

2015 年度 卒業論文

銀河系遠方腕におけるメタノールメーザーの探査

指導教員 百瀬宗武、米倉覚則

茨城大学 理学部理学科 学際理学コース

学籍番号 12S6009F 亀海真美

要旨

太陽質量の 8 倍以上の大質量星が形成されるときにはメタノールメーザーという特有の現象が見られる。一般にメーザーは輝度が非常に高いため、非常に優れた空間分解能を達成できる VLBI 観測が可能である。Sun et al.(2015)[1]は銀河系の星が生まれる場所である分子雲を効率的に検出できる一酸化炭素分子を用いて、中国・デリンハにある紫金山天文台の直径 13.7m の望遠鏡で観測を行った。彼らは空間的な分布図を作成し、銀経 100-150° までの銀河系遠方腕と思われる領域に存在する 72 個の分子雲を検出した。しかしながら彼らの観測では運動学的距離を用いており、この距離は銀河系の回転モデルを仮定しているため距離の推定誤差が大きいため、年周視差など直接的な方法で距離を導出する必要がある。そこで、未だ構造が明確になっていない銀河系遠方腕のメタノールメーザーを探索し、最終的には距離を測定可能とすることで、銀河系の渦状構造の推定を最終目的にすえた。その第一歩として本研究では、国立天文台が所有し茨城大学が運用する日立・高萩の 32m 電波望遠鏡を用いて CO 分子雲をターゲットとした、6.7GHz メタノールメーザーのサーベイを行った。結果として 72 天体全てでメタノールメーザーと思われる強い電波は検出されなかった。非検出の要因としては、(1) 目的とした 72 天体がメタノールメーザーを発するような大質量星を形成している天体ではなかった、ということと、(2)メーザーは発していたがとても弱く、感度が足りずに検出されなかった、という 2 点が考えられる。(1)については、72 天体について分子雲の平均数密度を求めたところ 65 個 cm^{-3} となり、太陽系近傍の大質量星形成が起きている分子雲の密度 $10^3\text{-}10^4$ 個 cm^{-3} と比べて小さいことが分かった。したがって、メーザーを発するような大質量星を形成している分子雲ではなかった可能性が考えられる。(2)については、これまでに検出されたメタノールメーザー源のうち、年周視差測定によって距離が正確に求められているもの、および、銀河系の第 2 象限あるいは第 3 象限に位置するもの、合計 76 個を今回観測した天体の平均的な距離 10kpc に持って行ったとした場合のフラックス密度の頻度分布図を作成したところ、平均 30.5Jy という値を得た。10kpc の距離にあると仮定した 76 天体のうち 1.6Jy 以上のフラックス密度を持つものは 43 個、つまり 56.6%であった。今回の 72 天体についても全てメタノールメーザーが付随し、そのフラックス密度の頻度分布が既知のメタノールメーザー源と同じであると仮定すると、1.6Jy 以上のフラックス密度を持つと期待される天体は 72 天体のうち 41 天体と推測されるため、本研究でも検出されるはずだと考えられる。したがって、今回対象とした 72 天体にも既に検出されているものと同等の強度をもつメタノールメーザーが付随しているという仮定が誤りだった可能性が考えられる。今回非検出の要因として感度が足りなかったことを挙げたが、今後は積分時間を長くすることでより弱いメーザー源の探索が可能になると期待できる。

目次

第 1 章 研究背景と研究目的	1
第 2 章 方法	2
2.1 観測方法	
2.2 解析方法	
第 3 章 結果と考察	3
3.1 結果	
3.2 考察	
第 4 章 まとめ	5
謝辞	5
参考文献	5
付録資料	6

第1章 研究背景と研究目的

太陽質量の 8 倍以上の大質量星が形成されるときにはメタノールメーザーという特有の現象が見られる。一般にメーザーは輝度が非常に高いため、非常に優れた空間分解能を達成できる VLBI(Very Long Baseline Interferometry)観測が可能である。VLBI 観測は天体の固有運動や年周視差の測定に役立つ手法である。

Sun et al.(2015)は銀河系の星が生まれる場所である分子雲を効率的に検出できる一酸化炭素分子を用いて、中国・デリンハにある紫金山天文台の直径 13.7m の電波望遠鏡で観測を行った。電波望遠鏡の空間分解能は 58 秒角である。観測ターゲットは、銀河の第二象限における銀河中心からの距離が 15-19kpc の領域が選定された(Fig.1 参照)。距離については、観測結果を用いて検出された一酸化炭素分子の視線速度から運動学的距離を求めた。彼らは空間的な分布図を作成し、銀経 100-150° までの銀河系遠方腕と思われる領域に存在する 72 個の分子雲を検出した。しかしながら彼らの観測では運動学的距離を用いており、この距離は銀河系の回転モデルを仮定しているため距離の推定誤差が大きい。したがって、年周視差など直接的な方法で距離を導出する必要がある。

そこで本研究では未だ構造が明確になっていない銀河系遠方腕のメタノールメーザーを探索し、最終的には距離を測定可能とすることで、銀河系の渦状構造の推定を最終目的とした。

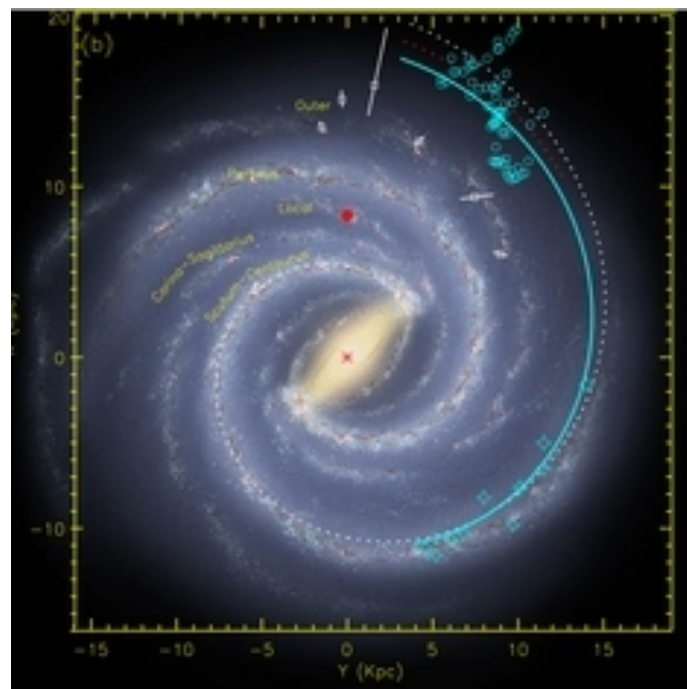


Figure 1. 観測天体の位置分布図

第2章 方法

2.1 観測方法

本研究では、国立天文台が所有し茨城大学が運用する日立・高萩の 32m 電波望遠鏡を用いて Sun et al.(2015)で検出された CO 分子雲をターゲットとし、6.7GHz メタノールメーザーのサーベイを行った。ターゲットは太陽からの距離が 10kpc 前後の計 72 天体で、各天体の ON 点・OFF 点で 300second ずつ積分時間をとった。32m 電波望遠鏡の視野は 6.7GHz において約 4.6 分角であるため、CO 分子雲が存在する領域は 1 回の観測でカバーできる。

2.2 解析方法

得られたデータはそれぞれ gnuplot を用いてプロットした。解析にあたり元データによるスペクトル図とは別に、S/N を向上させるために 5ch で平均したスペクトル図も作成した(付録資料参照)。年周視差の計測に必要なメーザー天体のフラックス密度の閾値としては VERA(VLBI Exploration of Radio Astrometry)のみの観測で位相補償を適用した場合を想定し、1.6Jy 以上とした。

※「位相補償を適用した場合」とは、「完璧に位相補償が成功した場合の理想のイメージ感度」を元になっている。

7 σ を参照とした閾値の導出は以下の通りである。

$$\frac{SN*SEFD}{\sqrt{N*(N-1)*B*t}} \quad - (1)$$

ここで、SN は信号雑音強度比(signal-to-noise ratio)、SEFD は System Equivalent Flux Density(Jy)、N は観測に参加するアンテナの台数、B は分光後の有効帯域(Hz)、t はイメージングのための積分時間(秒)である。計算すると、

$$\frac{7*2600}{\sqrt{4*3*0.98*10^3*10800}} = 1.61 \text{ [Jy]} \quad - (2)$$

ただし SN=7、SEFD=2600 [Jy]、N=4、B=0.98 [kHz]、t=10800 [sec]とした。

第3章 結果と考察

3.1 結果

解析の結果、72 天体全てでメタノールメーザーと思われる強い電波は検出されなかった(Fig.2 参照)。非検出の要因としては、

- (1)目的とした 72 天体がメタノールメーザーを発するような大質量星を形成している天体ではなかった
 - (2)メーザーは発していたがとても弱く、感度が足りずに検出されなかった
- という 2 点が考えられる。

3.2 考察

(1)について

まずSun et al.(2015)の天体質量と距離のデータを用いて各72天体の質量密度を求めた後、それぞれを水素原子の質量と水素分子1個あたりの平均分子量2.8を掛けた量で割って分子雲の平均分子数密度を求めた。ここで水素分子5個に対してヘリウム分子1個が存在すると仮定した。分子1個当たりの平均分子量は2.33である。その結果平均分子数密度は65個 cm^{-3} となり、太陽系近傍の大質量星形成が起こっている分子雲の密度 $10^3\text{-}10^4\text{個cm}^{-3}$ [2]と比べて小さいことが分かった(Fig.3参照)。

したがって、メーザーを発するような大質量星を形成している分子雲ではなかった可能性が考えられる。

(2)について

これまでに検出されたメタノールメーザー源のうち、年周視差測定によって距離が正確に求められているもの、および、銀河系の第2象限あるいは第3象限に位置するもの、合計 76 個[3]を今回観測した天体の平均的な距離 10kpc に持っていったとした場合のフラックス密度の頻度分布図を作成したところ、平均 40.6Jy という値を得た(Fig.4 参照)。

10kpc の距離にあると仮定した場合、前述の閾値 1.6Jy 以上のフラックス密度を持つものは 43 個、つまり 56.6%であった。今回の 72 天体についても全てメタノールメーザーが付随し、そのフラックス密度の頻度分布が既知のメタノールメーザー源と同じであると仮定すると、1.6Jy 以上のフラックス密度を持つと期待される天体は 72 天体のうち 56.6%のおよそ 41 天体と推測されるため、本研究でもメタノールメーザーは検出されるはずだと考えられる。

したがって、今回対象とした 72 天体にも既に検出されているものと同等の強度をもつメタノールメーザーが付随しているという仮定が誤りだった可能性が考えられる。

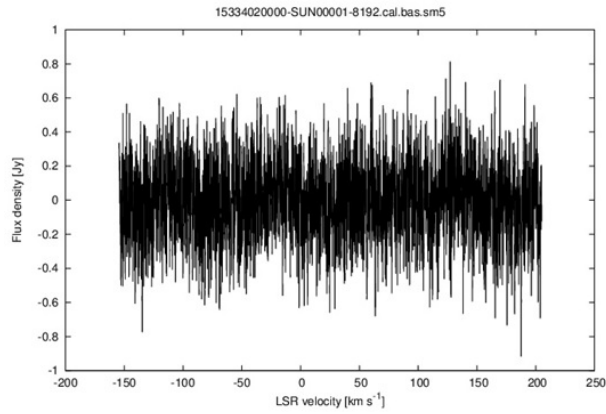


Figure 2. 非検出のスペクトルの一例
Sun+(15), 表 1 参照 : G 101.992+3.016
(5ch でスムージング後)

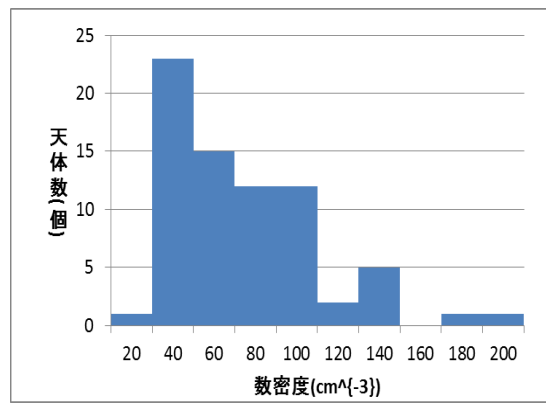


Figure 3. 72 天体の分子雲の数密度

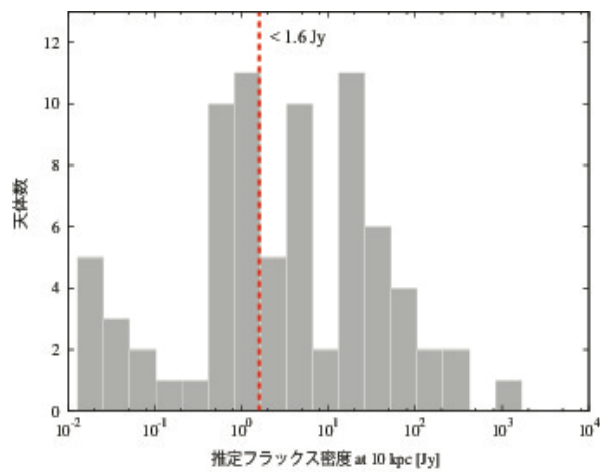


Figure 4. 既知のメタノールメーザー源のうち 76 天体(本文参照)が
10kpc の距離にあると仮定した場合のフラックス密度の分布

第4章 まとめ

本研究における Sun et al.(2015)をもとに観測した 72 天体は全てメタノールメーザーが非検出であった。非検出の要因として次の 2 点が考えられる。

(1)72 天体がメタノールメーザーを発するような大質量星を形成している天体ではなかった。

(2)メタノールメーザーは発していたがとても弱く、感度が不十分で検出されなかった。

今回非検出の要因として感度が足りなかったことを挙げたが、今後は積分時間を長くすることでより弱いメーザー源の探査が可能になると期待できる。

謝辞

本研究において終始適切な助言を賜り、ご丁寧に指導して下さった、米倉覚則准教授、杉山孝一郎さん、百瀬宗武教授に深く感謝いたします。また、ご協力していただきました電波天文観測研究室の皆様にも感謝いたします。

参考文献

- [1] Yan Sun, et al.(2015), “A Possible Extension of The Scutum – Centaurus Arm Into The Outer Second Quadrant,” *The Astrophysical Journal Letters*, 798(2), L27
- [2] 福井康雄・犬塚修一郎・大西利和・中井直正・舞原俊憲・水野亮編 (2008)
「星間物質と星形成」(現代の天文学 6) pp.41. 日本評論社
- [3] (a) Caswell, J. L., et al. (2010), “The 6-GHz methanol multibeam maser catalogue - I. Galactic Centre region, longitudes 345° to 6° ,” *MNRAS*, 417, 1964;
(b) Green, J. A., et al., (2010), “The 6-GHz methanol multibeam maser catalogue - II. Galactic longitudes 6° to 20° ,” *MNRAS*, 409, 913; (c) Green, J. A., et al., (2012), “The 6-GHz methanol multibeam maser catalogue - IV. Galactic longitudes 186° - 330° including the Orion-Monoceros region,” *MNRAS*, 420, 3108; (d) Pandian, J. D., et al. (2011), “The Arecibo Methanol Maser Galactic Plane Survey. IV. Accurate Astrometry and Source Morphologies,” *The Astrophysical Journal*, 730, 55; (e) Xu, Y., et al. (2009), “Absolute positions of 6.7-GHz methanol masers,” *Astronomy and Astrophysics*, 507, 1117

