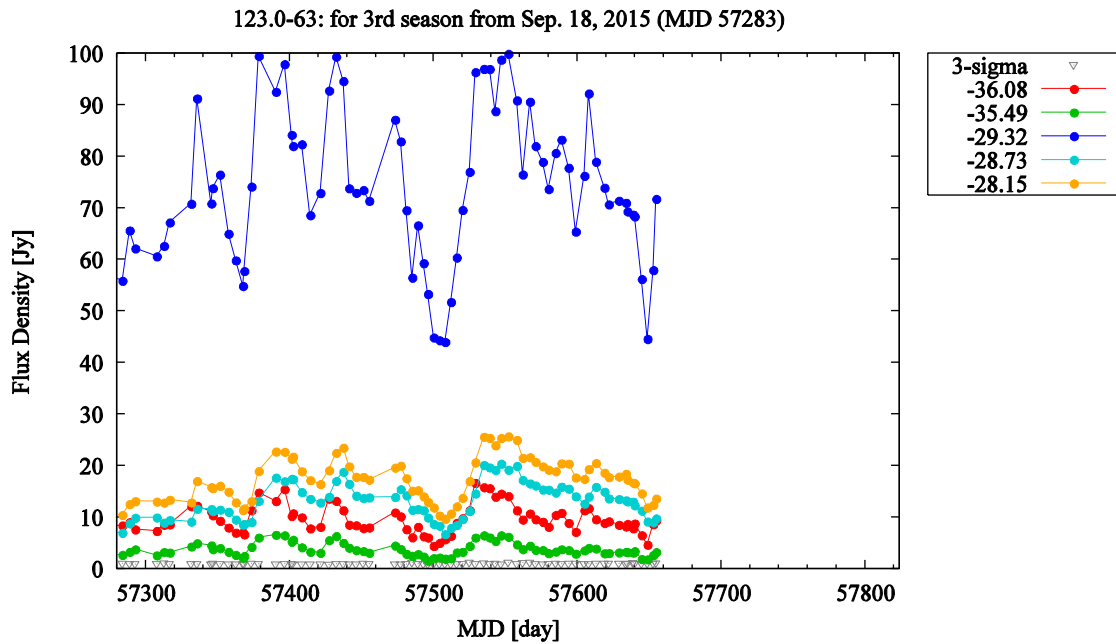


図 5.4 : G 123.05-6.31 の強度変動プロット (第 3 期の観測データを一部削除した場合)。第 3 期後半のデータを削除した。

最後に、c について検証するため、第 3 期の観測データを任意に間引くことによって、第 1 期・第 2 期の観測データと同等のデータ間隔にしてから周期解析を行った。ただし、二つの観測データのデータ数は統一していない。周期解析の結果、G 123.05-6.31 の 5 個の速度成分のいずれも選出条件を満たさなかった。以下に解析結果をまとめた。以上から、第 1 期・第 2 期では観測頻度が低く観測データのデータ間隔が広いため周期解析で非検出となった可能性があると考えられる。特に図 5.6 の第 3 期の観測データを任意に間引いたときの強度変動プロットより、データを間引いても周期 163.9 日の周期変動は目視で確認し得ることがわかる。それにもかかわらず非検出になったということは、データ間隔、つまり観測頻度が解析結果に大きく影響していると考えられる。

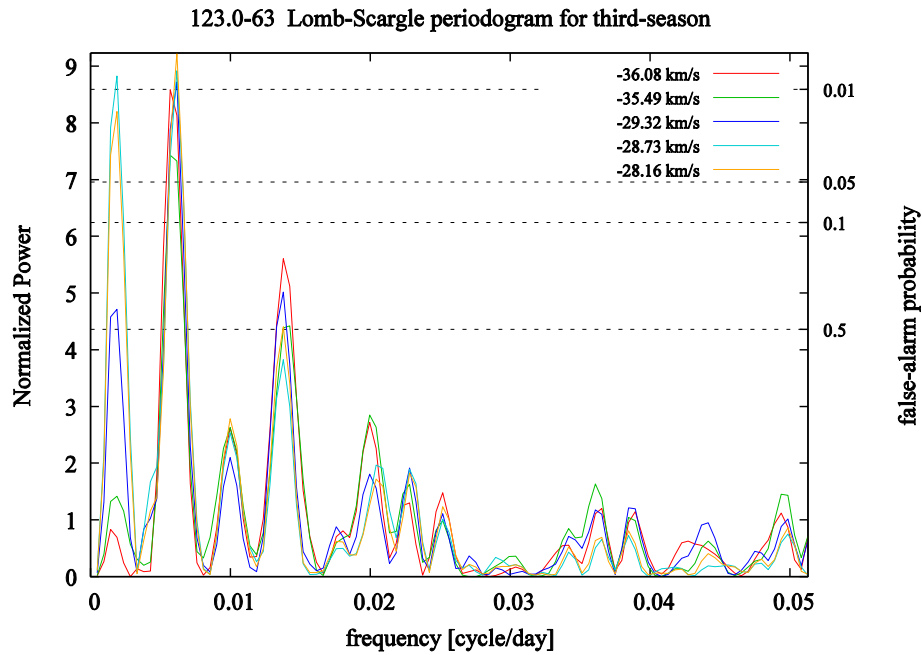


図 5.5 : G 123.05–6.31 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムの特クル（第 3 期の観測データを任意に間引いた場合）。

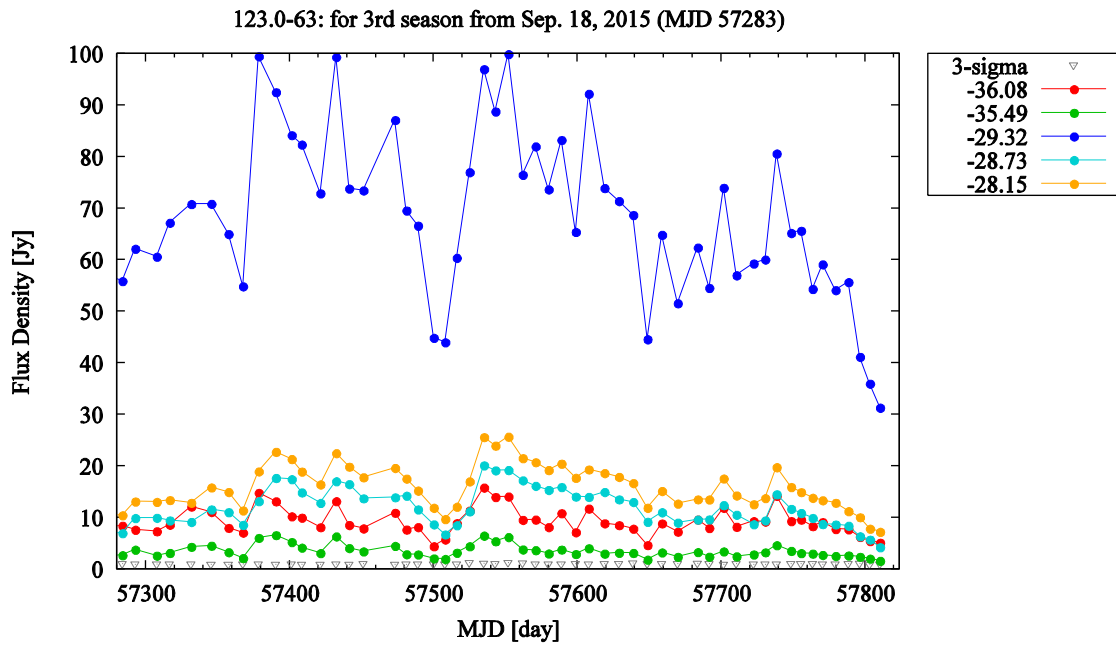


図 5.6 : G 123.05–6.31 の強度変動プロット（第 3 期の観測データを任意に間引いた場合）。データ間隔が 9 日程度になるようにデータを間引いた。

以上の議論より、比較的長い周期をもつ G 123.05–6.31 が第 1 期・第 2 期のデータを用いた周期解析では検出されず、第 3 期のデータを用いた本解析で新検出となった原因としては、a と c の可能性が高いと考えられる。現段階ではどちらの原因がもっともらしいかは判断できないが、c の検証から、G 123.05–6.31 のような比較的長い周期をもつ強度変動天体であっても、観測頻度が高くないとその周期性が検出できない場合もあることがわかった。

5.2 周期–光度関係の観測的検証

新検出の周期変動天体 20 天体について光度を導出し、Inayoshi et al. (2013) で予測されている周期–光度関係の観測的な検証を行った。

5.2.1 脈動不安定モデルが適用可能な天体の選出

Inayoshi et al. (2013) で予測されている周期–光度関係は、脈動不安定モデルの下に成り立つ関係である。そのため、光度の導出を行う前にまず、新検出天体 20 天体について、脈動不安定モデルが適用可能かどうかを考える必要がある。

脈動不安定モデルでは、数 10 日–数 100 日の連続的な周期変動について説明が可能であるとしている。さらに、このモデルを考えた場合、そのメカニズムにより、複数の速度成分をもつ天体は全ての速度成分で周期が一致するはずである。そこで、新検出天体 20 天体について、以下の二つの条件を満たすかどうかを判定し、二つとも満たす場合は脈動不安定モデルが適用可能、二つとも満たさない場合は適用不可能、1) のみ満たす場合は適用できる可能性があるかと判定した。

- 1) 数 10 日–数 100 日の連続的な周期変動である。
- 2) 周期解析で全ての速度成分の周期変動が検出されており、全ての速度成分の導出周期が一致する。

その結果、3 天体 (G 000.16–0.44、G 032.03+0.06、G 123.05–6.31) は適用可能、1 天体 (G 014.33–0.63) は適用不可能、その他の天体は適用できる可能性があるかと判定された。表 5.2 には判定の結果を示した。この表において、条件 1) と条件 2) の列には、条件を満たす場合は“○”、満たさない場合は“×”を記載した。また、判定の列には、条件を二つとも満たす場合は“○”、二つとも満たさない場合は“×”、1) のみ満たす場合は“△”を記載した。

表 5.2：脈動不安定モデルが適用可能かどうかの判定結果。

天体名	連続的	全ての周期が同じ	判定
G 000.16-0.44	○	○	○
G 010.88+0.12	○	×	△
G 012.90-0.26	○	×	△
G 014.33-0.63	×	×	×
G 019.75-0.12	○	×	△
G 024.54+0.32	○	×	△
G 024.64-0.33	○	×	△
G 0.24.93+0.08	○	×	△
G 032.03+0.06	○	○※	○
G 032.11+0.09	○	×	△
G 033.40+0.01	○	×	△
G 033.86+0.01	○	×	△
G 035.79-0.17	○	×	△
G 037.47-0.11	○	×	△
G 049.60-0.25	○	×	△
G 052.66-1.09	○	×	△
G 081.76+0.59	○	×	△
G 123.05-6.31	○	○	○
G 183.34-0.59	○	×	△
G 192.60-0.05	○	×	△

G 014.33-0.63 は、導出周期は 71.1 日であるが、連続的ではなく間欠的な周期変動であるため、条件 1) を満たさなかった。

なお、G 032.03+0.06 は、いくつかの速度成分でのみほぼ同じ周期が導出されており、他の成分は周期性が検出されていない。しかし、G 032.03+0.06 の空間分布から、周期変動を示す成分と示さない成分は明確に空間分離しており、周期変動を示さない成分はそもそも付随する励起源が異なっていると考えられることがわかった (Fujisawa et al. 2014)。そのため、G 032.03+0.06 は、結果として条件 2) を満たすと判断した。表 5.2 では、このことを考慮した事情を踏まえ、他の天体と区別するために G 032.03+0.06 の条件 2) の欄に“※”を付けた。

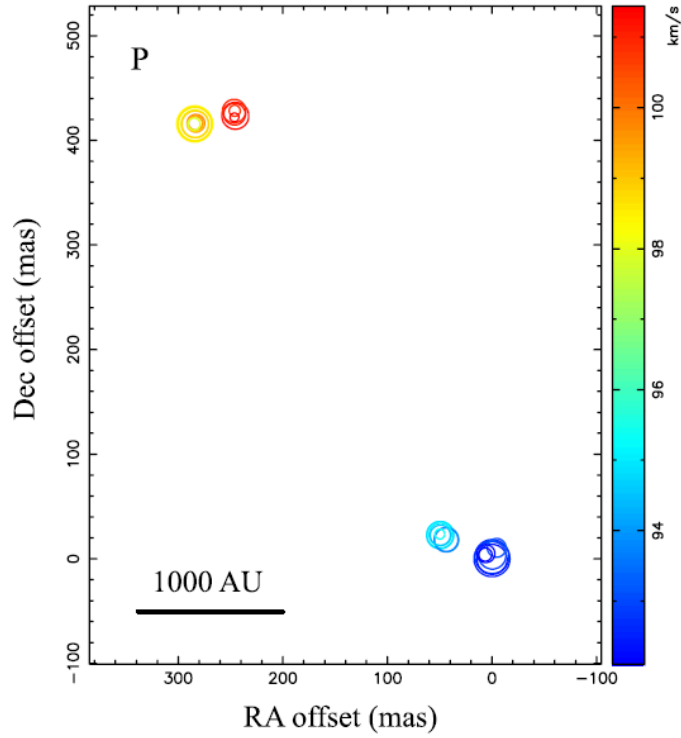


図 5.7 : G 032.03+0.06 の空間分布 (Fujisawa et al. 2014 より引用)。周期変動を示す成分 (92.74 [km/s]–95.51 [km/s]) は南西のスポット群に位置する一方で、周期変動を示さない成分 (96.58 [km/s]–102.31 [km/s]) は北東のスポット群に位置している。それぞれのスポット群同士は数 1000 au 離れ、明らかに空間分離していることがわかる。

5.2.2 光度の導出に向けて

本解析における新検出天体 20 天体のうち、前節で選出した脈動不安定モデルが適用可能な 3 天体と、適用できる可能性のある 16 天体の計 19 天体について、光度の導出を試みた。光度の導出には、赤外線天文衛星 IRAS (Infrared Astronomical Satellite) によって測定された 4 波長 (12、25、60、100 [μm]) におけるフラックス密度の情報を利用した。このフラックス密度の情報を利用して、IRAS 点源の光度 L_{IRAS} は以下の式で求められる (Guzman et al. 2012)。

$$L_{\text{IRAS}} = 5.44 \left(\frac{F_{12}}{0.79} + \frac{F_{25}}{2} + \frac{F_{60}}{3.9} + \frac{F_{100}}{9.9} \right) \left(\frac{D}{\text{kpc}} \right)^2 L_{\odot} \quad (5.1)$$

ここで、 F_{12} 、 F_{25} 、 F_{60} 、 F_{100} [Jy] はそれぞれ 12、25、60、100 [μm] におけるフラックス密度、 D [kpc] は天体までの距離、 $L_{\odot} = 3.839 \times 10^{26}$ [W] は太陽光度である。式(5.1)によって光度を導出するためには、IRAS 点源のフラックス密度と天体までの距離を調査する必要がある。

5.2.3 フラックス密度の調査

IRAS 点源のフラックス密度を調査するために、NASA/IPAC INFRARED SCIENCE ARCHIVE (<http://irsa.ipac.caltech.edu/Missions/iras.html>) の IRAS 点源の赤外線カタログ “IRAS Point Source Catalog v2.1 (PSC)” を対象に、IRAS 点源のサーベイを行った。そして、調査対象の 19 天体のメタノールメーザー源の絶対座標から最も離角の小さい IRAS 点源を探し、その点源のフラックス密度の値を取得した。調査の結果を、以下の表 5.3 に示す。この表では、メタノールメーザー源の絶対座標から最も近い IRAS 点源の 4 波長におけるフラックス密度を示し、フラックス密度の下には quality を示した。quality は、“3” が複数回の観測全てで検出、“2” が何回か検出、“1” が上限値を表している。上限値を考慮すると、G 183.34-0.59 以外は長波長ほどフラックス密度が強くなっており、これは生まれたばかりの星の特徴を示している。また、6 列目には、IRAS 点源がメタノールメーザー源の絶対座標からどのくらい離れているかを離角で示した。離角が 1 arcmin を超えるものについては、付随関係が不確かである点に注意が必要である。なお、G 081.76+0.59 は、10 arcmin 以内に IRAS 点源が見つからなかった。

表 5.3 : IRAS 点源の調査結果。

天体名	F_{12} [Jy] quality	F_{25} [Jy] quality	F_{60} [Jy] quality	F_{100} [Jy] quality	離角 [arcsec]
G 000.16-0.44	2.152 2	11.140 3	113.100 1	300.300 1	14.6618
G 010.88+0.12	6.281 3	31.320 3	247.800 1	1027.000 1	14.538907
G 012.90-0.26	21.060 3	268.600 3	2228.000 3	6310.000 3	8.614054
G 019.75-0.12	6.953 3	78.950 3	333.500 3	644.600 3	8.167837
G 024.54+0.32	5.786 1	4.255 3	103.400 1	293.500 1	41.587732
G 024.64-0.33	10.280 1	24.950 3	91.770 2	258.500 1	50.113464
G 024.93+0.08	2.614 1	8.709 3	256.300 3	445.500 1	78.258242
G 032.03+0.06	4.332 1	28.930 1	465.000 3	1199.000 3	12.945027
G 032.11+0.09	7.909 3	52.260 3	435.900 3	1199.000 1	0.399057

表 5.3 : IRAS 点源の調査結果 (続き)。

G 033.40+0.01	13.430 1	31.170 1	546.000 3	2064.000 3	141.934106
G 033.86+0.01	3.029 1	8.826 3	169.400 3	2429.000 1	177.894701
G 035.79-0.17	1.929 1	2.511 3	91.150 3	273.900 3	6.182699
G 037.47-0.11	2.606 3	10.290 1	281.500 2	859.700 3	193.035174
G 049.60-0.25	2.218 1	9.734 3	6.576 1	62.730 1	12.723103
G 052.66-1.09	1.307 3	5.695 3	77.470 3	123.800 3	12.425105
G 081.76+0.59	No sources are found.				
G 123.05-6.31	1.803 1	13.360 3	329.600 3	1166.000 3	4.439091
G 183.34-0.59	4.277 3	0.252 1	288.000 2	727.500 2	26.831643
G 192.60-0.05	107.200 3	371.600 3	3145.000 3	5285.000 3	9.571912

5.2.4 距離の調査・導出

光度を導出するため、IRAS 点源のフラックス密度の調査に続き、天体までの距離を調査した。距離は、二つの方法で導出されたものを以下の優先順位で採用した。

- 1) 年周視差法 (Reid et al. 2014)
- 2) 運動学的方法 & H_I 自己吸収の原理 (Green & McClure-Griffiths 2011)

1)の年周視差法は、数年間にわたる観測によって年周視差を測定することで距離を導出する方法である。この方法は直接的で、導出の際に仮定を一切含まず距離の精度がよいため、優先して採用する。ここでは、2014 年初頭時点で年周視差法による距離計測が実施済みの 6.7 GHz メタノールメーザー源を Reid et al. (2014) より引用した。

年周視差法によって距離計測が実施されていない天体については、運動学的方法を用いて距離を求めた。運動学的方法は、天体が銀河回転に乗ると仮定し、運動学的に天体までの距離を導出する方法である。この方法では、銀河回転に乗る天体が太陽軌道の内側に位置す

る場合、近い側（near）と遠い側（far）の二つの距離が導出される。近い側と遠い側のどちらの距離がより適切であるかについては、 H_I 自己吸収の有無によって判断する方法がある。観測的に、銀河には中性水素（ H_I ）ガスがほぼ一様に分布することがわかっている。 H_I ガスは 21.1 cm の輝線を放射するが、銀河回転の影響で速度幅の広い放射を示す。一方で、メーザーが生じる分子雲は周囲に比べて低温であるため、背景の輝線放射に対して吸収線を示す。よって、 H_I ガスからの 21.1 cm 輝線放射に対して、メーザー源と同じ視線速度に吸収線が見られればメーザー源は近い側に存在し、見られなければ遠い側に存在すると考えられる。この方法によって、近い側と遠い側のどちらの距離がもっともらしいかを判断した結果がある場合は、それも引用した（Green & McClure-Griffiths 2011）。運動学的方法による距離の導出方法は、次の通りである。

● 運動学的方法

ここでは、「シリーズ現代の天文学 5 “銀河Ⅱ—銀河系”」（祖父江義明 他 2007）を参考に記述する。

運動学的方法では、視線速度を測る慣性系として局所静止基準（LSR; Local Standard of Rest）を用いる。LSR は、「太陽の中心にあり銀河中心の周りを円運動する仮想的な点」として定義され、銀河系の回転を考える際の基準となる概念である。ここで、図 5.8 のように、LSR と銀河中心の距離を R_0 、LSR がもつ銀河系回転の速度を θ_0 と表す。この二つの定数は銀河定数と呼ばれ、太陽位置における銀河回転を記述する基本的な量である。銀河定数の値については多数の研究が存在するが、ここでは、1985 年の国際天文学連合（IAU）の決議によって推奨された以下の値を用いることにする。

$$R_0 = 8.5\text{ [kpc]}, \theta_0 = 220\text{ [km} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.2)$$

また、LSR と併せて、銀河系について議論する際に用いる概念の一つが太陽円であり、これは銀河中心を中心とする半径 R_0 の円として定義される。太陽系はこの円上に存在する。

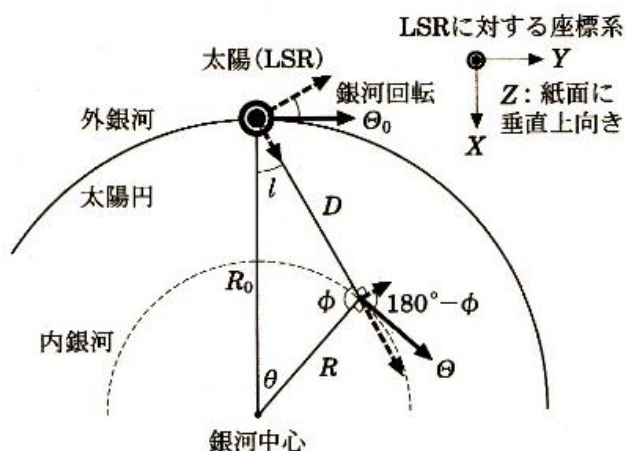


図 5.8：銀河系円盤を円盤上空（北銀極方向）から見たときの模式図（「シリーズ現代の天文学 5 “銀河Ⅱ—銀河系”」より引用）。

まず、天体が銀河回転に乗って完全な円運動をしている状況を考え、LSR から天体を観測したときの視線方向の速度 V_r を求める。このとき V_r は、観測天体と LSR の速度成分の差として与えられるため、図 5.8 より、

$$V_r = \theta \sin(180^\circ - \phi) - \theta_0 \sin l \quad (5.3)$$

となる。ここで、 θ は観測天体の位置における銀河回転の速度であり、 l は銀経である。ただし、太陽付近では銀河回転の速度はほぼ一定であるため、 $\theta = \theta_0$ と仮定する。天体と銀河中心の距離を R とすると、正弦定理より $\sin \phi / R_0 = \sin l / R$ が成り立つので、式(5.3)に代入して整理すると、

$$V_r = \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right) R_0 \theta_0 \sin l \quad (5.4)$$

という関係が得られる。さらに、LSR と天体の距離を D とすると、余弦定理より、

$$R^2 = D^2 + R_0^2 - 2DR_0 \cos l \quad (5.5)$$

が成り立つので、 D は R_0 、 R 、 l を用いて以下のように表すことができる。

$$D = R_0 \cos l \pm \sqrt{R^2 - R_0^2 \sin^2 l} \quad (5.6)$$

以上のように、式(5.4)と式(5.6)を用いることで、 R_0 、 θ_0 、 V_r 、 l の情報から天体までの距離 D を求めることができる。なお、天体の視線速度 V_r としては、メタノールメーザーの視線速度範囲の中間値を採用した。また、先程も述べたが、銀河回転に乗る天体が太陽軌道の内側に位置する場合、LSR から天体を見たときの視線と天体の銀河回転軌道の交点が二つあるため、近い側 (near) と遠い側 (far) の二つの距離が導出される。これは、式(5.6)からも明らかである。

以下の表 5.4 に、天体の距離の調査・導出を行った結果を示した。この表の 3 列目には距離の導出方法を示しており、年周視差法による場合は“parallax”、運動学的方法による場合は“kinematic”と記載した。また、運動学的方法によって近い側と遠い側の二つの距離が導出された場合は、 H_I 自己吸収の原理によって近い側と遠い側の切り分けが行われているものは“kinematic with H_I ”と記載し、近い側を採用した場合には“near”、遠い側を採用した場合には“far”と記載した。近い側と遠い側の切り分けが行われていない場合は、2 列目に二つの距離を記載した。また、年周視差法でも、運動学的方法でも距離を得られなかった場合は、2 列目と 3 列目に“-”と記載した。

表 5.4 : 天体の距離の調査・導出結果。

天体名	視線速度 V_{lsr} [km/s]	距離 [kpc]	距離導出方法
G 000.16−0.44	13.70	8.12, 8.88	kinematic
G 010.88+0.12	18.83	2.72	kinematic with H_I (near)
G 012.90−0.26	41.07	2.5	parallax
G 019.75−0.12	119.63	9.54	kinematic with H_I (far)
G 024.54+0.32	107.59	6.07	kinematic with H_I (near)
G 024.64−0.33	43.19	12.29	kinematic with H_I (far)
G 024.93+0.08	46.39	3.32, 12.1	kinematic
G 032.03+0.06	97.53	5.2	parallax
G 032.11+0.09	97.01	6.12, 8.28	kinematic
G 033.40+0.01	102.57	-	-
G 033.86+0.01	62.43	10.11	kinematic with H_I (far)
G 035.79−0.17	60.79	3.96	kinematic with H_I (near)
G 037.47−0.11	56.31	3.74	kinematic with H_I (near)
G 049.60−0.25	60.90	-	-
G 052.66−1.09	62.26	-	-
G 081.76+0.59	-0.91	1.5	parallax
G 123.05−6.31	-32.11	2.38	parallax
G 183.34−0.59	-10.03	-	-
G 192.60−0.05	4.21	1.59	parallax

