

銀河系第二・第三象限に対する
6.7GHz メタノールメーザー源の探査

電波天文研究室

13S2031S 水野友雄

指導教員 百瀬宗武

2017 年 3 月 13 日

現在多くの銀河系内メーザー源の距離が決定され、銀河系内の 3 次元構造が解明されてきている。しかし、既知のメーザー源は比較的太陽近傍に多く、銀河系中心からの距離が 13.5 kpc 以遠の銀河系外縁部に関しては分かっていない。そこで高萩 32m 電波望遠鏡を用いて銀河系外縁部の天体について 6.7GHz メタノールメーザー源の単一鏡観測を行った。

大質量星形成領域で 6.7GHz メタノールメーザーは検出され、多くが原始星の段階で現れる。そして可視光では観測が困難な大質量原始星を観測するにあたってメタノールメーザーでの探査はよい指針となる。単一鏡での観測によりメタノールメーザー源の検出をすることで VLBI アストロメトリー観測 (年周視差を用いた測距) などの正確な距離を求める観測に繋ぐことができる。VLBI などを使用して正確な距離の決定をすることができれば、銀河系の立体構造の解明に近づく。本研究では、立体構造があまり知られていない銀河系外縁部にある過去の研究で星形成の兆候がみられた領域 (本研究では銀河系第二・第三象限について) の 20 天体について観測を行った。暗い領域を観測することから、観測した領域にメーザーが存在したとしてもメーザー強度がノイズに埋もれてしまう可能性があるので、観測回数を増やすことによってノイズレベルを低下させて対応しようと考え実行した。観測した領域からのメタノールメーザーとみられる放射を検出することはできなかった。

目次

1	研究背景	1
1.1	三角測量と年周視差	1
1.2	メーザー	1
2	観測	2
2.1	観測諸元	2
2.2	観測天体の選定	2
3	結果	5
3.1	観測結果	5
4	考察	6
5	まとめ	8
付録 A	観測	10
A.1	観測成功	10
A.2	一部失敗	10
A.3	全部失敗	10
A.4	観測準備のみ	10
A.5	観測失敗回数	11
付録 B	解析ファイル	11
B.1	ファイル	11
B.2	全観測の平均化スペクトル	11
B.3	各観測のスペクトル	21

1 研究背景

1.1 三角測量と年周視差

星までの距離を測る方法として信頼のおけるものが年周視差を用いる方法である。年周視差は三角測量の原理に基づいて考えられる。三角測量は距離を測りたい物体を離れた2点から観測し、その物体の背景に対する見かけの位置の違いから距離を測定する方法である。物体が2点を見込む角度を視差角あるいは視差と呼ぶ。この2点間の距離が分かれば、視差から測定したい物体までの距離を知ることができる。

年周視差は地球が太陽の周りを公転することを利用して、この2点を地球の公転軌道上にとって目的の星までの距離を仮定を必要としないで測る方法である。これを用いて天球面上見かけの星の位置を測定すると、一般的に楕円を描いて変動していく。この楕円の長半径(角度)が年周視差と呼ばれるものである。年周視差が測定できれば仮定なしに天体の距離を求めることができる。

1.2 メーザー

地球大気のようなガスの密度が高いところでは粒子の衝突が支配的(熱平衡)となり、2つのエネルギー準位間の粒子数は以下の様にボルツマン分布で与えられる。

$$\frac{n_2/g_2}{n_1/g_1} = \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right) \quad (1.1)$$

但し、 n_1, n_2 : 2つの準位それぞれの分子数、 g_1, g_2 : 2つの準位それぞれの統計的重み、 h : プランク定数、 ν : 振動数、 k : ボルツマン定数、 T : 温度である。熱平衡のとき、式(1.1)は必ず1より小さくなり、統計的重み当りの分子個数が下の準位に多く存在すると分かる。このように地球上では自然には起こらないが、粒子数密度の低い希薄な宇宙空間では自発放射や誘導放射・吸収が卓越する場合があります、ボルツマン分布に従わずに粒子が上のエネルギー準位により多く分布する場合があります。このような状態即ち、 $n_2/g_2 > n_1/g_1$ となる状態は反転分布と呼ばれる。これを式(1.1)に適用すると $T < 0$ の負温度となり、負温度分布とも呼ばれる。

吸収係数 κ_ν は

$$\kappa_\nu = \frac{h\nu}{4\pi} \varphi(\nu) n_1 B_{12} \left(1 - \frac{g_1 n_2}{g_2 n_1}\right) \quad (1.2)$$

のように書ける。これを用いると、反転分布のとき、式(1.2)の $\left(1 - \frac{g_1 n_2}{g_2 n_1}\right)$ が負となることから、 κ_ν も負となる。このとき、強度の変化量 dI_ν は

$$dI_\nu = -\kappa_\nu I_\nu ds > 0 \quad (1.3)$$

となり、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 (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) と呼ばれる現象である。

上の準位により多くの粒子が存在する状態は不安定であり、外からこの2準位間のエネルギー差に相当する周波数 ν_{21} の伝播が入射すると、上の準位にある粒子が下の準位に落ちて ν_{21} の伝播を誘導放射する。これがカスケードのように起こることで非常に強い放射を出す。

宇宙空間でメーザー現象を起こす分子として OH , H_2O , SiO , CH_3OH などがある。本研究ではこのうち、大質量形成初期に発せられるメタノールメーザーについての観測を行った。

2 観測

2.1 観測諸元

本研究では高萩市に位置する高萩 32m 電波望遠鏡を用いて、2016 年 12 月 17 日から 15 日間の観測を行った。観測日は表 2.1 に示した。OFF 点を赤経方向に +60 分角として観測を

2016 年	2017 年	
12 月 17 日	1 月 12 日	2 月 1 日
12 月 19 日	1 月 19 日	2 月 14 日
12 月 20 日	1 月 21 日	2 月 15 日
12 月 22 日	1 月 22 日	2 月 17 日
	1 月 23 日	
	1 月 24 日	
	1 月 26 日	

表 2.1 本研究の観測日

行った。

2.2 観測天体の選定

本観測では銀河系第二・第三象限に位置する天体うち図 2.3 に示した銀河系外縁分に存在するこれまでに星形成が検出された 20 天体について 6.7GHz メタノールメーザーの観測を行った。(表 2.3 参照) ON・OFF 観測のセットを平均して 1 日の観測につき 2 セット行った。

電波望遠鏡	高萩 32m
ビームサイズ	4.6 分角
周波数	6664-6672 MHz
分光点数	8192
チャンネル分解能	0.44 km/s
積分時間	300 秒

表 2.2 観測パラメータ

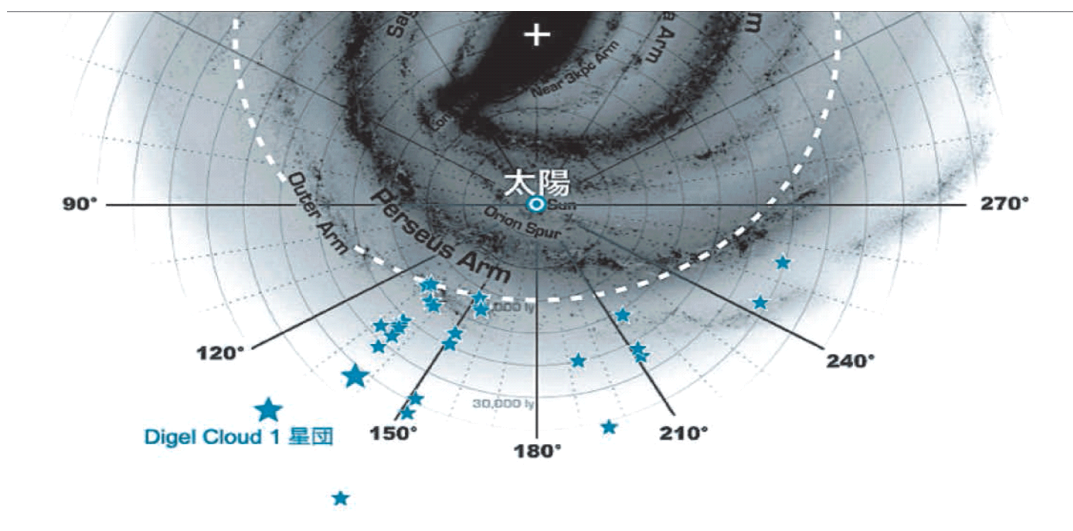


図 2.1 本研究にて観測した天体の位置 [3]

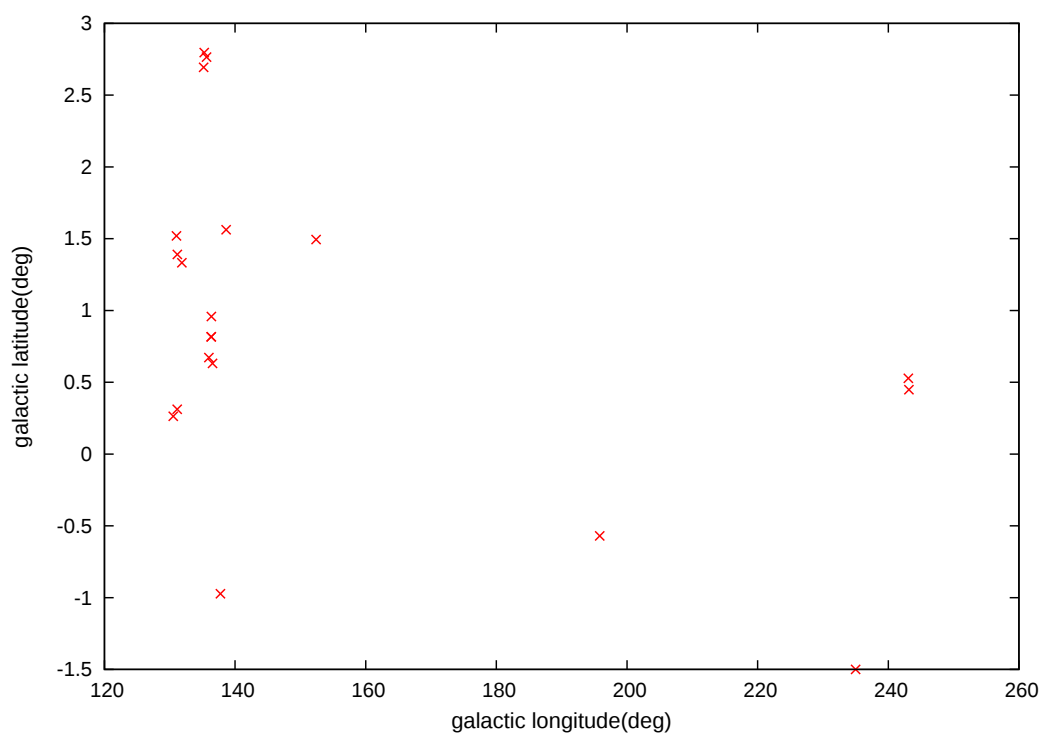


図 2.2 本研究にて観測を行った天体の位置 (銀河座標系)[4]

	赤経 [h m s] (J2000)	赤緯 [d m s] (J2000)	力学的距離 [kpc]
Rigel Cloud 1a	02 04 15.1	63 14 33.2	22
Rigel Cloud 1b	02 05 7.2	63 04 43.0	22
Rigel Cloud 2N	02 48 40.0	58 28 56.0	23.6
IRAS 01537+6154	01 57 18.0	62 09 29.0	6.5
IRAS 01587+6148	02 02 24.6	62 02 48.1	6.3
IRAS 02071+6235	02 10 49.5	62 49 12.3	9.4
IRAS 02376+6030	02 41 28.8	60 43 24.5	10.2
IRAS 02383+6241	02 42 20.1	62 53 51.8	8.5
IRAS 02395+6244	02 43 28.7	62 57 05.1	8.8
IRAS 02407+6029a	02 44 38.6	60 42 20.7	6.6
IRAS 02407+6029b	02 44 38.6	60 42 20.7	9.4
IRAS 02413+6037	02 45 12.4	60 49 45.5	6.9
IRAS 02416+6014	02 45 27.3	60 27 13.9	7.5
IRAS 02421+6233	02 46 07.7	62 46 29.9	8.9
IRAS 02598+6008	03 03 50.4	60 20 14.2	7.0
IRAS 04186+5143	04 22 33.8	51 51 05.5	
IRAS 06145+1455	06 17 24.2	14 54 42.0	11.9
IRAS 07255-2012	07 27 44.0	-20 19 03.0	10.2
Sh2-311/Haffner 18	07 52 39.9	-26 23 07.3	11.2
Sh2-311/Haffner 19	07 52 46.7	-26 16 23.7	5.7

表 2.3 観測天体 [3]

3 結果

3.1 観測結果

観測を行った結果、特に検出されたメタノールメーザーと思われる電波は存在しなかった。観測結果のスペクトルは付録 B.2 に示した。今回メーザー活動を検出できなかった理由としては

- (1) 目標とした 20 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する天体でなかったこと、
 - (2) 観測した領域からメーザーは放出されていたが弱かったため感度が足りなく検出されなかったこと
- の 2 点が考えられる。

天体名	積分時間	ノイズレベル (3σ)[Jy]
Rigel Cloud 1a	36×300 sec=180 min	0.156
Rigel Cloud 1b	36×300 sec=180 min	0.151
Rigel Cloud 2N	26×300 sec=130 min	0.165
IRAS 01537+6154	26×300 sec=130 min	0.178
IRAS 01587+6148	26×300 sec=130 min	0.159
IRAS 02071+6235	28×300 sec=140 min	0.153
IRAS 02376+6030	28×300 sec=140 min	0.167
IRAS 02383+6241	26×300 sec=130 min	0.207
IRAS 02395+6244	26×300 sec=130 min	0.185
IRAS 02407+6029a	26×300 sec=130 min	0.164
IRAS 02407+6029b	26×300 sec=130 min	0.190
IRAS 02413+6037	26×300 sec=130 min	0.163
IRAS 02416+6014	26×300 sec=130 min	0.165
IRAS 02421+6233	26×300 sec=130 min	0.170
IRAS 02598+6008	26×300 sec=130 min	0.174
IRAS 04186+5143	26×300 sec=130 min	0.164
IRAS 06145+1455	28×300 sec=140 min	0.199
IRAS 07255-2012	16×300 sec=80 min	0.221
Sh2-311/Haffner 18	14×300 sec=70 min	0.250
Sh2-311/Haffner 19	14×300 sec=70 min	0.250

表 3.1 天体毎の観測時間とノイズレベル

4 考察

本観測にて最小検出フラックス密度を計算するにあたって、下式のような公式を用いる。

$$\Delta S = \frac{2K_s}{\eta_A A_p} \frac{kT_{sys}}{\sqrt{\Delta B t}} \quad (4.1)$$