付録資料

1.元データによるスペクトル

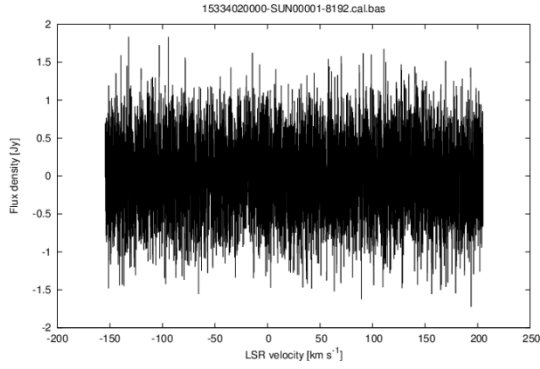


Figure 5. [1] G101.992+3.016

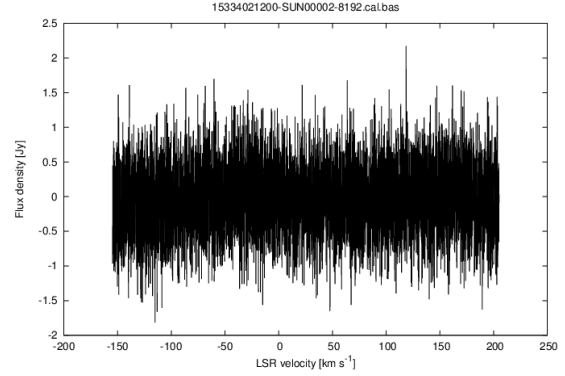


Figure 6. [2] G102.092+2.776

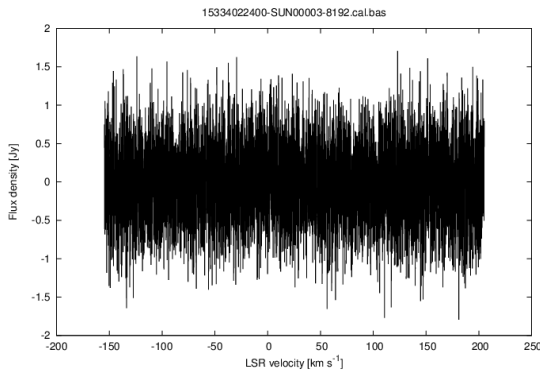


Figure 7. [3] G102.375+2.733

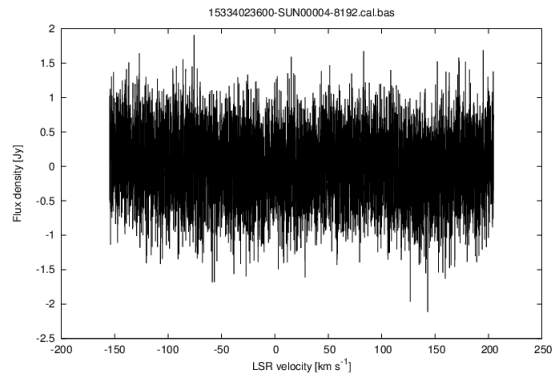


Figure 8. [4] G103.042+2.475

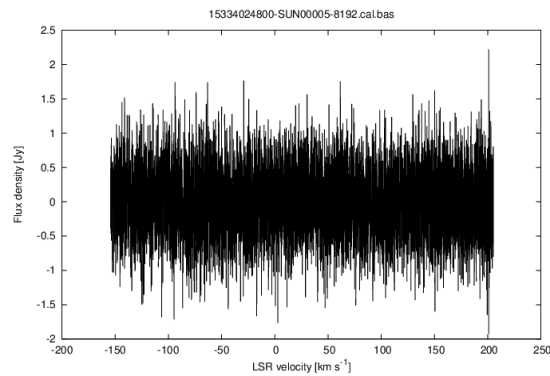


Figure 9. [5] G103.458+3.300

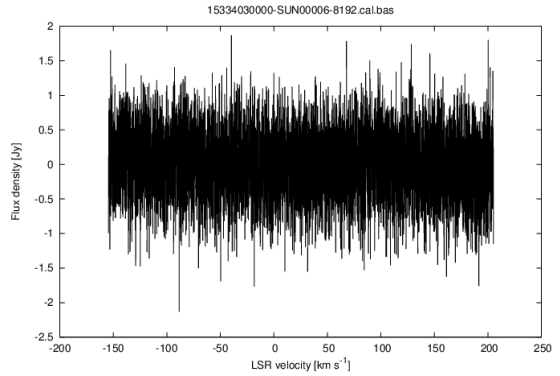


Figure 10. [6] G103.729+2.867

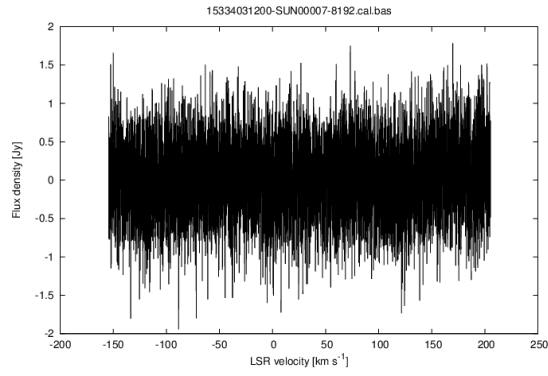


Figure 11. [7] G104.983+3.317

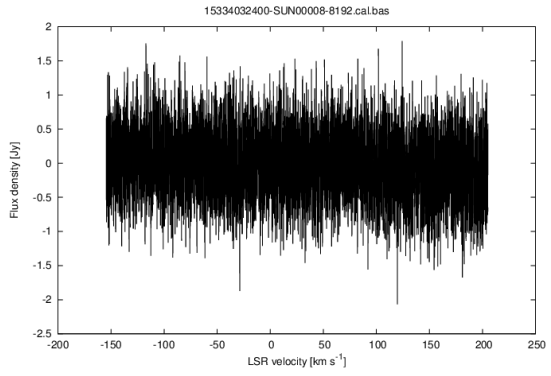


Figure 12. [8] G105.242+3.025

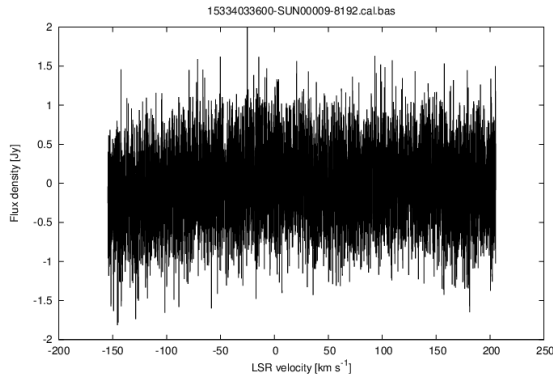


Figure 13. [9] G105.283+3.175

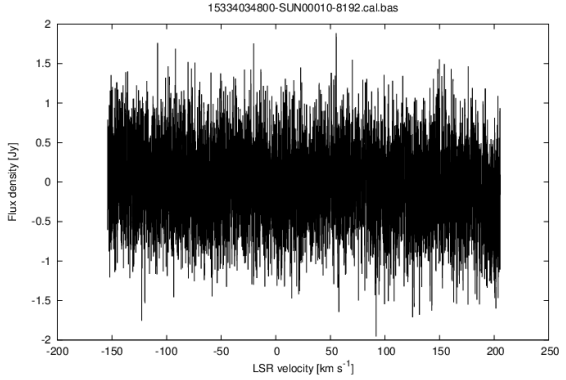


Figure 14. [10] G106.417+3.925

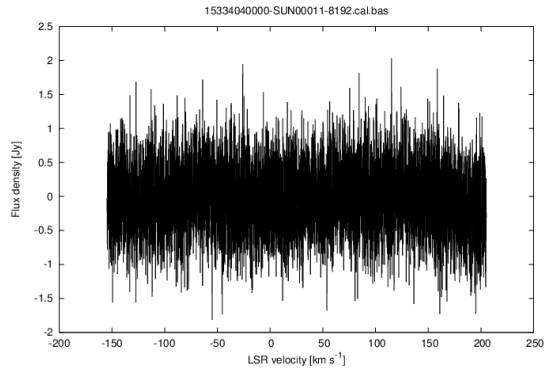


Figure 15. [11] G107.725+2.933

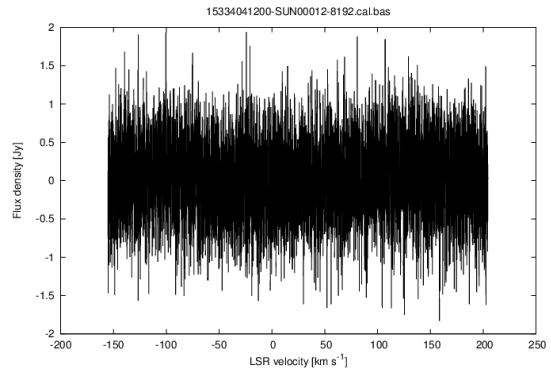


Figure 16. [12] G107.900+1.908

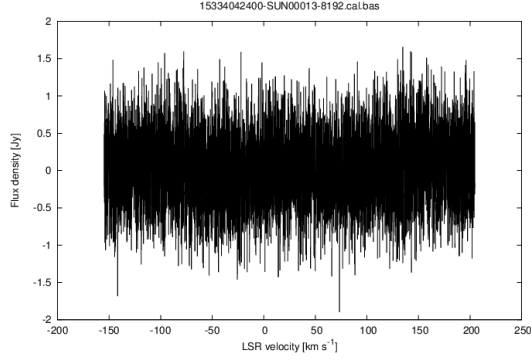


Figure 17. [13] G109.200+2.283

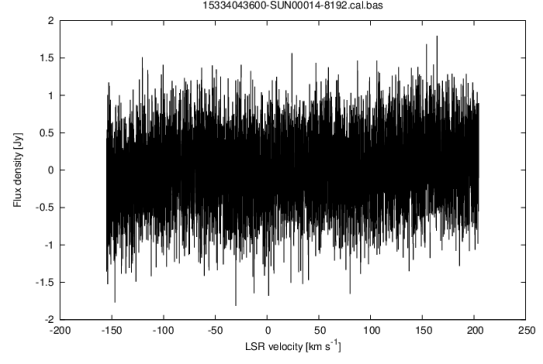


Figure 18. [14] G109.292+2.083

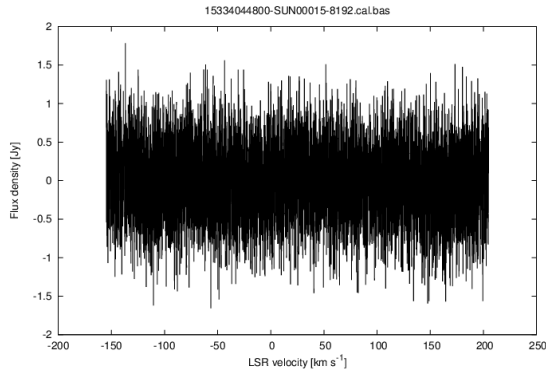


Figure 19. [15] G109.375+2.642

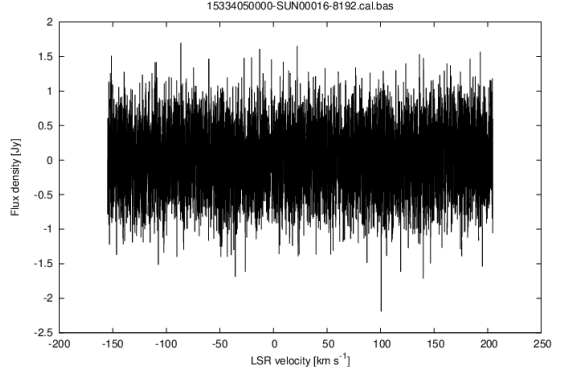


Figure 20. [16] G109.500+2.608

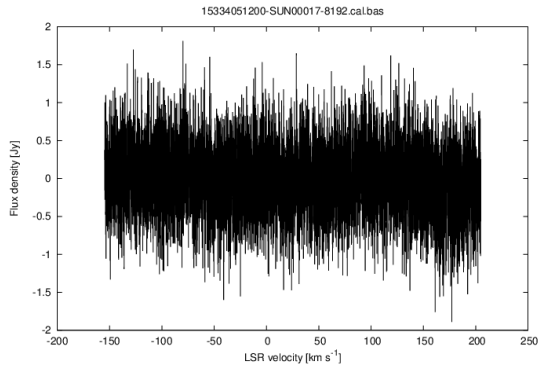


Figure 21. [17] G109.642+2.700

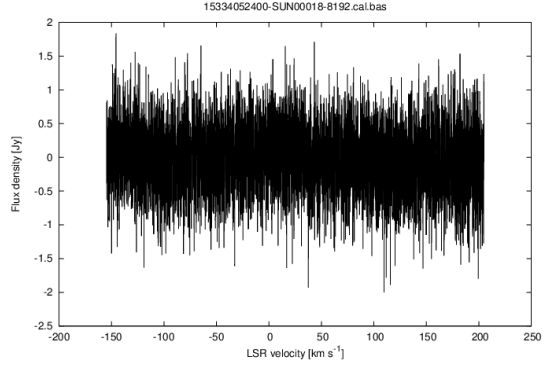


Figure 22. [18] G109.790+2.717

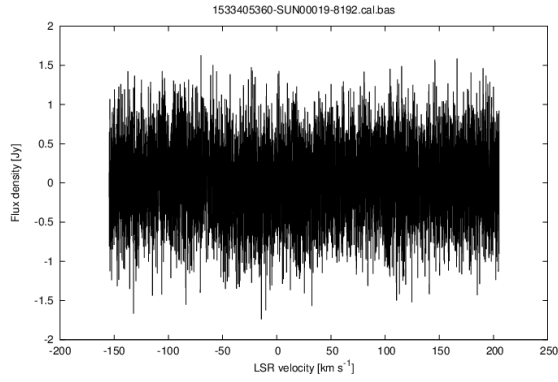


Figure 23. [19] G110.025+3.083

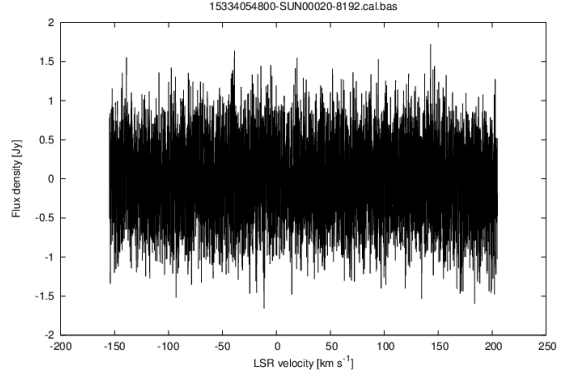


Figure 24. [20] G110.167+2.783

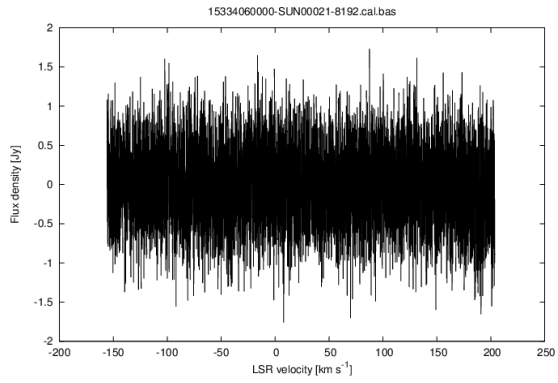