5.2.5 光度の導出

得られた IRAS 点源のフラックス密度と天体までの距離の情報から、式(5.1)を用いて光度を導出した。以下の表 5.5 にその結果を示す。この表には、次項での周期 - 光度関係の観測的検証に用いるため、導出された光度と共に周期解析によって導出された周期も示した。ただし、同じ天体でも速度成分によって異なる周期が導出されている場合は、最も信頼性の高いといえる正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラム の値が最も大きい周期を採用している。

表 5.5 : 脈動不安定モデルが適用可能な 3 天体と適用できる可能性のある 16 天体 (計 19 天体) についての導出された光度と周期の一覧。

天体名	光度 [$L_{\odot}$]	周期 [day]
G 000.16-0.44	$2.43 \times 10^4, 2.90 \times 10^4$	47.6
G 010.88+0.12	7.68×10^3	106.7
G 012.90-0.26	4.66×10^4	25.4
G 019.75-0.12	9.85×10^4	21.9
G 024.54+0.32	1.32×10^4	163.9
G 024.64-0.33	6.17×10^4	15.2
G 0.24.93+0.08	$7.10 \times 10^3, 9.43 \times 10^4$	133.9
G 032.03+0.06	3.83×10^4	57.0
G 032.11+0.09	$5.48 \times 10^4, 1.00 \times 10^5$	56.1
G 033.40+0.01	-	31.4
G 033.86+0.01	1.65×10^5	73.5
G 035.79-0.17	4.67×10^3	33.4
G 037.47-0.11	1.27×10^4	68.7
G 049.60-0.25	-	106.7
G 052.66-1.09	-	14.9
G 081.76+0.59	-	163.9
G 123.05-6.31	6.51×10^3	163.9
G 183.34-0.59	-	64.6
G 192.60-0.05	2.29×10^4	118.6

5.2.6 周期 - 光度関係の観測的検証

以上で導出された光度と、周期解析によって導出された周期を用いて、周期 - 光度関係の観測的な検証を行った。以下の図 5.9 に、横軸を周期、縦軸を光度としてプロットした図を示した。

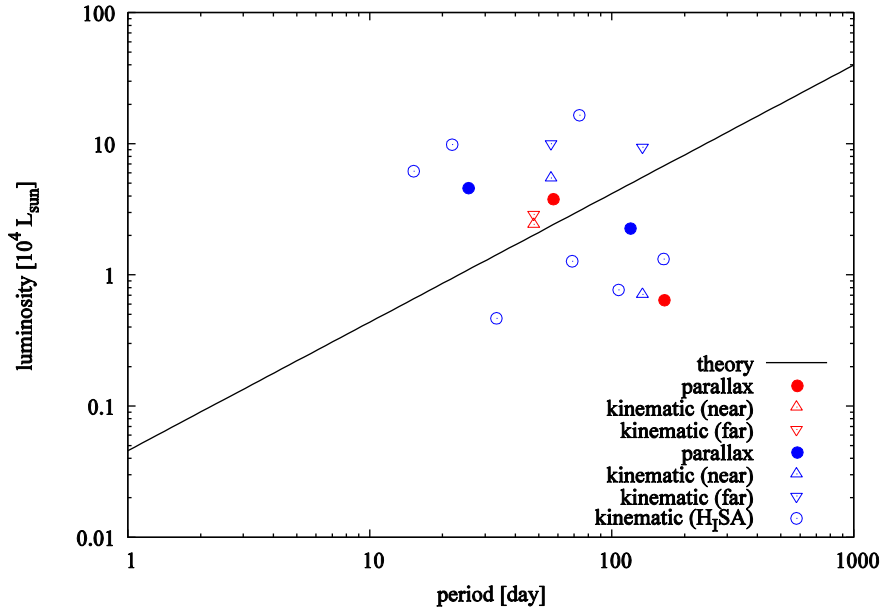


図 5.9 : 周期 - 光度関係の観測的な検証の結果。直線は式(1.7)で表される理論的な周期－光度関係であり、プロットが本研究で導出された観測値である。脈動不安定モデルが適用可能な3天体を赤で、その他を青でプロットした。また、塗りつぶしのものは距離が年周視差法で導出された天体、白抜きのものは運動学的方法で導出された天体を表している。

図 5.9 より、観測値は理論直線に沿って分布しているようにも見えなくはないが、かなりばらついていることがわかる。そのため、現時点では観測的に周期 - 光度関係を見出すことはできなかった。本検証には三つの問題点が挙げられる。まず、第一の問題点として、脈動不安定モデルが適用可能な天体数が少なかったことが挙げられる。今回、図 5.9 にプロットすることのできた脈動不安定モデルが適用可能な天体は 3 天体しかなかった。また、第二の問題点として、運動学的方法によって導出された距離の不定性が大きいことが挙げられる。今回使用することのできた、精度のよい年周視差法によって距離が導出されている天体は、表 5.4 に示した天体の距離の調査・導出結果の中でも 5 天体しかなかった。その結果、その他の多くの天体は、モデル依存性が強く不定性の大きい運動学的方法による導出となってしまった。そして最後の問題点として、IRAS による観測データの精度があまりよくないことが挙げられる。今回使用した IRAS 点源のフラックス値の中でも quality が低いものがいくつかあった上、そもそも IRAS 点源がメタノールメーザー源の絶対座標から比較的離れているものがいくつか存在した。特に IRAS 点源が 1 arcmin 以上離れているメーザー源は、表 5.3 に示した IRAS 点源の調査結果の中でも 4 天体あった。このようなメーザー源は IRAS 点源との付随関係が不確かであり、その IRAS 点源の光度を用いるのは不適當である。よって今後は、脈動不安定モデルの適用できる天体数の増加、年周視差法による距離の計測、そして、IRAS よりも精度のよい赤外線観測データの使用が必要である。これらの達成によって、周期 - 光度関係の観測的な検証が可能となることを期待したい。

第6章 まとめ

本研究では、6.7 GHz メタノールメーザーの周期的な強度変動に着目し、日立 32 m 電波望遠鏡（日立局）を用いた高頻度モニター観測によって得られたデータに対して周期解析を実施した。この解析により、主に 50 日未満の短い周期をもつ強度変動天体（短周期強度変動天体）の数を増やすことを目指した。そして、検出された周期変動天体について光度の導出を行い、Inayoshi et al. (2013) で提唱されている周期 - 光度関係の観測的な検証を行った。

まず、短周期強度変動天体の数を増やすため、日立局で行われているモニター観測のうち、2015 年 9 月 18 日から 2017 年 3 月 7 日まで（第 3 期）の観測データに対して周期解析を実施した。第 3 期では、各天体 4 日に 1 回程度という高頻度なモニター観測が行われたため、短周期強度変動天体の検出に適している。周期解析には、安井靖堯氏（2015 年度、茨城大学修士論文）によって日立局のデータ解析用に作成された C 言語プログラムを使用した。この解析プログラムでは、Lomb-Scargle 法という不等間隔な離散的データに対しても適用可能な解析法が実装されている。

周期解析を実施した結果、検出された周期変動天体は、第 3 期観測対象 143 天体のうち 37 天体であり、それらの導出周期は 14.8 日–163.9 日であった。そのうち、既知の周期変動天体であるが、別の速度成分で周期変動を新検出した天体や、既知とは別の周期が導出された準新検出天体は 11 天体であった。また、本解析によって新検出、つまり、第 3 期の観測データに対する周期解析によって初めて検出することができた周期変動天体は、20 天体であった。特に、今まで検出例が少なかった、50 日未満の短い周期を持つ強度変動天体の検出にも成功した。つまり、短周強度変動天体の数を増やすことができた。

次に、新検出の周期変動天体 20 天体について光度の導出を行い、周期–光度関係の観測的な検証を行った。光度を導出するためには天体のフラックス密度の値と天体までの距離を調査する必要がある。そこで、フラックス密度の値は赤外線天文衛星 IRAS によって測定された 4 波長におけるフラックス密度の値の情報を使用し、距離は年周視差法、または運動学的方法によって導出されたものを使用した。そして、導出された光度と、周期解析によって導出された周期を用いて、周期 - 光度関係の観測的な検証を行った。しかし、有意な傾向は見つからず、現時点では観測的に周期 - 光度関係を見出すことはできなかった。今後は、脈動不安定モデルの適用できる天体数の増加、年周視差法による距離の計測、そして、IRAS よりも精度のよい赤外線観測データの使用によって、周期 - 光度関係の観測的な検証が可能となることを期待したい。

謝辞

本研究を遂行し、修士論文を執筆するにあたり、たくさんの方々のご指導、ご協力を賜りました。この場を借りて心より感謝申し上げます。

百瀬宗武教授には、ゼミや授業を通じて電波天文学や星形成の基礎を教えて頂いただけではなく、研究発表や論文執筆の意義、私の研究についてのご指摘など、本当にたくさんのご指導を賜りました。先生の教えは非常に明快でわかりやすく、今まで理解することができなかったことも先生の説明で解決できることが多々ありました。心より感謝の意と敬意を表します。米倉覚則准教授には、私の研究に関して本当に多くのご指導、ご鞭撻を賜りました。日々の研究進捗報告では、私のどんな質問に対しても簡潔かつ的確な説明で、非常に有益なアドバイスをたくさん頂きました。心より感謝申し上げます。塚越崇助教には、私の研究に直接関わって頂くことは少なかったものの、ゼミを通じて星形成の基礎を教えて頂きました。ゼミでは、私たちの的外れな質問に対しても真摯に考え、一緒に議論を交わして頂きました。心より感謝申し上げます。

国立天文台の杉山孝一郎様にも大変お世話になりました。茨城大学に所属されていた頃は、質問をするために突然お邪魔しても、いつも優しく丁寧に教えて下しました。また、周期解析に関することや日立局の運用に関することなど、私の研究の骨幹となる考え方をたくさん教えて頂きました。本当にありがとうございました。

研究員の齋藤悠様、Soon Kang Lou 様にも、本当にたくさんのご指導、ご協力を賜りました。齋藤悠様には、日立局の運用に関することをたくさん教えて頂きました。運用の際にトラブルがあった場合にも、早朝や深夜にもかかわらず対応して頂き、何度も助けて頂きました。本当にありがとうございました。また、Soon Kang Lou 様にも、私たちのゼミや、無駄に時間のかかる自主ゼミに参加して頂き、一緒に議論を交わして頂きました。それだけでなく、私の研究に関することや、研究室における普段の生活でもお世話になることがたくさんありました。心より感謝申し上げます。研究室の先輩である田辺義浩様にも、私の研究に関することによって多くのアドバイスを頂いたり、研究がうまくいかない際は励まして頂いたりと、大変お世話になりました。本当にありがとうございました。たくさんご飯に誘って頂いたことも、大変感謝しております。

同期の青木健悟様、石川果奈様、佐藤愛樹様には、ゼミや自主ゼミで活発な議論を交わして頂きました。私たちの自主ゼミは多くの時間を費やしたものの、その分一歩踏み込んだ深い内容までお互いに議論することができ、本当に有意義な時間を過ごすことができました。また、同期の存在は心の支えとなり、研究がうまくいかないときも、ただ話すだけで気分が安らぐことが多々ありました。本当にありがとうございました。

研究室の後輩の皆様にも、研究面だけでなく日々の生活で刺激をもらうことがたくさんありました。私自身は頼りない先輩でしたが、本当に優しくて優秀な後輩ばかりで、助けてもらうことが多々ありました。本当にありがとうございました。

最後になりますが、改めて皆様の支えがあったからこそ修士論文を執筆できたことを実感いたしました。本当にありがとうございました。

付録 A 日立モニター観測第 3 期観測天体リスト

今回解析を行った、日立局第 3 期モニター観測対象 143 天体のリストを以下の表 A.1 に示した。ただし、天体名は略称であり、例えば、0.167-04 は G 0.167-0.446 であることに注意する。成分数とは、日立局のモニター観測によって同定された視線速度成分の数である。

表 A.1：第 3 期モニター観測天体リスト。

天体名	成分数	天体名	成分数
0.167-04	1	12.18-01	18
0.315-02	15	12.20-01	21
0.409-05	3	12.62-00	8
0.546-08	14	12.68-01	10
4.434+01	16	12.88+04	11
5.885-03	4	12.90-02	5
5.900-04	4	13.17+00	2
6.189-03	12	13.65-05	8
6.539-01	3	13.71-00	8
6.610-00	6	14.23-05	9
6.795-02	22	14.33-06	6
7.632-01	14	14.63-05	2
8.139+02	3	15.60-02	1
8.872-04	7	15.66-04	4
9.621+01	16	18.34+17	6
10.09+07	1	18.73-02	6
10.20-03	6	18.88-04	7
10.28-01	12	19.26+03	3
10.32-02	17	19.36-00	4
10.32-01	21	19.47+01	16
10.47+00	27	19.75-01	2
10.629-0	22	19.88-05	2
10.72-03	2	20.24+00	15
10.88+01	14	22.36+00	9
11.10-01	8	22.43-01	20
11.49-14	18	23.19-03	14
11.904-0	12	23.48+00	10
11.93-06	14	23.80+04	2

天体名	成分数
24.14+00	3
24.33+01	12
24.50-00	9
24.54+03	8
24.64-03	5
24.93+00	8
25.27-04	6
25.38-01	5
25.82-01	11
26.52-02	9
27.22+01	8
27.78-02	4
27.78+00	9
27.86-02	1
28.02-04	6
28.39+00	11
28.53+01	4
28.69+04	4
28.86+00	1
30.20-01	15
30.30-01	8
30.30+00	16
30.40-02	9
30.70-00	8
30.76-00	22
31.06+00	5
32.03+00	11
32.11+00	16
33.09-00	22
33.40+00	17
33.64-02	8
33.74-01	10
33.86+00	6
34.24+01	10
34.39+02	8

天体名	成分数
35.02+03	10
35.20-17	10
35.20-07	13
35.79-01	13
36.10+05	18
36.70+00	7
36.84-00	12
37.47-01	13
37.52-01	13
37.54+02	9
38.26-02	6
38.26-00	7
40.28-02	21
40.62-01	5
41.12-02	7
41.12-01	3
41.16-02	11
42.43-02	4
43.87-07	15
45.44+00	9
45.47+01	8
45.49+01	9
49.03-10	8
49.41+03	15
49.49-03	27
49.60-02	13
52.66-10	6
53.62+00	2
59.78+00	12
73.04+18	4
75.76+03	8
78.10+36	5
79.75+09	4
80.85+04	3
81.76+05	14

天体名	成分数
81.87+07	9
94.58-17	4
108.7-09	4
109.8+21	5
111.2-07	4
111.5+07	13
121.2+06	6
123.0-63	5
173.4+24	7
174.1-00	6
183.3-05	4
188.9+08	9
189.7+03	4
192.6-00	13
196.4-16	4
359.4-04	7
IRS22198	7

付録 B 新検出の周期変動天体の周期解析結果

ここでは、本解析による新検出の周期変動天体 20 天体のうち、第 4 章で紹介しきれなかった 17 天体についての周期解析の結果を示す。ここで示す表と図については、4.2 節と同様である。

● G 000.16–0.44

G 000.16–00.44 は、1 個の速度成分が同定されている。この速度成分は選出条件を満たしており、47.6 日の周期が導出された。以下に、G 000.16–00.44 の解析結果をまとめた。

表 B.1 : G 000.16–00.44 の速度成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	13.70
---------------------------------	-------

表 B.2 : G 000.16–00.44 の周期変動成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	ピリオドグラムの 最大値 $P_N(\omega_p)$	誤警報確率 α	周期 T (誤差+, -) [day]
13.70	88.33	$< 0.1 \times 10^{-5}$	47.6 (+1.2, -1.0)

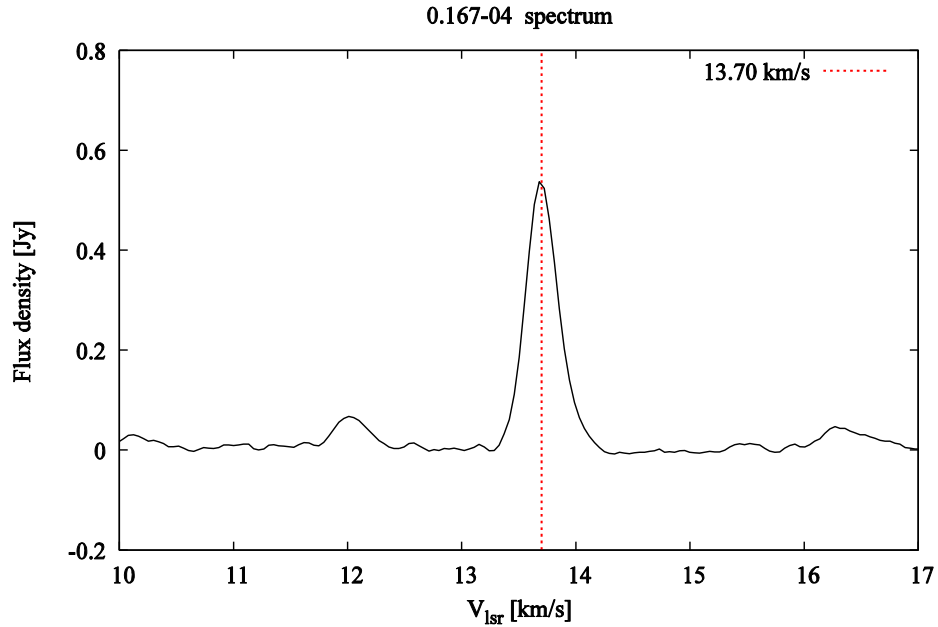


図 B.1 : G 000.16–00.44 のラインプロファイル。

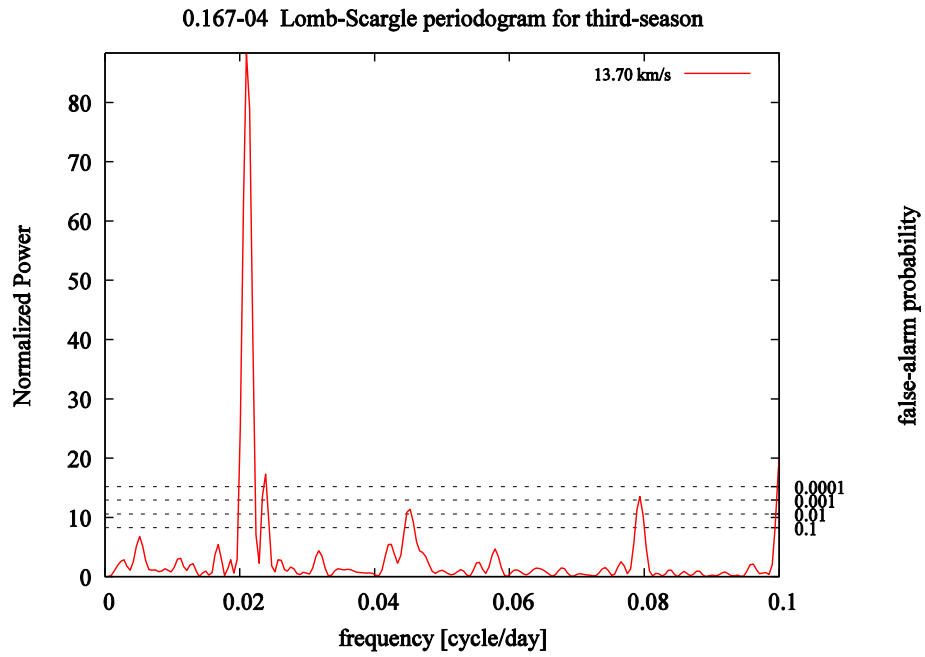


図 B.2 : G 000.16-00.44 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル。

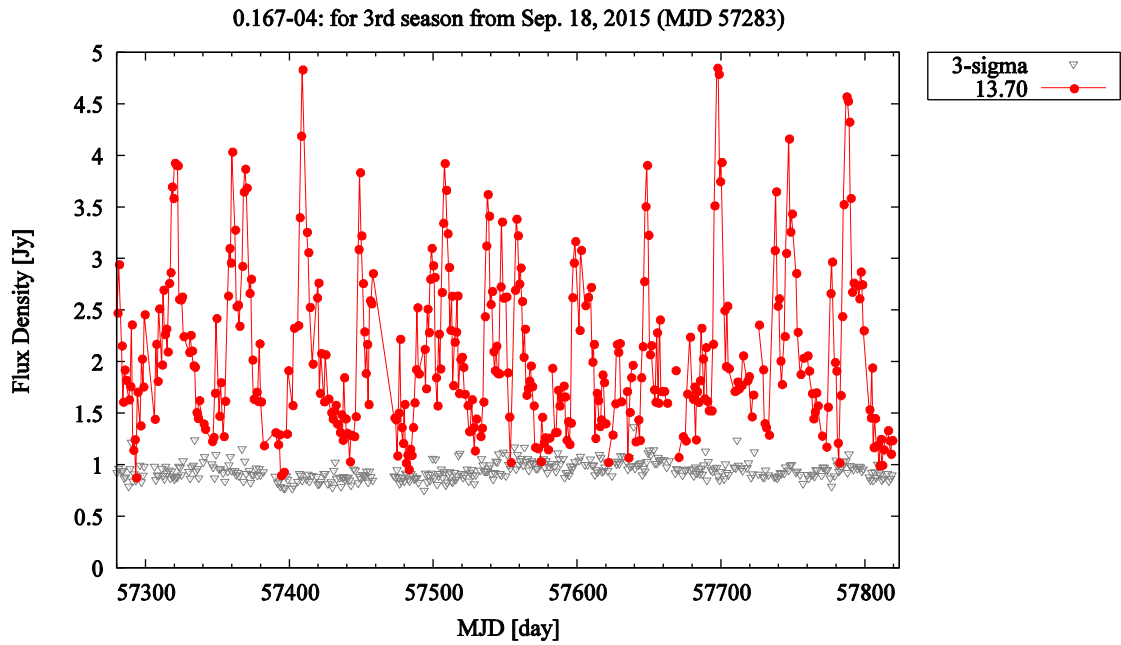


図 B.3 : G 000.16-00.44 の強度変動プロット。

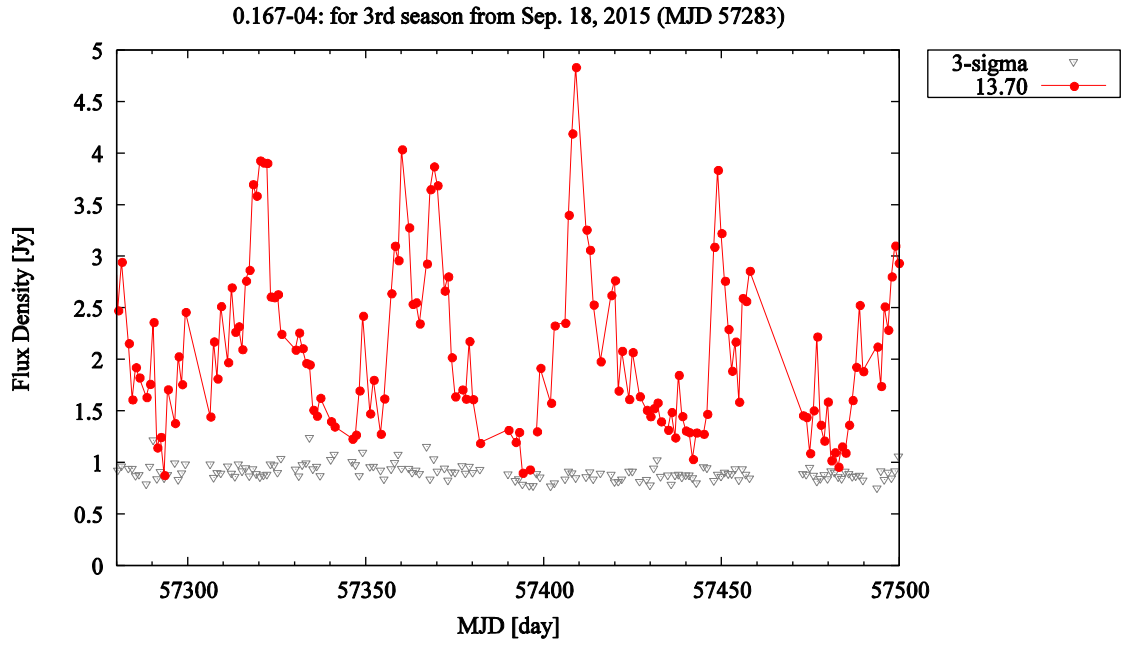


図 B.4 : G 000.16–00.44 の強度変動プロット。図 B.3 の横軸を拡大したもの。

● G 010.88+0.12

G 010.88+0.12 は、14 個の速度成分が同定されている。そのうち、選出条件を満たすのは 15.22 [km/s] のみであり、106.7 日の周期が導出された。以下に、G 010.88+0.12 の解析結果をまとめた。

表 B.3 : G 010.88+0.12 の速度成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	13.02, 13.58, 14.58, 15.22, 15.77, 16.35, 17.40, 18.56, 20.08, 20.40, 21.20, 23.98, 24.36, 24.64
---------------------------------	---

表 B.4 : G 010.88+0.12 の周期変動成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	ピリオドグラム の 最大値 $P_N(\omega_p)$	誤警報確率 α	周期 T (誤差+, -) [day]
15.22	16.31	0.8×10^{-5}	106.7 (+5.6, -5.1)