但し、 ΔS : 最小検出フラックス密度、 K_s : 受信機によって異なる係数 (~ 1)、 η_A : 有効効率、 A_p : アンテナの開口面積 ($\pi \times (3200 \text{ cm})^2$)、 k : ボルツマン定数 ($1.4 \times 10^{-16} \text{ erg K}^{-1}$)、 T_{sys} : システム雑音温度 (30K)、 ΔB : 周波数幅 (8MHz)、 t : 積分時間、である。式 (4.1) から観測時間の平方根で最小の検出フラックス密度の値が減少していくことが分かる。

$$\Delta S = \frac{2 \cdot 1}{0.6\pi \times (1.6 \times 10^3 \text{ cm})^2} \frac{1.4 \times 10^{-16} \text{ erg/K} \cdot 300\text{K}}{\sqrt{8 \text{ MHz}/8192}} \frac{1}{\sqrt{t}} \approx \frac{5.6}{\sqrt{t}} \text{ Jy} \quad (4.2)$$

式 (4.2) に $t = 26 \times 300 \text{ sec}$ を代入すると、 0.063 Jy となり、 3σ の値は 0.19 Jy となる。これ

積分時間	ノイズレベル (3σ)[Jy]	本観測ノイズレベル平均値 (3σ)[Jy]
300sec×14	0.26	0.250
300sec×16	0.24	0.221
300sec×26	0.19	0.160
300sec×28	0.18	0.173
300sec×36	0.16	0.154

表 4.1 式 (4.2) から導出した観測時間とノイズレベルの対応

を他の積分時間も計算したものを表 4.1 に示した。ここからノイズレベルが複数の観測結果を平均化することでほぼ理論的に予想される通りに低下していることが分かる。ノイズレベルの低下度合の理論値と実験値の相違は殆どないと言えるので、実験に対しての信頼性があると言える。結果の (1)、(2) について、

- (1) 分子雲中の水素分子とヘリウム分子の個数比を 5:1 と仮定する。すると、水素分子の質量当りの全体の質量は $M(\text{H}_2 + \text{He}) : M(\text{H}_2)$ は $= 7 : 5$ ^{*1} となる。[5] これにより分子雲中の水素分子当りの平均分子質量は

$$\frac{M(\text{H}_2 + \text{He})}{n(\text{H}_2)} = \frac{1.4}{1} 2m_{\text{H}} = 2.8m_{\text{H}} \quad (4.3)$$

となる。但し、 m_{H} は水素原子の質量である。^{*2}

本観測の天体について Snell(2002)、Yasui(2006)、Izumi(2014) により、各天体の質量と半径を求め、それにより質量密度を求めた。その後、式 (4.3) により分子の個数密度を求めたところ、平均 543 個 cm^{-3} となった。太陽系近傍の大質量形成が起こっている分子雲の密度 10^3 - 10^4 個 cm^{-3} である。 $10 \times 10^3 \text{ 個 cm}^{-3}$ のオーダーとなったものは Rigel Cloud 1 のみである。したがって、観測した天体が大質量星を形成する天体でなかった可能性が考えられる。

*1

$$M(\text{H}_2 + \text{He}) = 2 \times 5 + 1 \times 4 = 14$$

$$M(\text{H}_2) = 2 \times 5 = 10$$

*2

$$M(\text{H}_2) = 2m_{\text{H}}$$

- (2) 本観測の天体までの平均距離は約 9.6kpc である。表 3.1 から 3σ ノイズレベルの平均値は約 0.18Jy である。実際の解析では 3 チャンネル平均をしているので、 $0.18/\sqrt{3} \approx 1.0$ の値をノイズレベルとして見ることができる。日立モニター観測で観測してきた天体 [7] の一部の 171 天体を Green(2011) から距離を求め、本観測の観測天体の平均距離 9.6kpc に置いた場合のフラックス密度を計算した。その結果、平均値は 26Jy となった。(図 4.1) また、ノイズレベルの平均 1.0Jy を超える天体は 92% であり (3 チャンネル平均する前の値である 1.8Jy としても 90% が超える)、メーザー活動のある天体であれば、観測できる可能性が高いと考えられる。よって本研究で観測した 20 天体はそもそもメタノールメーザー活動のない天体である可能性が高い。

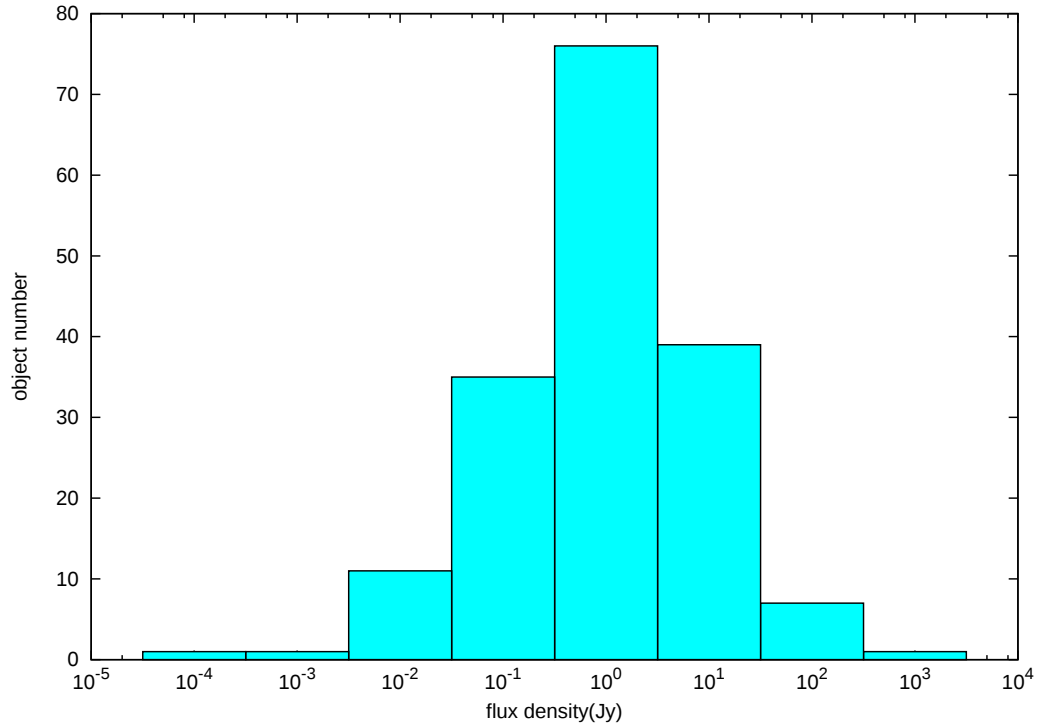


図 4.1 171 天体を 9.6kpc に置くと仮定したときのフラックス密度

5 まとめ

銀河系第二・第三象限に位置する 20 天体について 6.7GHz メタノールメーザーの観測を行った。この天体についてメーザー活動を見つけることができなかった。今回メーザー活動を検出できなかった理由としては (1) 目標とした 20 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する天体でなかったこと、(2) 観測した領域からメーザーは放出されていたが銀河系内域で放射しているものに比べて著しく弱かったため感度が足りなく検出されなかったことの 2 点が考えられる。

謝辞

本研究をするにあたり、大変多くの方にご指導、ご協力頂きましたことを心から感謝致します。

百瀬宗武教授にはゼミ、生活面など多方面からご指導いただきありがとうございました。米倉覚則准教授には本研究、観測に関しまして丁寧に多数の指導をして頂き、ありがとうございました。塚越崇助教授には研究齋藤悠研究員、杉山孝一郎研究員にはアンテナ運用、ゼミなどで指導していただきありがとうございました。

また、研究室の皆様にも生活面で、また、研究面で多数の勉強をさせて頂き深く感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] シリーズ現在の天文学 1 人類の住む宇宙
- [2] シリーズ現在の天文学 16 宇宙の観測 II-電波天文学-
- [3] 天文月報 2016 年 12 月号 泉奈都子
- [4] Brand J., Blitz L., 1993, A&A 275, 67
 Snell R. L., et al., 2002, ApJ 578, 229
 Yasui C., et al., 2006, ApJ 649, 753
 Brand J., Wouterloot J. G. A., 2007, A&A 464, 909
 Izumi N., et al., 2014, ApJ 795, 66
 Anderson L. D., et al., 2015, ApJS 221, 26
 Yadav R. K., Pandey A. K.
 Sharma S., et al., 2015, New Astronomy 34, 27
 Yun J. L., et al., 2015, MNRAS 452, 1523
 Santos et al., 2000, ApJ 540L, 87S
 VERA : 研究者向け情報 2015A ステータスレポート http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/restricted/common_use2015a.html
- [5] Robert Estalella, Hydrogen and total mass
- [6] 2015 年度茨城大学卒業論文 亀海真美
- [7] Caswell J.L., 2010, MNRAS 404, 1029C
 Green J.A., et al., 2010, MNRAS 409, 913G
 Szymczak M., et al., 2012, A&A 543, 277S
 Cyganowski C.J., et al., 2009, ApJ 702, 1615C
 Szymczak M., et al., 2000, A&AS 143, 269S
 Caswell J.L., 1995, MNRAS 272, 96C
 Xu Y., et al., 2008, A&A 485, 729X
 Pandian, Jagadheep D., et al., 2007, ApJ 656, 255P

Green J.A., et al., 11, MNRAS, 417, 2500G

付録 A 観測

A.1 観測成功

日付	失敗理由
2017 年 1 月 21 日	
1 月 22 日	
1 月 24 日	
1 月 26 日	
2 月 1 日	
2 月 14 日	
2 月 15 日	

表付録 A.1 本研究の観測日 (観測成功)

A.2 一部失敗

日付	失敗理由
2016 年 12 月 17 日	追尾遅れ
12 月 19 日	追尾遅れ
12 月 20 日	追尾遅れ
12 月 22 日	追尾遅れ
2017 年 1 月 12 日	追尾遅れ
1 月 19 日	追尾遅れ
1 月 23 日	追尾遅れ
2 月 17 日	アンテナトラブル

表付録 A.2 本研究の観測日 (観測一部失敗)

A.3 全部失敗

日付	失敗理由
2017 年 1 月 11 日	OFF 点の入れ忘れ
1 月 17 日	OFF 点の入れ忘れ

表付録 A.3 本研究の観測日 (観測全部失敗)

A.4 観測準備のみ

なし。

A.5 観測失敗回数

ON-OFF それぞれ 300 秒の観測セットで 1 回の観測と数えてある。

付録 B 解析ファイル

B.1 ファイル

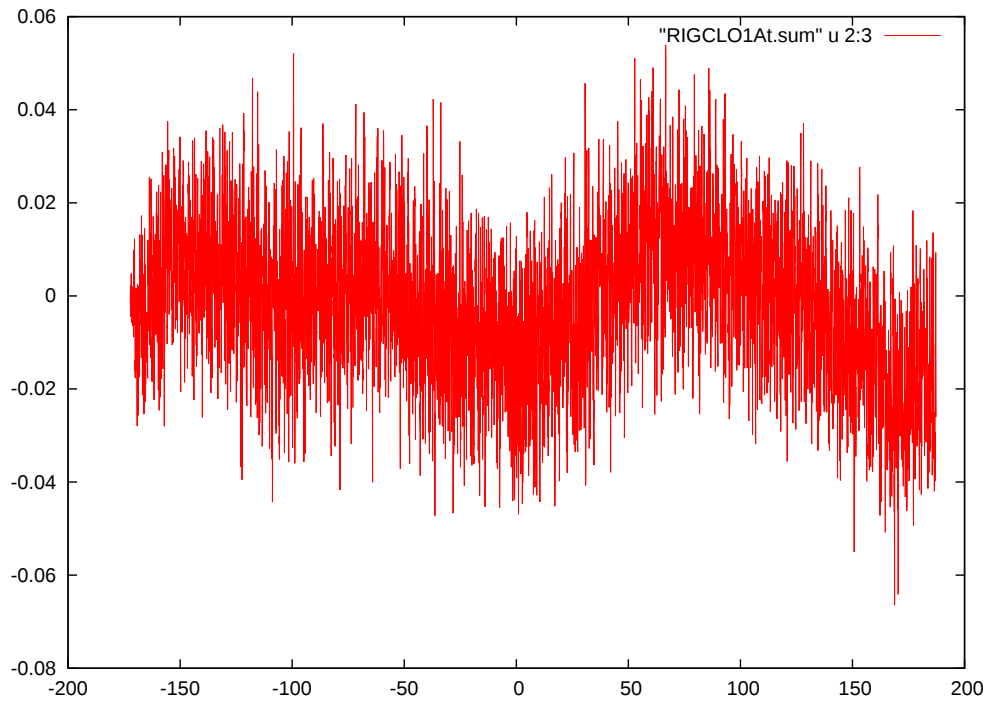
本研究に使用したファイルは茨城大学 S709 に所在する penzias:/media/backup/mizuno/ に保存してある。

/media/backup/mizuno/base/psfile/ に平均化したデータを保存してある。

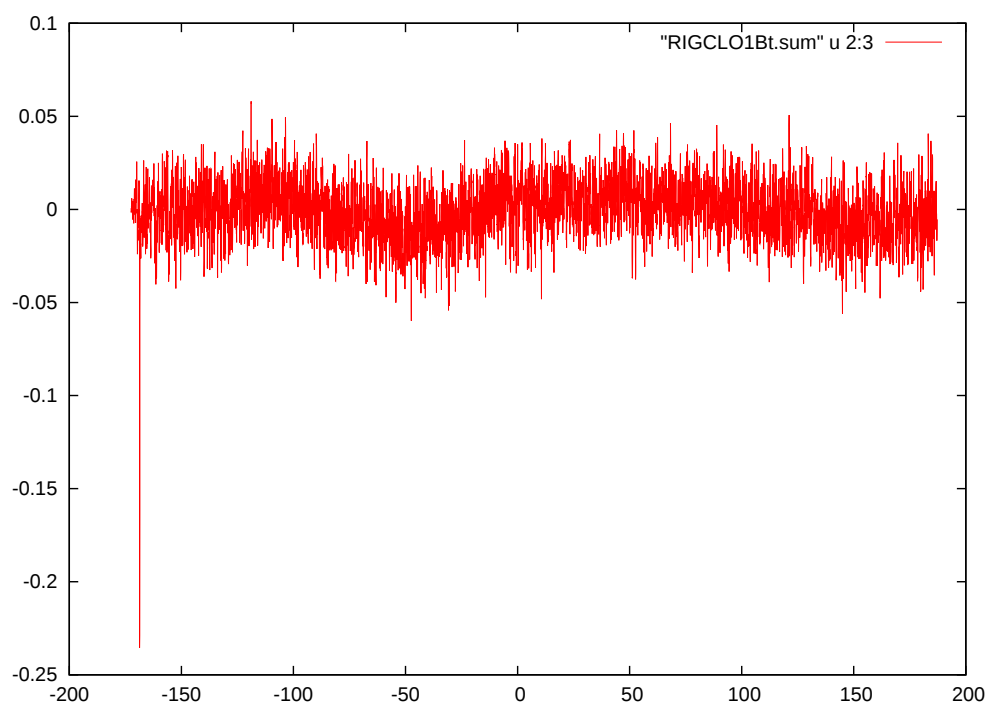
また、/media/backup/mizuno/base/M*****M/(*****.yyddd) のようにそれぞれの観測日ごとのファイルが存在し、その中に平均化する前のデータを保存してある。