Figure 25. [21] G114.342+0.781

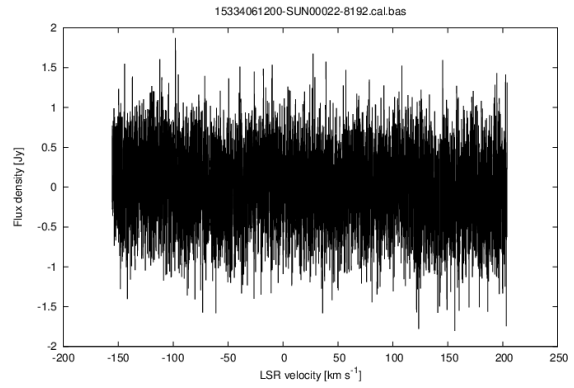


Figure 26. [22] G115.992+1.250

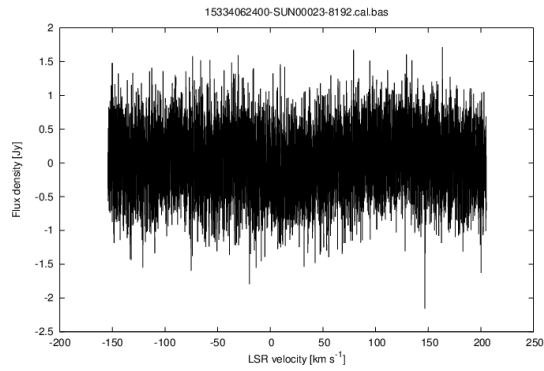


Figure 27. [23] G116.725+3.542

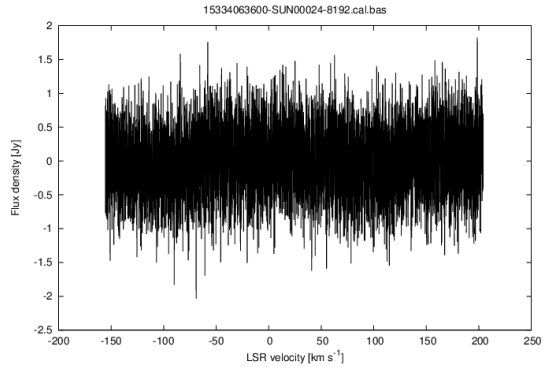


Figure 28. [24] G117.367+1.700

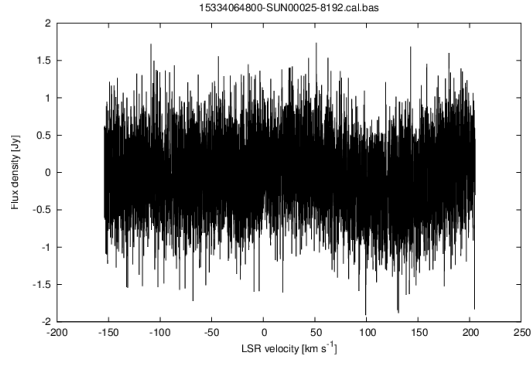


Figure 29. [25] G117.576+3.950

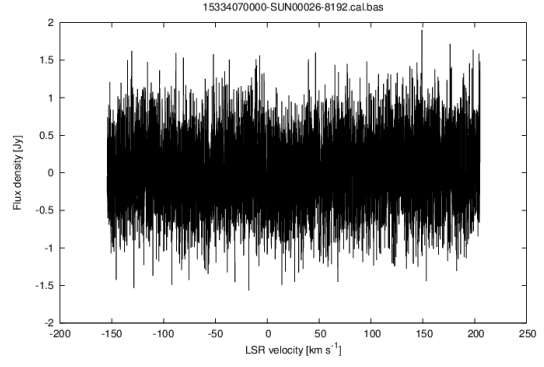


Figure 30. [26] G118.143+3.417

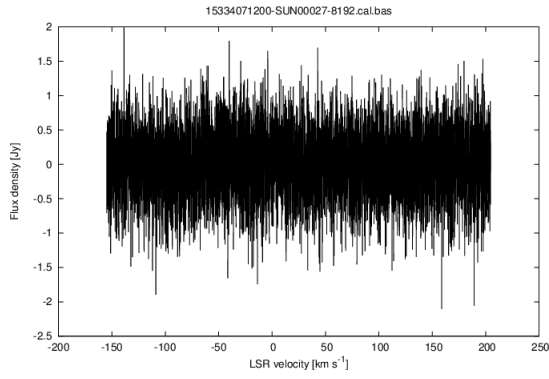


Figure 31. [27] G120.925+2.758

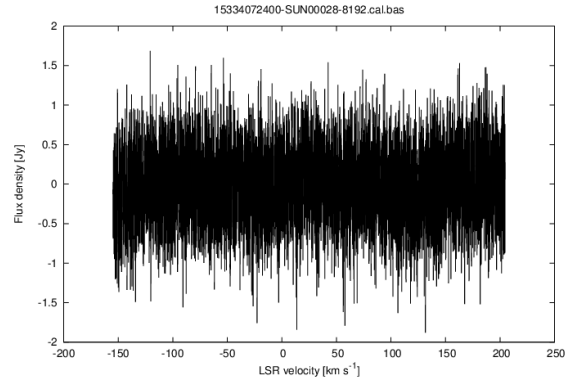


Figure 32. [28] G121.375+2.708

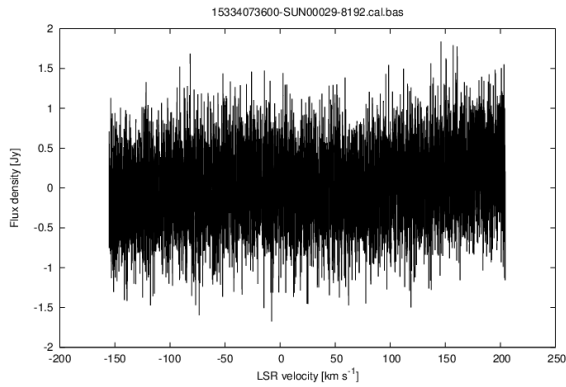


Figure 33. [29] G121.675+2.042

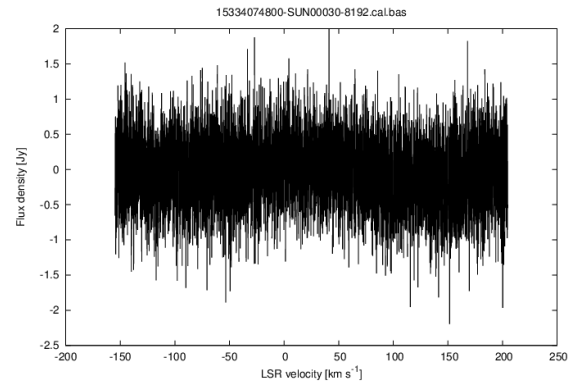


Figure 34. [30] G121.817+3.052

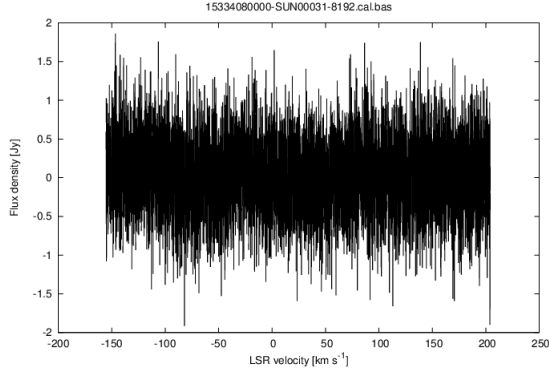


Figure 35. [31] G121.967+1.842

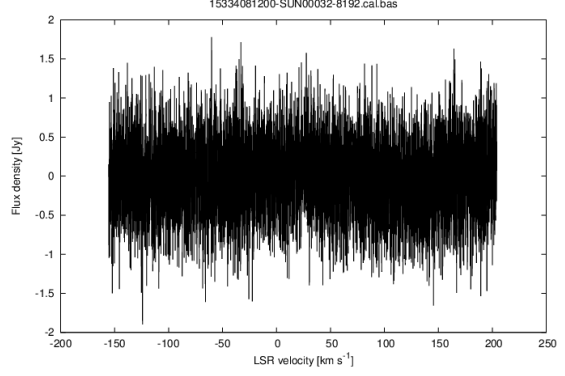


Figure 36. [32] G122.375+1.775

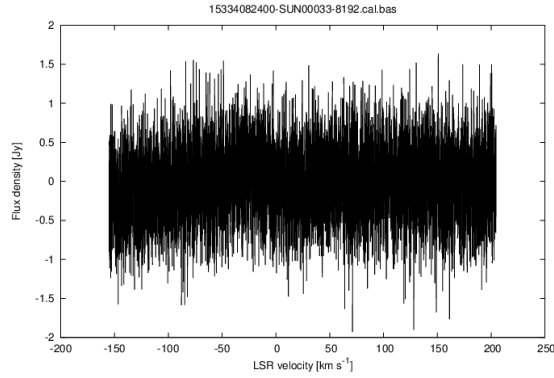


Figure 37. [33] G122.492+2.592

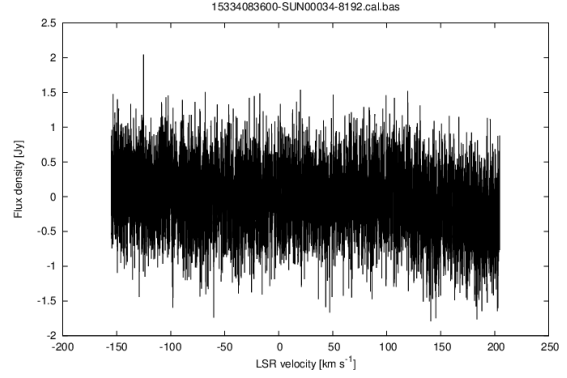


Figure 38. [34] G122.775+2.522

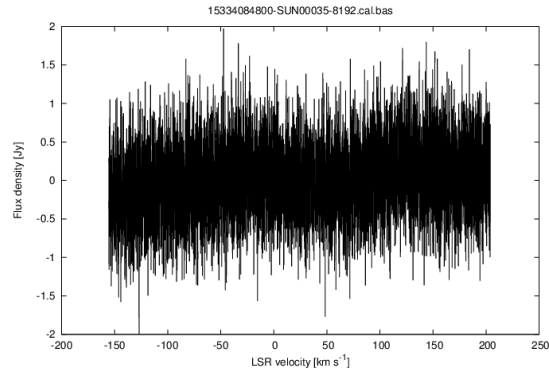


Figure 39. [35] G123.367+1.659

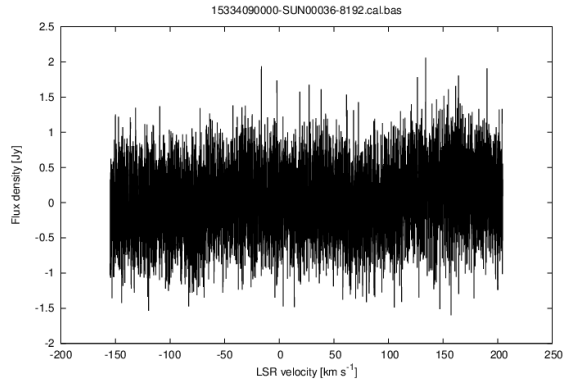


Figure 40. [36] G123.650+2.833

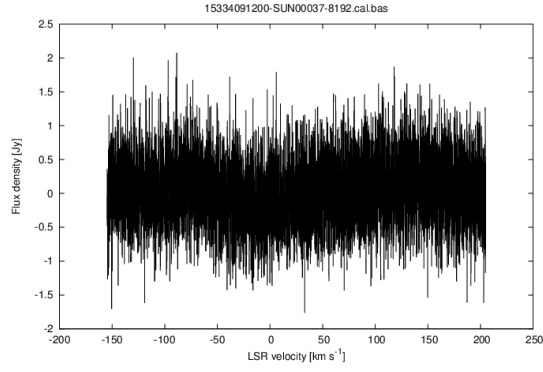


Figure 41. [37] G123.925+3.158

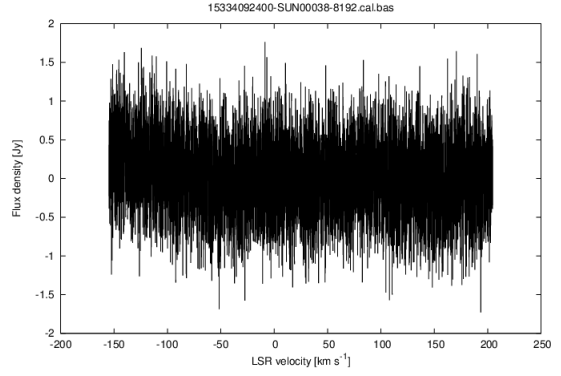


Figure 42. [38] G124.292+3.000

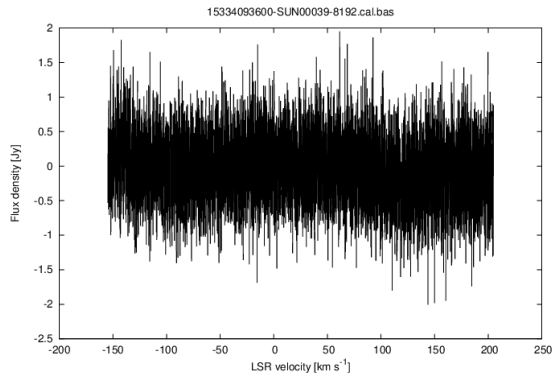


Figure 43. [39] G124.342+3.367

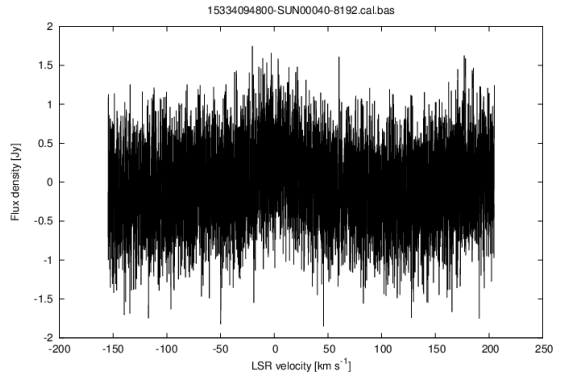


Figure 44. [40] G124.525+3.400

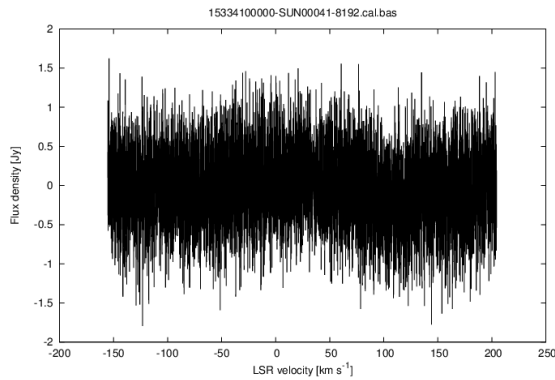


Figure 45. [41] G125.075+2.375

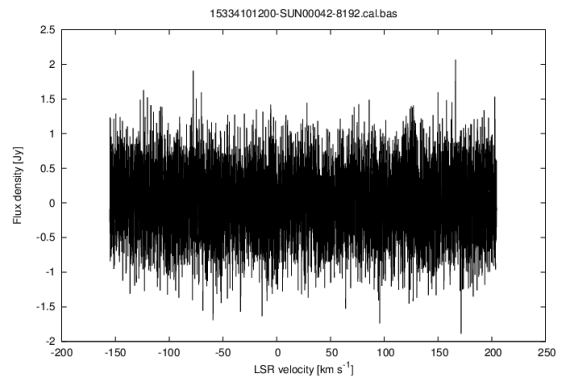