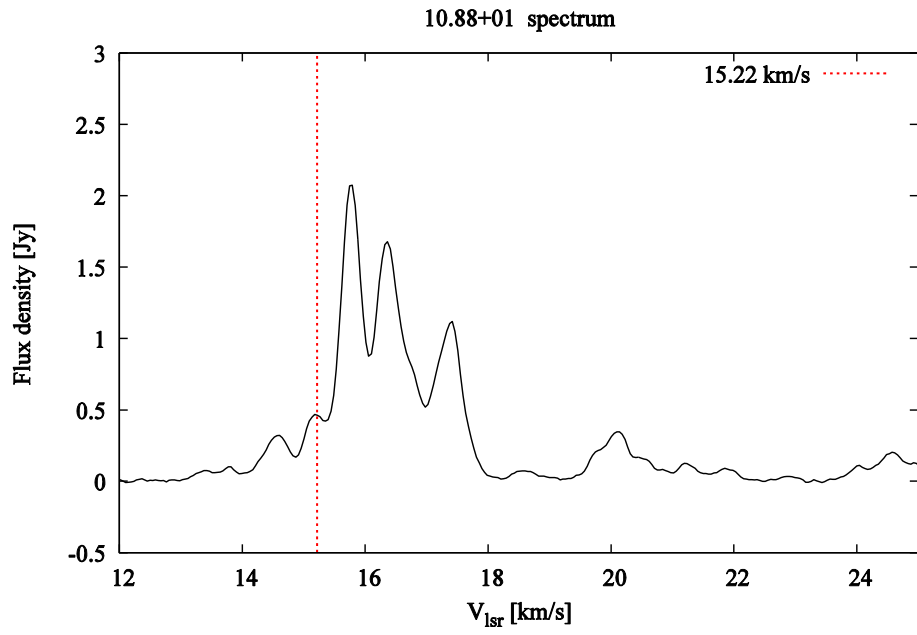


図 B.5 : G 010.88+0.12 のラインプロファイル。

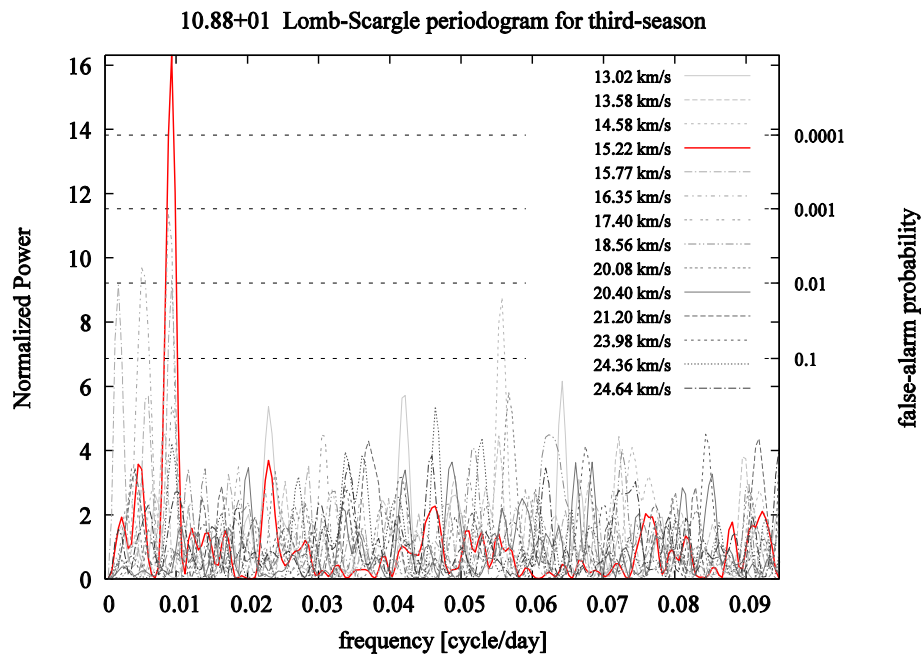


図 B.6 : G 010.88+0.12 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル。

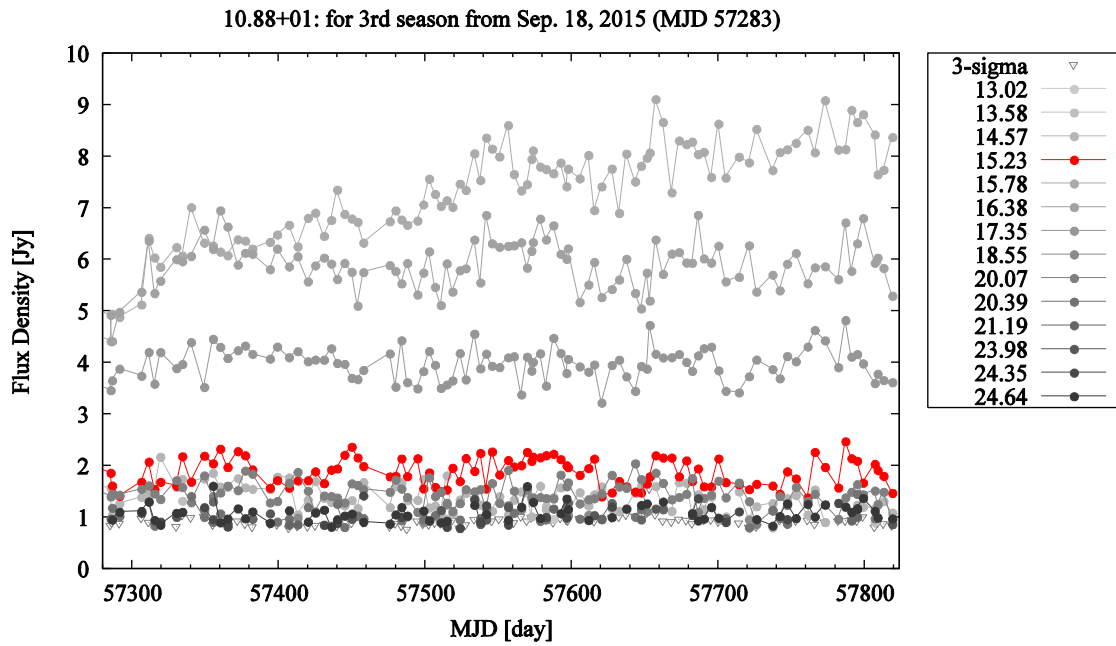


図 B.7 : G 010.88+0.12 の強度変動プロット。

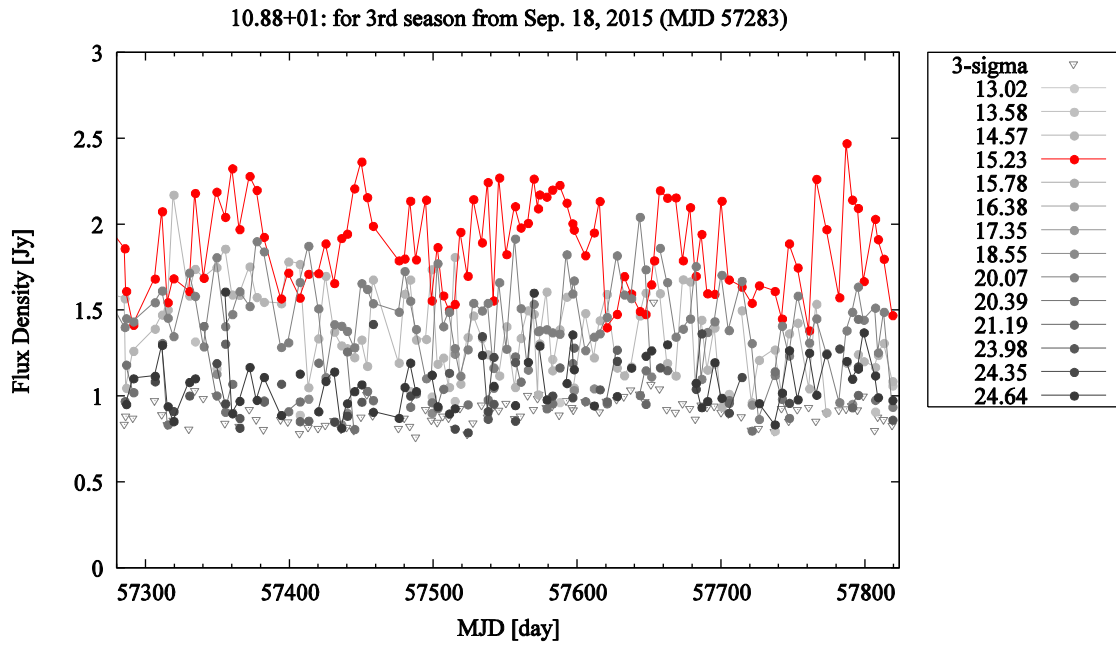


図 B.8 : G 010.88+0.12 の強度変動プロット。図 B.7 の縦軸を拡大したもの。

● G 012.90–0.26

G 012.90–0.26 は、8 個の速度成分が同定されている。そのうち、選出条件を満たすのは 36.95 [km/s] のみであり、25.4 日の周期が導出された。以下に、G 12.90–0.26 の解析結果をまとめた。

表 B.5 : G 012.90–0.26 の速度成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	35.41, 36.15, 36.95, 38.37, 38.66, 39.29, 40.08, 46.73
---------------------------------	--

表 B.6 : G 012.90–0.26 の周期変動成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	ピリオドグラムの 最大値 $P_N(\omega_p)$	誤警報確率 α	周期 T (誤差+, −) [day]
36.95	15.53	1.7×10^{-5}	25.4 (+0.3, −0.3)

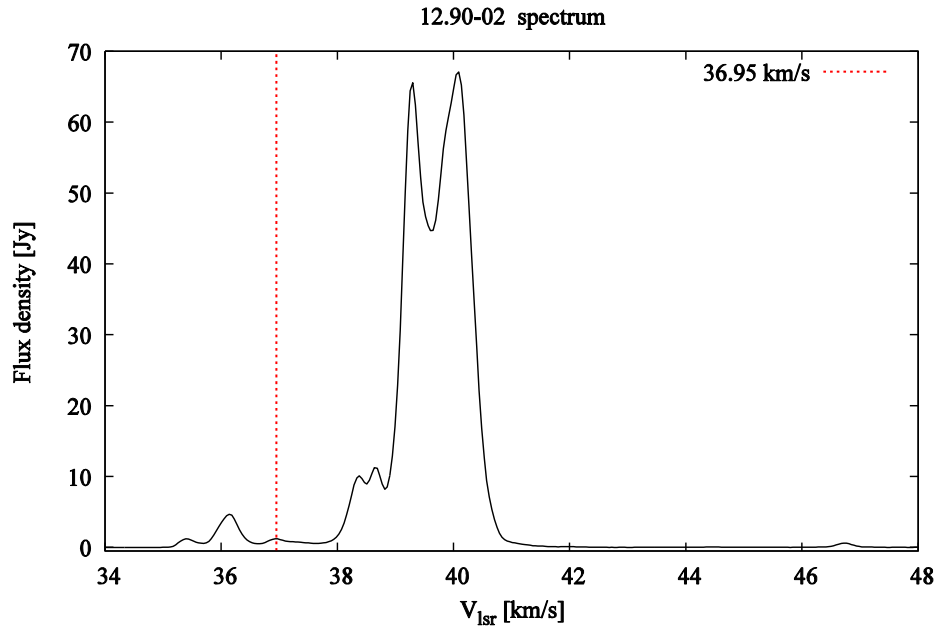


図 B.9 : G 012.90–0.26 のラインプロファイル。

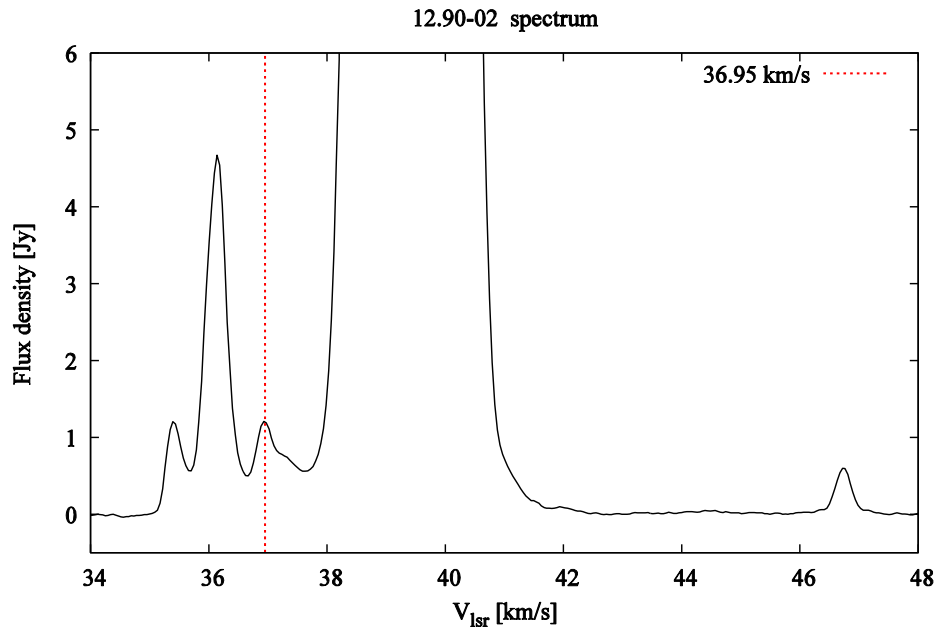


図 B.10 : G 012.90-0.26 のラインプロファイル。図 B.9 の縦軸を拡大したもの。

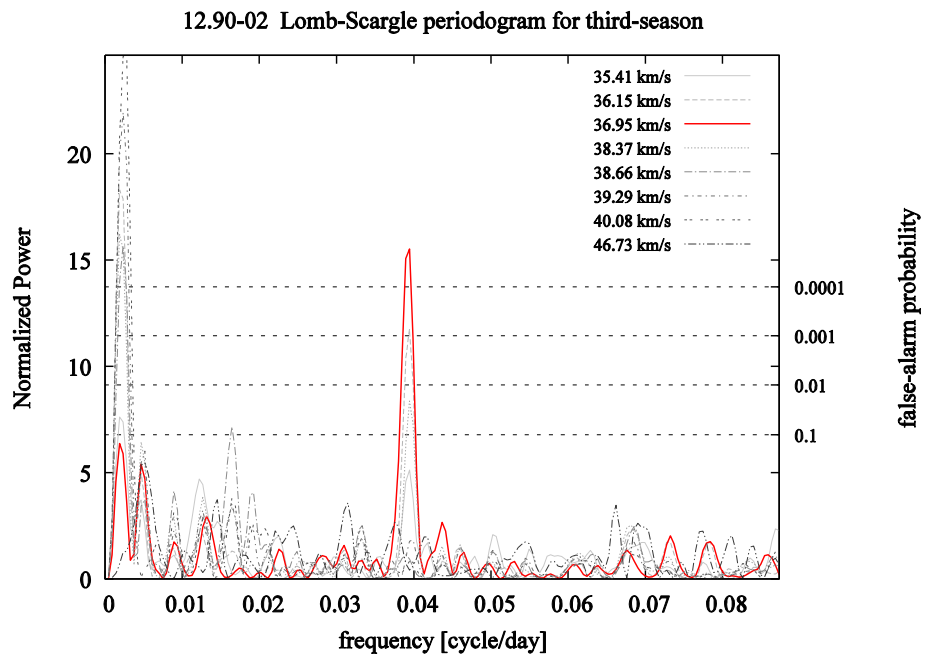


図 B.11 : G 012.90-0.26 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル。

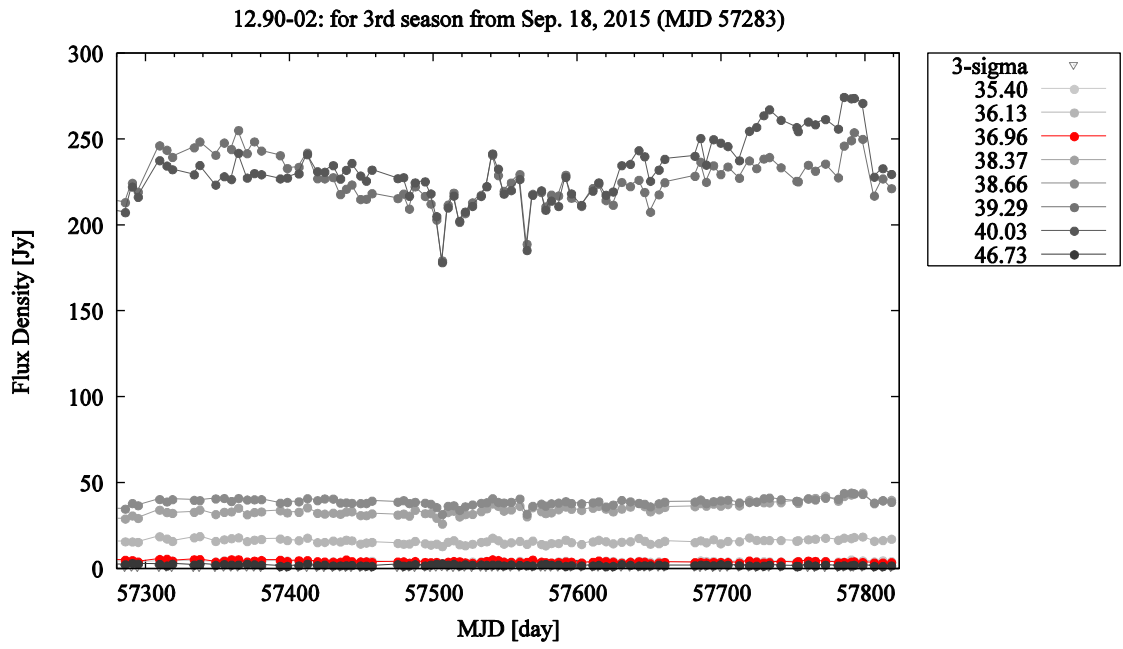


図 B.12 : G 012.90-0.26 の強度変動プロット。

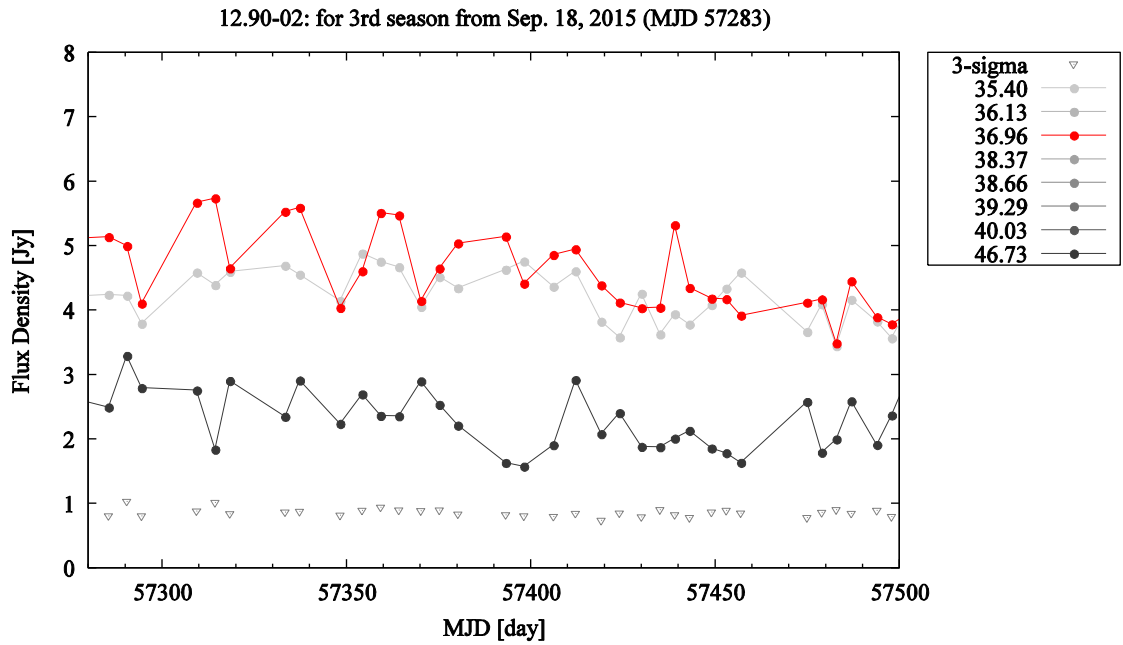


図 B.13 : G 012.90-0.26 の強度変動プロット。図 B.12 の縦軸を拡大したもの。

● G 014.33–0.63

G 014.33–0.63 は、6 個の速度成分が同定されている。そのうち、選出条件を満たすのは 21.55 [km/s] のみであり、71.1 日の周期が導出された。以下に、G 014.33–0.63 の解析結果をまとめた。

表 B.7 : G 014.33–0.63 の速度成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	21.55, 22.30, 22.68, 23.11, 23.95, 24.32
---------------------------------	--

表 B.8 : G 014.33–0.63 の周期変動成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	ピリオドグラムの 最大値 $P_N(\omega_p)$	誤警報確率 α	周期 T (誤差+, -) [day]
21.55	15.97	2.2×10^{-5}	71.1 (+2.5, -2.3)

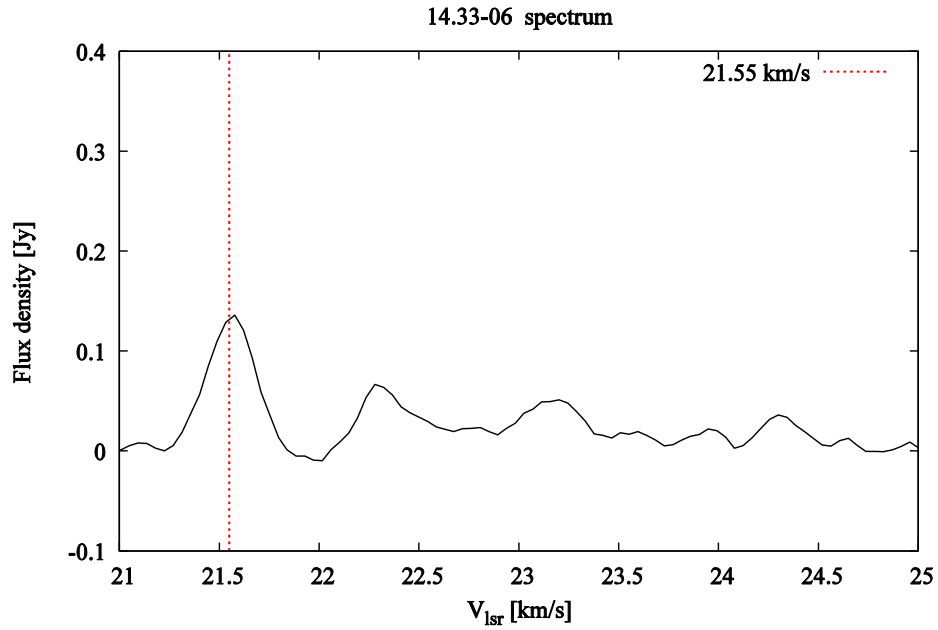


図 B.14 : G 014.33–0.63 のラインプロファイル。

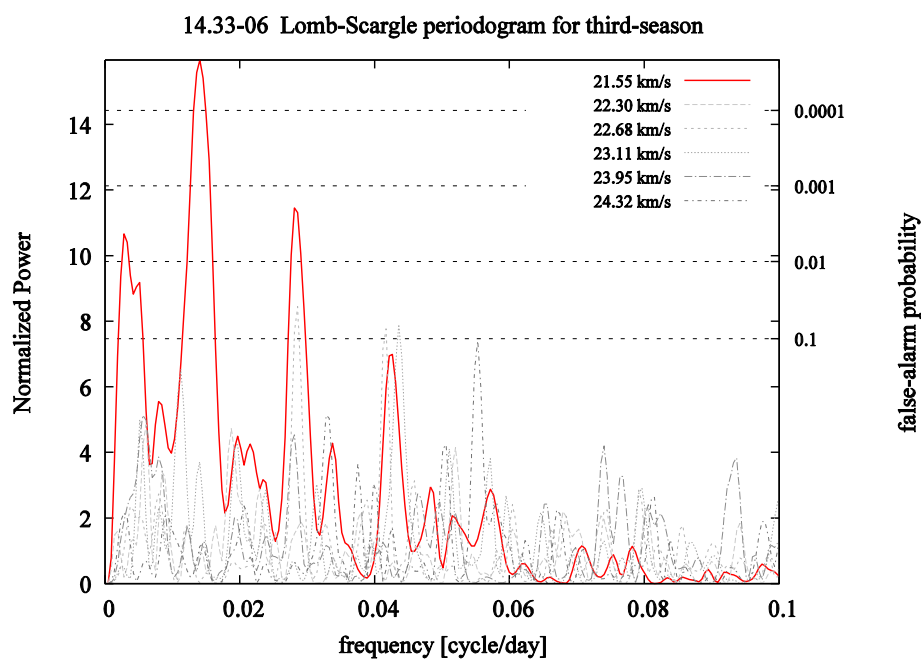


図 B.15 : G 014.33-0.63 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル。

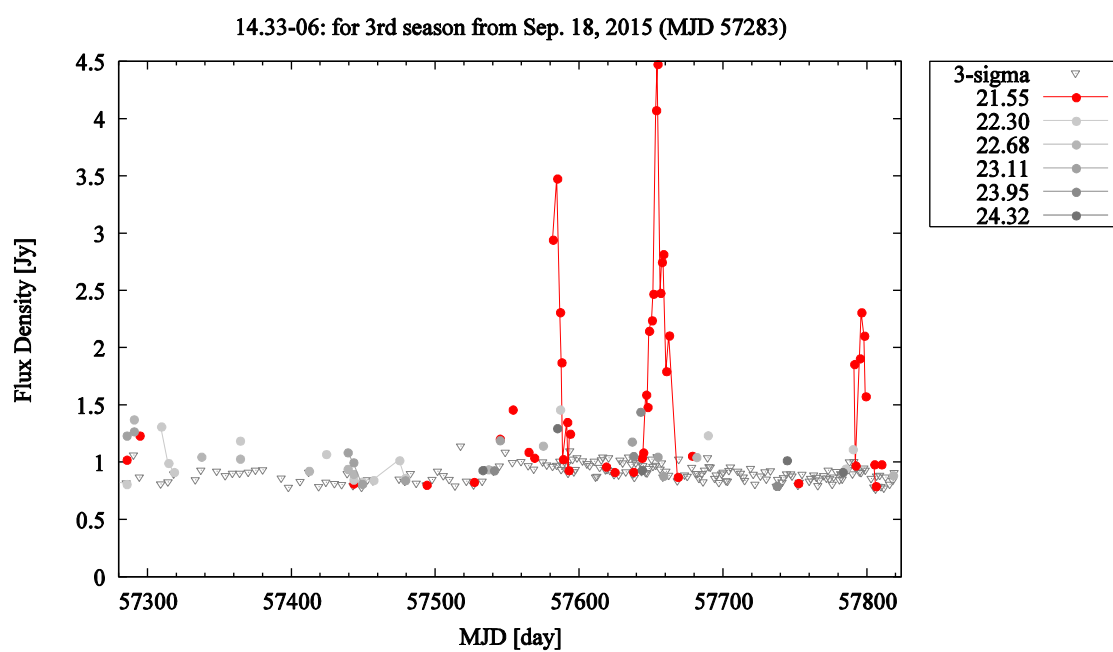


図 B.16 : G 014.33-0.63 の強度変動プロット。

● G 019.75–0.12

G 019.75–0.12 は、2 個の速度成分が同定されている。そのうち、選出条件を満たすのは 122.95 [km/s] のみであり、21.9 日の周期が導出された。以下に、G 019.75–0.12 の解析結果をまとめた。