B.2 全観測の平均化スペクトル

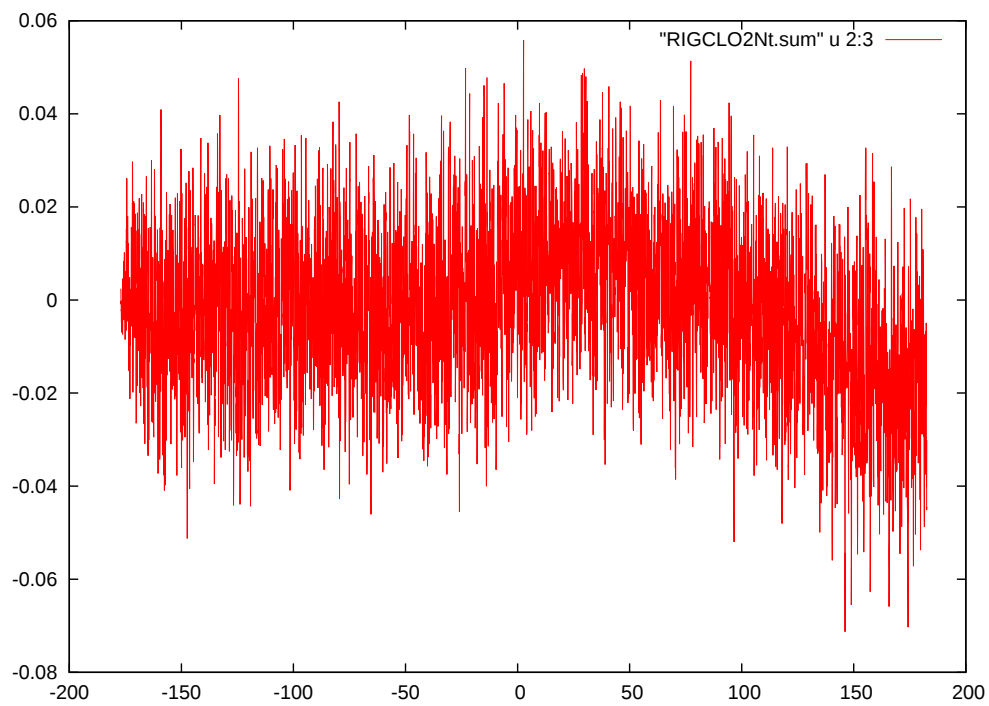
全天体について、全観測の平均化後のスペクトルを示した。観測回数に関しては、表 3.1 を参照。それぞれの図において、横軸視線速度 [km/s]、縦軸アンテナ温度 [K] である。縦軸の値に $3.43[\text{Jy/K}]$ と掛けると、アンテナ温度 [K] をフラックス密度 [Jy] に変換できる。(式 4.1)