Figure 46. [42] G127.150+2.583

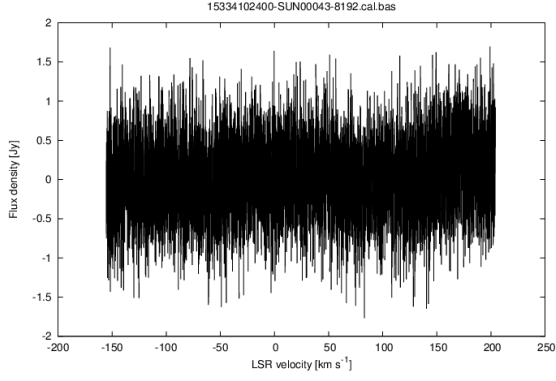


Figure 47. [43] G127.875+2.167

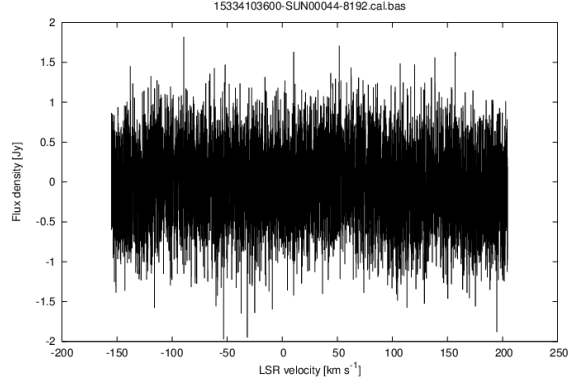


Figure 48. [44] G128.633+2.833

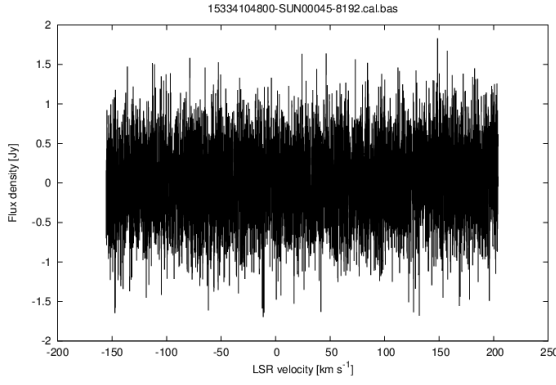


Figure 49. [45] G130.050+2.108

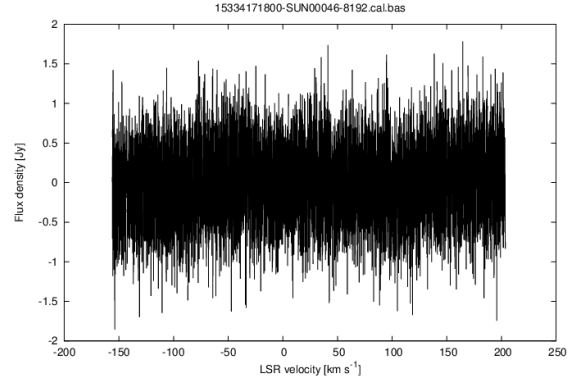


Figure 50. [46] G131.016+1.524

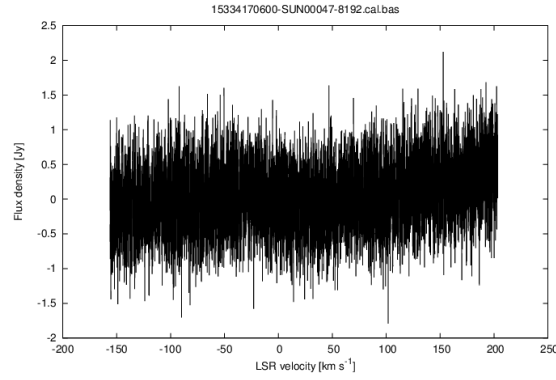


Figure 51. [4] G131.157+1.390

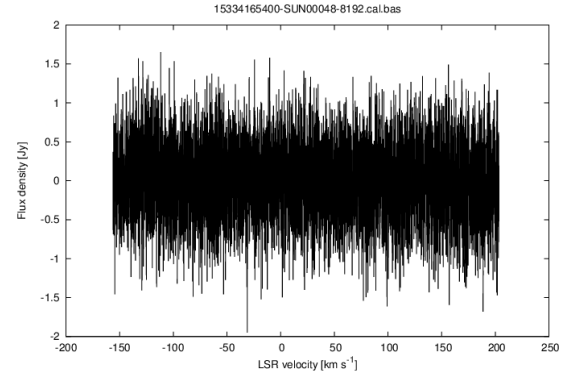


Figure 52. [48] G131.575+1.300

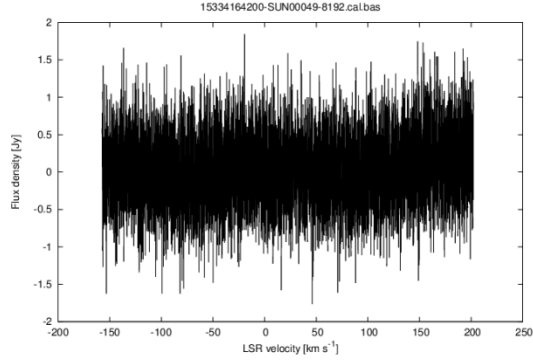


Figure 53. [49] G132.792−0.425

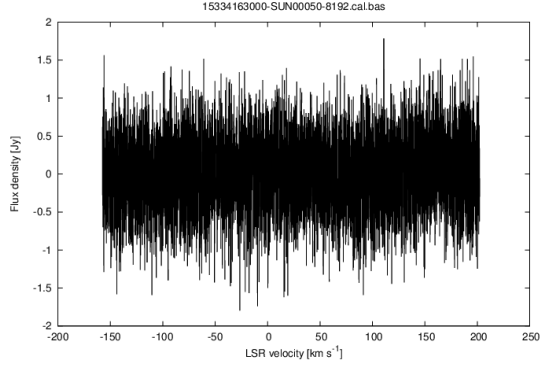


Figure 54. [50] G133.817−0.758

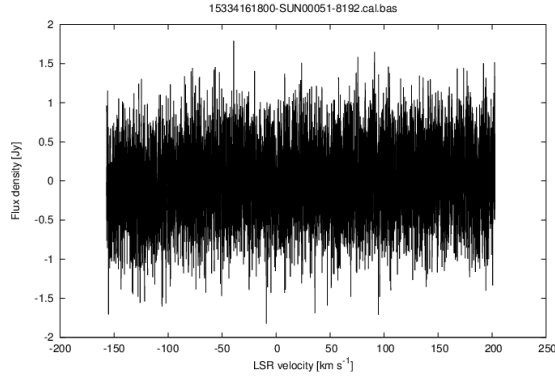


Figure 55. [51] G133.825−0.017

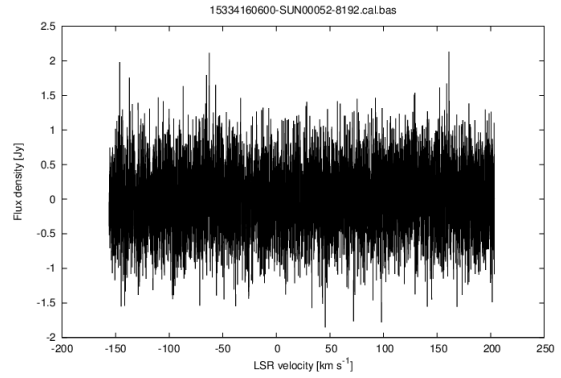


Figure 56. [52] G136.859+1.557

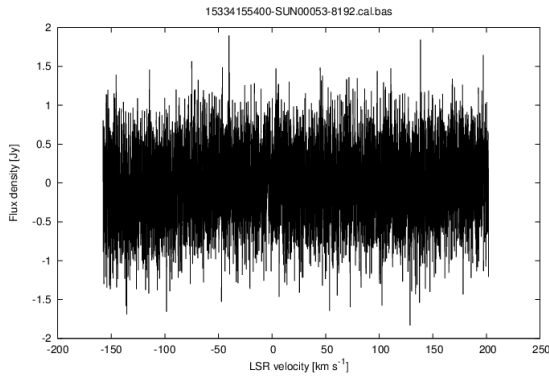


Figure 57. [53] G137.283−1.150

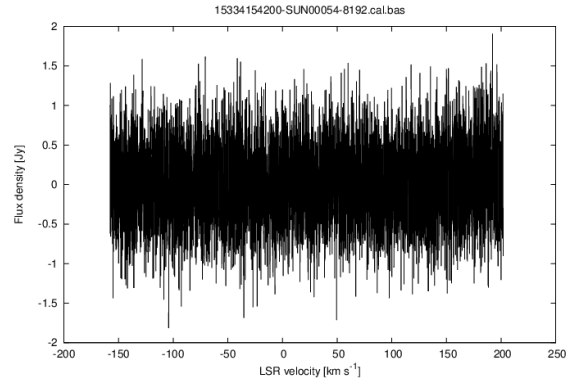


Figure 58. [54] G137.517−1.267

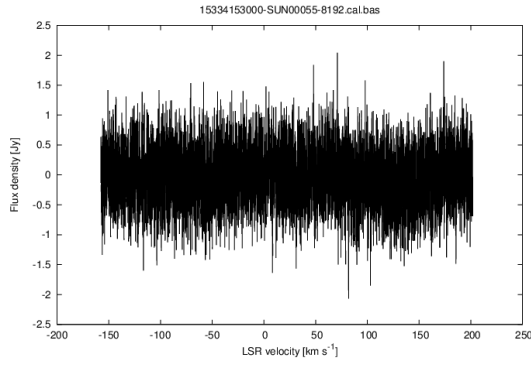


Figure 59. [55] G137.617−1.225

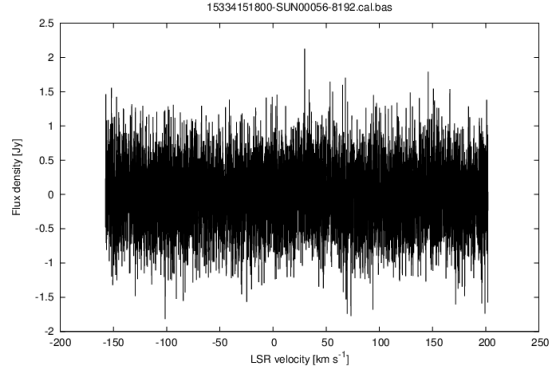


Figure 60. [56] G137.759−0.983

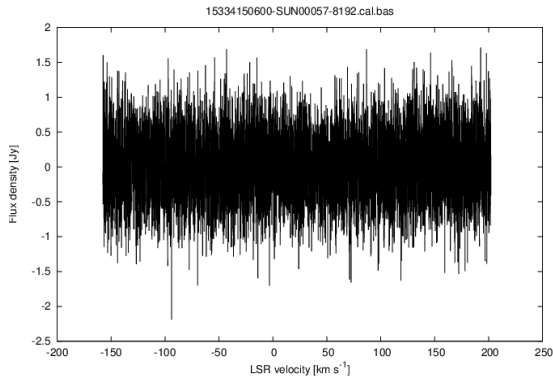


Figure 61. [57] G137.775−1.067

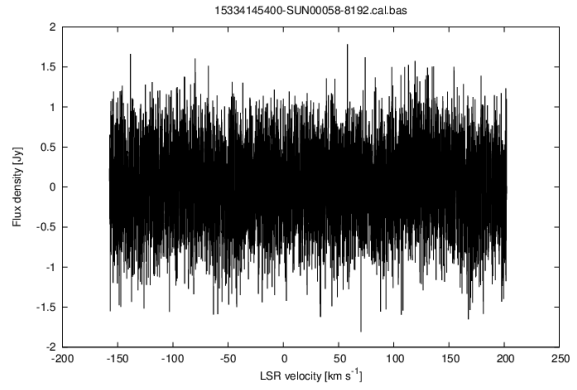


Figure 62. [58] G138.373−0.850

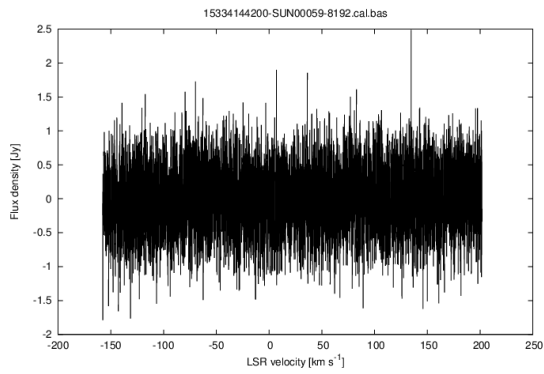


Figure 63. [59] G139.116−1.475

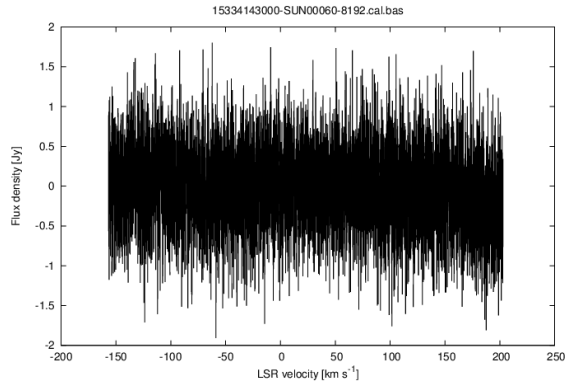


Figure 64. [60] G139.850+0.368

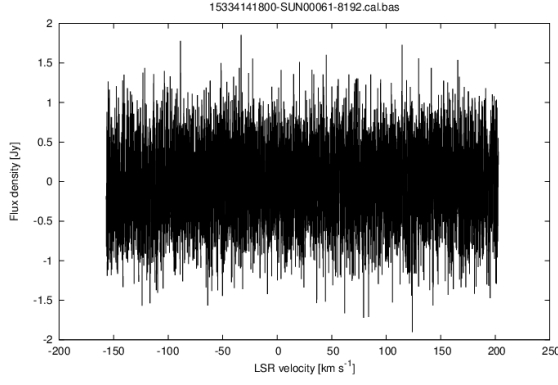


Figure 65. [61] G140.183+0.258

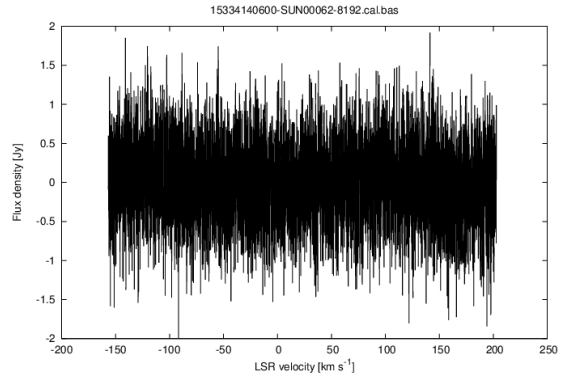


Figure 66. [62] G140.700+0.150