表 B.9 : G 019.75–0.12 の速度成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	116.30, 122.95
---------------------------------	----------------

表 B.10 : G 019.75–0.12 の周期変動成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	ピリオドグラムの 最大値 $P_N(\omega_p)$	誤警報確率 α	周期 T (誤差+, −) [day]
122.95	45.28	$< 0.1 \times 10^{-5}$	21.9 (+0.2, −0.2)

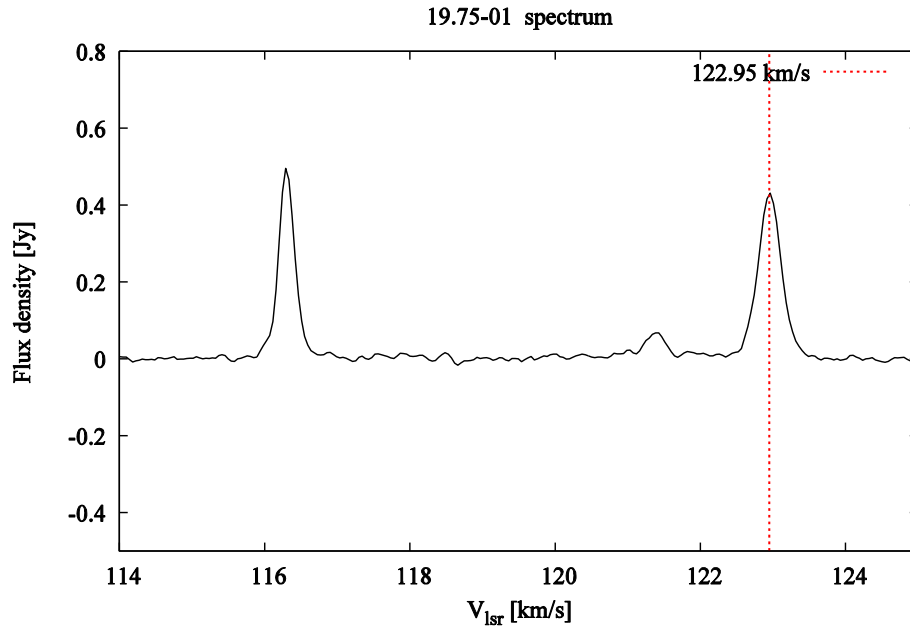


図 B.17 : G 019.75–0.12 のラインプロファイル。

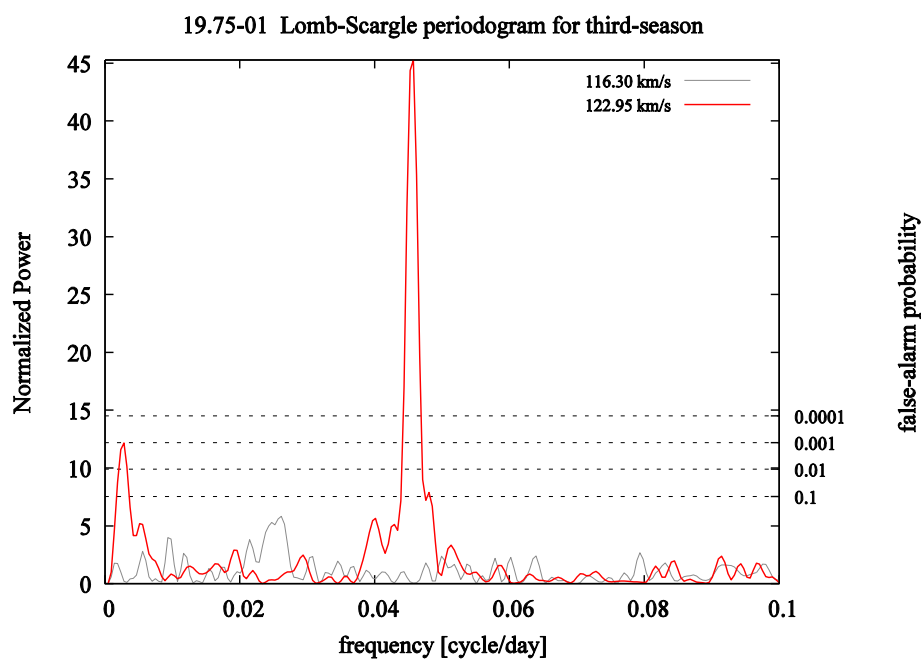


図 B.18 : G 019.75-0.12 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル。

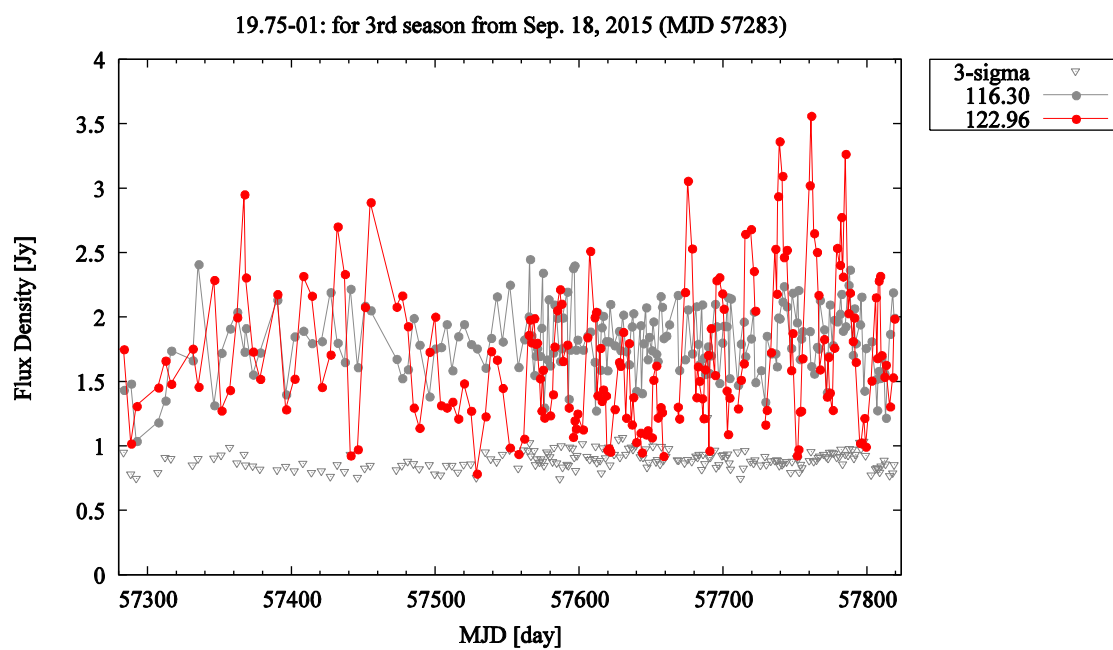


図 B.19 : G 019.75-0.12 の強度変動プロット。

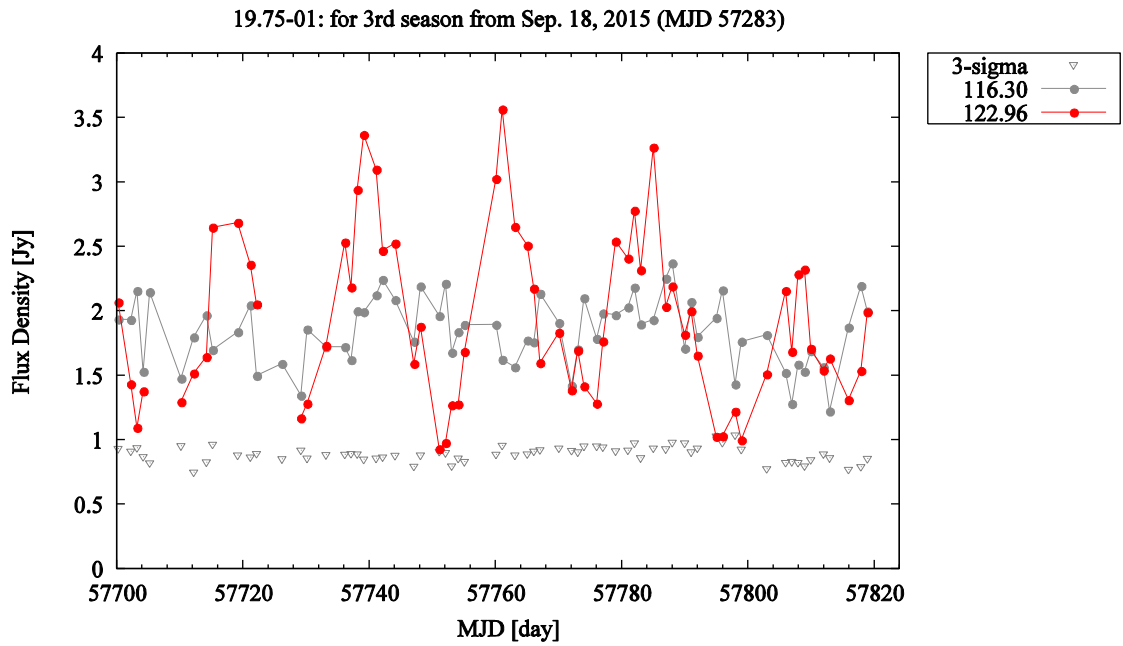


図 B.20 : G 019.75-0.12 の強度変動プロット。図 B.19 の横軸を拡大したもの。

● G 024.54+0.32

G 024.54+0.32 は、8 個の速度成分が同定されている。そのうち、5 個の速度成分が選出条件を満たし、いずれも 163.9 日の周期が導出された。163.9 日は、本解析導出された周期の中で最も長い周期である。以下に、G 024.54+0.32 の解析結果をまとめた。

表 B.11 : G 024.54+0.32 の速度成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	105.16, 106.35, 106.87, 107.72, 108.19, 108.74, 109.29, 110.02
---------------------------------	--

表 B.12 : G 024.54+0.32 の周期変動成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	ピリオドグラムの 最大値 $P_N(\omega_p)$	誤警報確率 α	周期 T (誤差+, -) [day]
106.35	20.92	$< 0.1 \times 10^{-5}$	163.9 (+13.7, -11.7)
106.87	19.56	$< 0.1 \times 10^{-5}$	163.9 (+13.7, -11.7)
107.72	15.68	1.5×10^{-5}	163.9 (+13.7, -11.7)
109.29	20.19	$< 0.1 \times 10^{-5}$	163.9 (+13.7, -11.7)
110.02	23.83	$< 0.1 \times 10^{-5}$	163.9 (+13.7, -11.7)

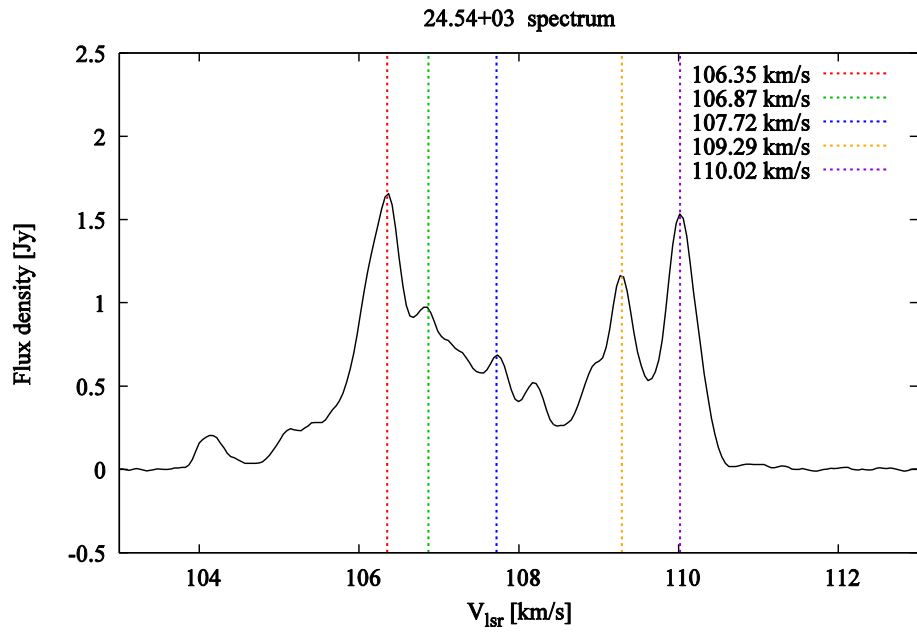


図 B.21 : G 024.54+0.32 のラインプロファイル。

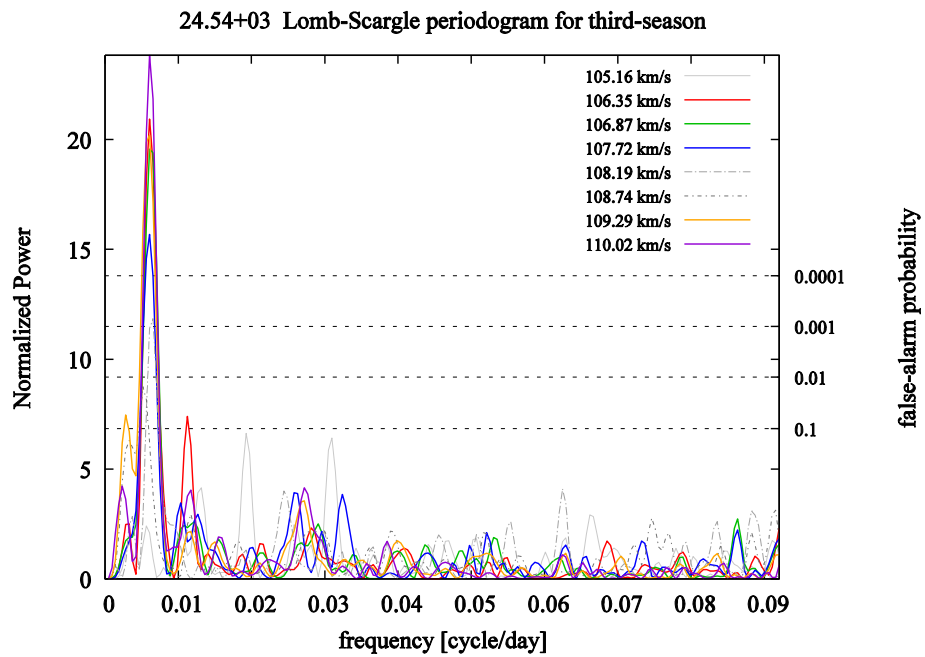


図 B.22 : G 024.54+0.32 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル。

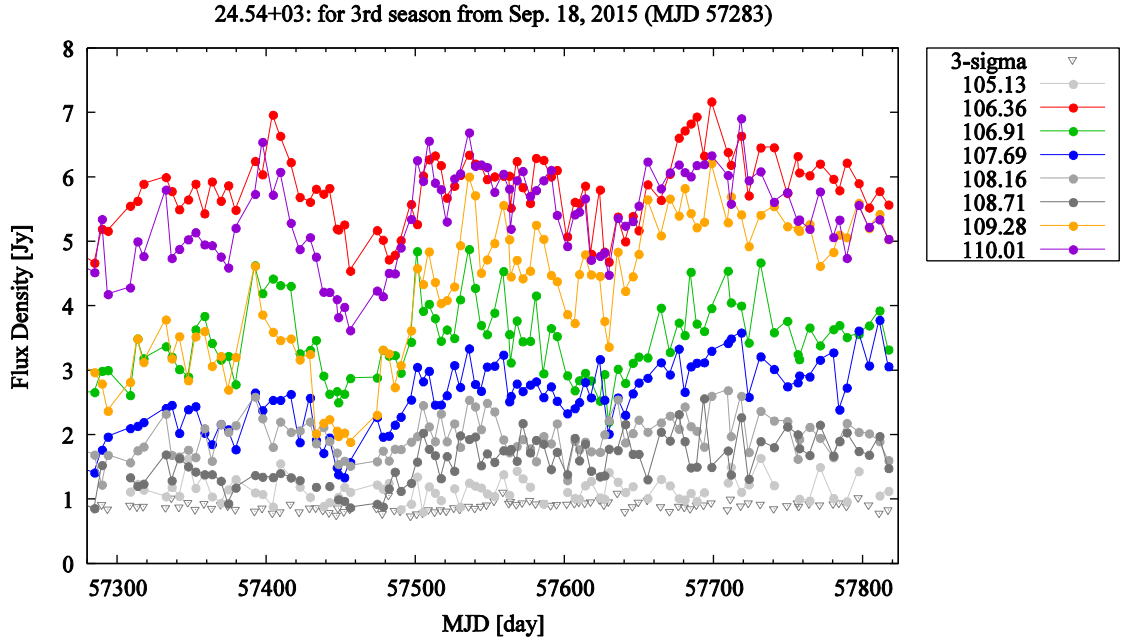


図 B.23 : G 024.54+0.32 の強度変動プロット。

● G 024.64–0.33

G 024.64–0.33 は、5 個の速度成分が同定されている。そのうち、選出条件を満たすのは 35.59 [km/s] のみであり、15.2 日の周期が導出された。以下に、G 024.64–0.33 の解析結果をまとめた。

表 B.13 : G 024.64–0.33 の速度成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	35.59, 44.01, 46.69, 48.19, 50.79
---------------------------------	-----------------------------------

表 B.14 : G 024.64–0.33 の周期変動成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	ピリオドグラムの 最大値 $P_N(\omega_p)$	誤警報確率 α	周期 T (誤差+, -) [day]
35.59	16.09	1.0×10^{-5}	15.2 (+0.1, -0.1)

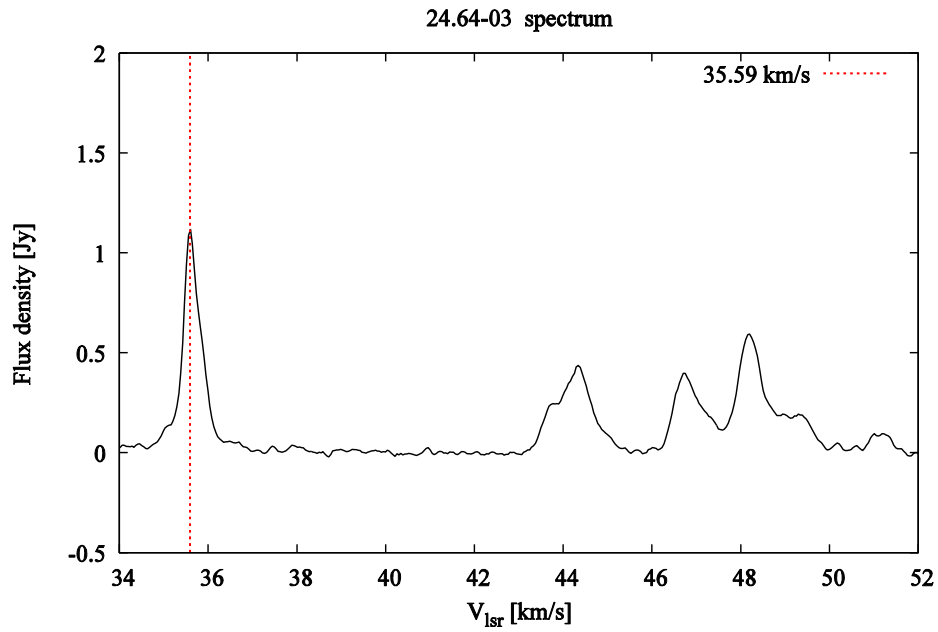


図 B.24 : G 024.64-0.33 のラインプロファイル。

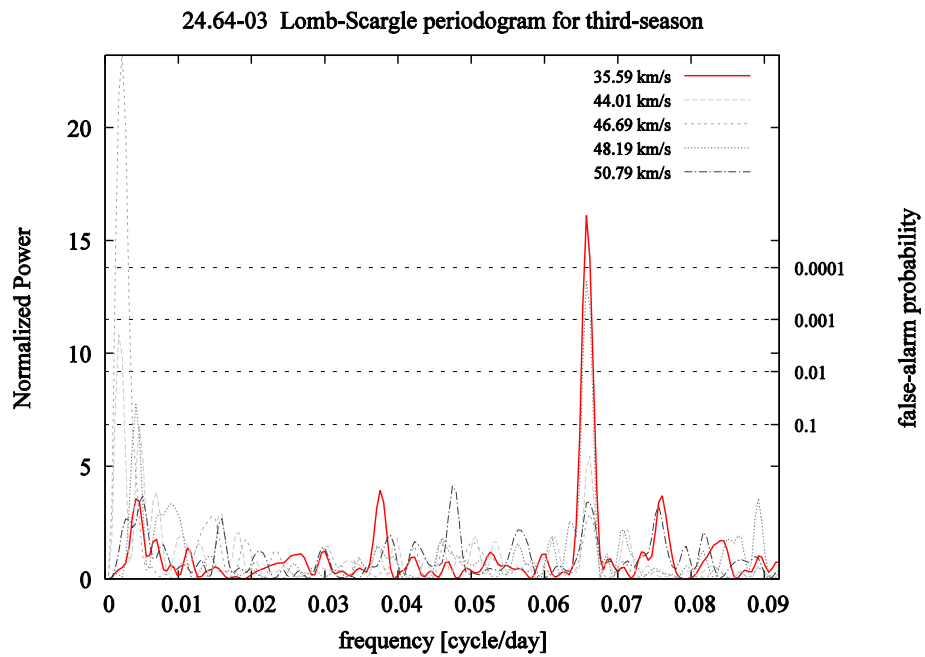


図 B.25 : G 024.64-0.33 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル。

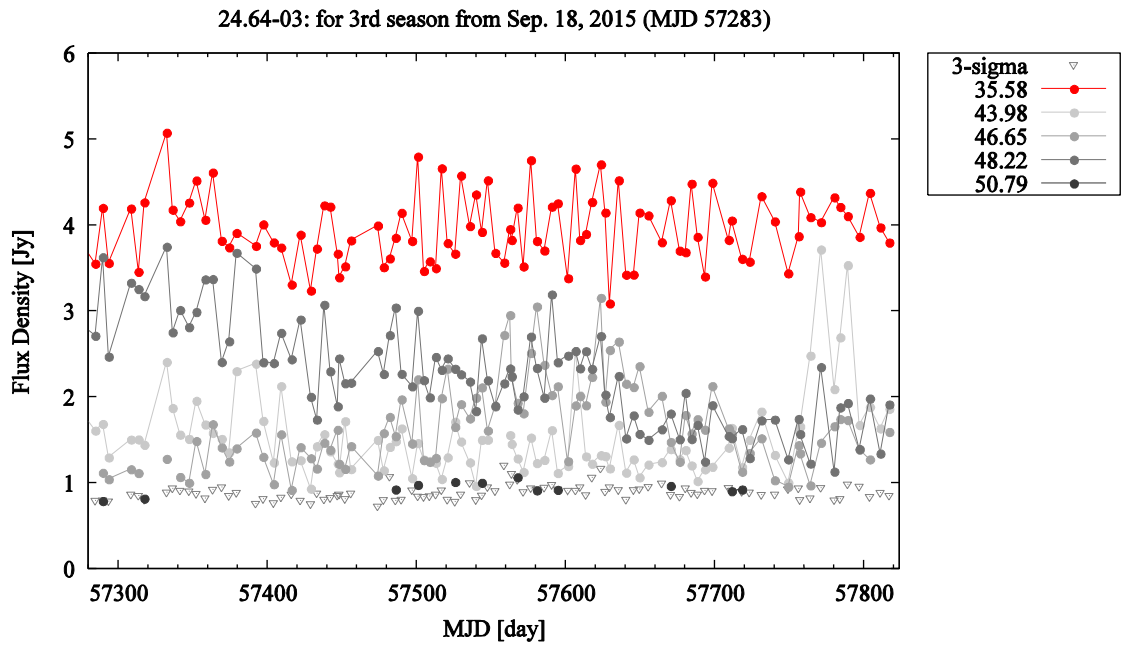


図 B.26 : G 024.64-0.33 の強度変動プロット。

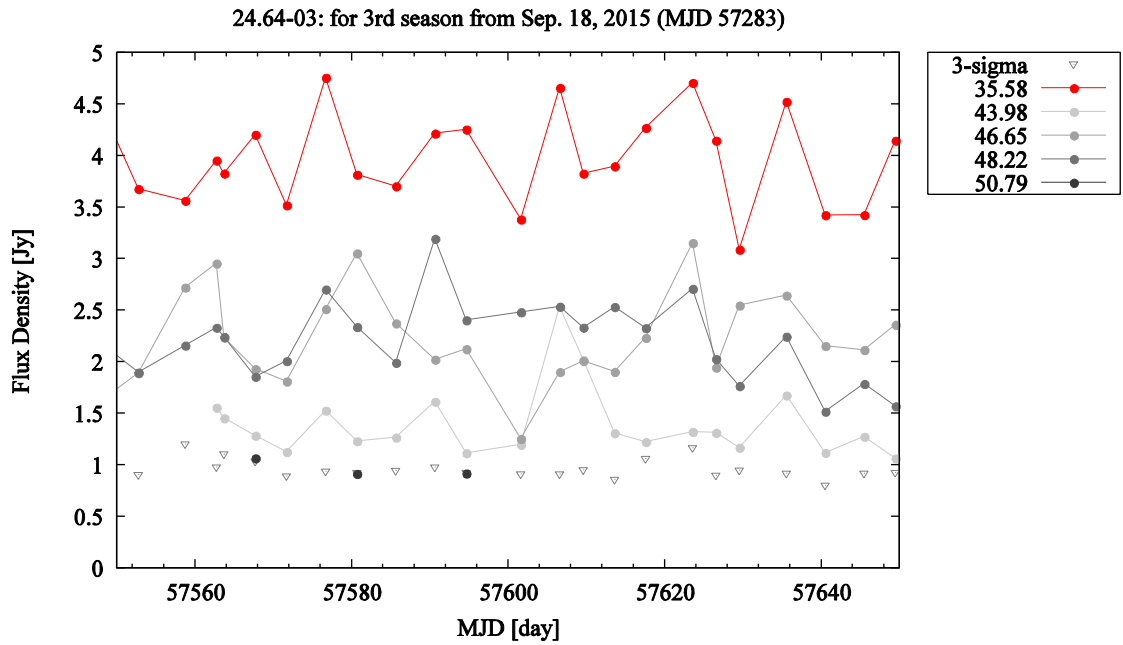


図 B.27 : G 024.64-0.33 の強度変動プロット。図 B.26 の縦軸と横軸を拡大したもの。

● G 024.93+0.08

G 024.93+0.08 は、8 個の速度成分が同定されている。そのうち、選出条件を満たすのは 46.62 [km/s] のみであり、133.9 日の周期が導出された。以下に、G 024.93+0.08 の解析結果をまとめた。