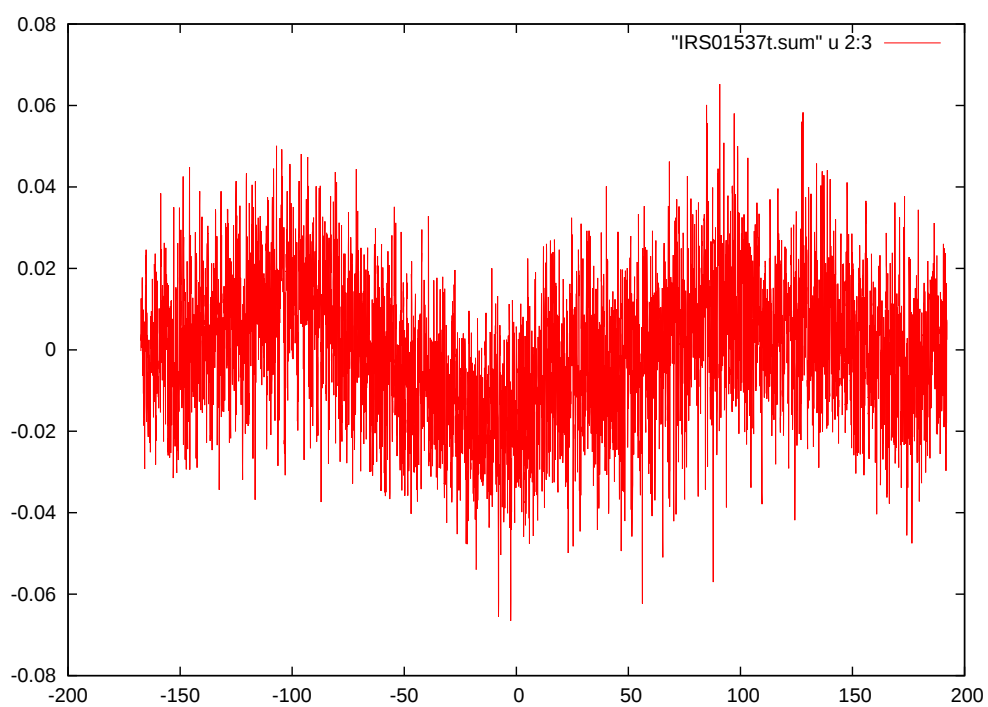
図付録 B.1 Rigel Cloud 1a



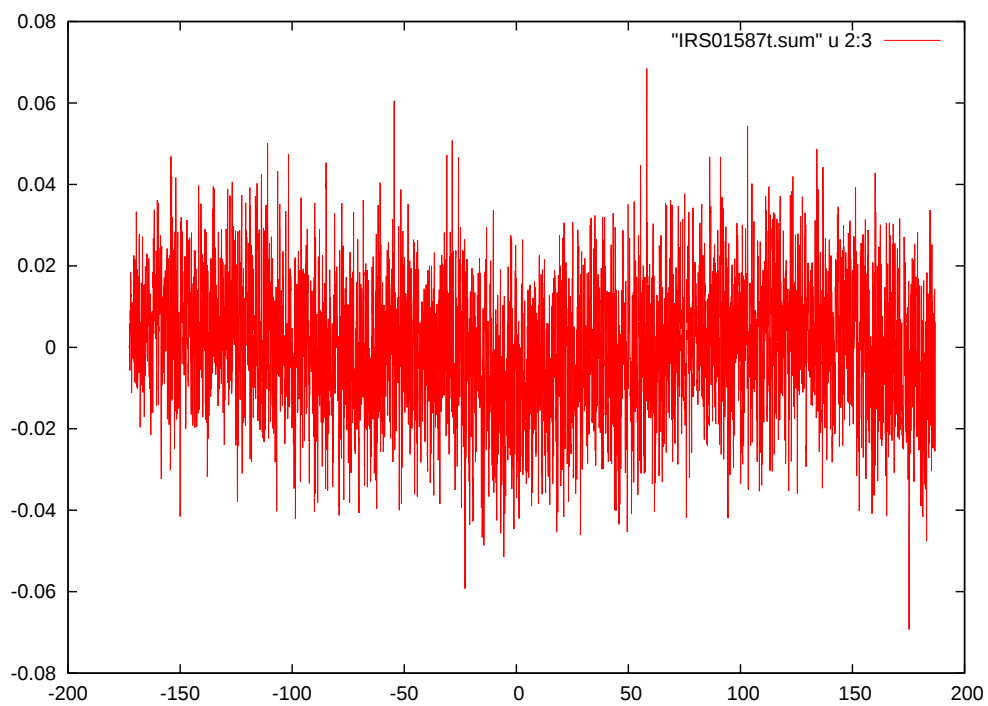
図付録 B.2 Rigel Cloud 1b



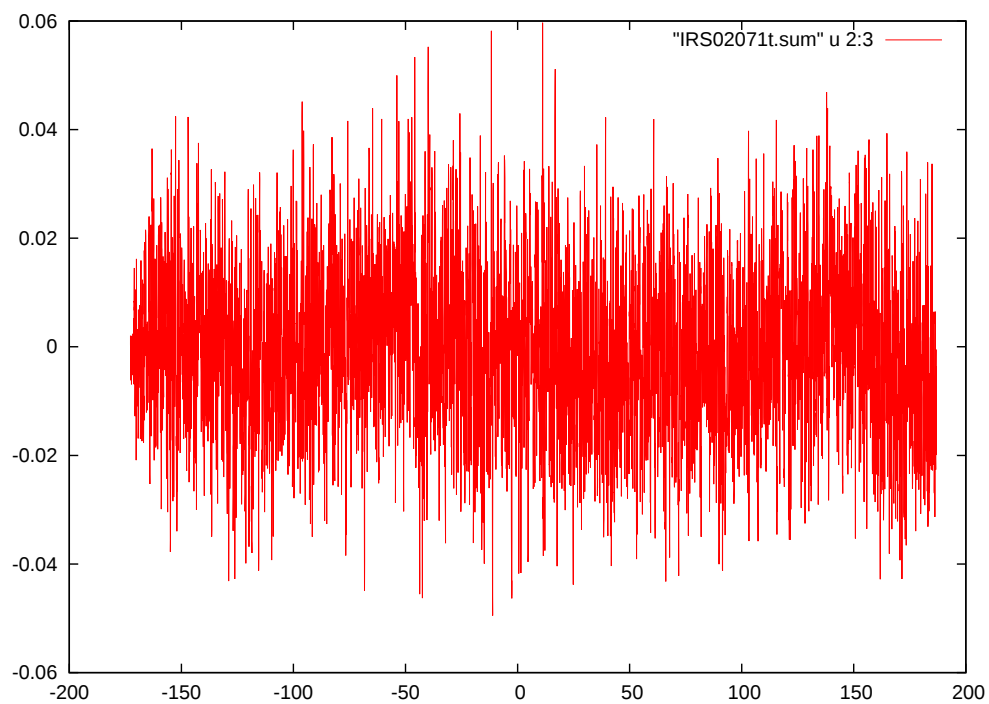
図付録 B.3 Rigel Cloud 2N



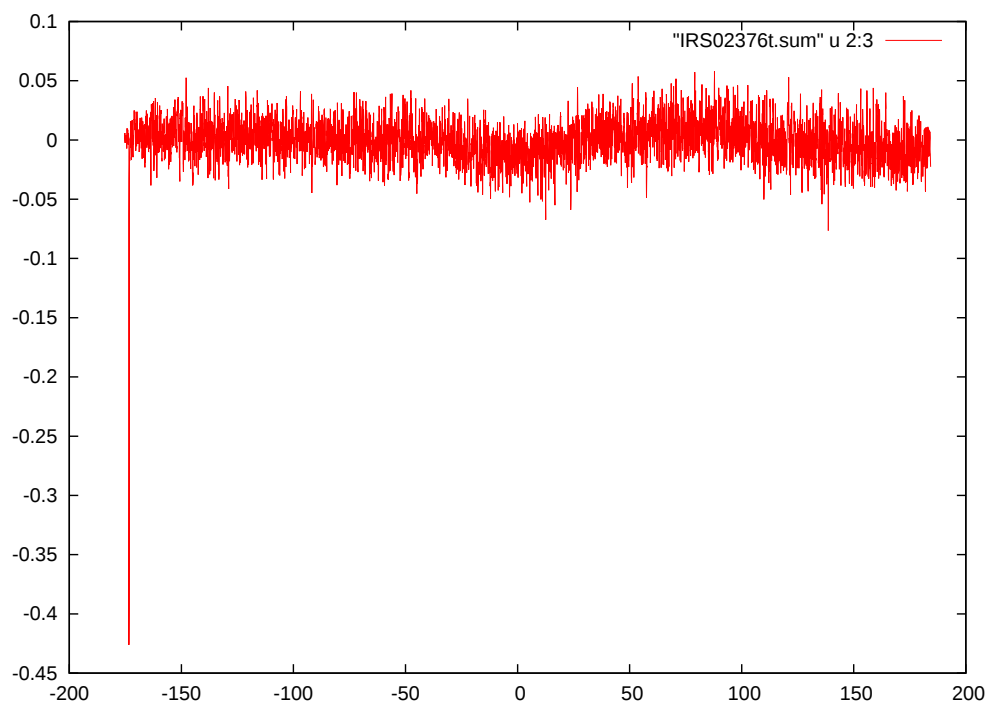
図付録 B.4 IRAS 01537+6154



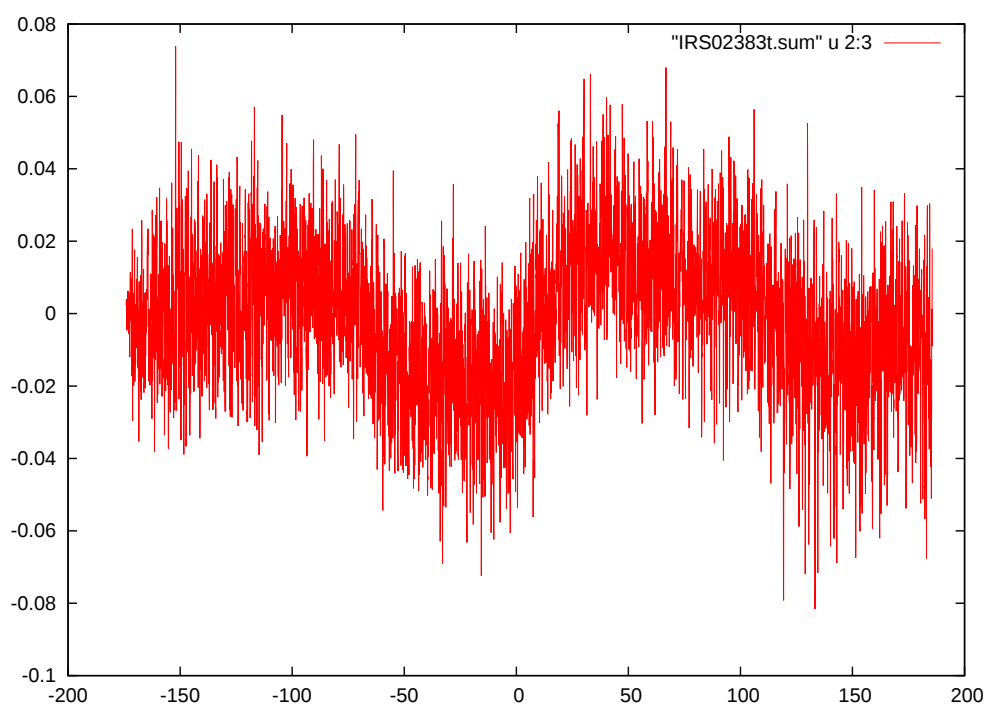
図付録 B.5 IRAS 01587+6148



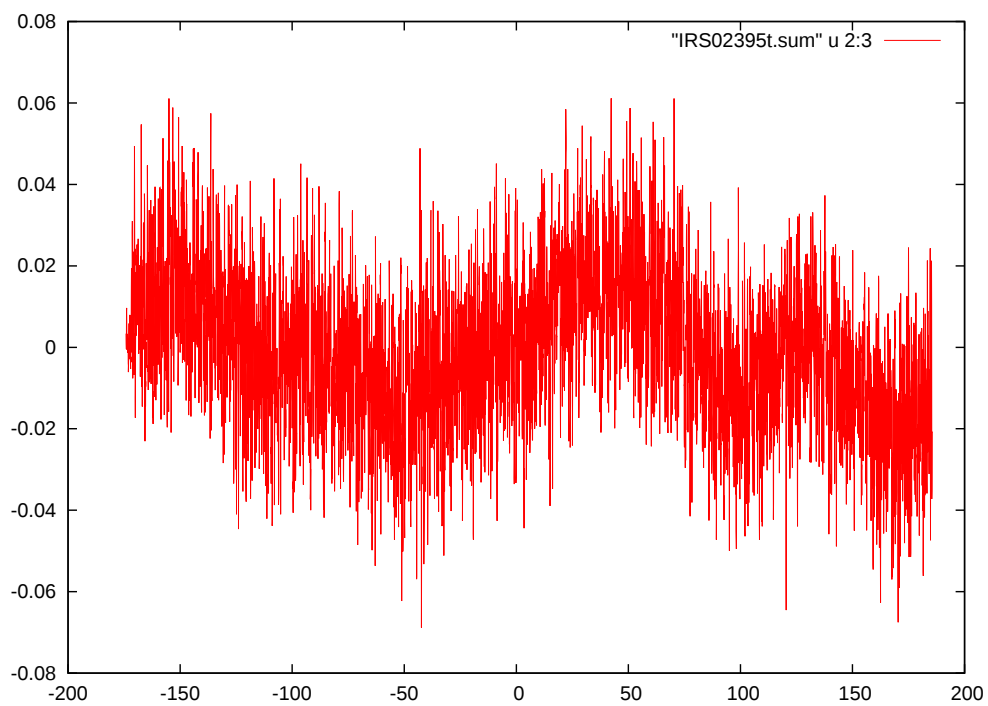
図付録 B.6 IRAS 02071+6235



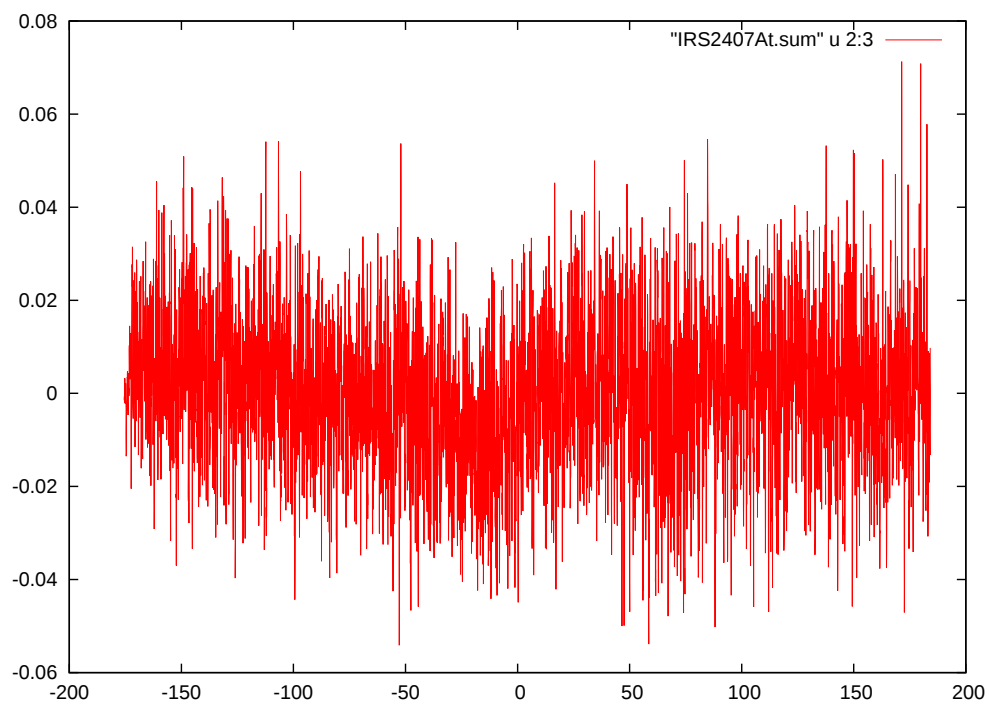
図付録 B.7 IRAS 02376+6030



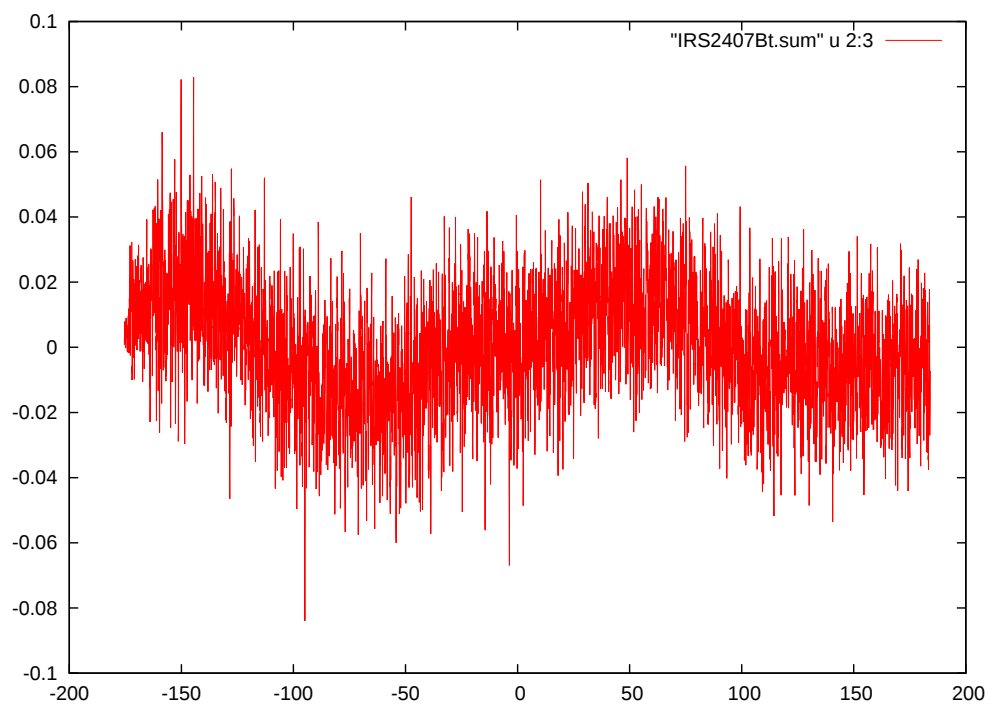
図付録 B.8 IRAS 02383+6241



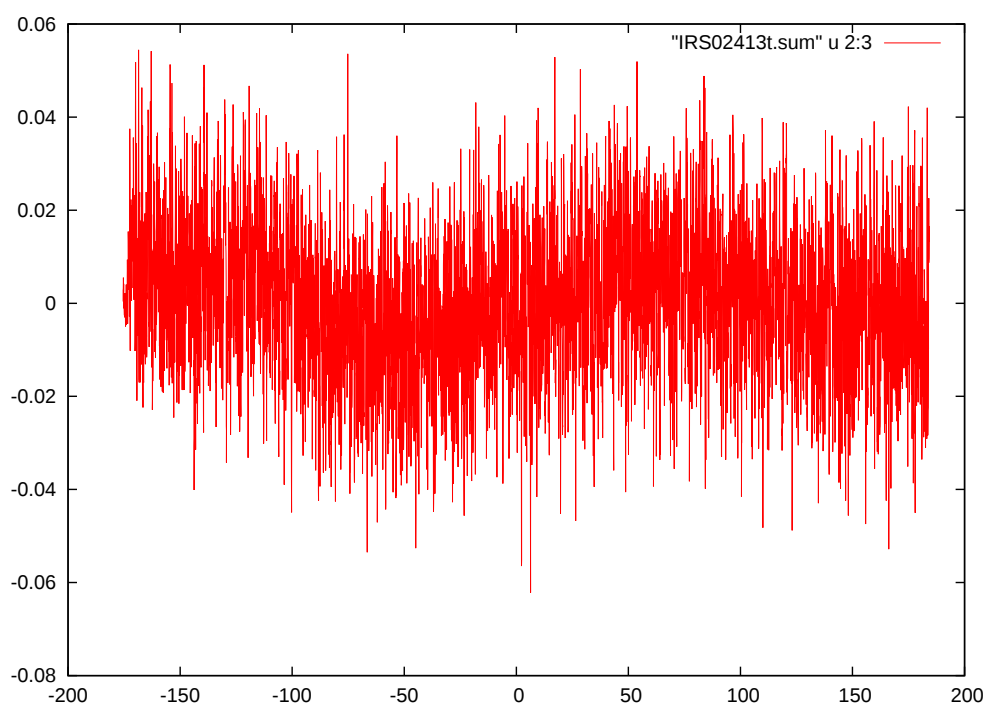
図付録 B.9 IRAS 02395+6244



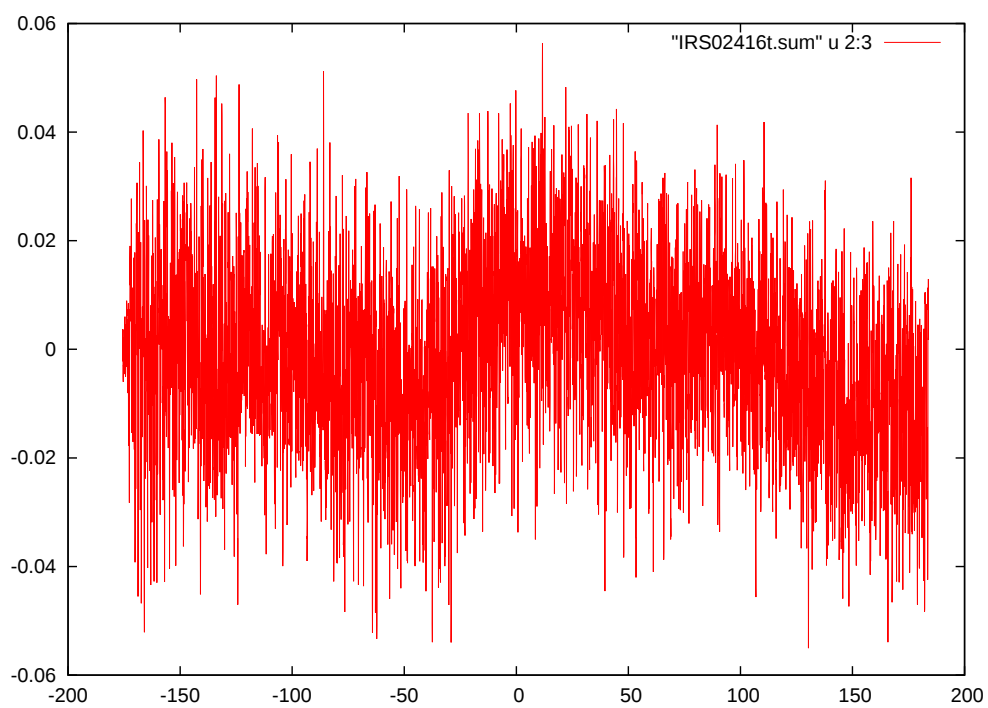