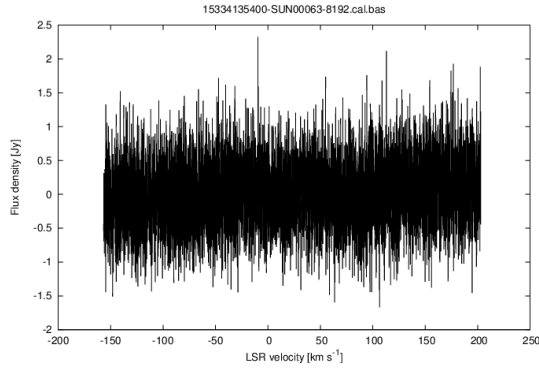


Figure 67. [63] G141.083+0.425

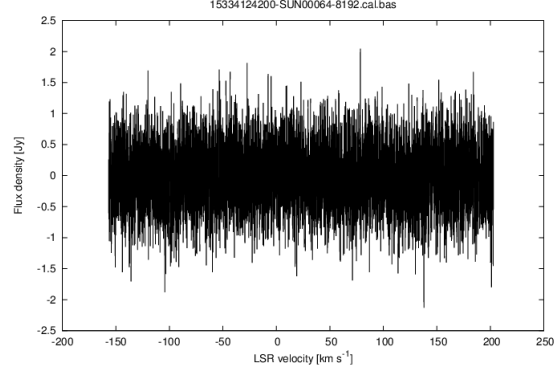


Figure 68. [64] G142.167+0.267

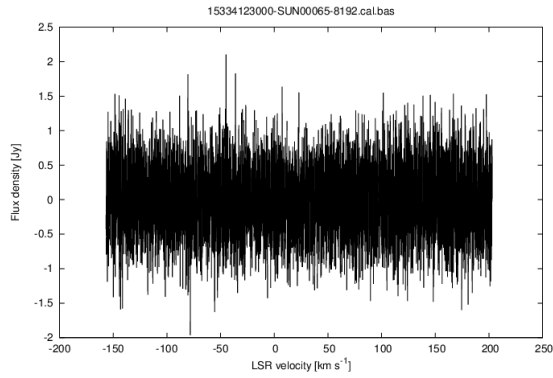


Figure 69. [65] G142.642+0.317

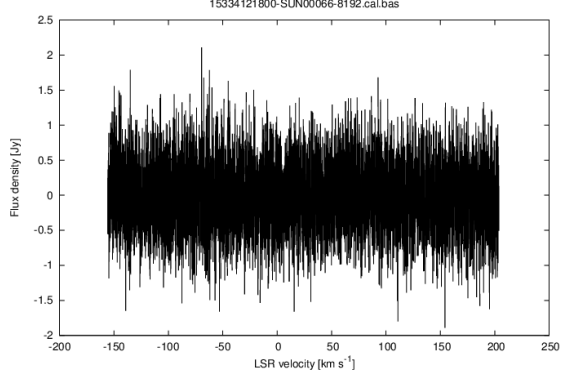


Figure 70. [66] G143.325+1.775

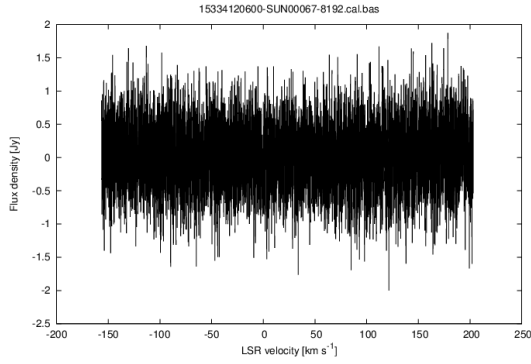


Figure 71. [67] G143.533+0.492

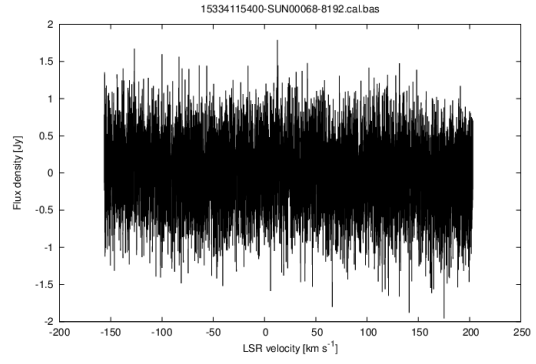


Figure 72. [68] G144.167+0.817

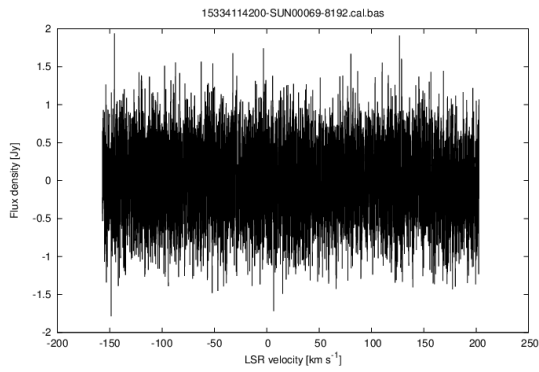


Figure 73. [69] G145.208−0.392

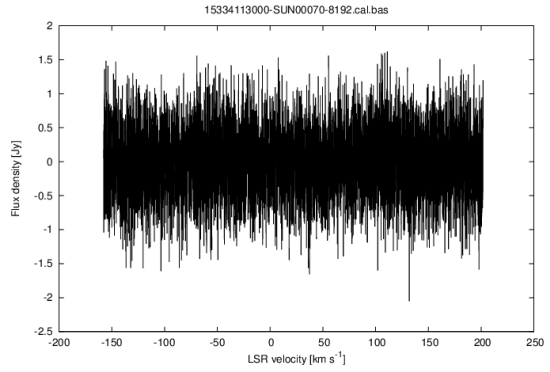


Figure 74. [70] G145.808−1.817

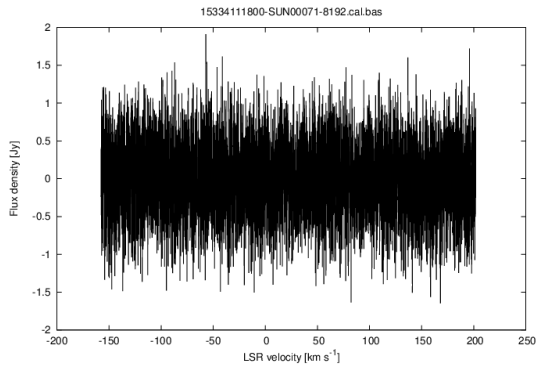


Figure 75. [71] G145.850−1.717

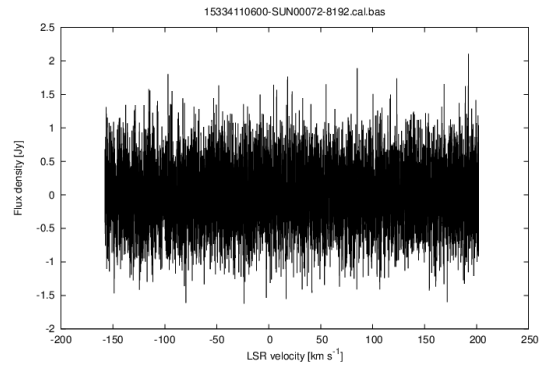


Figure 76. [72] G146.059−1.650

2.S/N 向上のため 5ch で平均したスペクトル

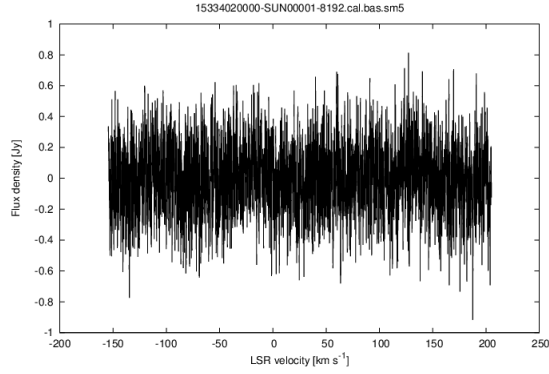


Figure 77. [1] G101.992+3.016

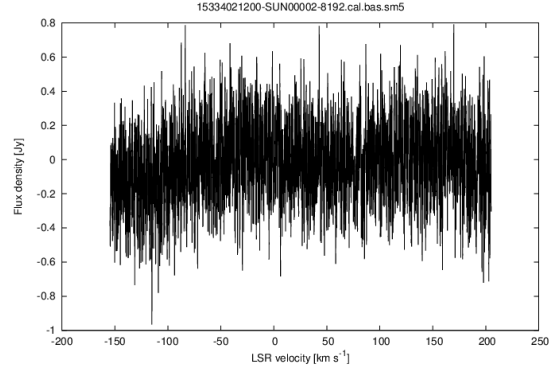


Figure 78. [2] G102.092+2.776

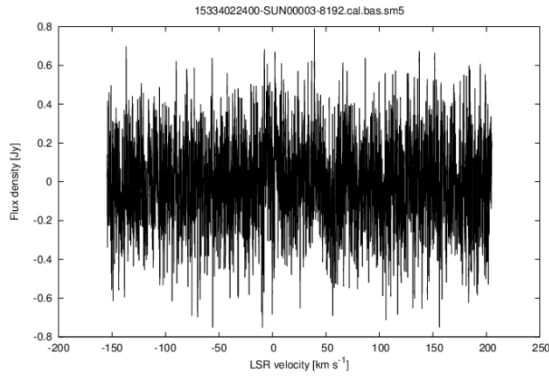


Figure 79. [3] G102.375+2.733

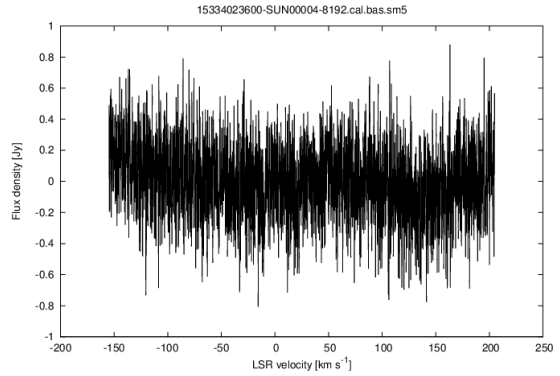


Figure 80. [4] G103.042+2.475

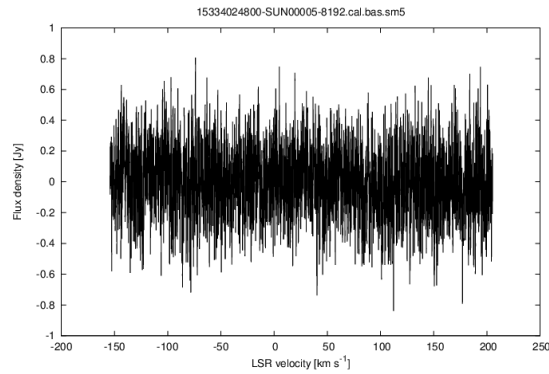


Figure 81. [5] G103.458+3.300

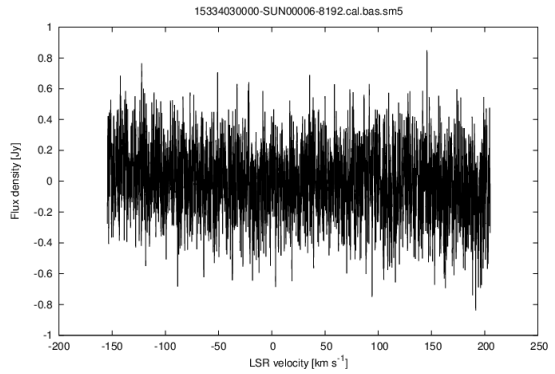


Figure 82. [6] G103.729+2.867

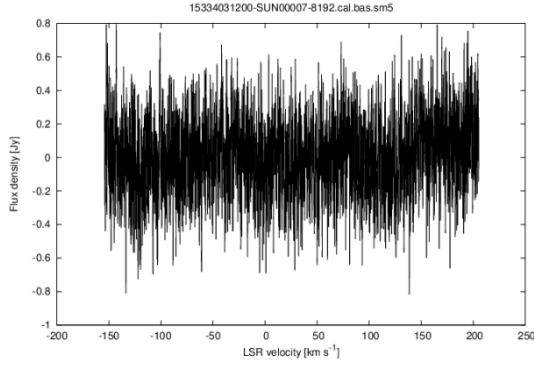


Figure 83. [7] G104.983+3.317

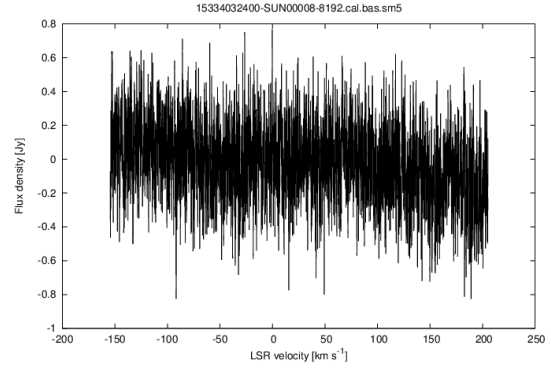


Figure 84. [8] G105.242+3.025

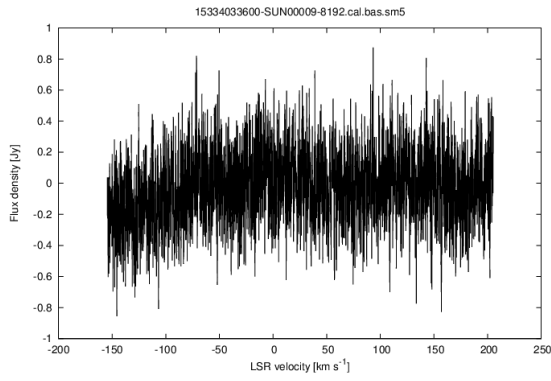


Figure 85. [9] G105.283+3.175

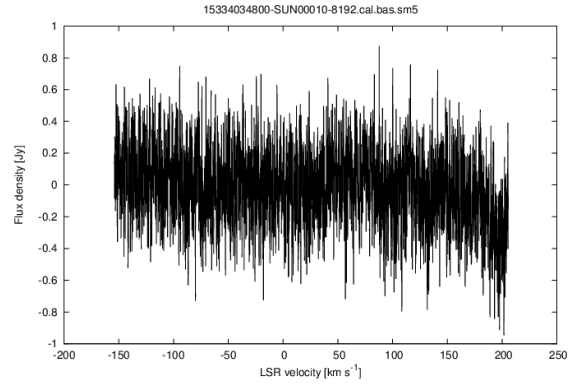


Figure 86. [10] G106.417+3.925

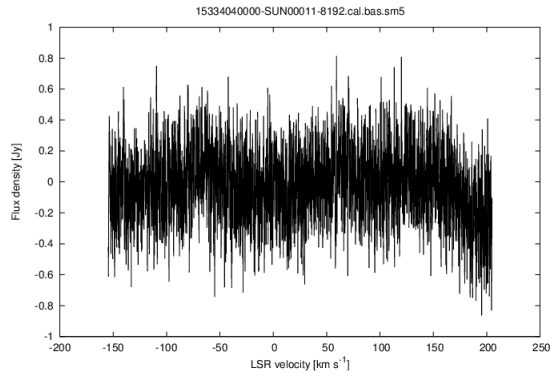