表 B.15 : G 024.93+0.08 の速度成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	39.51, 45.73, 46.62, 47.69, 48.09, 50.50, 51.68, 53.26
---------------------------------	--

表 B.16 : G 024.93+0.08 の周期変動成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	ピリオドグラムの 最大値 $P_N(\omega_p)$	誤警報確率 α	周期 T (誤差+, -) [day]
46.62	20.85	$< 0.1 \times 10^{-5}$	133.9 (+8.9, -7.9)

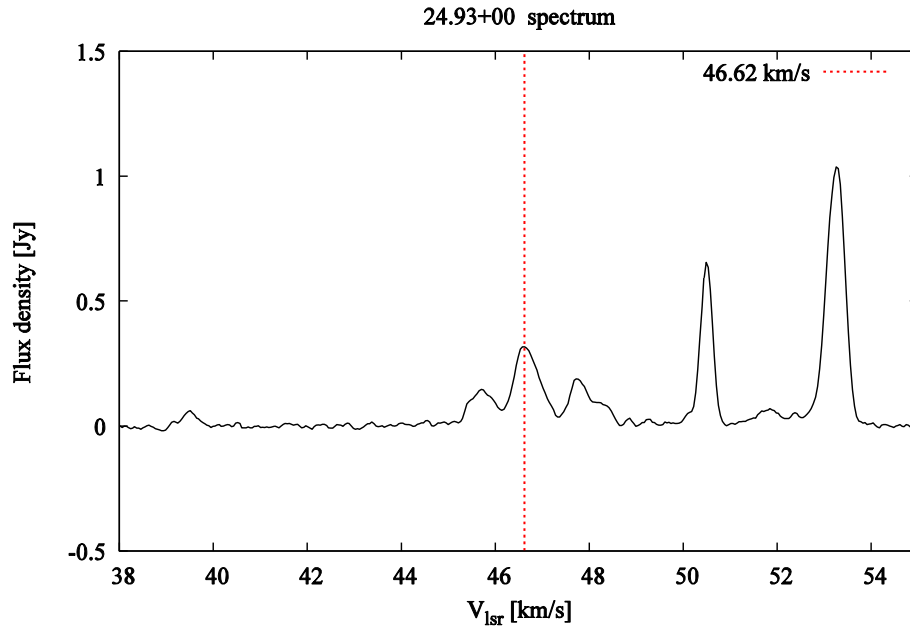


図 B.28 : G 024.93+0.08 のラインプロファイル。

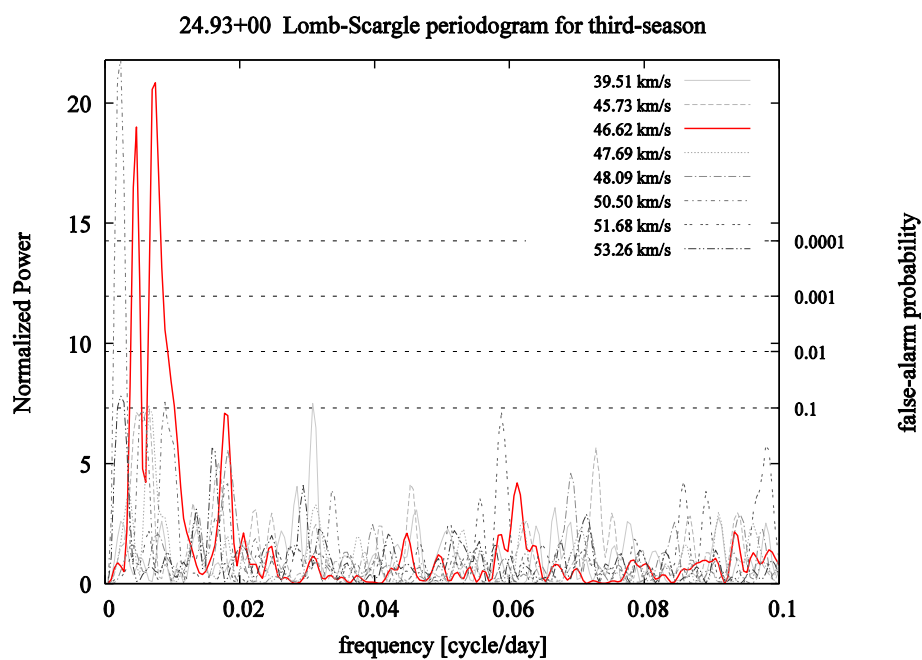


図 B.29 : G 024.93+0.08 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル。

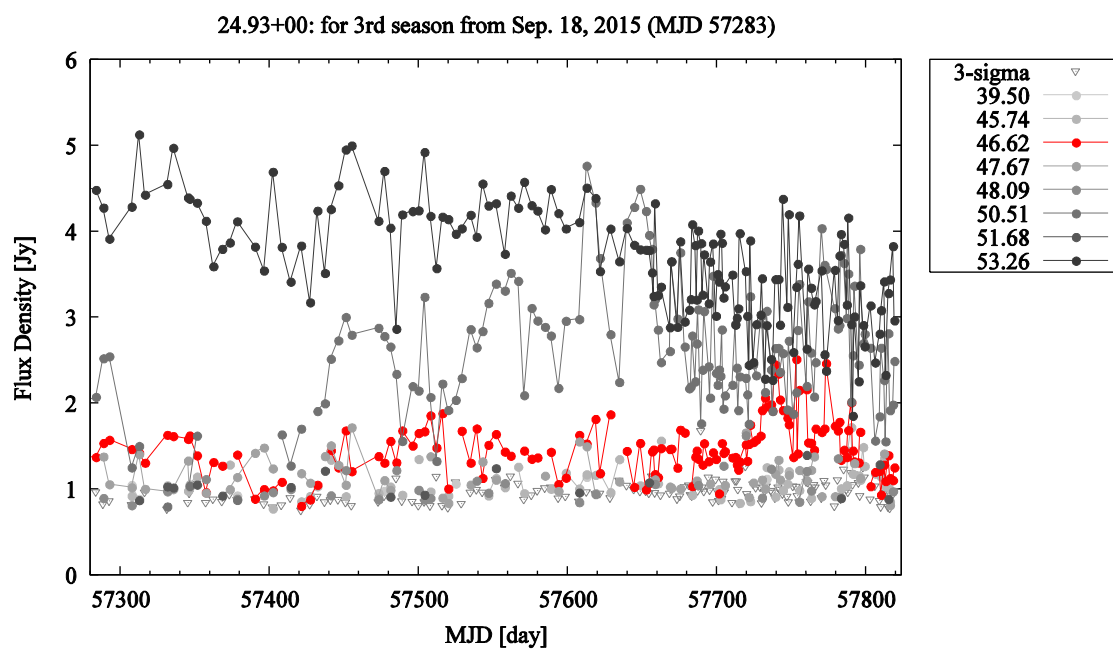


図 B.30 : G 024.93+0.08 の強度変動プロット。

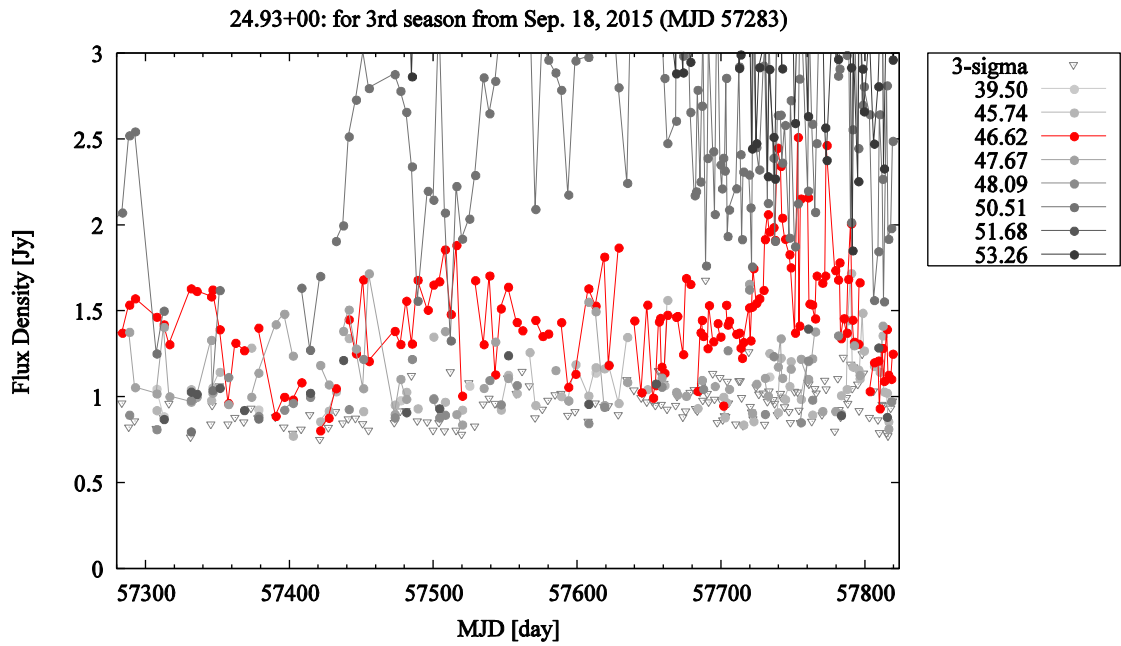


図 B.31 : G 024.93+0.08 の強度変動プロット。図 B.30 の縦軸を拡大したもの。

● G 032.11+0.09

G 032.11+0.09 は、16 個の速度成分が同定されている。そのうち、選出条件を満たすのは 92.83 [km/s] のみであり、56.1 日の周期が導出された。以下に、G 032.11+0.09 の解析結果をまとめた。

表 B.17 : G 032.11+0.09 の速度成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	90.80, 91.80, 92.16, 92.83, 93.79, 94.13, 94.83, 95.53, 97.89, 98.43, 99.54, 99.98, 100.96, 101.11, 102.89, 103.21
---------------------------------	---

表 B.18 : G 032.11+0.09 の周期変動成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	ピリオドグラムの 最大値 $P_N(\omega_p)$	誤警報確率 α	周期 T (誤差+, -) [day]
92.83	20.86	$< 0.1 \times 10^{-5}$	56.1 (+1.5, -1.4)

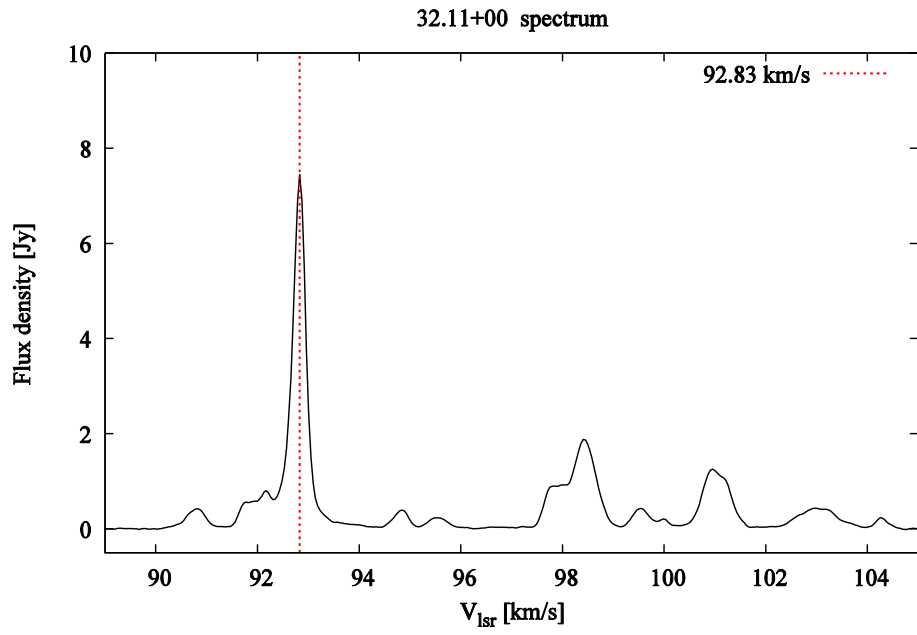


図 B.32 : G 032.11+0.09 のラインプロファイル。

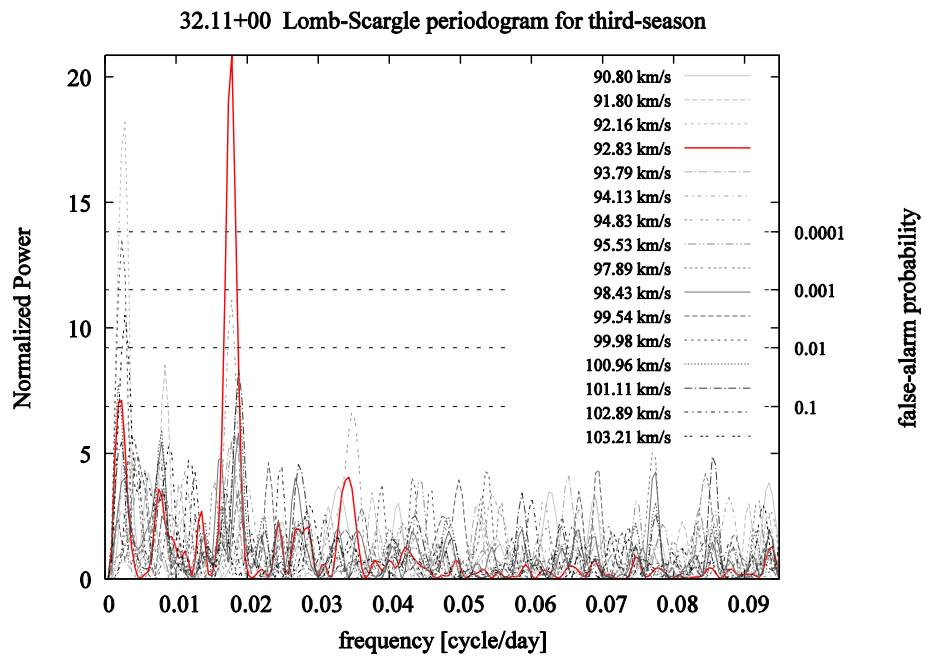


図 B.33 : G 032.11+0.09 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル。

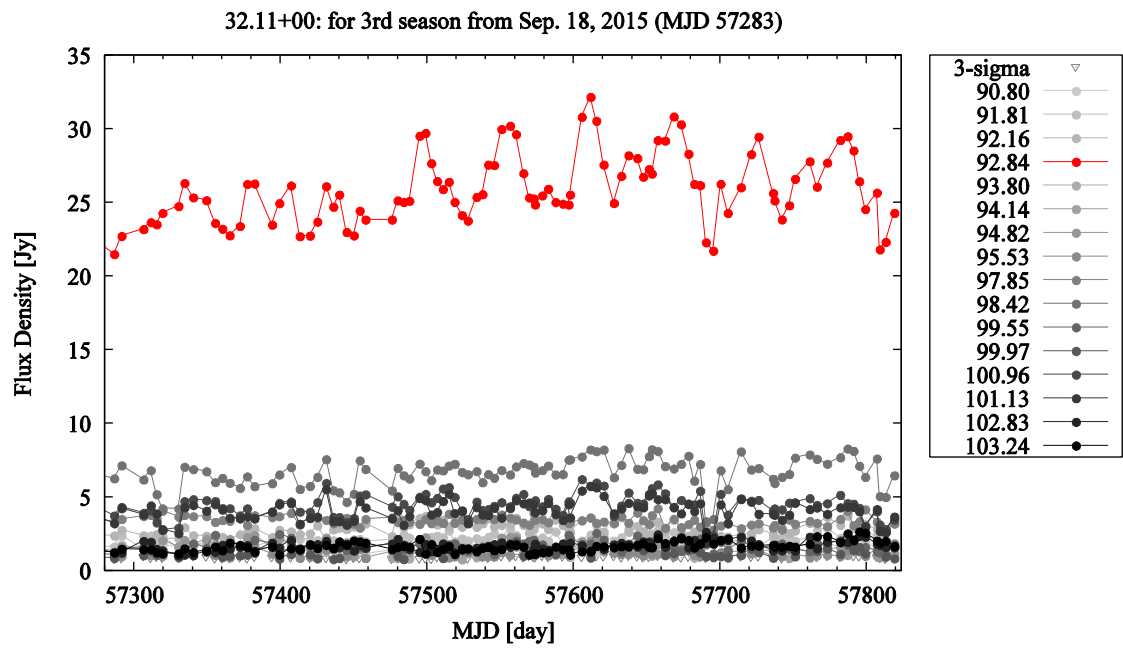


図 B.34 : G 032.11+0.09 の強度変動プロット。

● **G 033.40+0.01**

G 033.40+0.01 は、17 個の速度成分が同定されている。そのうち、10 個の速度成分が選出条件を満たし、いずれも 31.4 日の周期が導出された。以下に、G 033.40+0.01 の解析結果をまとめた。

表 B.19 : G 033.40+0.01 の速度成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	97.56, 97.84, 98.62, 99.04, 99.44, 100.84, 101.22, 102.24, 103.03, 103.16, 104.14, 104.89, 105.24, 105.68, 106.86, 107.12, 107.58
---------------------------------	---

表 B.20 : G 033.40+0.01 の周期変動成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	ピリオドグラムの 最大値 $P_N(\omega_p)$	誤警報確率 α	周期 T (誤差+, -) [day]
97.56	32.71	$< 0.1 \times 10^{-5}$	31.4 (+0.5, -0.5)
97.84	32.20	$< 0.1 \times 10^{-5}$	31.4 (+0.5, -0.5)
98.62	52.36	$< 0.1 \times 10^{-5}$	31.4 (+0.5, -0.5)
99.04	26.20	$< 0.1 \times 10^{-5}$	31.4 (+0.5, -0.5)
99.44	55.99	$< 0.1 \times 10^{-5}$	31.4 (+0.5, -0.5)
104.14	42.22	$< 0.1 \times 10^{-5}$	31.4 (+0.5, -0.5)
104.89	42.53	$< 0.1 \times 10^{-5}$	31.4 (+0.5, -0.5)
105.24	29.38	$< 0.1 \times 10^{-5}$	31.4 (+0.5, -0.5)
105.68	32.29	0.1×10^{-5}	31.4 (+0.5, -0.5)
107.58	42.04	$< 0.1 \times 10^{-5}$	31.4 (+0.5, -0.5)