図付録 B.10 IRAS 02407+6029a



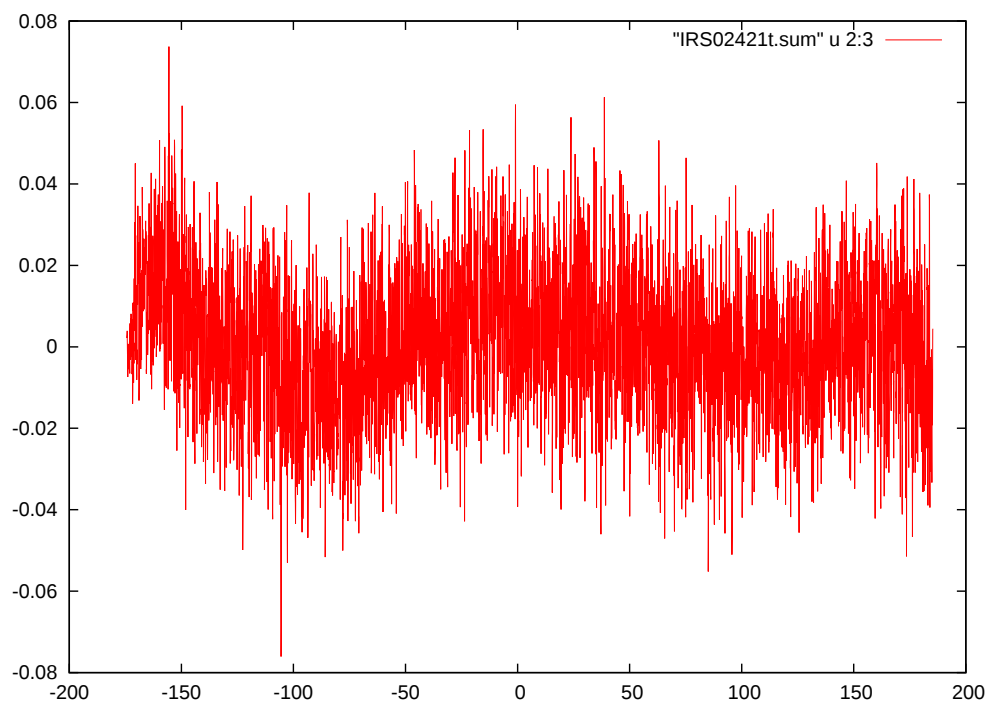
図付録 B.11 IRAS 02407+6029b



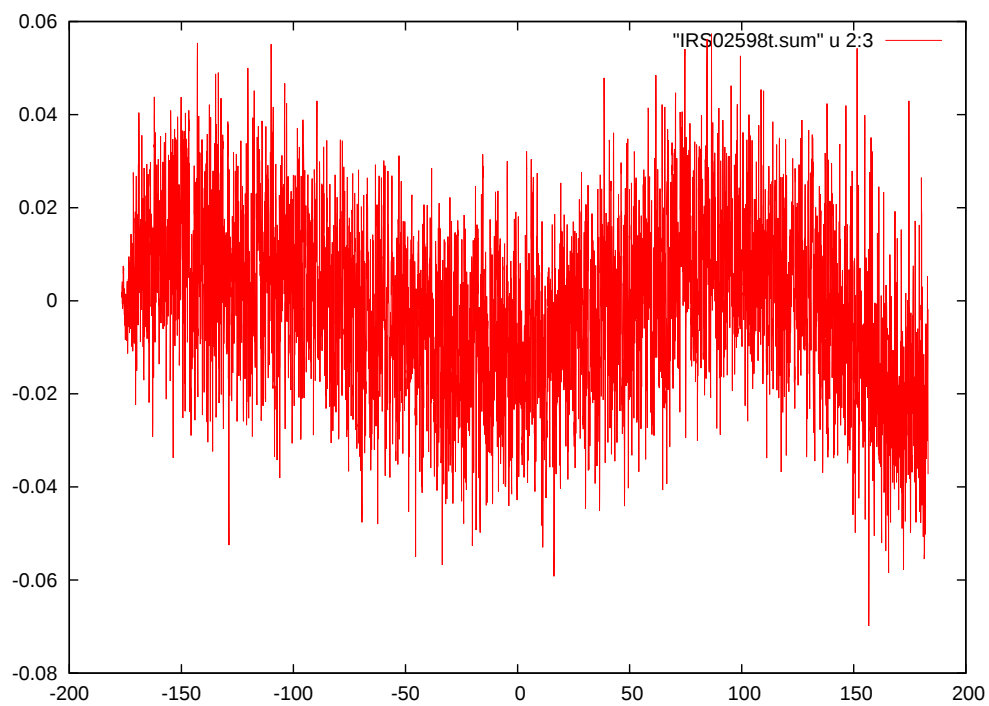
図付録 B.12 IRAS 02413+6037



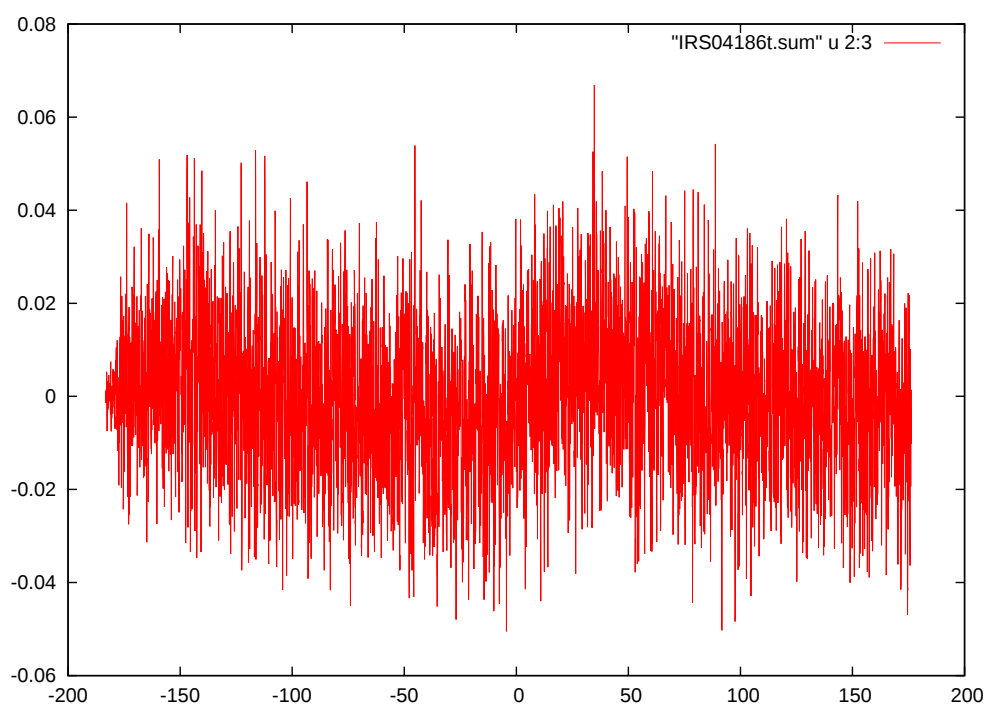
図付録 B.13 IRAS 02416+6014



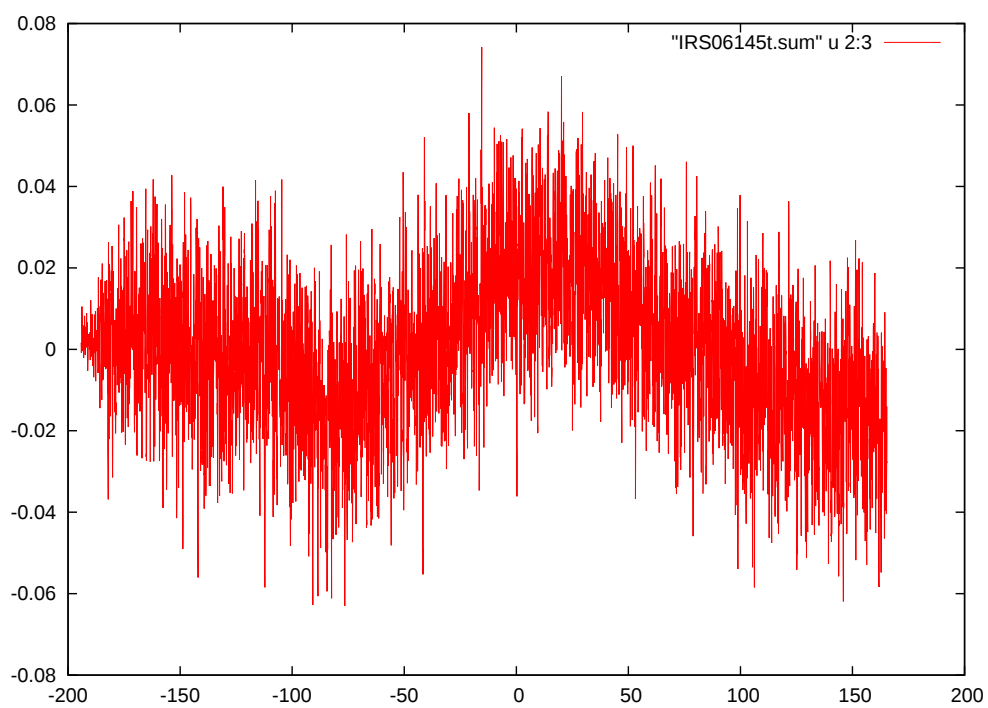
図付録 B.14 IRAS 02421+6233



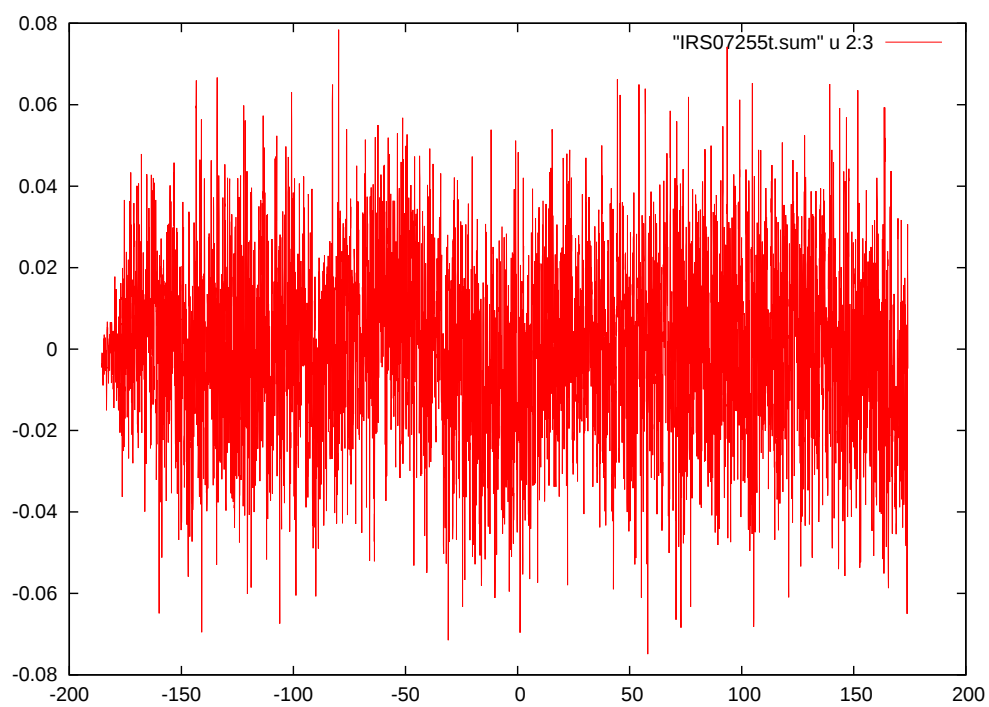
図付録 B.15 IRAS 02598+6008



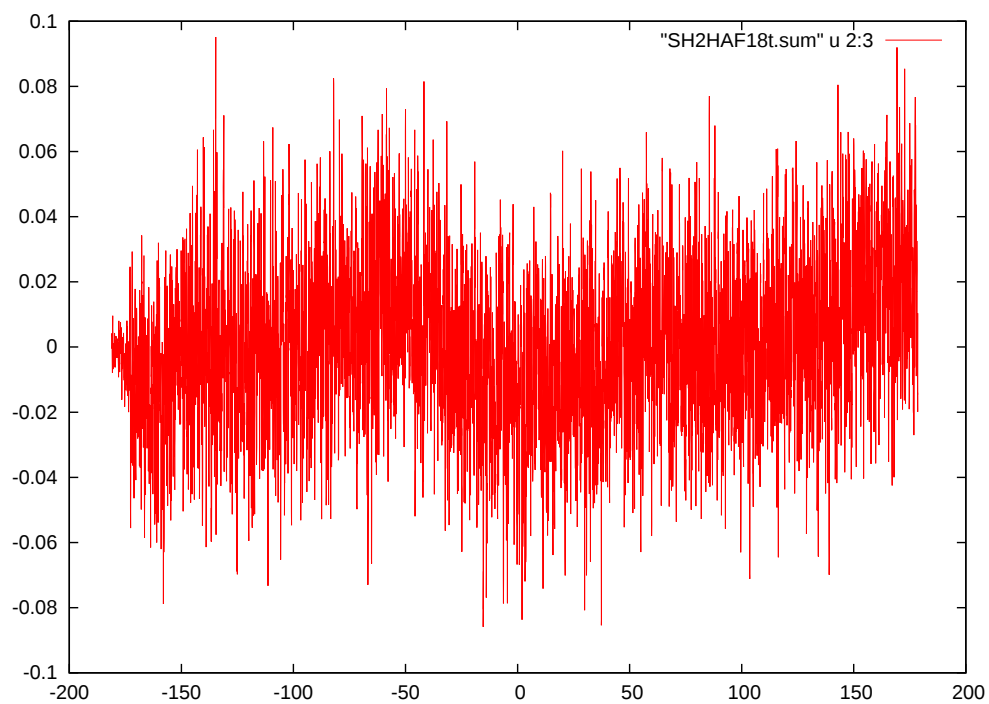
図付録 B.16 IRAS 04186+5143



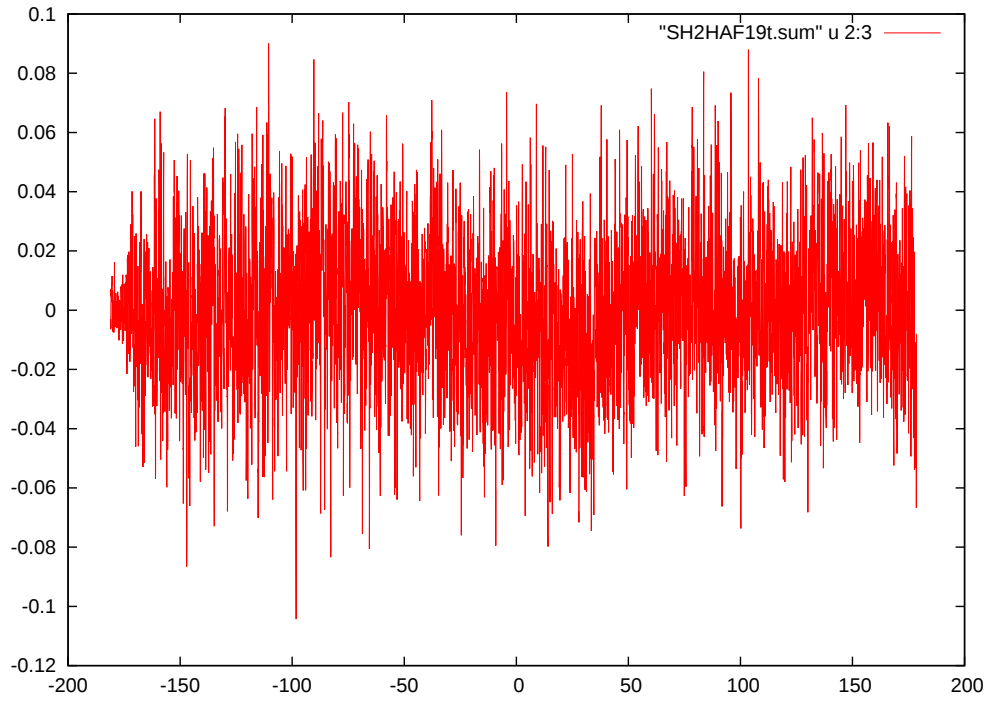
図付録 B.17 IRAS 06145+1455



図付録 B.18 IRAS 07255-2012



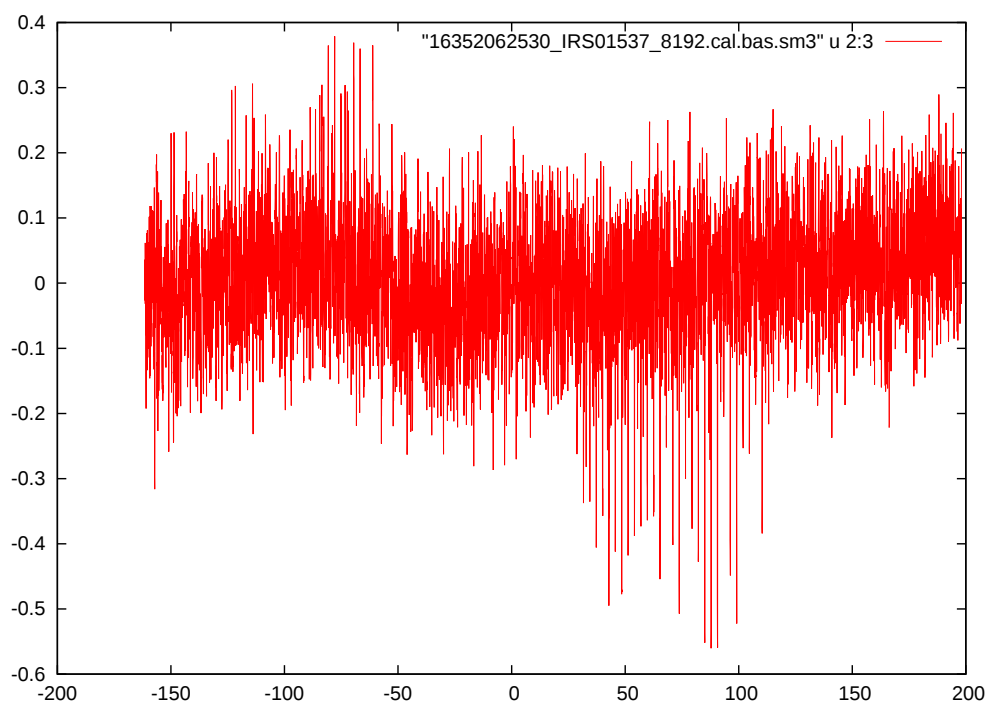
図付録 B.19 Sh2-311/Haffner 18