Figure 87. [11] G107.725+2.933

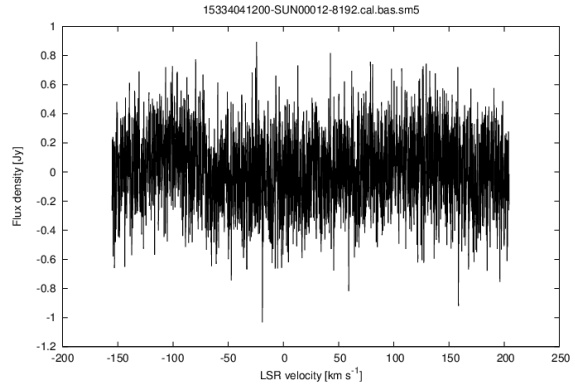


Figure 88. [12] G107.900+1.908

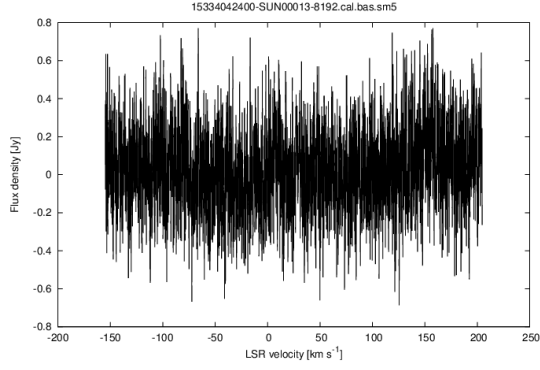


Figure 89. [13] G109.200+2.283

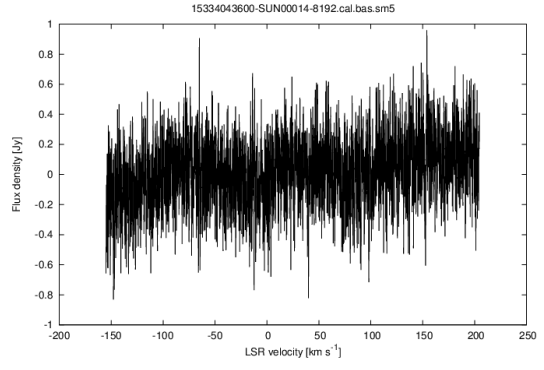


Figure 90. [14] G109.292+2.083

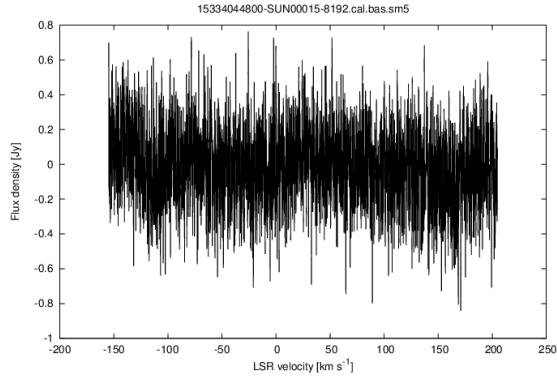


Figure 91. [15] G109.375+2.642

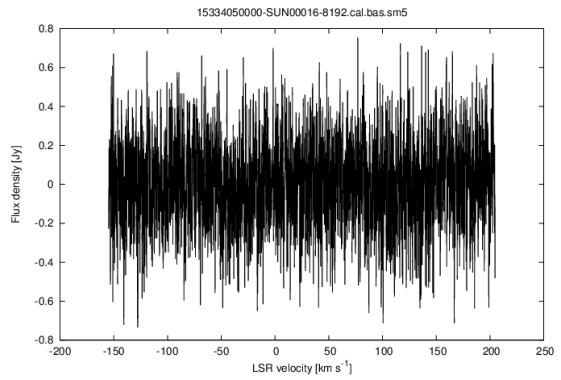


Figure 92. [16] G109.500+2.608

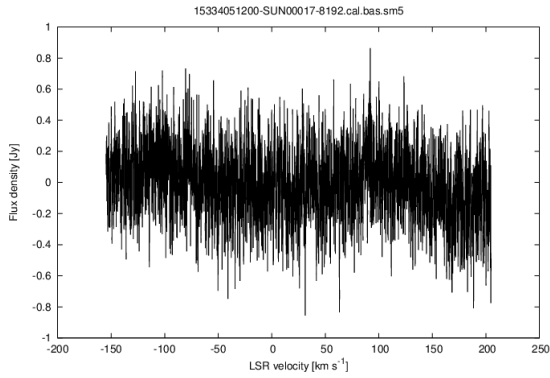


Figure 93. [17] G109.642+2.700

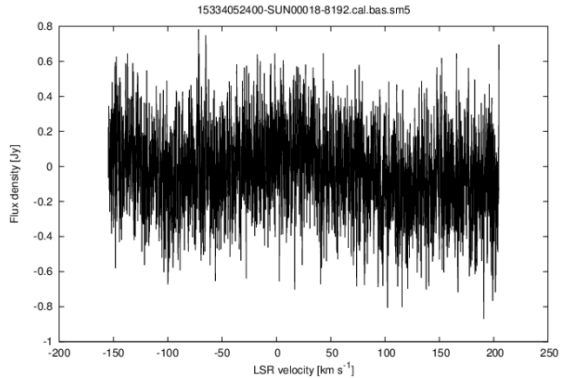


Figure 94. [18] G109.790+2.717

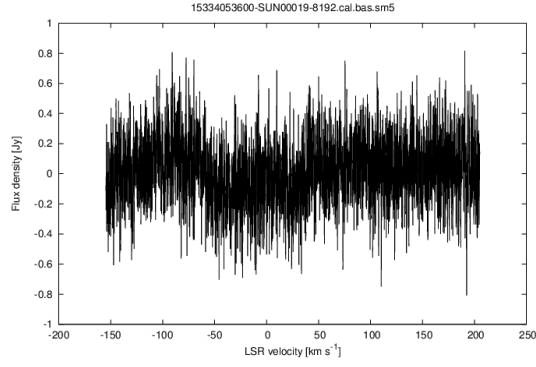


Figure 95. [19] G110.025+3.083

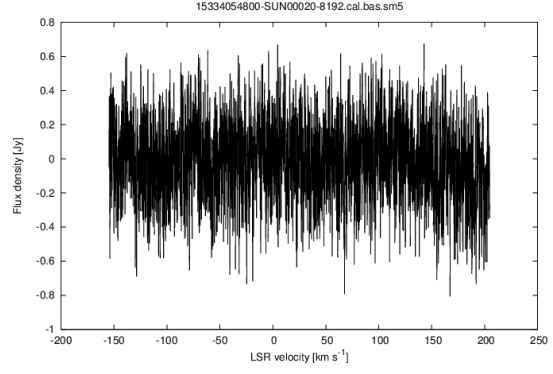


Figure 96. [20] G110.167+2.783

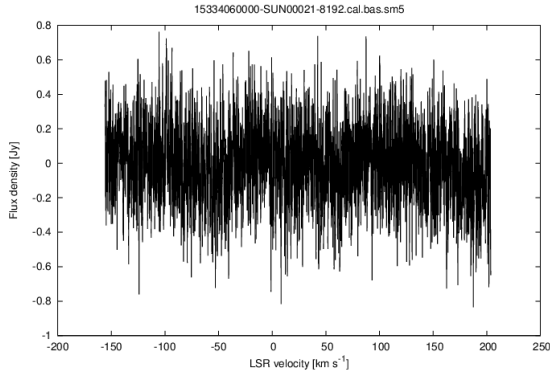


Figure 97. [21] G114.342+0.781

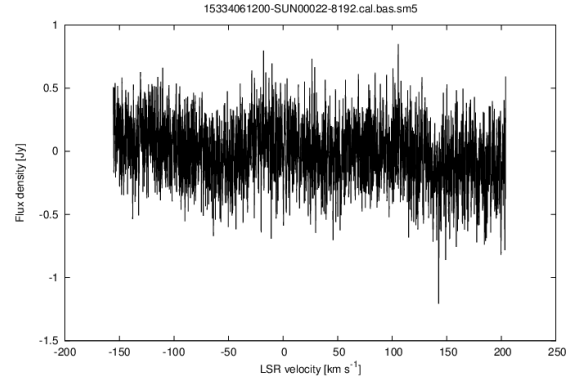


Figure 98. [22] G115.992+1.250

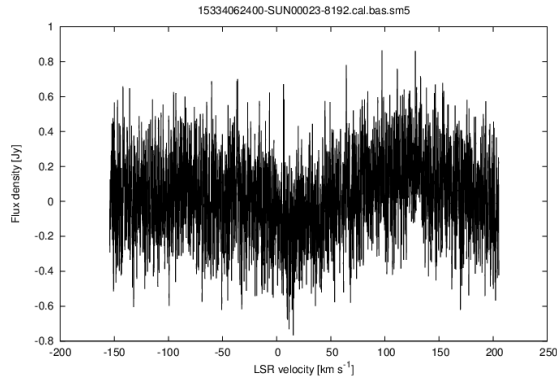


Figure 99. [23] G116.725+3.542

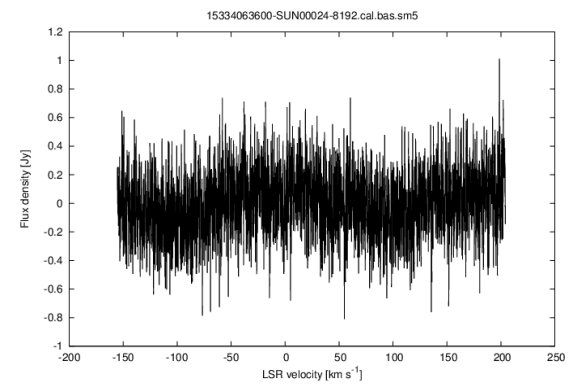


Figure 100. [24] G117.367+1.700

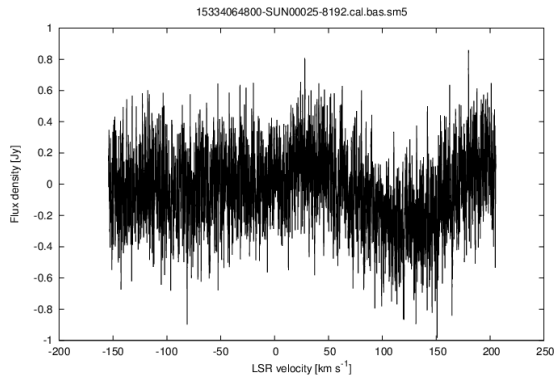


Figure 101. [25] G117.576+3.950

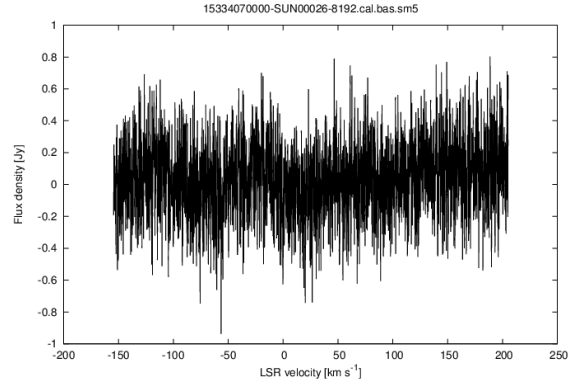


Figure 102. [26] G118.143+3.417

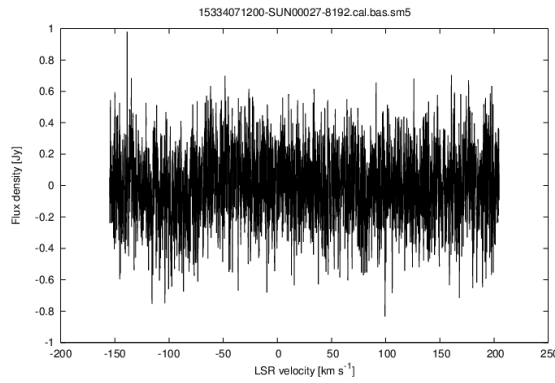


Figure 103. [27] G120.925+2.758

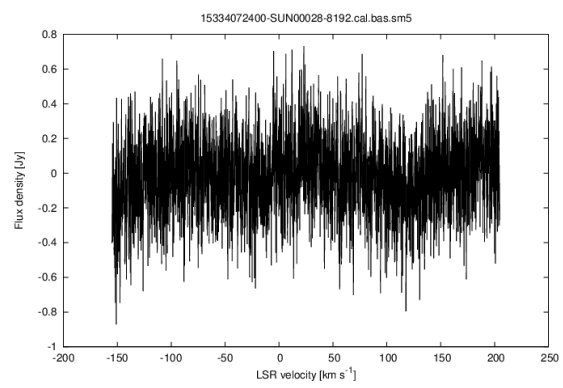


Figure 104. [28] G121.375+2.708

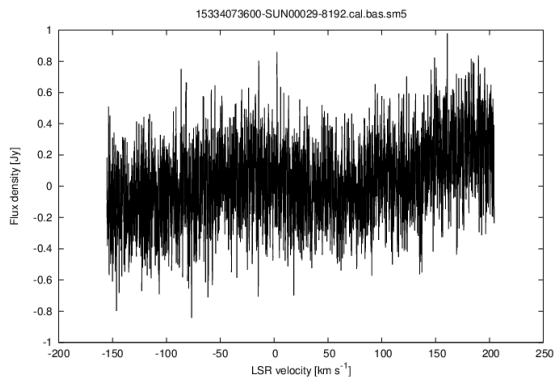


Figure 105. [29] G121.675+2.042

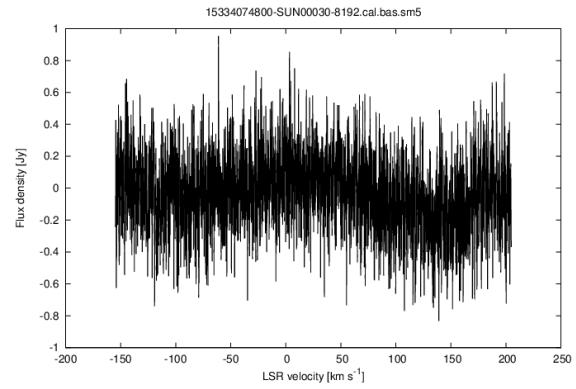


Figure 106. [30] G121.817+3.052

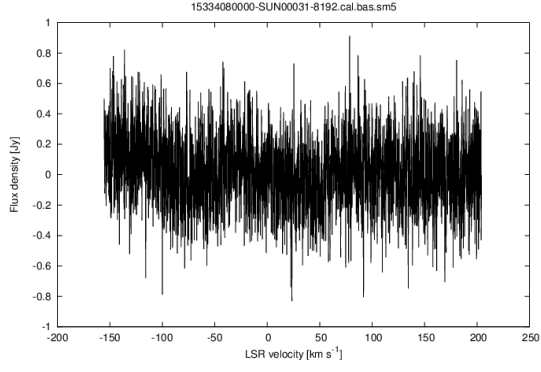


Figure 107. [31] G121.967+1.842