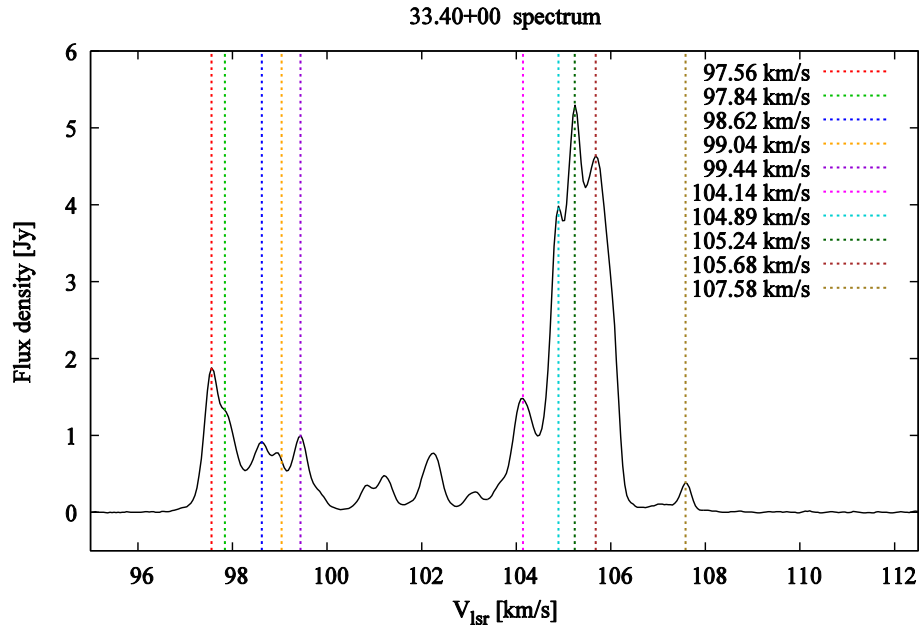


図 B.35 : G 033.40+0.01 のラインプロファイル。

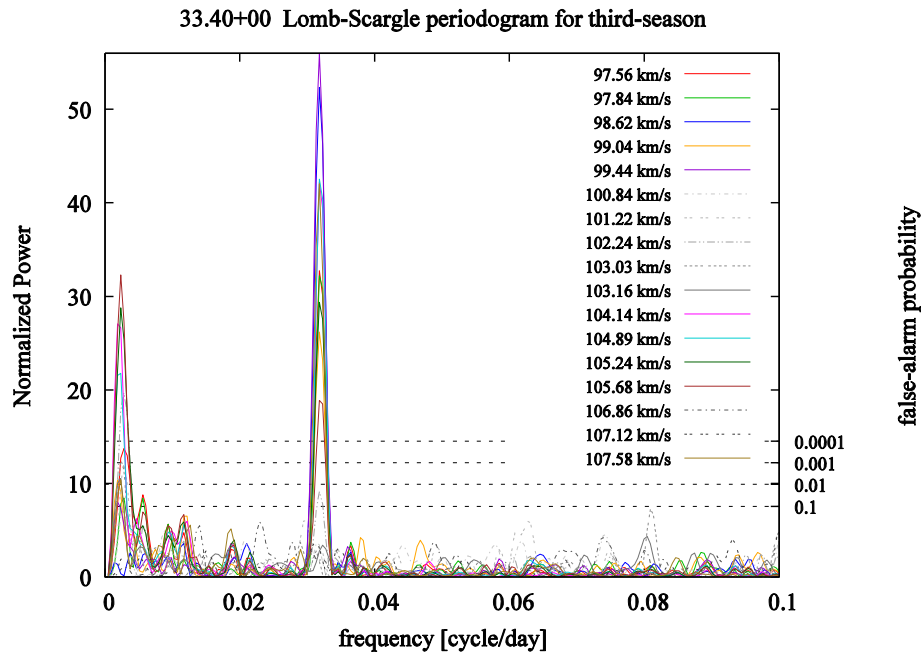


図 B.36 : G 033.40+0.01 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル。

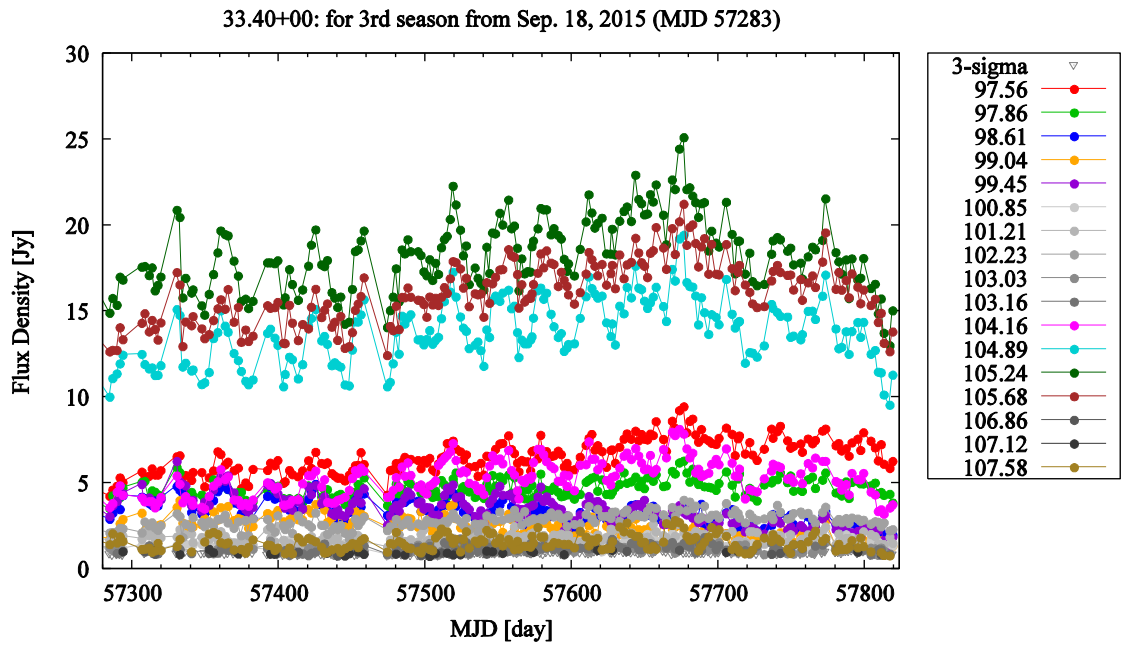


図 B.37 : G 033.40+0.01 の強度変動プロット。

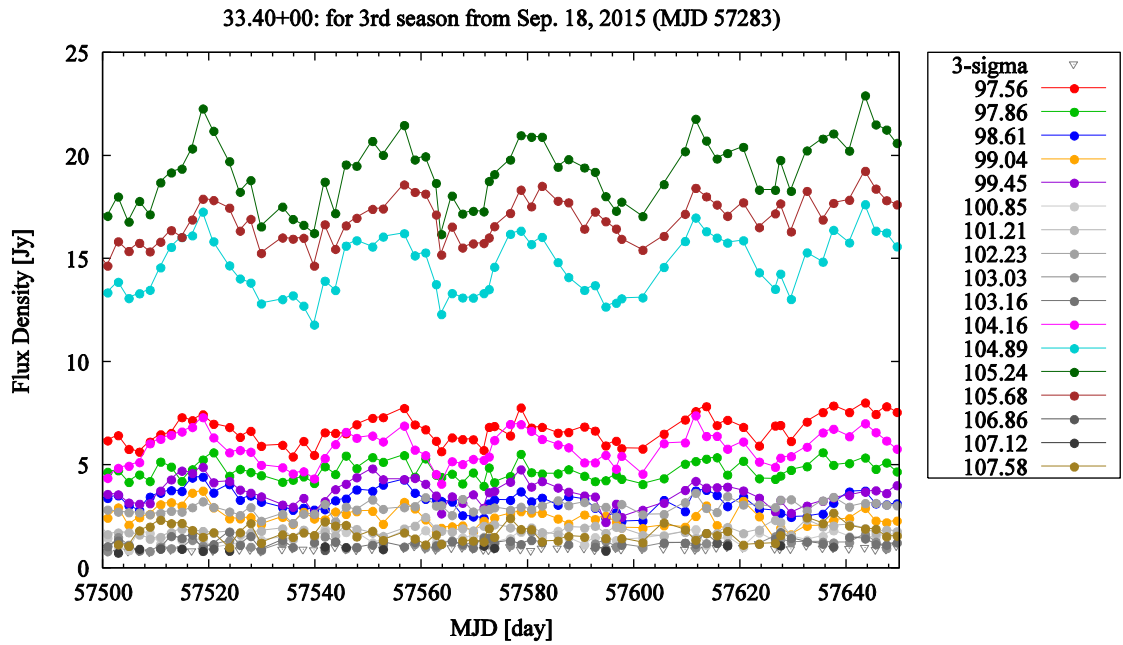


図 B.38 : G 033.40+0.01 の強度変動プロット。図 B.37 の縦軸と横軸を拡大したもの。

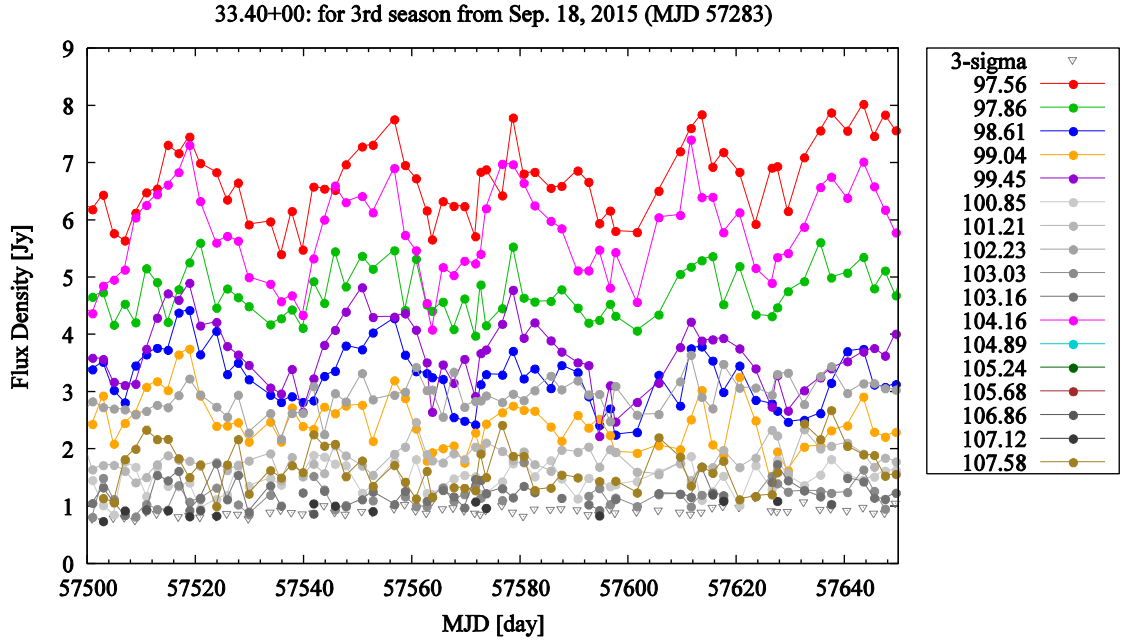


図 B.39 : G 033.40+0.01 の強度変動プロット。図 B.38 の縦軸を拡大したもの。

● G 033.86+0.01

G 033.86+0.01 は、6 個の速度成分が同定されている。そのうち、2 個の速度成分が選出条件を満たし、いずれも 73.5 日の周期が導出された。以下に、G 033.86+0.01 の解析結果をまとめた。

表 B.21 : G 033.86+0.01 の速度成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	60.30, 60.88, 61.59, 62.91, 63.46, 64.56
---------------------------------	--

表 B.22 : G 033.86+0.01 の周期変動成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	ピリオドグラムの 最大値 $P_N(\omega_p)$	誤警報確率 α	周期 T (誤差+, -) [day]
60.88	15.42	2.0×10^{-5}	73.5 (+2.6, -2.4)
63.46	20.43	$< 0.1 \times 10^{-5}$	73.5 (+2.6, -2.4)

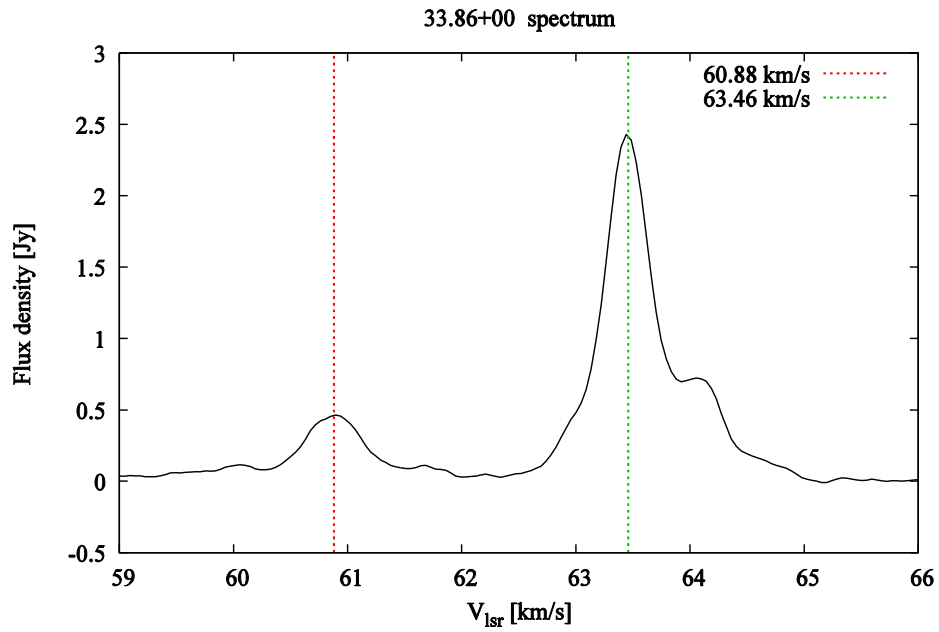


図 B.40 : G 033.86+0.01 のラインプロファイル。

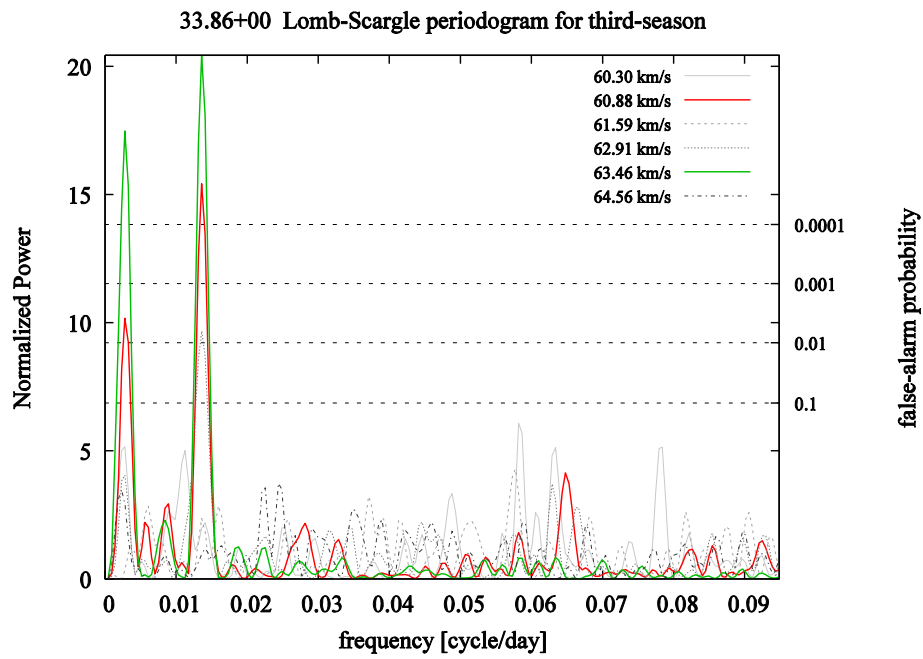


図 B.41 : G 033.86+0.01 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル。

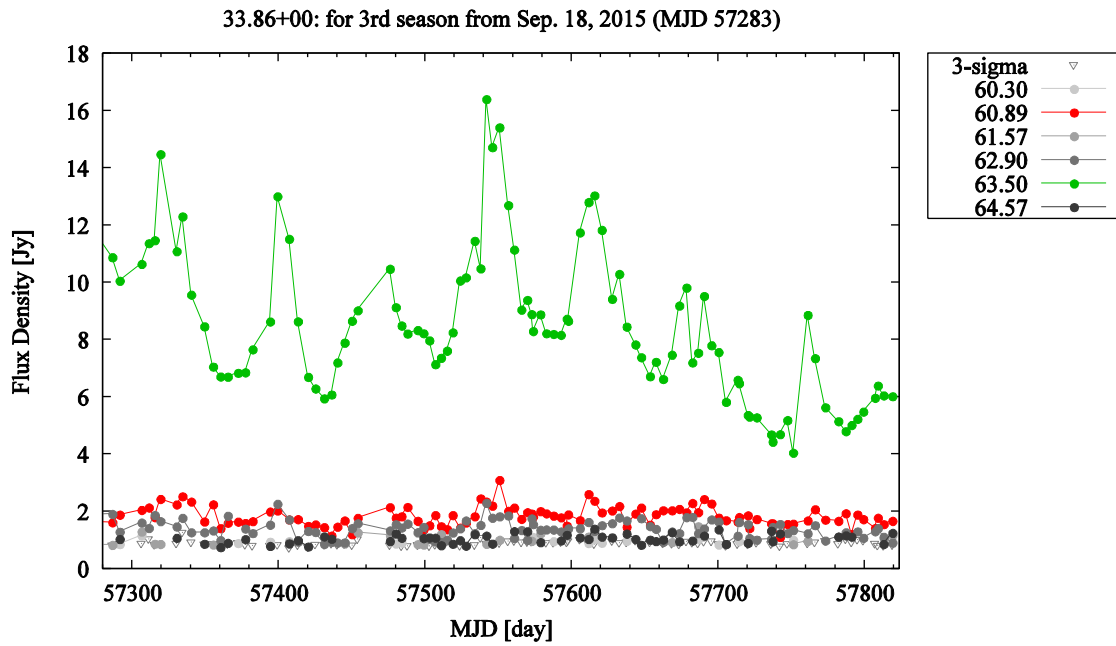


図 B.42 : G 033.86+0.01 の強度変動プロット。

● G 035.79–0.17

G 035.79–0.17 は、13 個の速度成分が同定されている。そのうち、2 個の速度成分が選出条件を満たし、いずれも 33.4 日の周期が導出された。以下に、G 035.79–0.17 の解析結果をまとめた。

表 B.23 : G 035.79–0.17 の速度成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	57.21, 57.81, 58.03, 58.21, 58.85, 59.94, 60.80, 61.55, 62.02, 62.90, 63.70, 64.13, 64.37
---------------------------------	--

表 B.24 : G 035.79–0.17 の周期変動成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	ピリオドグラムの 最大値 $P_N(\omega_p)$	誤警報確率 α	周期 T (誤差+, -) [day]
61.55	29.56	$< 0.1 \times 10^{-5}$	33.4 (+0.5, -0.5)
62.02	26.14	$< 0.1 \times 10^{-5}$	33.4 (+0.5, -0.5)

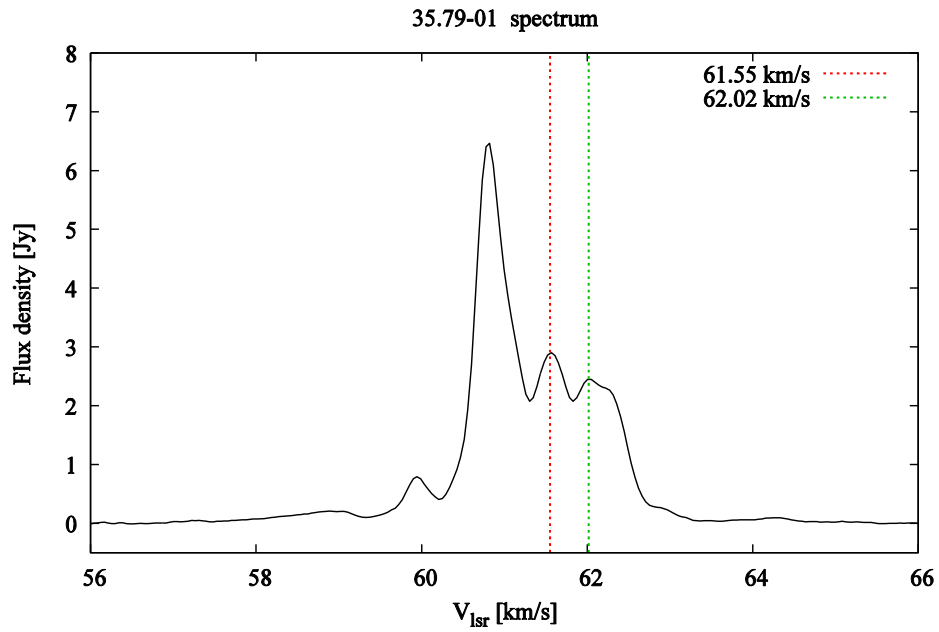


図 B.43 : G 035.79-0.17 のラインプロファイル。

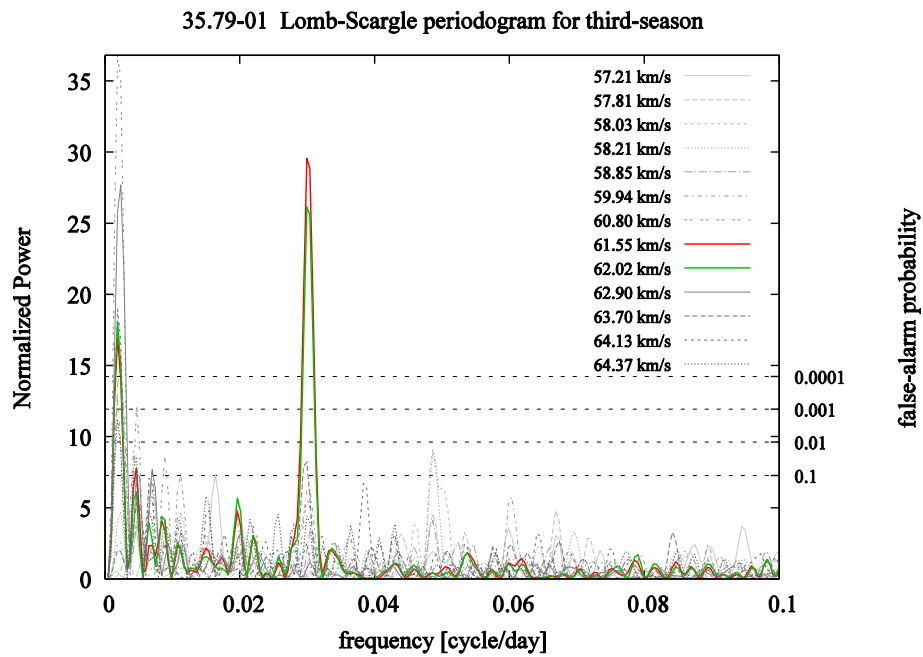


図 B.44 : G 035.79-0.17 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル。

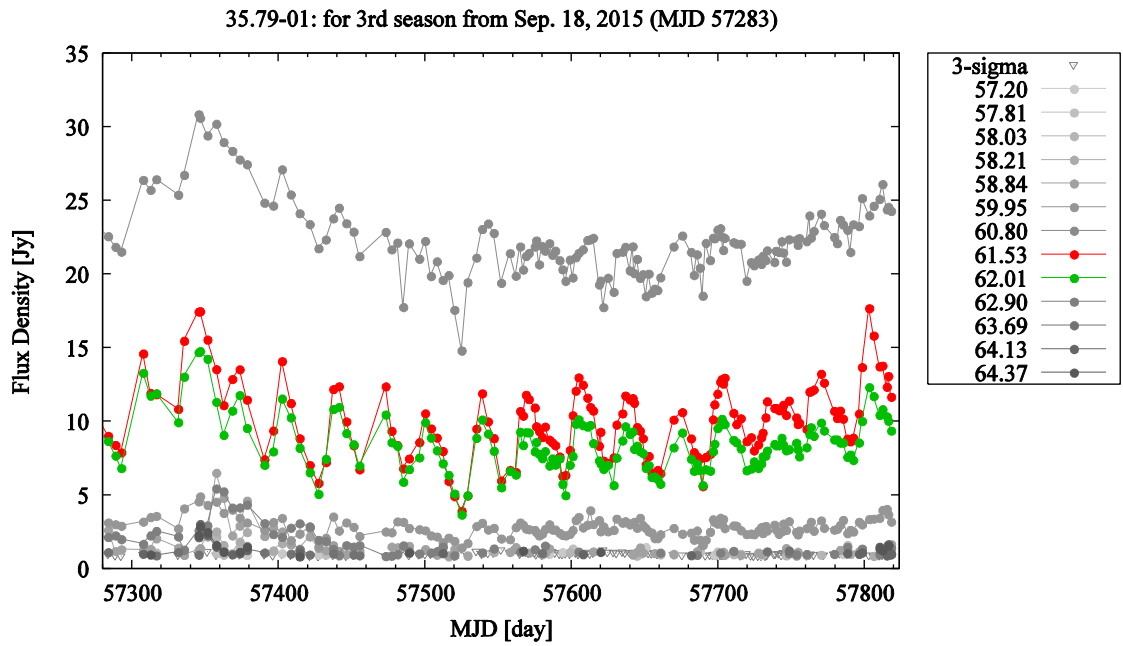


図 B.45 : G 035.79-0.17 の強度変動プロット。

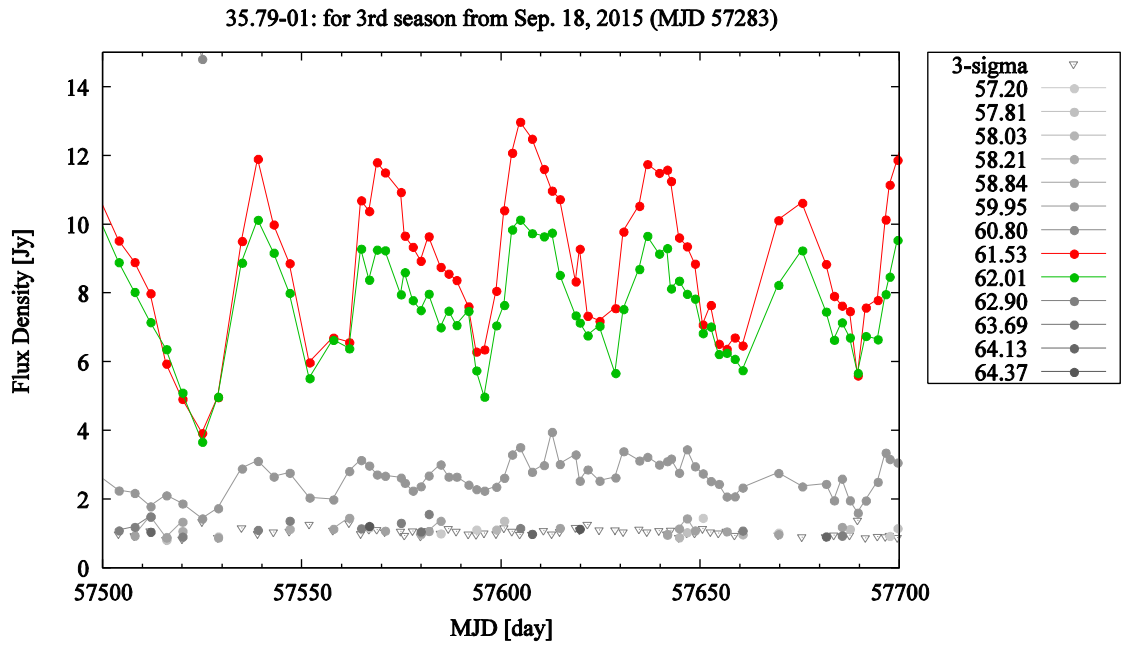


図 B.46 : G 035.79-0.17 の強度変動プロット。図 B.45 の縦軸と横軸を拡大したもの。

● G 037.47–0.11

G 037.47–0.11 は、13 個の速度成分が同定されている。そのうち、選出条件を満たすのは 54.49 [km/s] のみであり、68.7 日の周期が導出された。以下に、G 037.47–0.11 の解析結果をまとめた。

表 B.25 : G 037.47–0.11 の速度成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	49.99, 52.50, 54.00, 54.49, 56.84, 57.14, 58.44, 59.42, 59.98, 61.29, 61.70, 62.04, 62.23
---------------------------------	--

表 B.26 : G 037.47–0.11 の周期変動成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	ピリオドグラムの 最大値 $P_N(\omega_p)$	誤警報確率 α	周期 T (誤差+, −) [day]
54.49	19.42	$< 0.1 \times 10^{-5}$	68.7 (+2.3, −2.1)