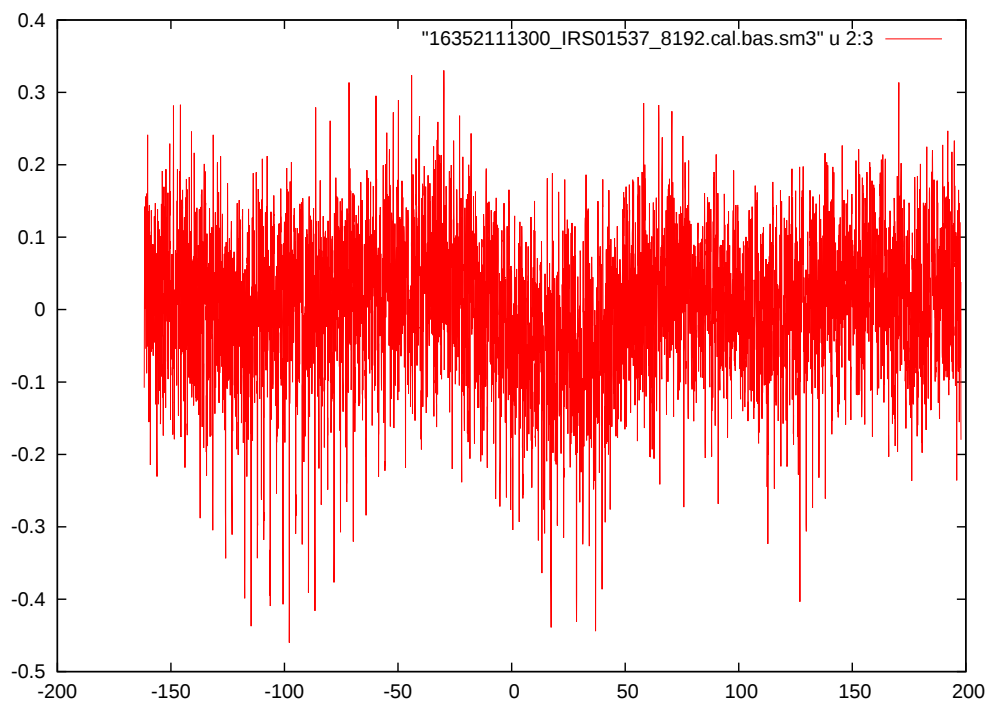
図付録 B.20 Sh2-311/Haffner 19

B.3 各観測のスペクトル

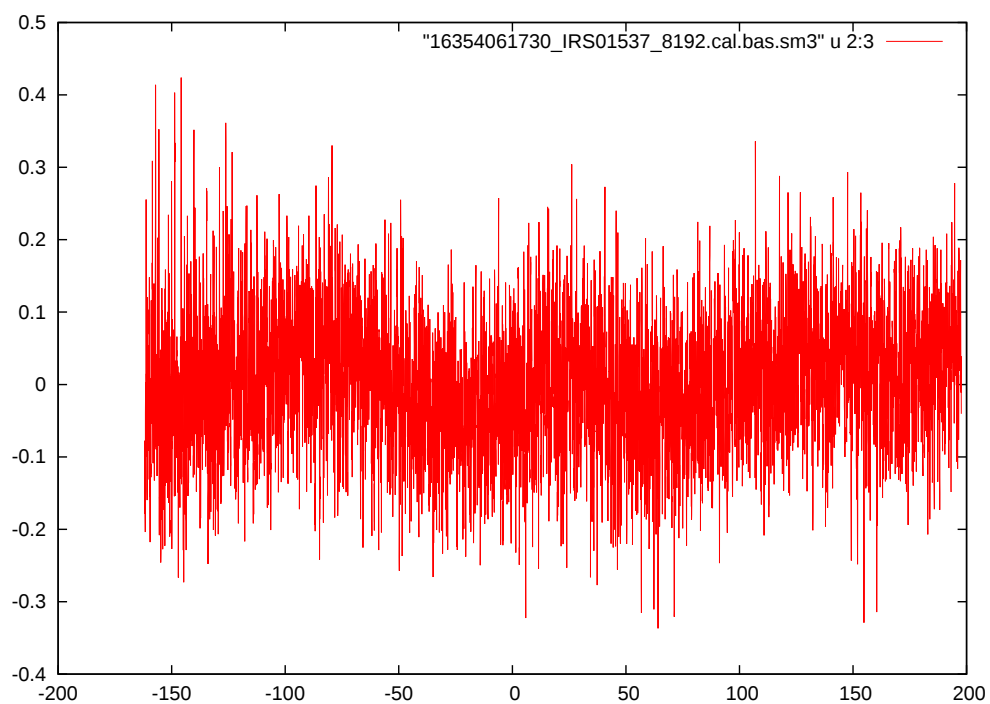
例として IRAS 01537+6154 についての ON-OFF 観測 1 セット分（平均化する前）のスペクトルを以下に示す。それぞれの図において、横軸視線速度 [km/s]、縦軸アンテナ温度 [K] である。縦軸の値に $3.43[\text{Jy/K}]$ と掛けると、アンテナ温度 [K] をフラックス密度 [Jy] に変換できる。(式 4.1)



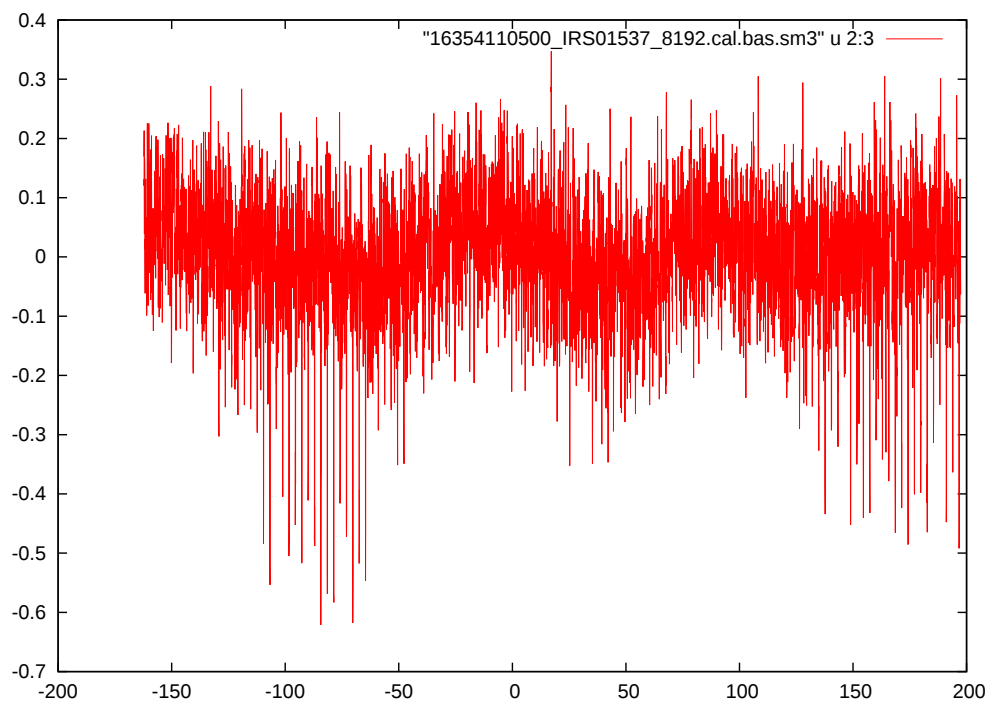
図付録 B.21 16352062530(yydddhmmss) から 300sec



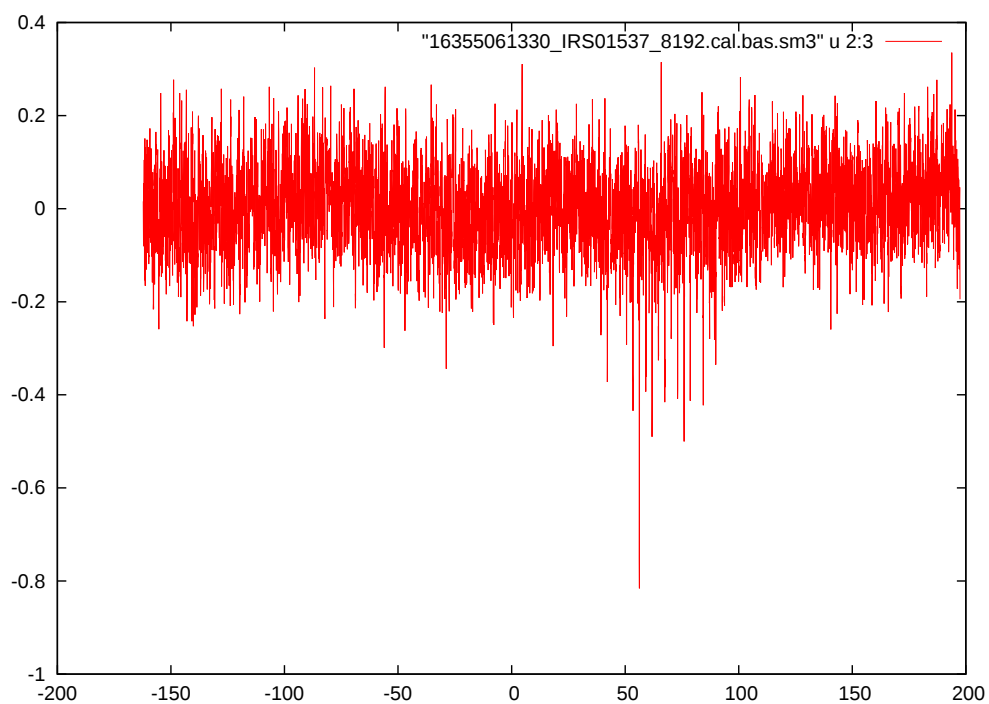
図付録 B.22 16352111300(yydddhmmss) から 300sec



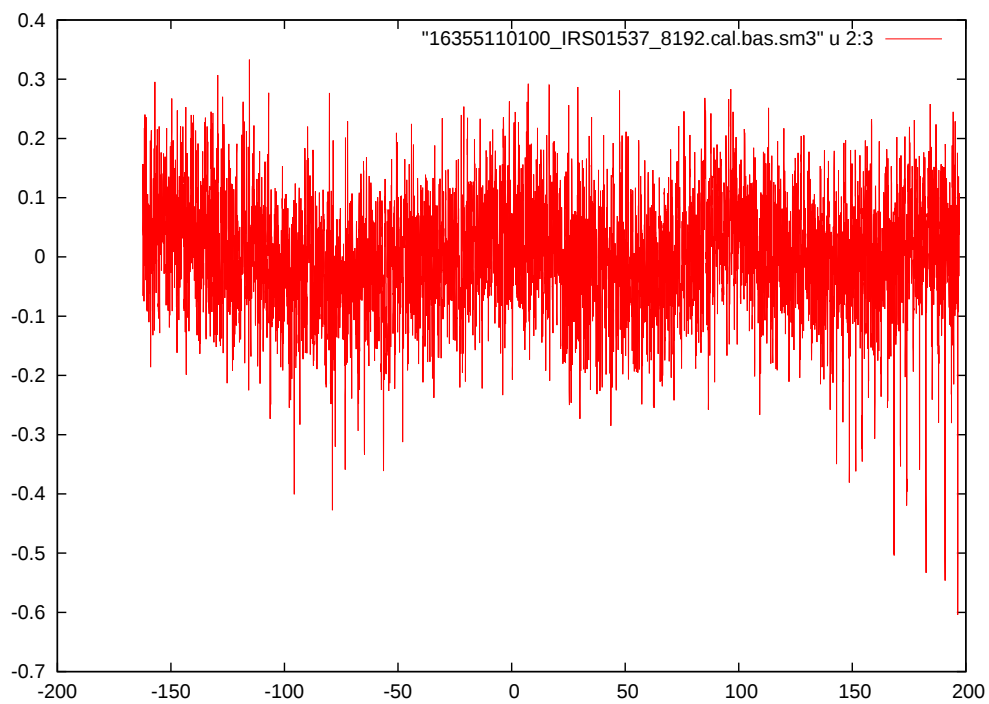
図付録 B.23 16354061730(yydddhmmss) から 300sec



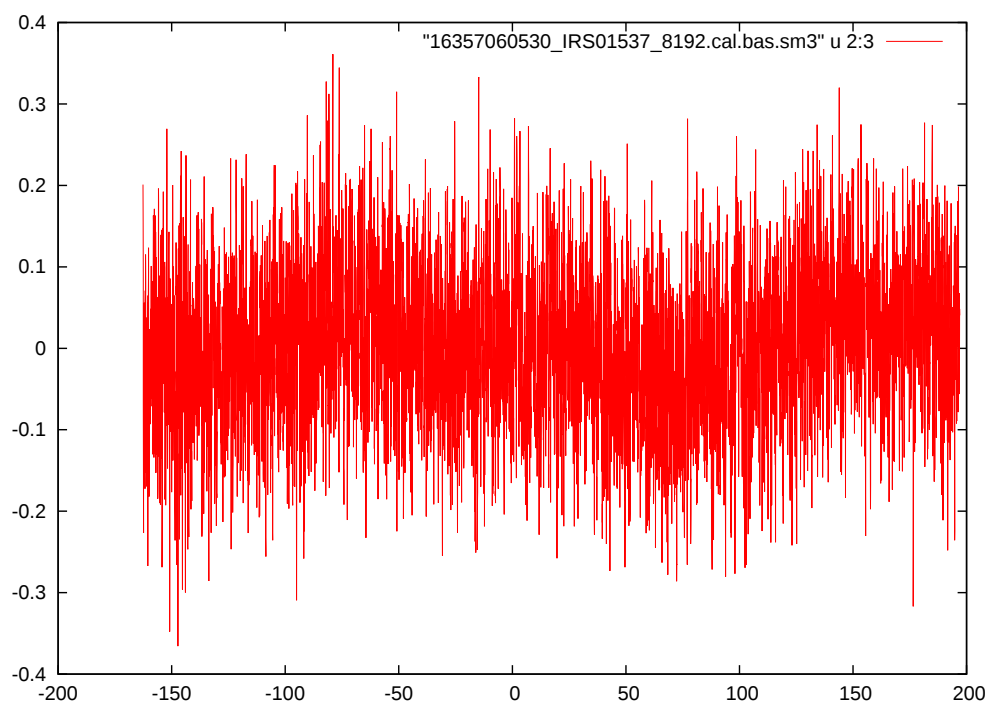
図付録 B.24 16354110500(yydddhmmss) から 300sec