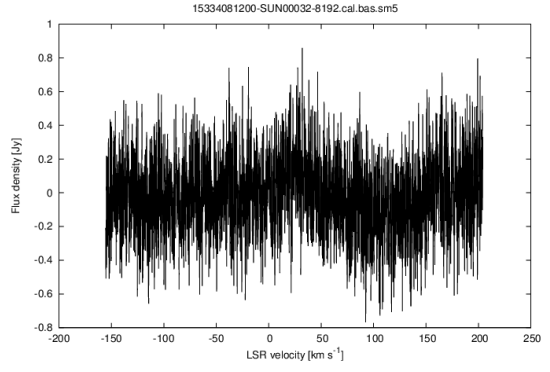


Figure 108. [32] G122.375+1.775

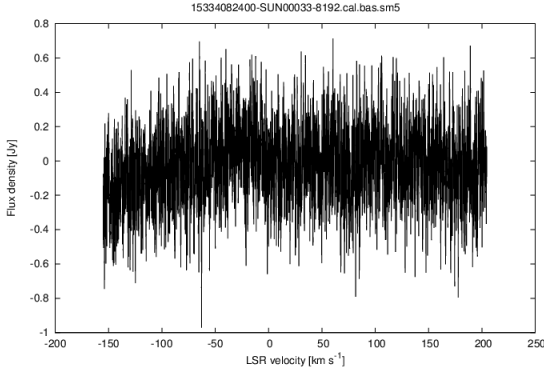


Figure 109. [33] G122.492+2.592

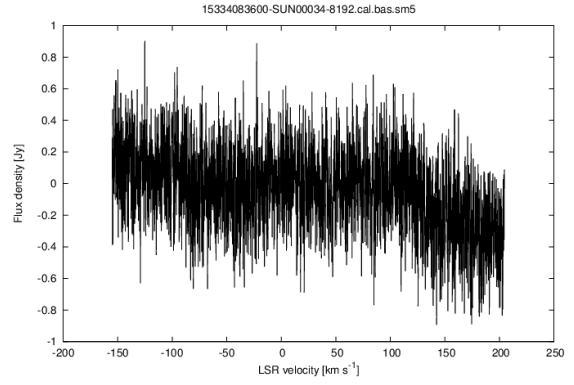


Figure 110. [34] G122.775+2.522

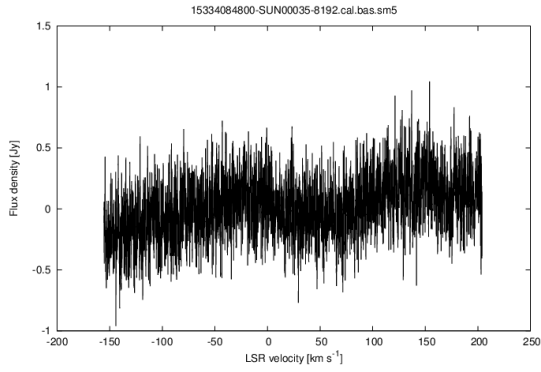


Figure 111. [35] G123.367+1.659

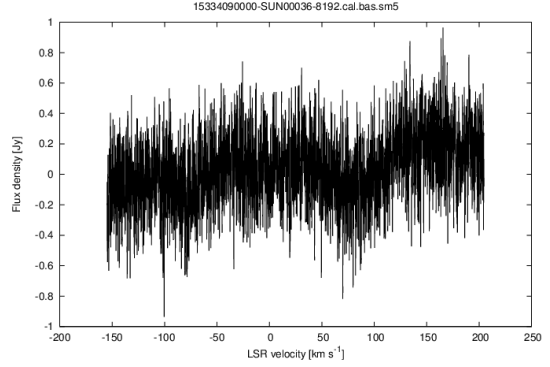


Figure 112. [36] G123.650+2.833

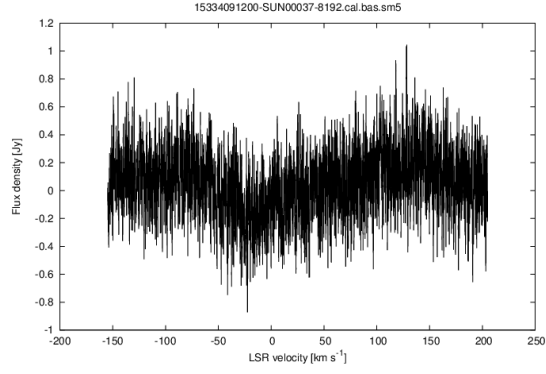


Figure 113. [37] G123.925+3.158

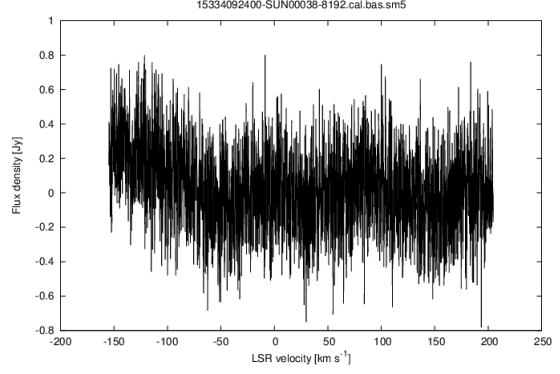


Figure 114. [38] G124.292+3.000

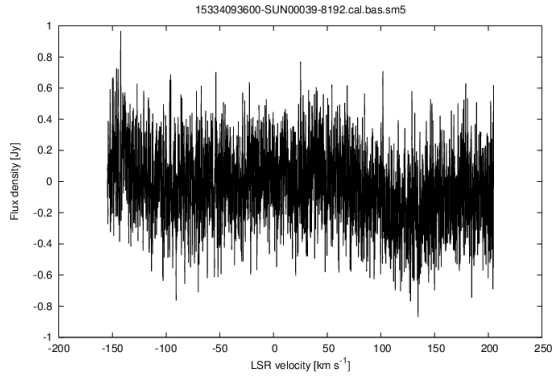


Figure 115. [39] G124.342+3.367

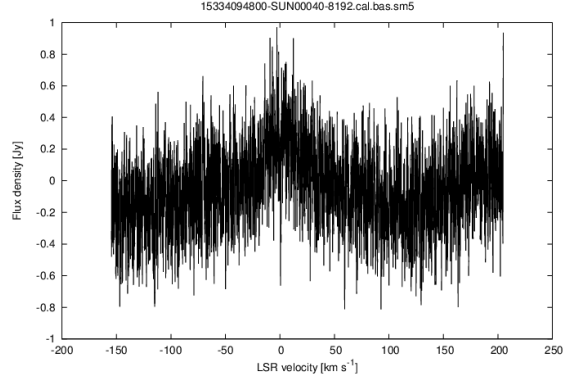


Figure 116. [40] G124.525+3.400

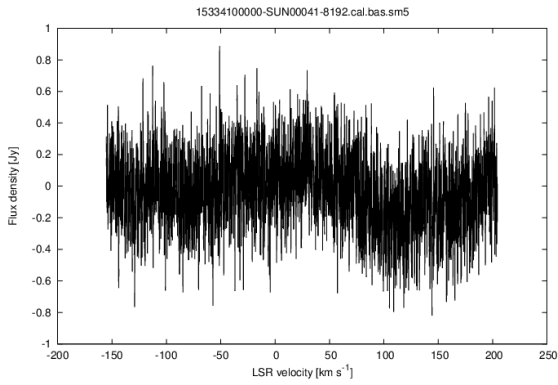


Figure 117. [41] G125.075+2.375

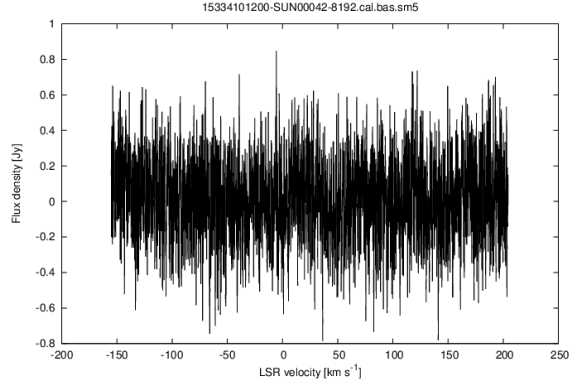


Figure 118. [42] G127.150+2.583

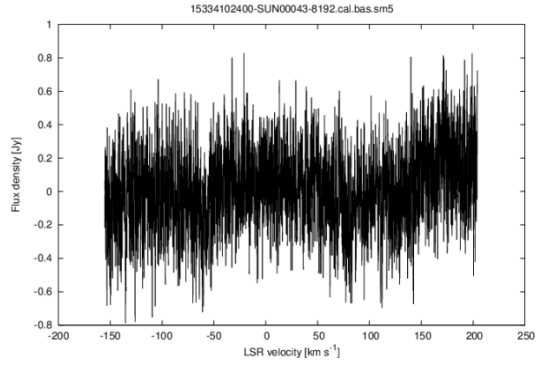


Figure 119. [43] G127.875+2.167

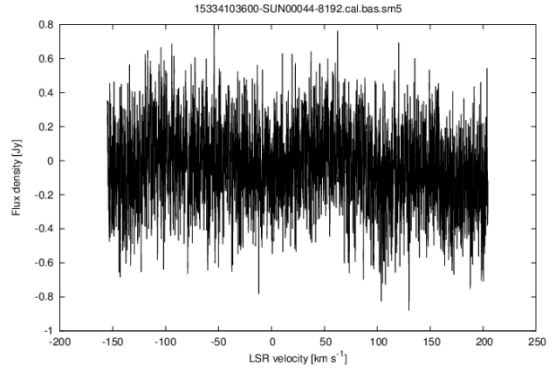


Figure 120. [44] G128.633+2.833

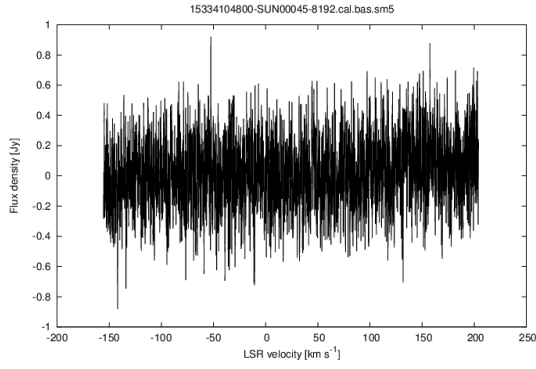


Figure 121.[45] G130.050+2.108

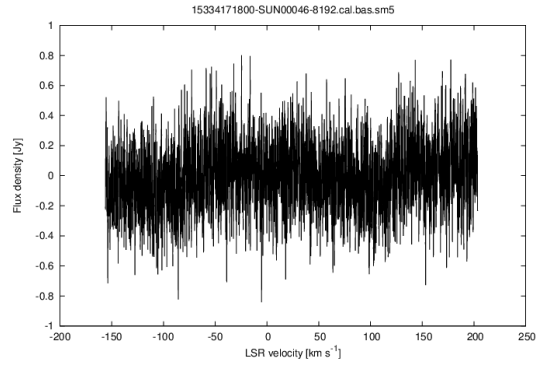


Figure 122. [46] G131.016+1.524

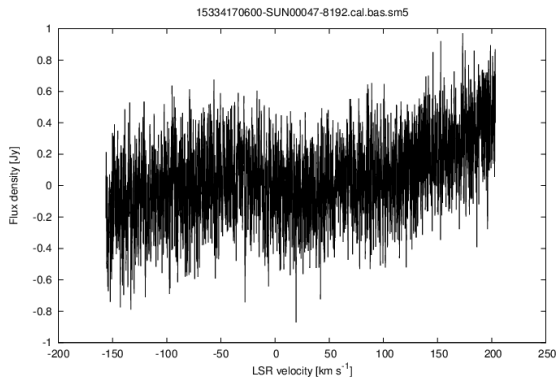


Figure 123. [47] G131.157+1.390

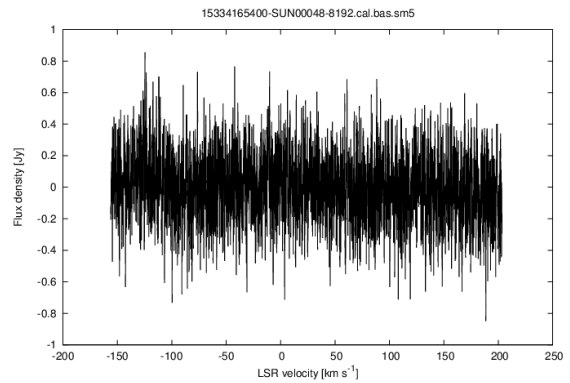


Figure 124. [48] G131.575+1.300

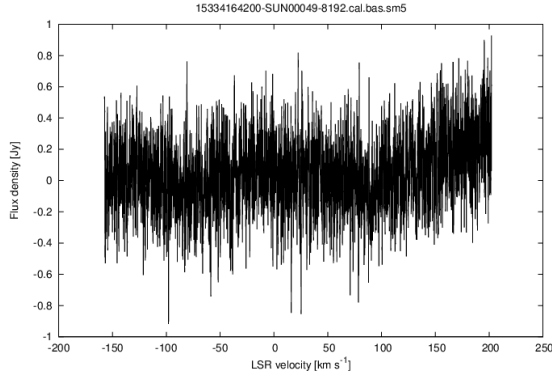


Figure 125. [49] G132.792—0.425

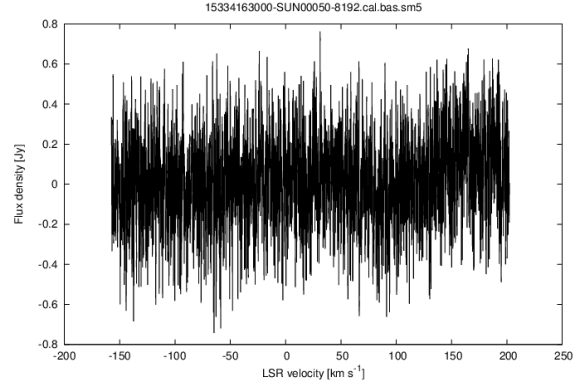


Figure 126. [50] G133.817—0.758

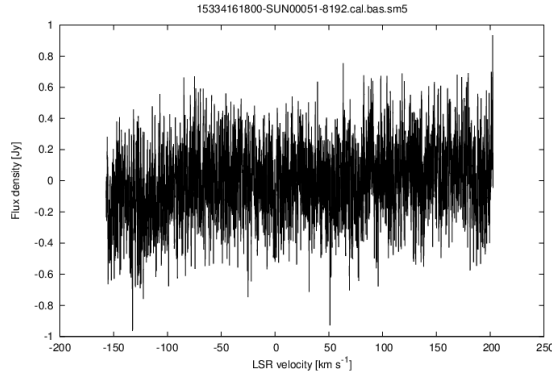


Figure 127. [51] G133.825—0.017

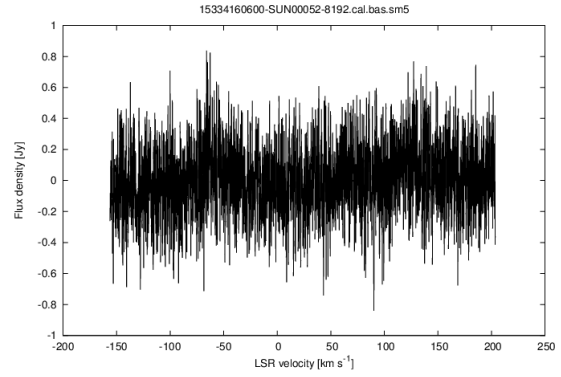