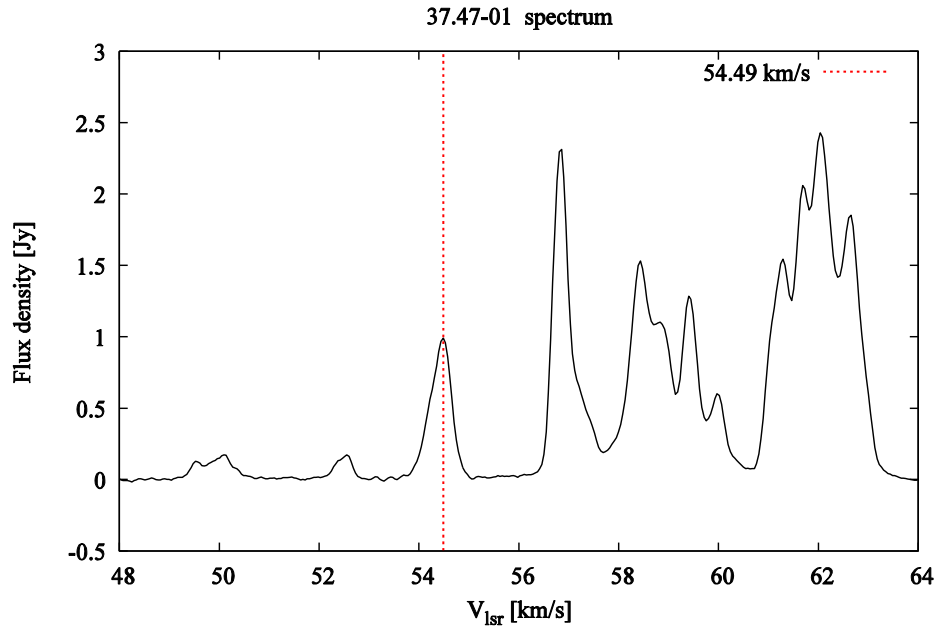


図 B.47 : G 037.47–0.11 のラインプロファイル。

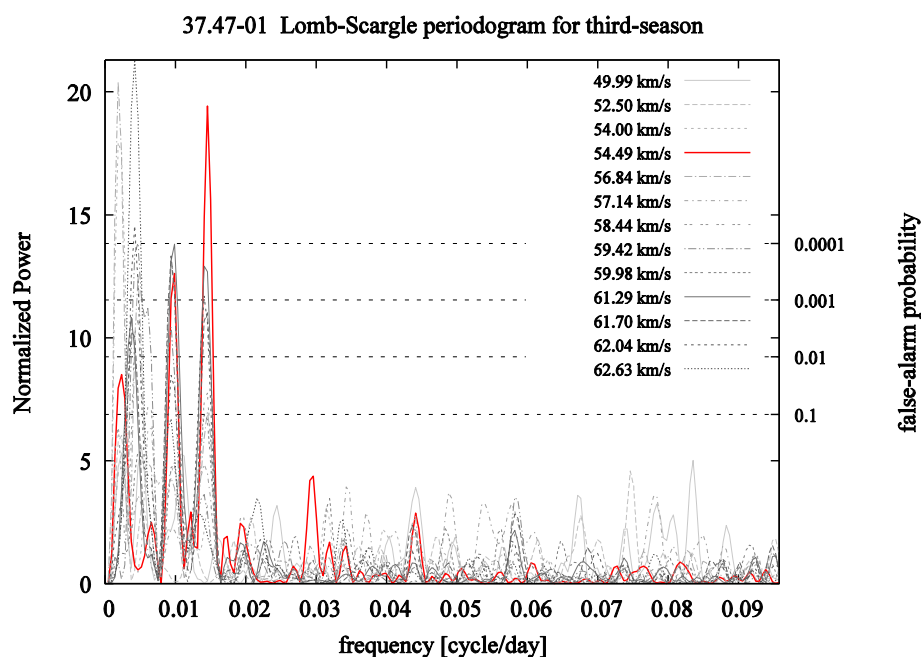


図 B.48 : G 037.47-0.11 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル。

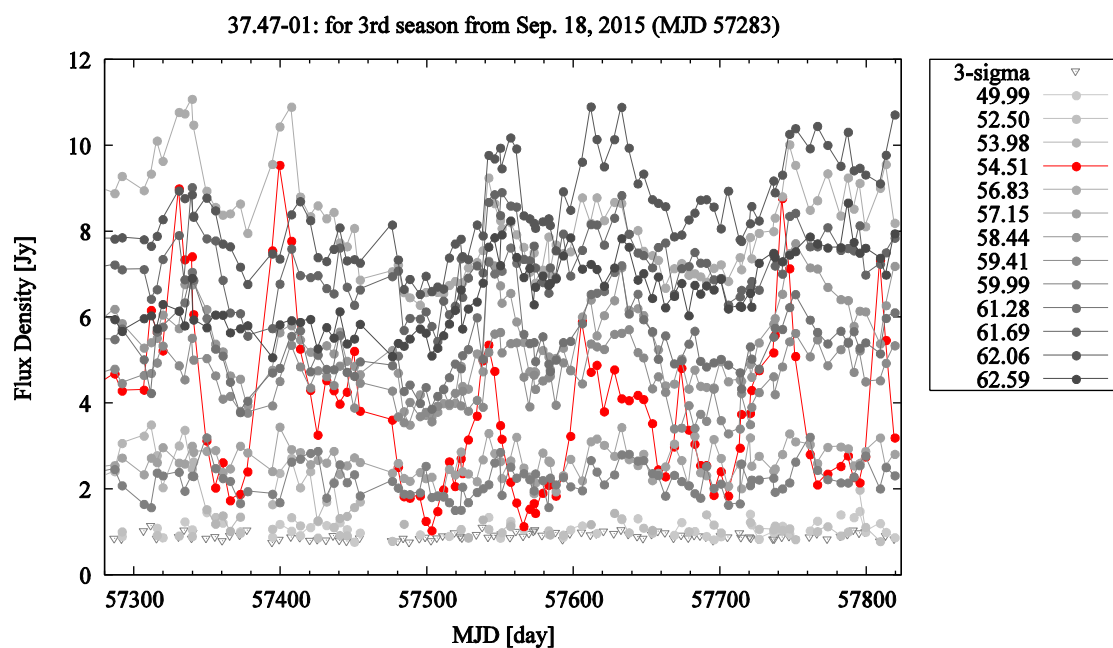


図 B.49 : G 037.47-0.11 の強度変動プロット。

● G 049.60–0.25

G 049.60–0.25 は、13 個の速度成分が同定されている。そのうち、選出条件を満たすのは 63.04 [km/s] のみであり、106.7 日の周期が導出された。以下に、G 049.60–0.25 の解析結果をまとめた。

表 B.27 : G 049.60–0.25 の速度成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	56.25, 57.89, 58.28, 59.33, 59.72, 60.97, 62.13, 62.41, 63.04, 63.48, 63.87, 65.10, 65.54
---------------------------------	--

表 B.28 : G 049.60–0.25 の周期変動成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	ピリオドグラムの 最大値 $P_N(\omega_p)$	誤警報確率 α	周期 T (誤差+, −) [day]
63.04	13.86	9.8×10^{-5}	106.7 (+5.6, −5.1)

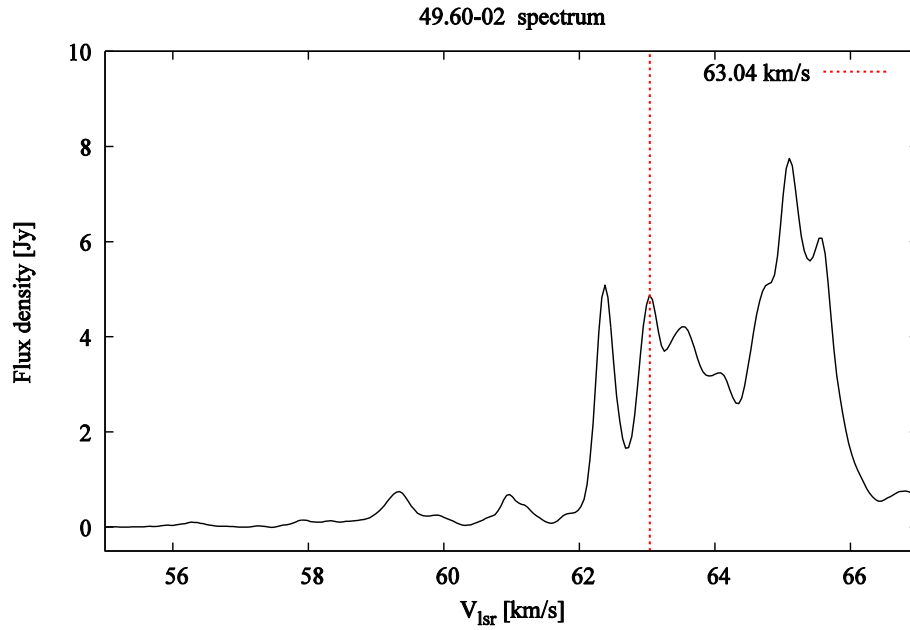


図 B.50 : G 049.60–0.25 のラインプロファイル。

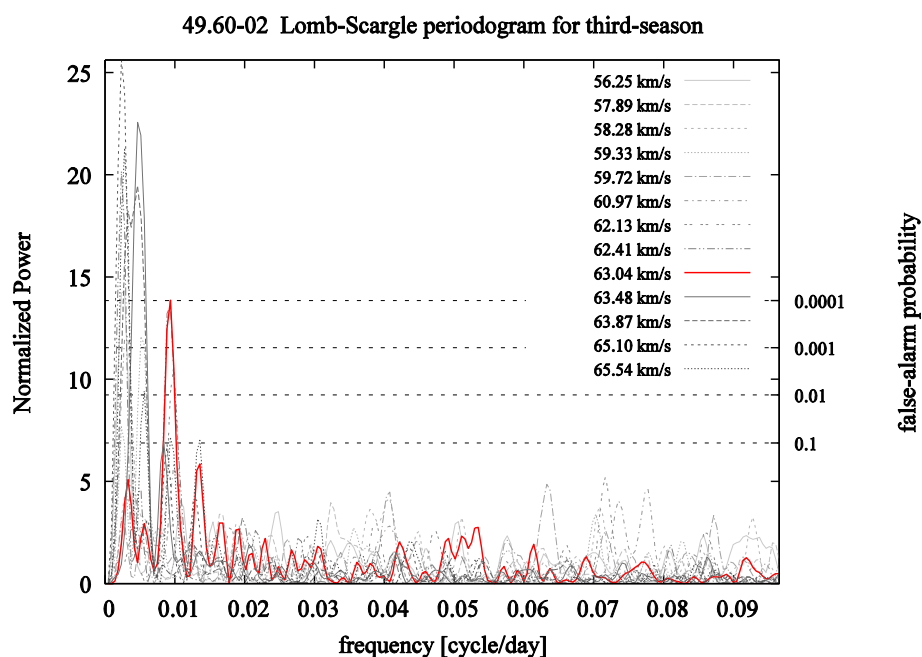


図 B.51 : G 049.60-0.25 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル。

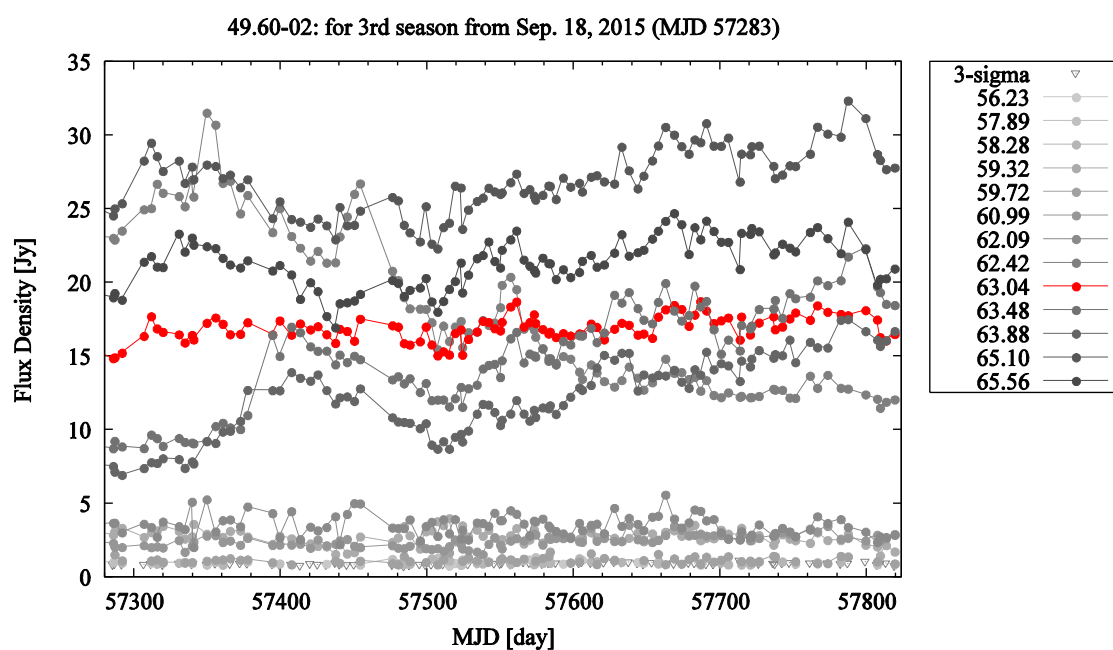


図 B.52 : G 049.60-0.25 の強度変動プロット。

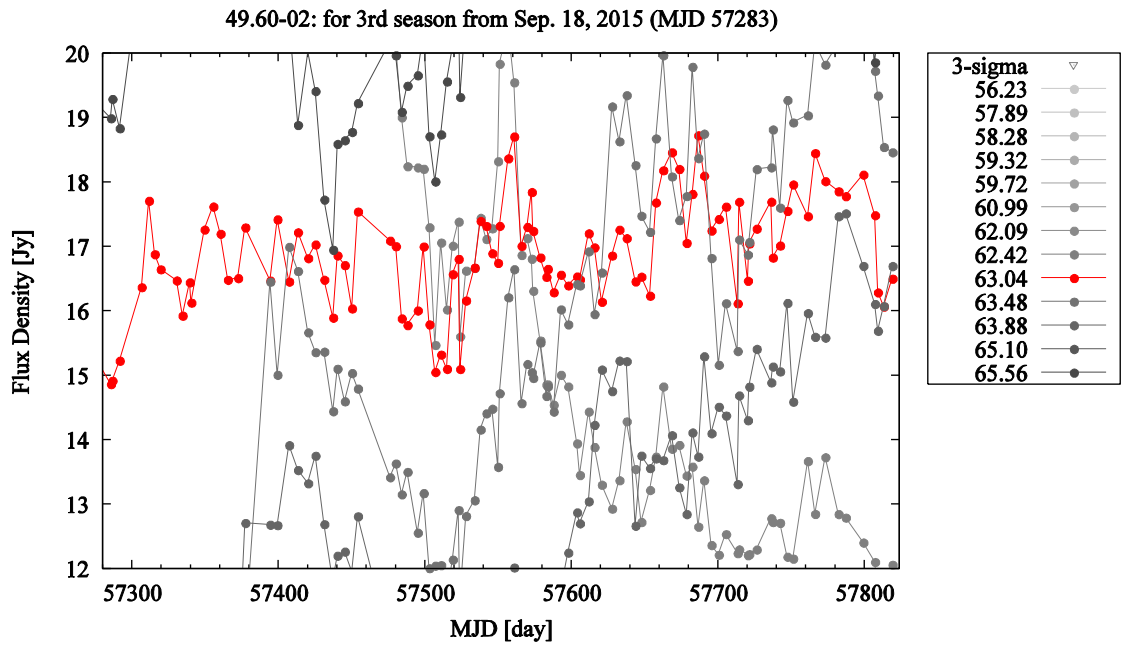


図 B.53 : G 049.60-0.25 の強度変動プロット。図 B.52 の縦軸を拡大したもの。

● G 081.76+0.59

G 081.76+0.59 は、14 個の速度成分が同定されている。そのうち、2 個の速度成分が選出条件を満たし、いずれも 163.9 日の周期が導出された。163.9 日は、本解析で導出された周期の中で最も長い周期である。以下に、G 081.76+0.59 の解析結果をまとめた。

表 B.29 : G 081.76+0.59 の速度成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	-9.09, -8.55, -6.79, -6.39, -5.80, -3.76, -3.08, -2.72, -1.26, 3.87, 4.59, 5.15, 5.76, 7.27
---------------------------------	--

表 B.30 : G 081.76+0.59 の周期変動成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	ピリオドグラム の 最大値 $P_N(\omega_p)$	誤警報確率 α	周期 T (誤差+, -) [day]
3.87	14.26	6.4×10^{-5}	163.9 (+13.7, -11.7)
4.59	13.93	8.9×10^{-5}	163.9 (+13.7, -11.7)

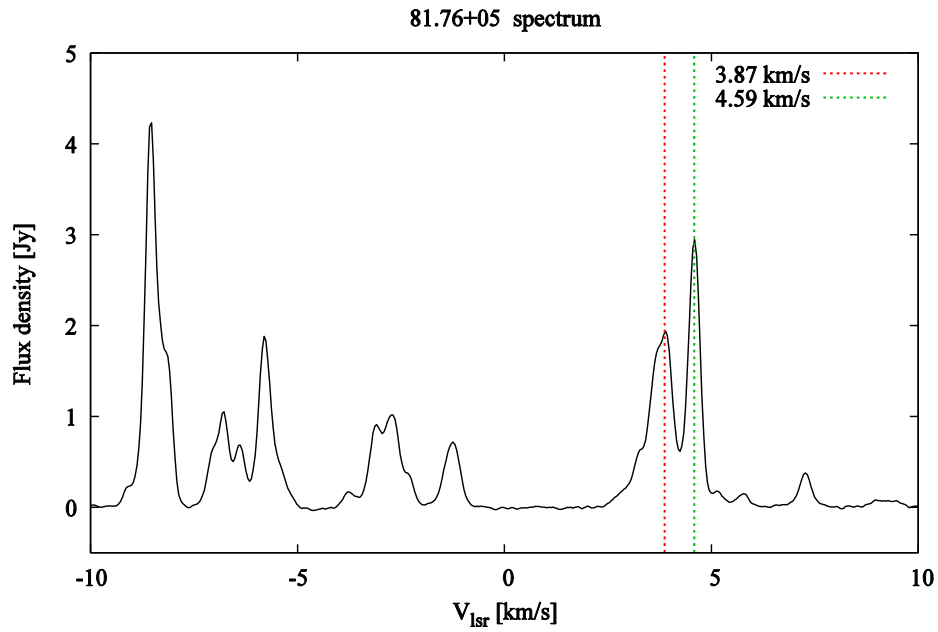


図 B.54 : G 081.76+0.59 のラインプロファイル。

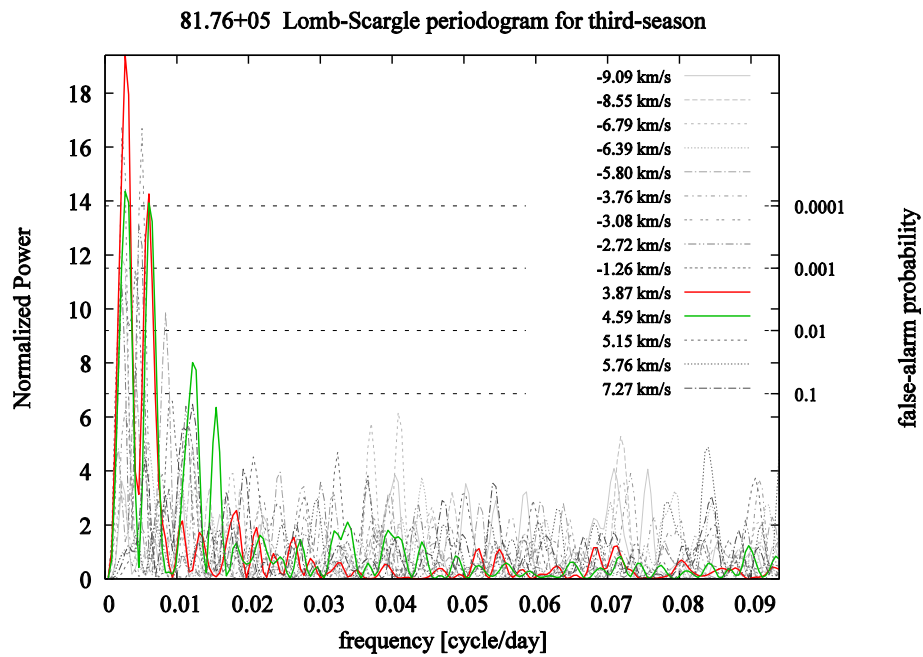


図 B.55 : G 081.76+0.59 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル。

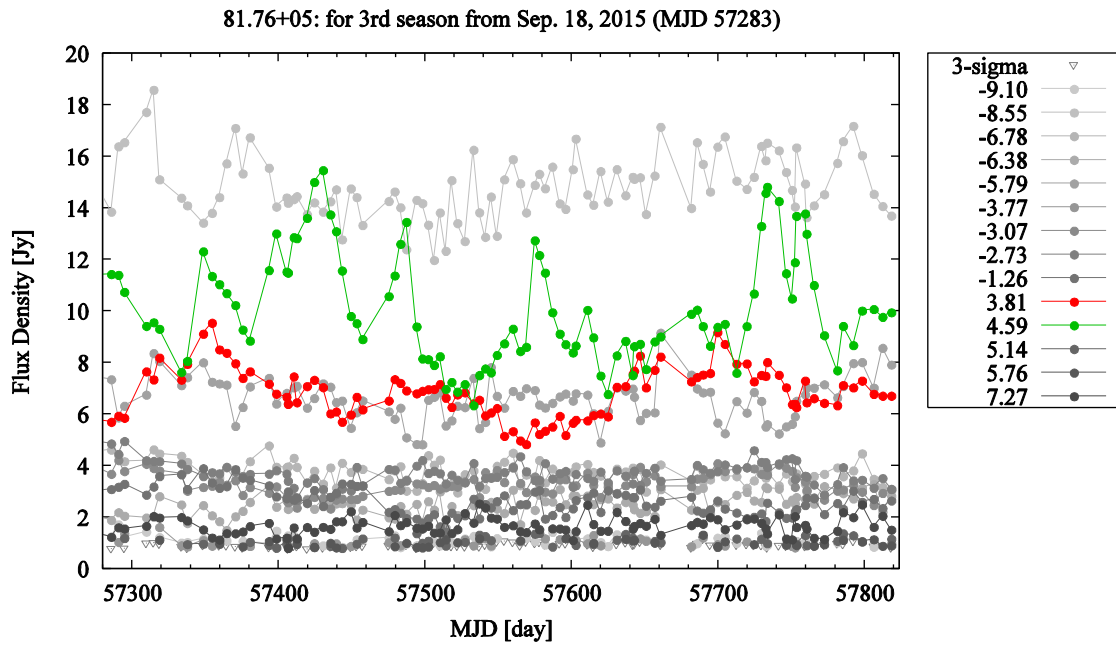


図 B.56 : G 081.76+0.59 の強度変動プロット。

● G 183.34-0.59

G 183.34-0.59 は、4 個の速度成分が同定されている。そのうち、3 個の速度成分が選出条件を満たし、64.6 日、または 68.8 日の周期が導出された。以下に、G 183.34-0.59 の解析結果をまとめた。

表 B.31 : G 183.34-0.59 の速度成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	-15.19, -14.61, -13.97, -4.86
---------------------------------	-------------------------------

表 B.32 : G 183.34-0.59 の周期変動成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	ピリオドグラムの 最大値 $P_N(\omega_p)$	誤警報確率 α	周期 T (誤差+, -) [day]
-15.19	22.00	$< 0.1 \times 10^{-5}$	68.8 (+2.3, -2.1)
-14.61	15.48	2.9×10^{-5}	68.8 (+2.3, -2.1)
-4.86	31.60	$< 0.1 \times 10^{-5}$	64.6 (+2.0, -1.9)