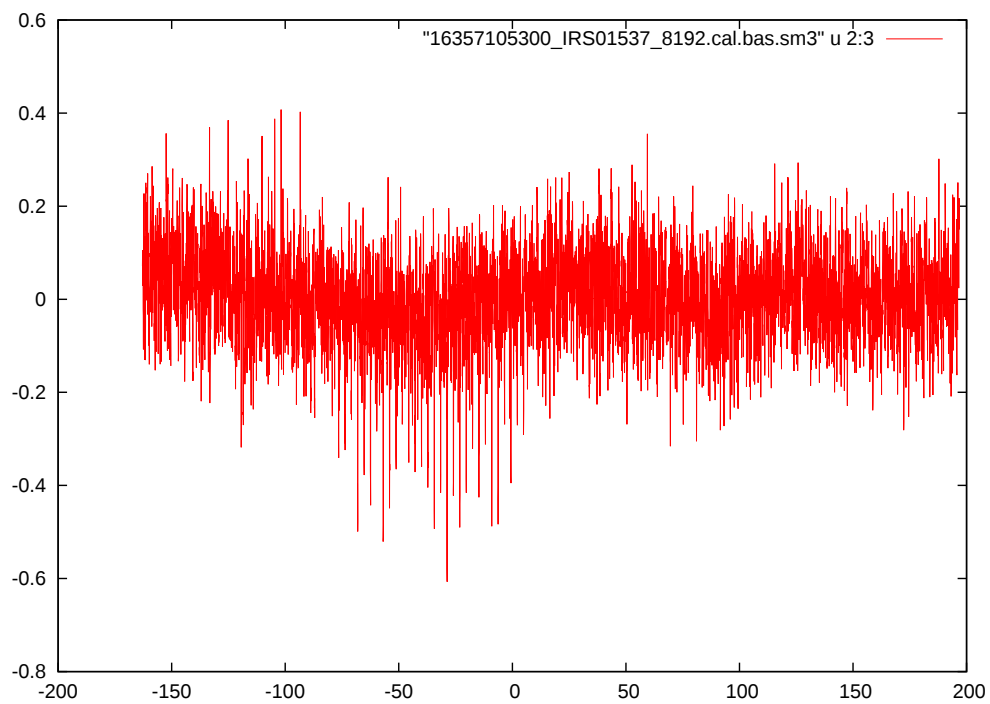
図付録 B.25 16355061330(yydddhmmss) から 300sec



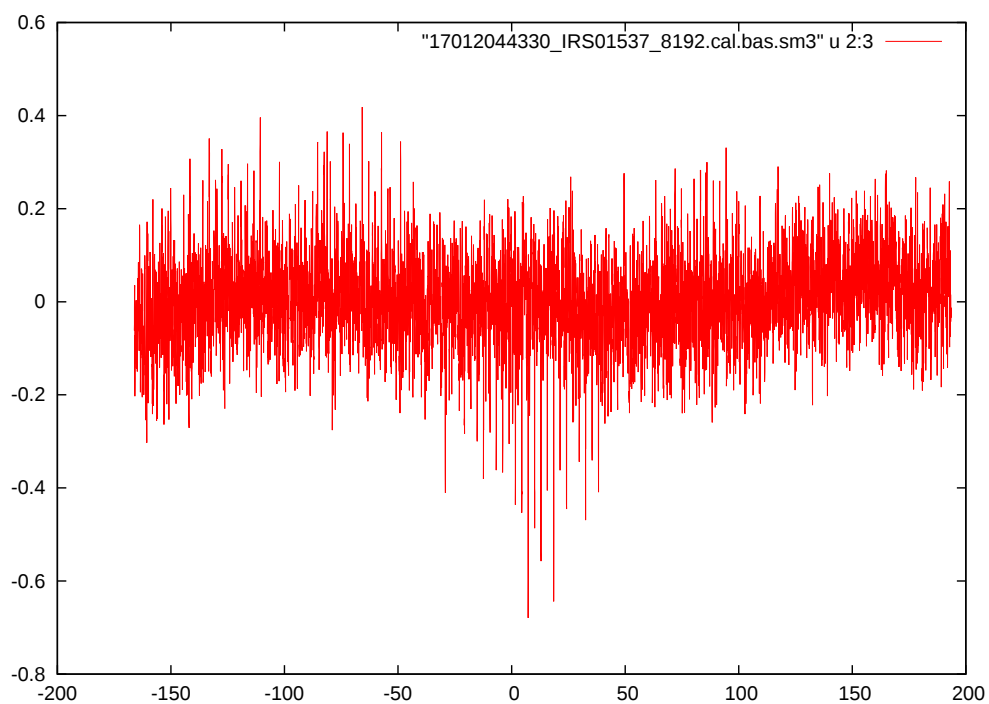
図付録 B.26 16355110100(yydddhmmss) から 300sec



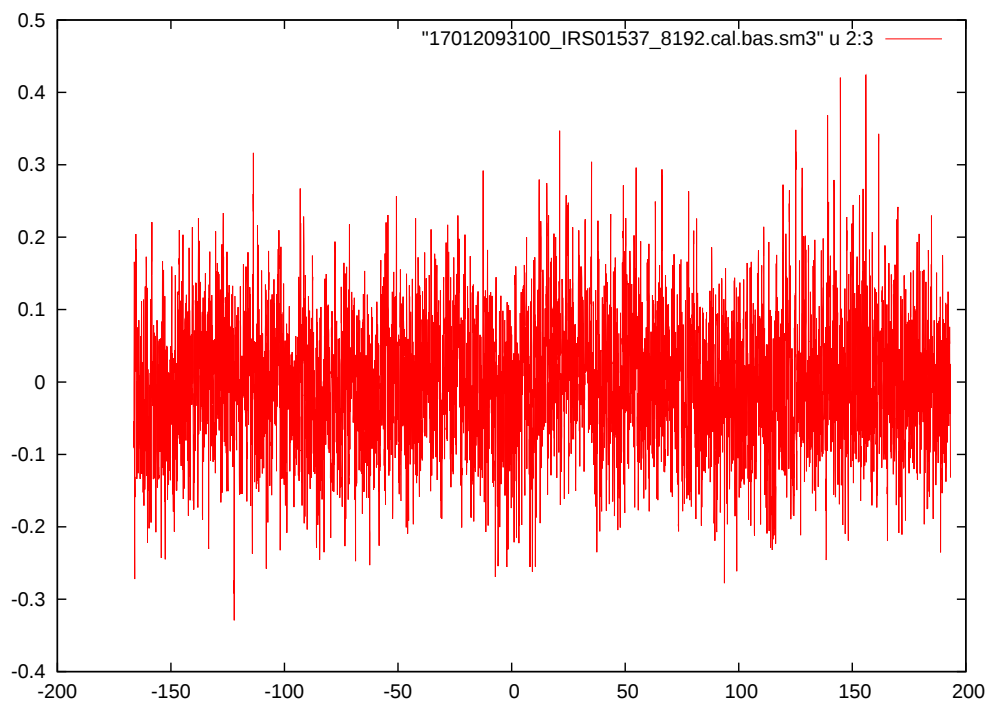
図付録 B.27 16357060530(yydddhmmss) から 300sec



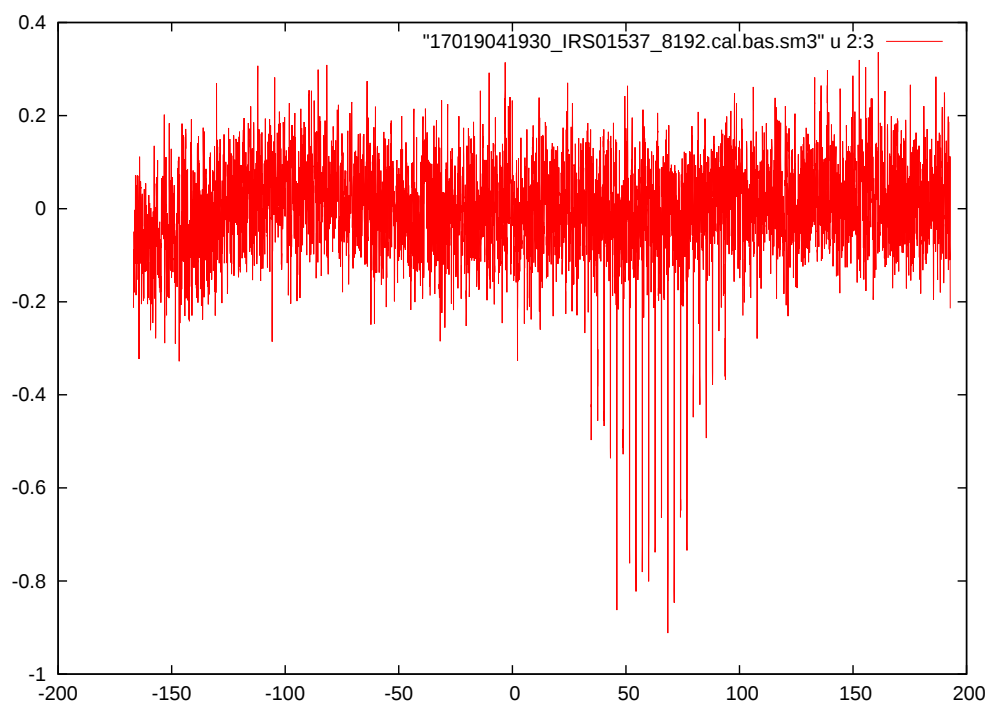
図付録 B.28 16357105300(yydddhmmss) から 300sec



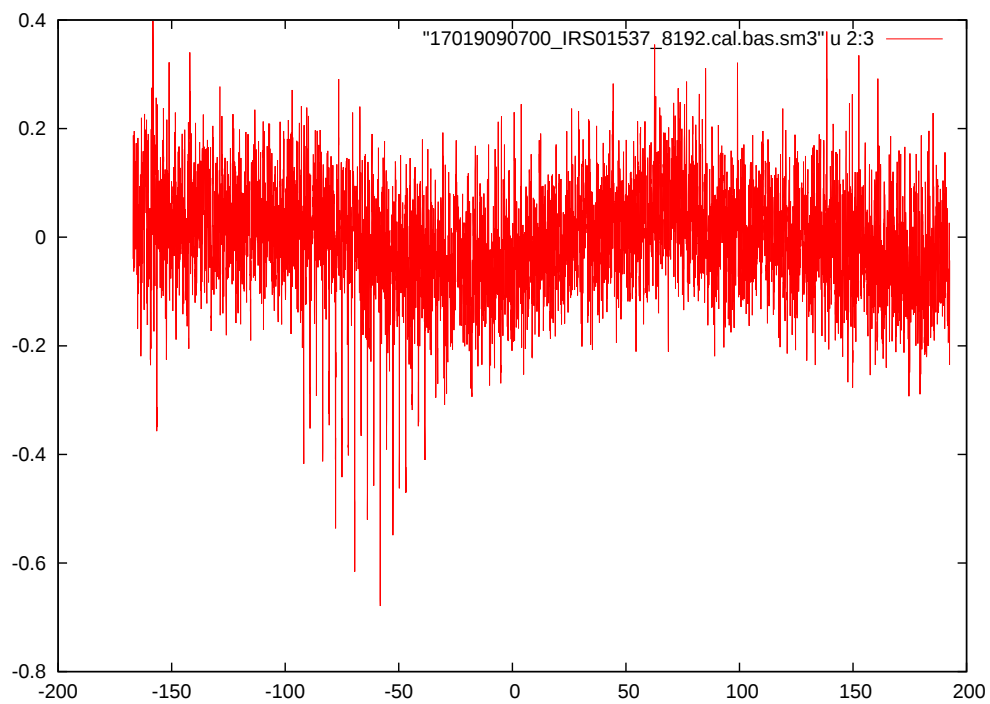
図付録 B.29 17012044330(yydddhmmss) から 300sec



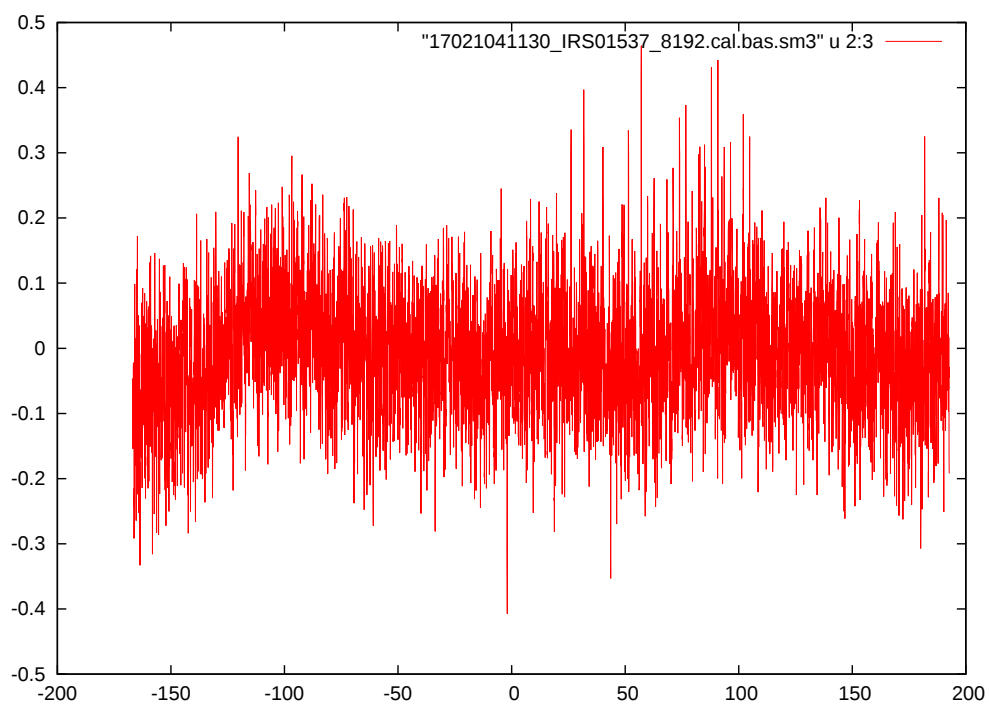
図付録 B.30 17012093100(yydddhmmss) から 300sec