Figure 128. [52] G136.859+1.557

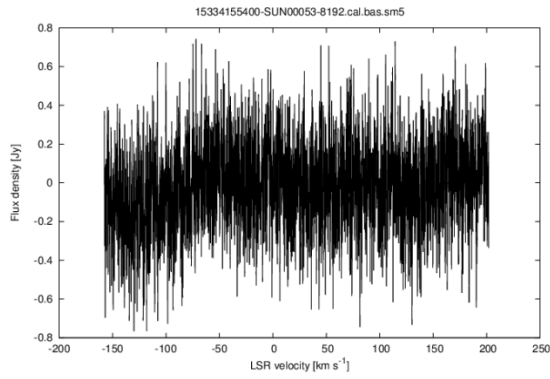


Figure 129. [53] G137.283—1.150

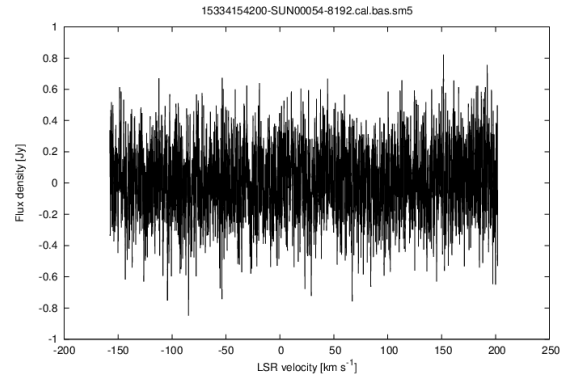


Figure 130. [54] G137.517—1.267

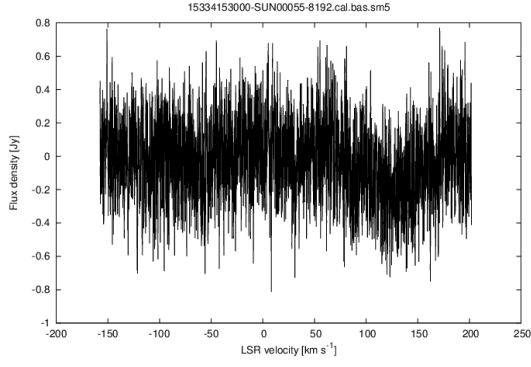


Figure 131. [55] G137.617−1.225

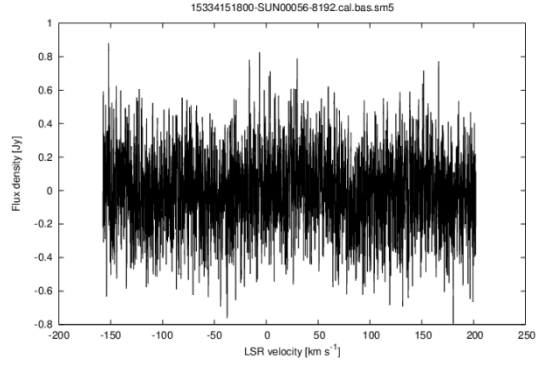


Figure 132. [56] G137.759−0.983

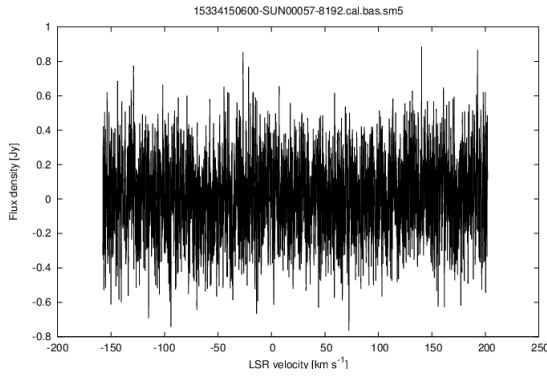


Figure 133. [57] G137.775−1.067

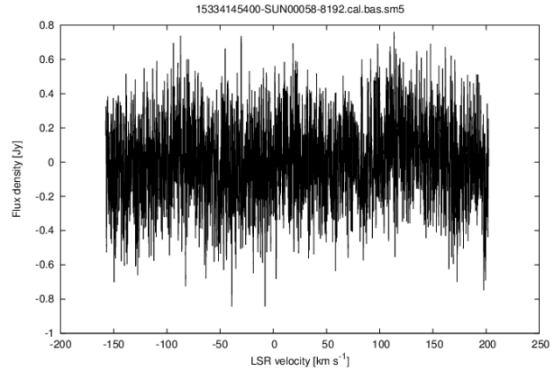


Figure 134. [58] G138.373−0.850

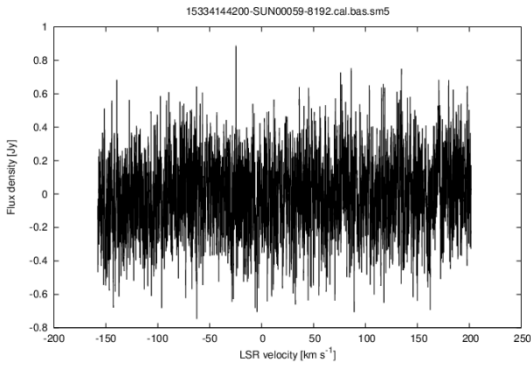


Figure 135. [59] G139.116−1.475

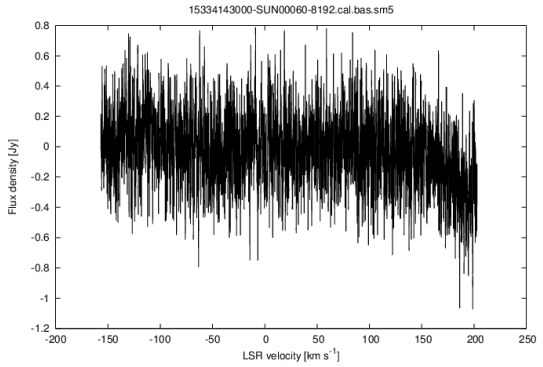


Figure 136. [60] G139.850+0.368

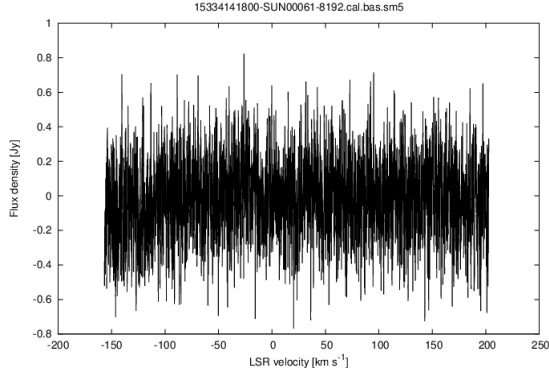


Figure 137. [61] G140.183+0.258

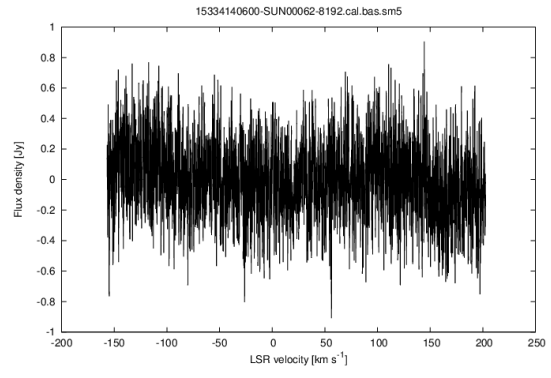


Figure 138. [62] G140.700+0.150

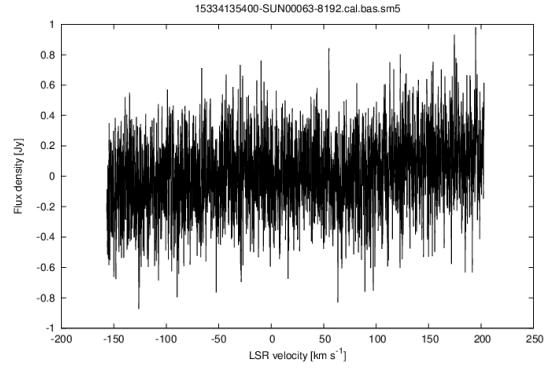


Figure 139. [63] G141.083+0.425

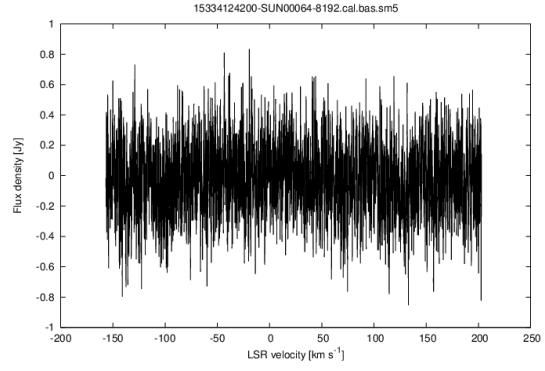


Figure 140. [64] G142.167+ 0.267

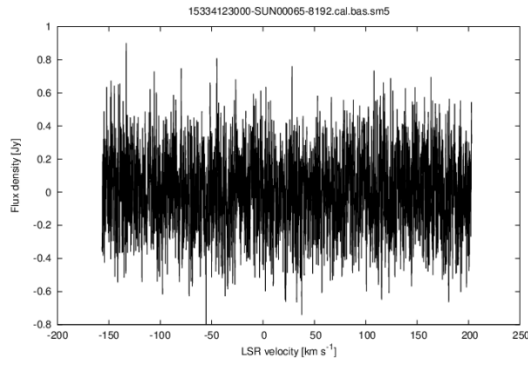


Figure 141. [65] G142.642+0.317

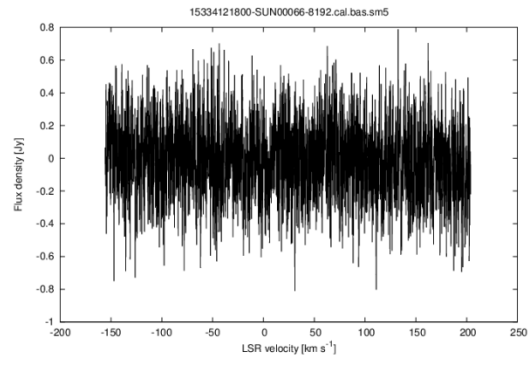


Figure 142. [66] G143.325+1.775

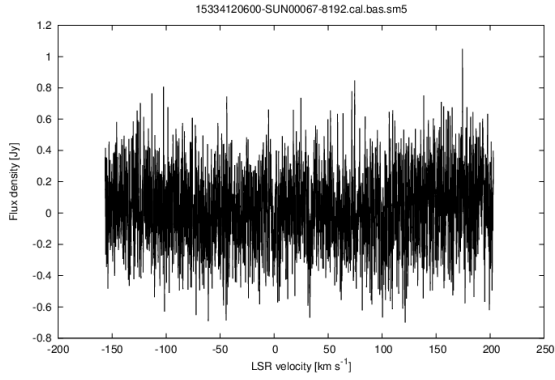


Figure 143. [67] G143.533+0.492

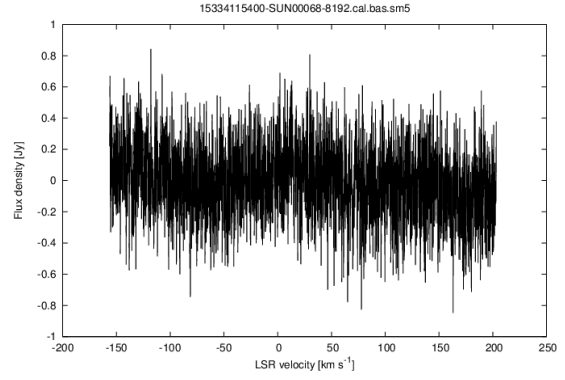


Figure 144. [68] G144.167+0.817

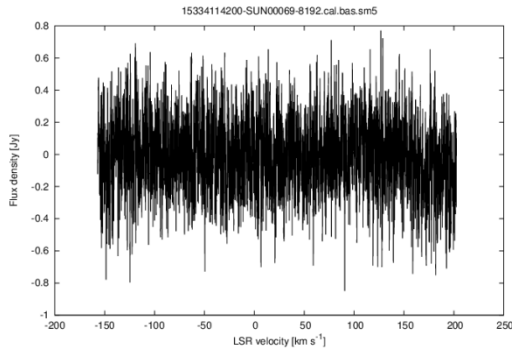


Figure 145. [69] G145.208−0.392

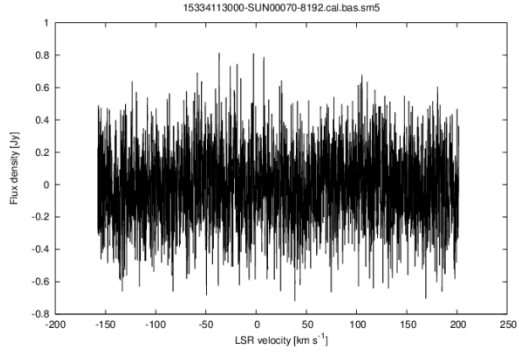


Figure 146. [70] G145.808−1.817

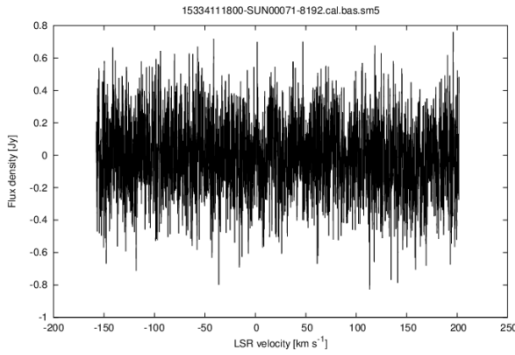


Figure 147. [71] G145.850−1.717

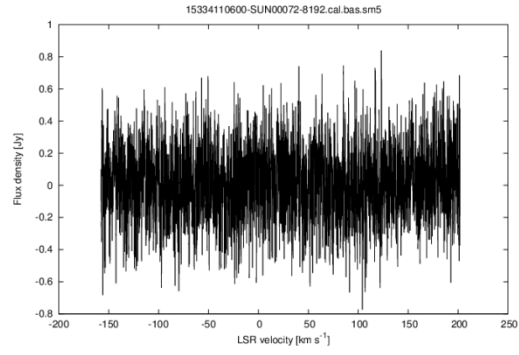


Figure 148. [72] G146.059−1.650