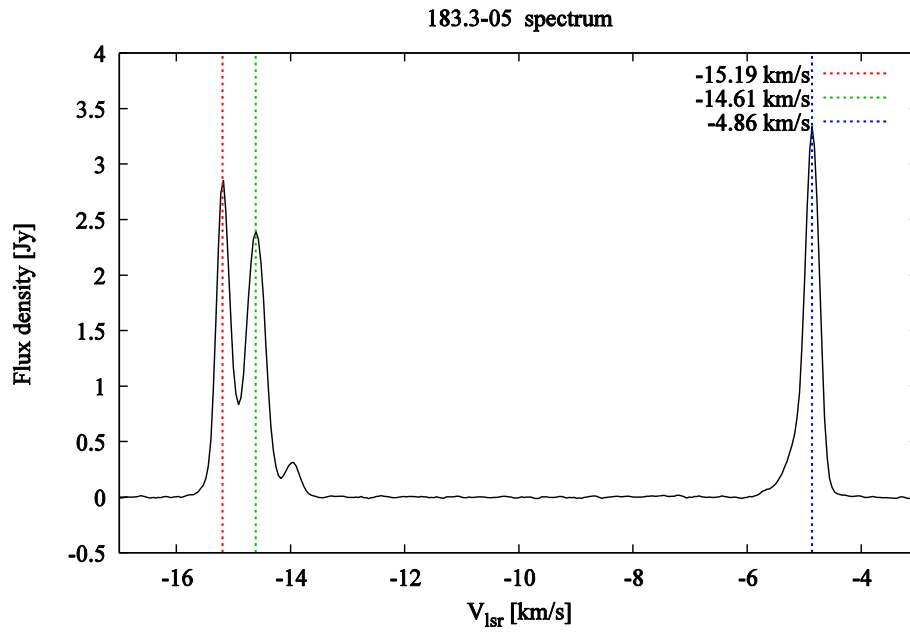


図 B.57 : G 183.34-0.59 のラインプロファイル。

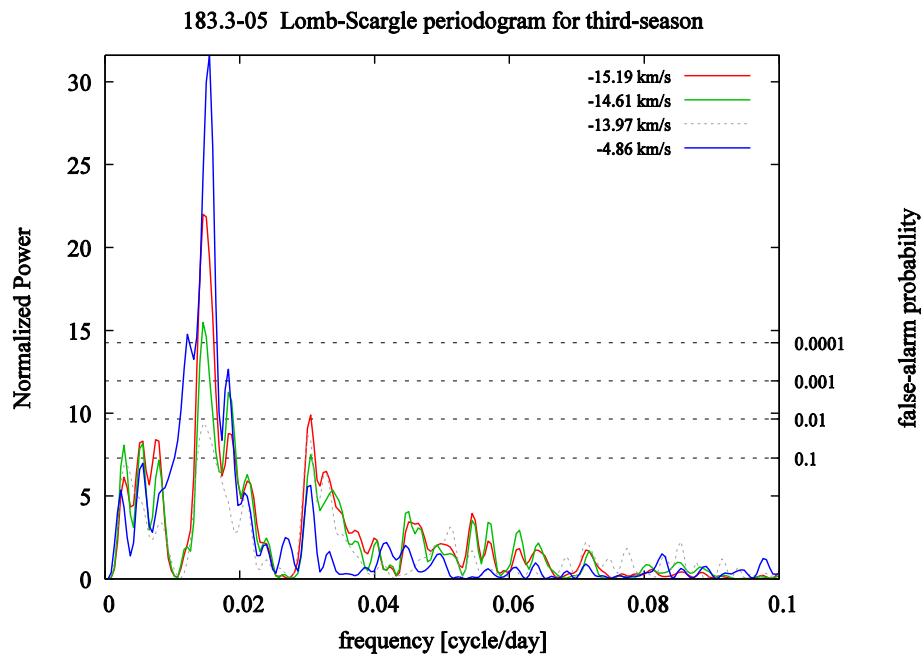


図 B.58 : G 183.34-0.59 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル。

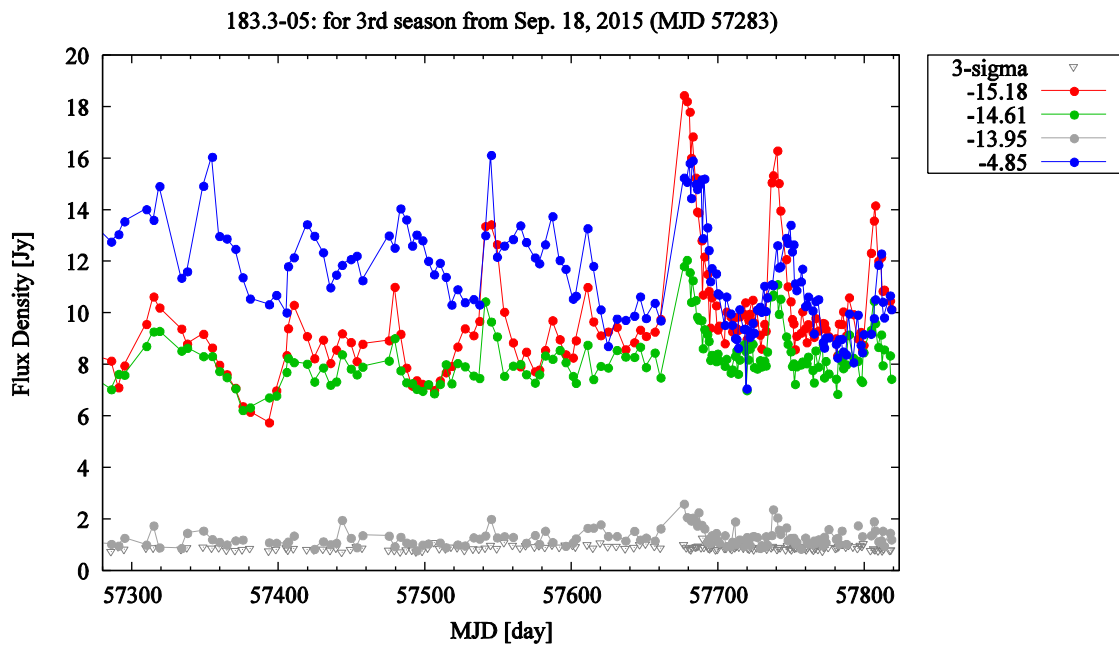


図 B.59 : G 183.34-0.59 の強度変動プロット。

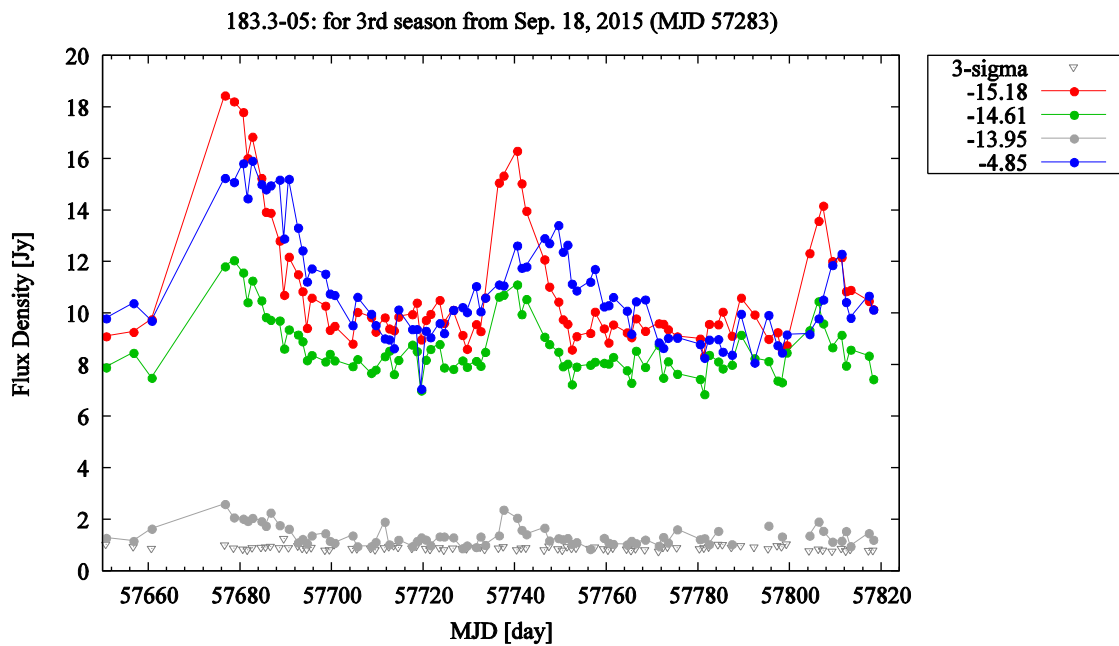


図 B.60 : G 183.34-0.59 の強度変動プロット。図 B.59 の横軸を拡大したもの。

● G 192.60–0.05

G 192.6–0.05 は、13 個の速度成分が同定されている。そのうち、3 個の速度成分が選出条件を満たし、112.3 日、118.6 日、または 125.5 日の周期が導出された。以下に、G 192.6–0.05 の解析結果をまとめた。

表 B.33 : G 192.6–0.05 の速度成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	0.50, 1.20, 1.70, 2.38, 3.09, 3.31, 3.97, 5.01, 5.29, 5.92, 6.47, 7.64, 7.92
---------------------------------	---

表 B.34 : G 192.6–0.05 の周期変動成分。

視線速度 V_{lsr} [km/s]	ピリオドグラムの 最大値 $P_N(\omega_p)$	誤警報確率 α	周期 T (誤差+, −) [day]
5.01	18.34	0.4×10^{-5}	112.3 (+6.2, −5.6)
5.29	25.92	$< 0.1 \times 10^{-5}$	118.6 (+7.0, −6.2)
5.92	17.26	1.3×10^{-5}	125.5 (+7.8, −7.0)

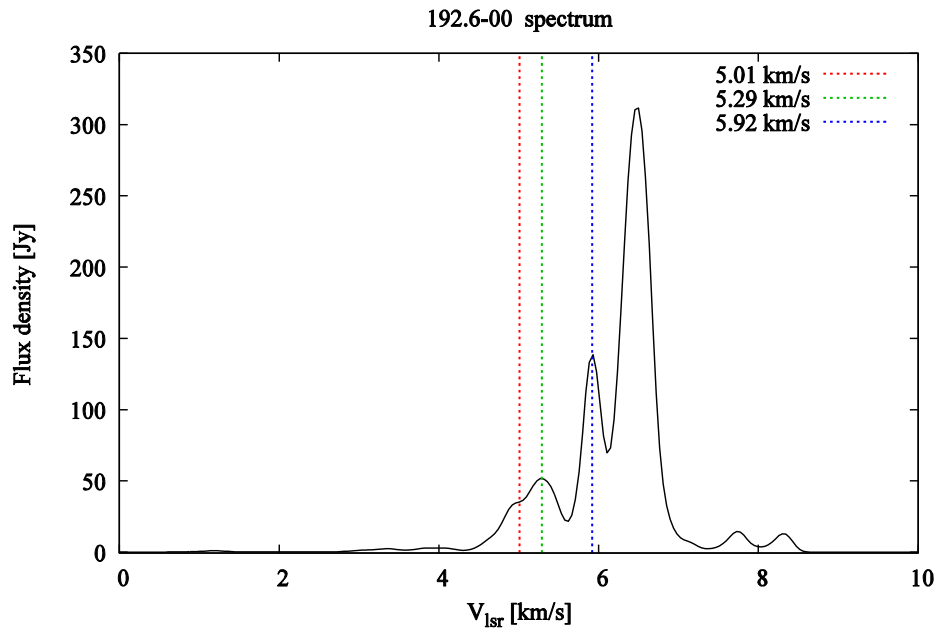


図 B.61 : G 192.6–0.05 のラインプロファイル。

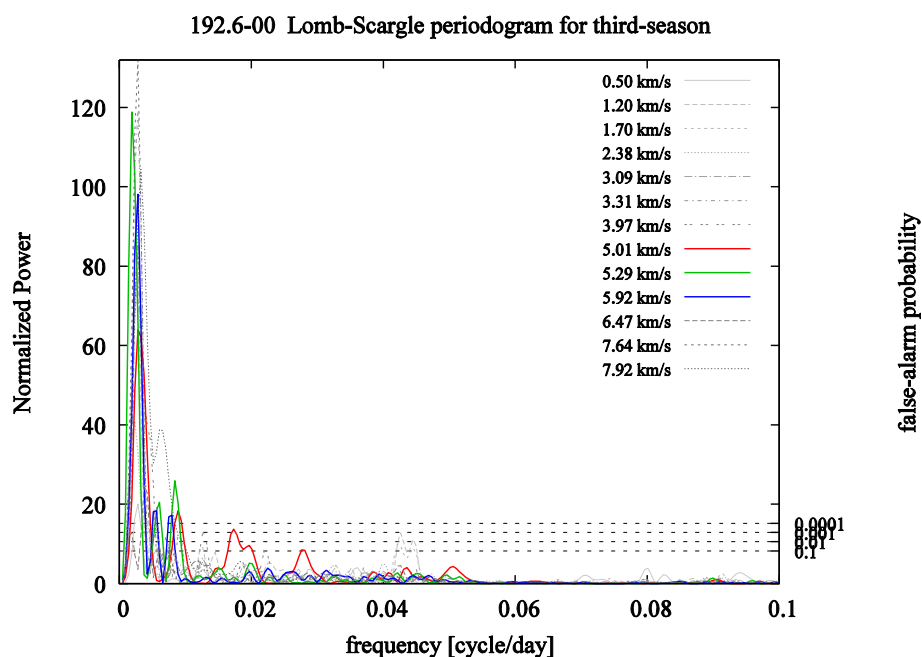


図 B.62 : G 192.6-0.05 の正規化 Lomb-Scargle ピリオドグラムのスペクトル。

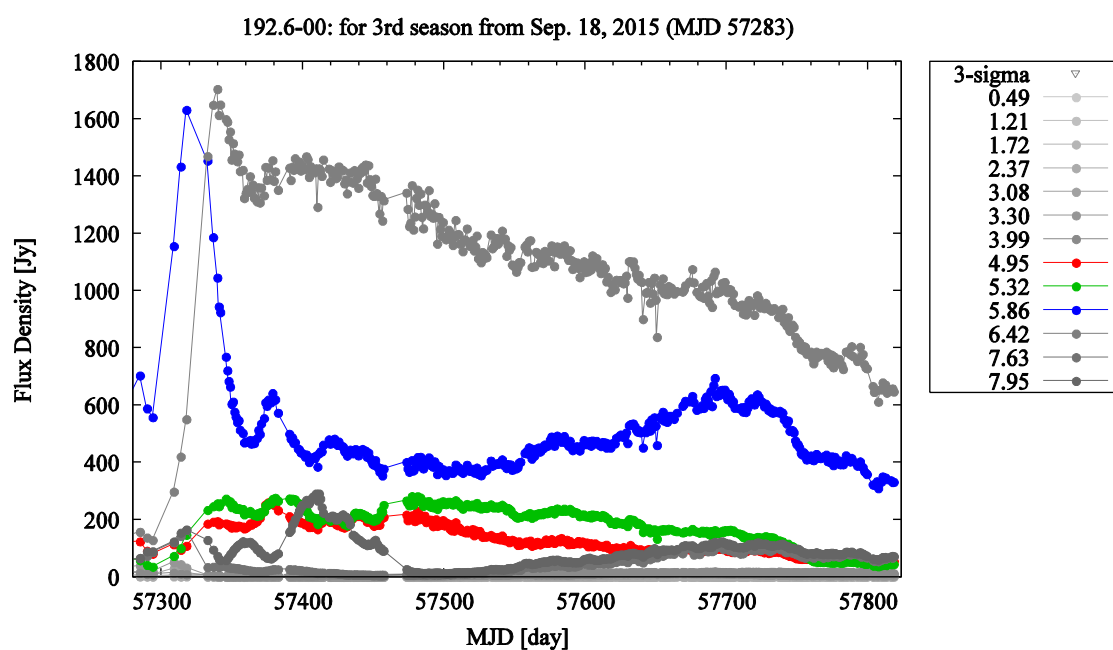


図 B.63 : G 192.6-0.05 の強度変動プロット。

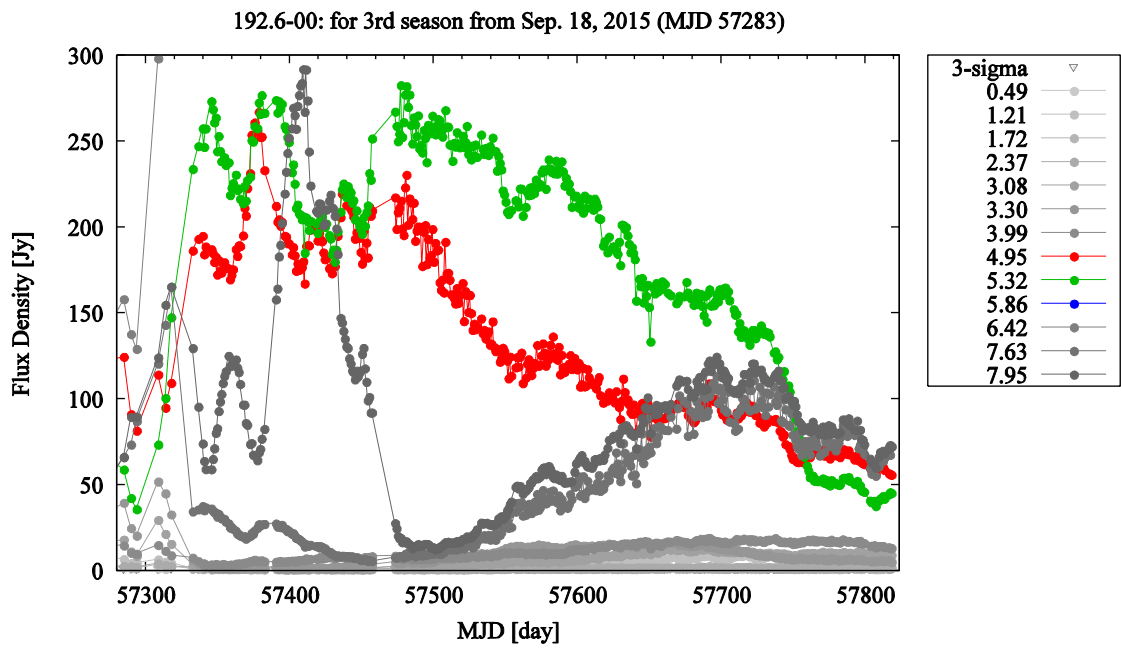


図 B.64 : G 192.6-0.05 の強度変動プロット。図 B.63 の縦軸を拡大したもの。

付録 C 全周期変動天体リスト

先行研究で検出された周期変動天体と、日立局モニター観測第 1 期・第 2 期のデータを用いた周期解析で検出された周期変動天体、そして第 3 期のデータを用いた本解析で検出された周期変動天体 (全 62 天体) についてのリストを以下の表 C.1 に示した。この表には、天体名 (略称) と周期変動が検出された視線速度成分を示し、さらに、先行研究、または日立局モニター観測データをを用いた周期解析で導出された周期を示した。なお、日立局モニター観測第 1 期・第 2 期のデータを用いた周期解析は、国立天文台の杉山孝一郎氏によって行われた。

この表の「視線速度」の列において、先行研究で検出された周期変動成分を赤で、日立局モニター観測第 1 期・第 2 期のデータを用いた周期解析で検出された周期変動成分を青で、第 3 期のデータを用いた本解析で新検出の周期変動成分を黒で示した。また、「備考 1」の列には新検出かどうかを小文字のアルファベットで示した。それぞれ以下の意味を表す。

- a. 周期変動が新検出された。
- b. 既知とは別の周期が導出された。
- c. 既知と同じ周期が導出された。
- d. 既知の周期に対応する周波数の高調波にあたる周期が導出された。

さらに、「備考 2」の列には、既知の周期変動天体にもかかわらず本解析で非検出となった成分について、なぜ非検出となったか、その理由を小文字のローマ数字で示した。それぞれ以下の意味を表す。

- i. 日立局第 3 期モニター観測対象ではない天体であった。
- ii. 周期変動天体の選出条件 2) を満たさなかった。
- iii. 周期性が失われた可能性がある。

表 C.1：全周期変動天体リスト。

天体名	視線速度 V_{lsr} [km/s]	先行研究で検出	第 1 期・第 2 期 で検出	本解析（第 3 期）で 検出／非検出		
		周期 T [day] 文献	周期 T [day] 備考 1	周期 T [day]	備考 1	備考 2
0.167-04	13.70			47.6	a	
6.189-03	-37.19, -36.20, -35.70, -34.48		180 a	非検出		ii
	-31.33			163.9	a	
9.621+01	1.227	243.3 [5], [8]		119.0	d	
	1.841			非検出		iii
	2.237			112.7	d	
	3.027			119.0	d	
	-0.21		133 a	非検出		iii
	7.28		167 a	非検出		iii
	8.74		120 a	53.6	d	
10.88+01	15.22			106.7	a	
12.02-00	110.59		147 a	非検出		i
	111.19, 111.84		213 a	非検出		i
12.19-00	50.91		121 a	非検出		i
12.20-01	17.34		197 a	非検出		ii
12.68-01	52.24, 54.32, 54.94, 55.50, 57.02, 57.58, 58.42, 58.14, 59.04, 59.15, 60.73	307 [5]		非検出		ii

	51.08, 59.86	307 [5]	249 b	非検出 ii
12.88+04	31.74, 31.85, 32.75, 33.43, 33.65, 34.66, 36.57, 37.81, 38.71, 39.16	29.5 [7]		29.6 c
12.90-02	36.95			25.4 a
14.23-05	25.30		23.9 a	23.8 c
14.33-06	21.55			71.1 a
16.83+00	64.93		197 a	非検出 i
19.75-01	122.95			21.9 a
20.24+00	71.45		291 a	非検出 ii
22.36+00	78.95, 79.52, 80.09, 81.45, 83.42	178.2 [20], [22]		非検出 ii
24.14+00	19.29		189 a	非検出 ii
24.54+03	106.35, 106.87, 107.72, 109.29, 110.02			163.9 a
24.64-03	35.59			15.2 a
24.93+00	46.62			133.9 a
25.41+01	94.68	245 [22]		非検出 i
	97.06		211 b	非検出 i
25.65+10	40.39, 40.96, 41.85,		165 a	非検出 i

	42.60			
25.82-01	99.57		165 a	71.0 b
26.52-02	109.58		172 a	非検出 ii
28.02-04	17.00, 24.70		111 a	112.1 c
	16.19			112.1 a
28.28-03	41.46		249 a	非検出 i
30.40-02	105.03		220 a	非検出 ii
	98.13			112.1 a
	100.41			112.1 a
32.03+00	94.14			55.5 a
	92.75, 94.82, 95.51			57.0 a
32.11+00	92.83			56.1 a
33.40+00	97.56, 97.84, 98.62, 99.04, 99.44, 104.14, 104.89, 105.24, 105.68, 107.58			31.4 a
33.64-02	58.92		201 a	153.0 b
	60.92		119 a	142.8 b
	59.29			142.8 a
	59.62			52.2 a
	60.32			142.8 a
	62.69			126.0 a
	63.19			133.9 a
33.86+00	60.88, 63.46			73.5 a
34.39+02	55.67,		29.2 a	29.3 c

	60.46, 62.53			
	61.45			29.3 a
35.02+03	46.24		252 a	非検出 ii
35.79-01	61.55, 62.02			33.4 a
36.70+00	53.11		53.4 a	52.0 c
	53.65			非検出 ii
	55.10, 62.11			53.3 c
37.47-01	54.49			68.7 a
37.54+02	79.8	237 [1]		非検出 iii
	86.4			非検出 ii
	87.8			125.3 d
	87.40			125.3 a
45.47+01	59.60	195.6 [22]		非検出 ii
49.60-02	63.04			106.7 a
52.66-10	65.18			14.8 a
	56.36, 65.88			14.9 a
73.04+18	-2.59	159 [22]		152.2 c
	5.93			非検出 iii
75.76+03	-10.93, -9.44	119.9 [22]		非検出 iii
81.76+05	3.87, 4.59			163.9 a
108.7-09	-45.56		164 a	152.2 c
109.8+21	-4.66, -2.60	84-87 [21]		非検出 iii
123.0-63	-36.07, -35.50, -29.32, -28.73, -28.15			163.9 a
174.1-00	1.49		46.9 a	非検出 iii

	2.06		46.9 a	47.5 c
	3.77			112.5 a
	4.56			125.8 a
	4.77			46.5 a
183.3-05	-4.86			64.6 a
	-15.19, -14.61			68.8 a
188.9+08	8.420, 9.649, 10.439, 10.702, 11.361	395 [5], [8]		非検出 ii
	-3.82			163.9 a
192.6-00	5.01			112.3 a
	5.29			118.6 a
	5.92			125.5 a
196.4-16	14.70	668 [5]	142 b	152.4 c
	15.15			142.3 c
	15.88			66.7 d
	15.42		142 a	66.7 d
316.6-00	-22.31, -21.75, -21.19, -20.29, -19.84	321 [5]		非検出 i
328.2-05	-45.410, -44.751, -44.268, -43.259, -36.410	220.5 [5], [8]		非検出 i
331.1-02	-91.505, -90.802, -85.578, -84.920, -84.305	509 [5], [8]		非検出 i

338.9-00	-42.166, -41.946	132.8 [5], [8]		非検出	i
339.6-01	-37.661, -37.310, -36.959, -32.92	200.3 [5], [8]		非検出	i
339.9-04	-91.068, -89.400, -89.137, -88.610, -87.907, -89.400, -89.496, -89.160, -88.679, -88.583	246 [14]		非検出	i
351.7-05	1.73		292 a	非検出	i
358.4-03	1.129, 1.700	220 [13]		非検出	i
358.9-00	-15.90		140 a	非検出	i
IRS22198	-16.89, -16.06, -10.91, -9.19, -8.51, -7.33	34.6 [3]		34.5 c	

参考文献

- [1] Araya, E. D., et al. 2010, *ApJL*, 717L, 133A
- [2] Barrett, A. H., et al. 1971, *ApJ*, 168L, 101B
- [3] Fujisawa, K., et al., 2014, *PASJ*, 66, 78F
- [4] Goedhart, S., et al. 2003, *MNRAS*, 339, L33G
- [5] Goedhart, S., et al. 2004, *MNRAS*, 355, 553G
- [6] Goedhart, S., et al. 2007, *IAUS*, 242, 97G
- [7] Goedhart, S., et al. 2009, *MNRAS*, 398, 995G
- [8] Goedhart, S., et al. 2014, *MNRAS*, 437, 1808G
- [9] Green, J. A., & McClure-Griffiths, N. M., 2011, *MNRAS*, 417, 2500G
- [10] Guzman, A. E. et al. 2012, *ApJ*, 753, 51G
- [11] Inayoshi, K., et al. 2013, *ApJ*, 769L, 20I
- [12] Lomb, N. R., 1976, *Ap&SS*, 39, 447L
- [13] Maswanganye, J. P., et al. 2015, *MNRAS*, 446, 2730M
- [14] Maswanganye, J. P., et al. 2016, *MNRAS*, 456, 4335M
- [15] Menten, K. M., 1991a, *ASPC*, 16, 119M
- [16] Menten, K. M., 1991b, *ApJ*, 380L, 75M
- [17] Menten, K. M., 1991b, *ApJ*, 401L, 39M
- [18] Reid, M. J., et al. 2014, *ApJ*, 783, 130R
- [19] Scargle, J. D., 1982, *ApJ*, 263, 835S
- [20] Szymczak, M., et al. 2011, *A&A*, 531, L3S
- [21] Szymczak, M., et al. 2014, *MNRAS*, 439, 407S
- [22] Szymczak, M., et al. 2015, *MNRAS*, 448, 2284S
- [23] 安井靖堯, 2016, 茨城大学理工学研究科修士論文
- [24] 祖父江義明, 他 (2007) 「シリーズ現代の天文学 5 “銀河Ⅱ—銀河系”」日本評論社
- [25] 福井康雄, 他 (2009) 「シリーズ現代の天文学 6 “星間物質と星形成”」日本評論社
- [26] 中井直正, 他 (2009) 「シリーズ現代の天文学 16 “宇宙の観測Ⅱ—電波天文学”」日本評論社