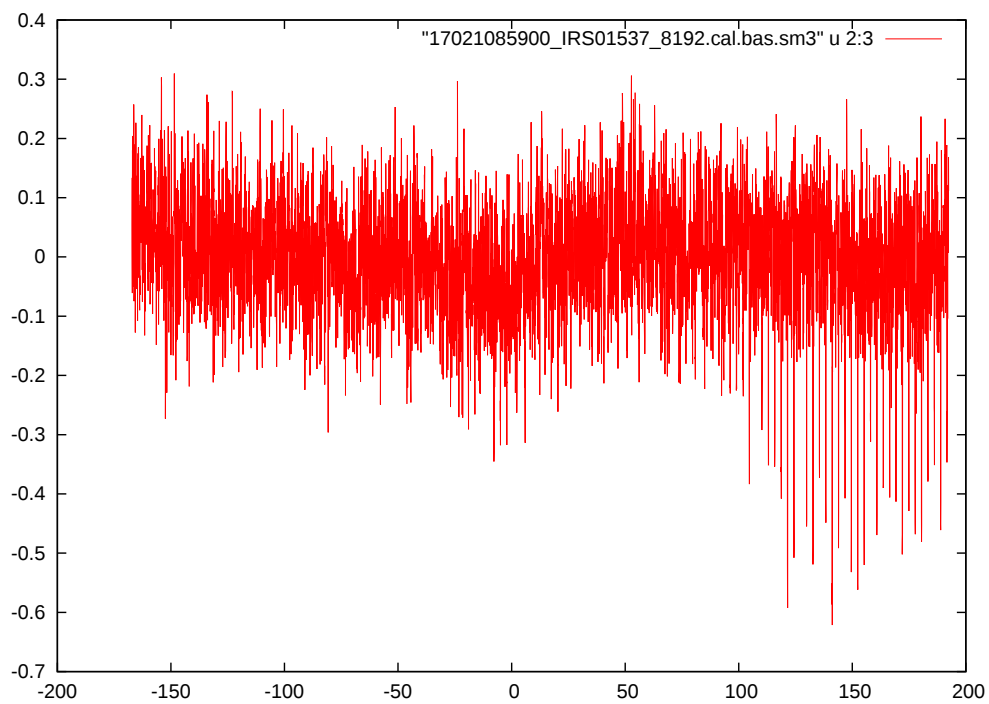
図付録 B.31 17019041930(yydddhmmss) から 300sec



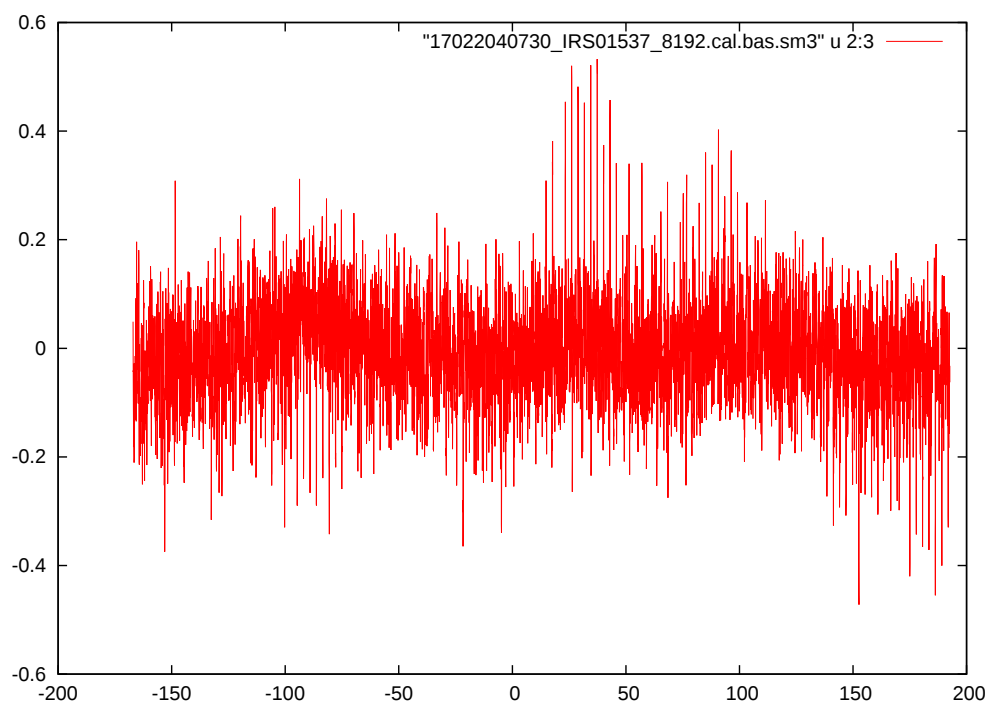
図付録 B.32 17019090700(yydddhmmss) から 300sec



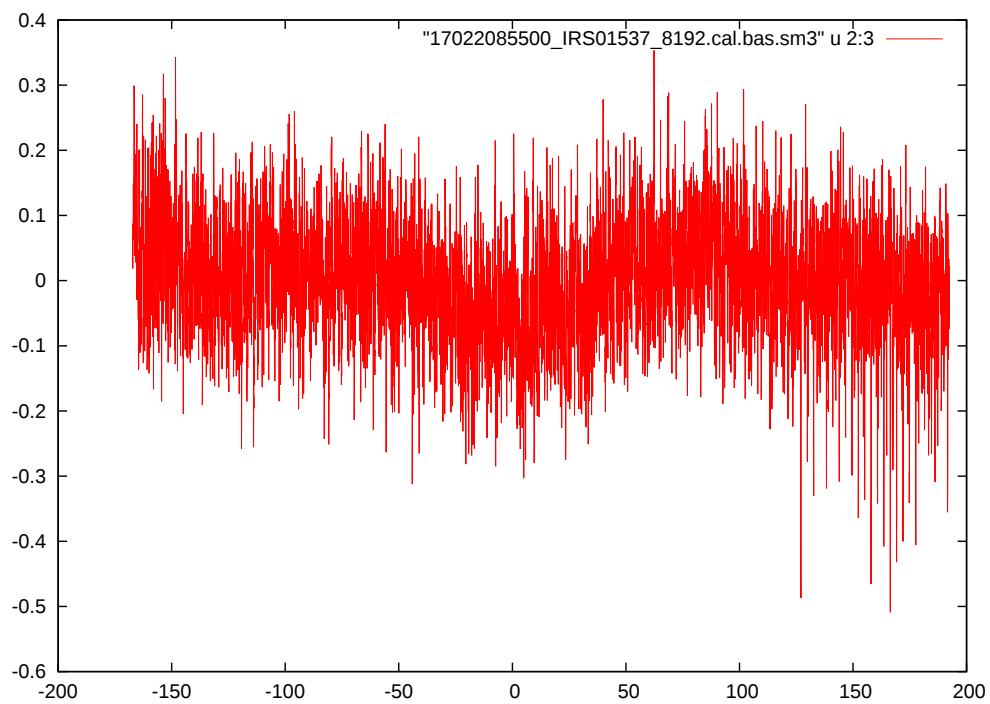
図付録 B.33 17021041130(yydddhmmss) から 300sec



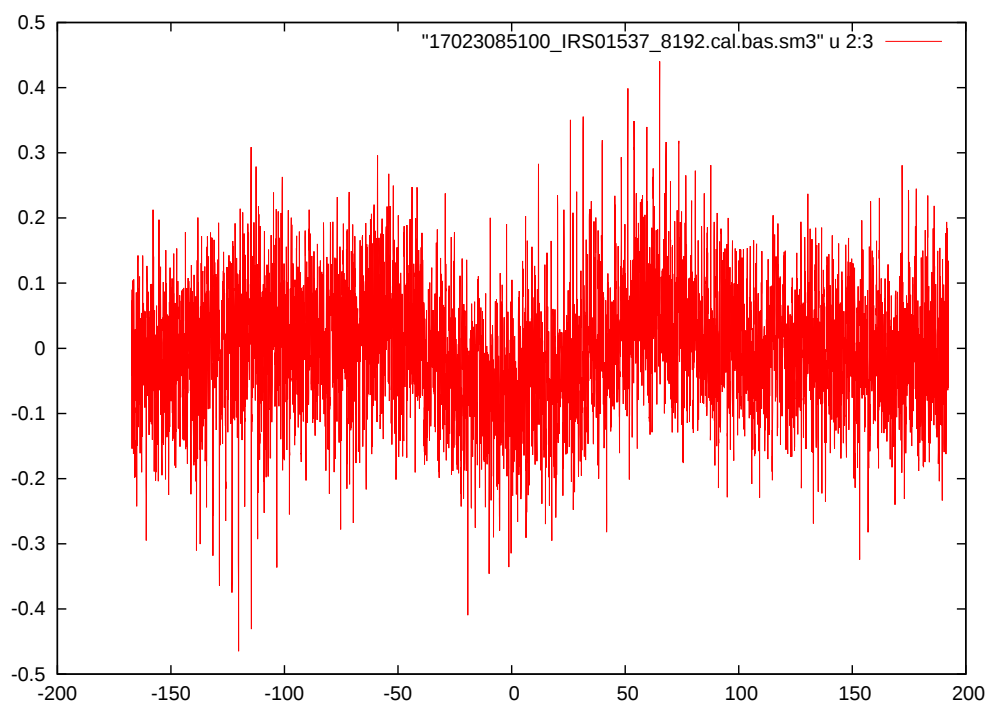
図付録 B.34 17021085900(yydddhmmss) から 300sec



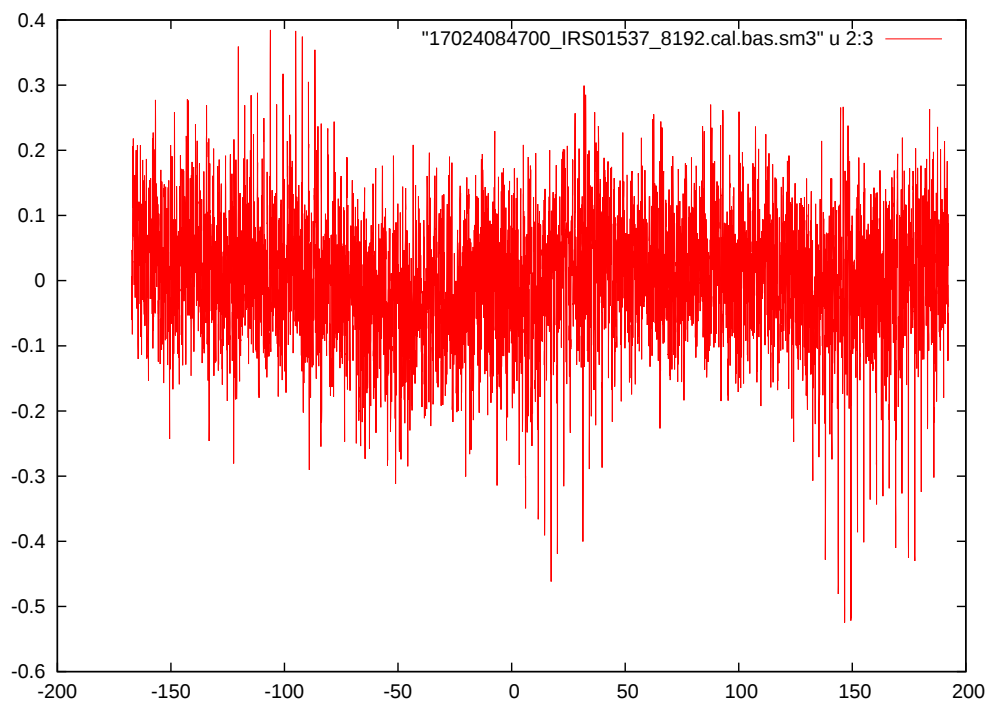
図付録 B.35 17022040730(yydddhmmss) から 300sec



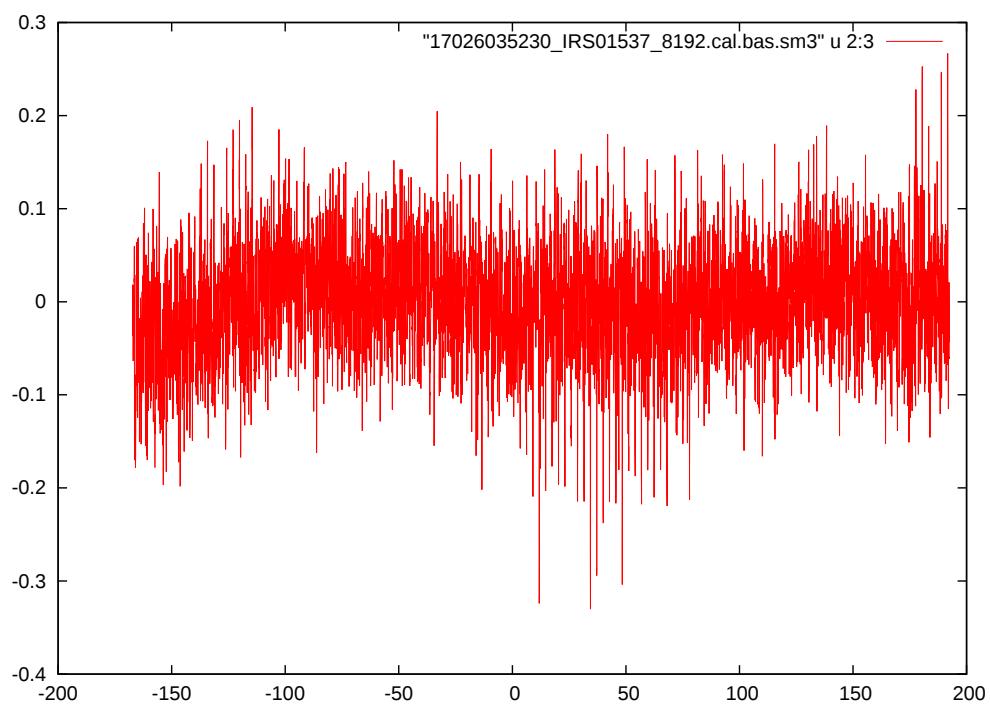
図付録 B.36 17022085500(yydddhmmss) から 300sec



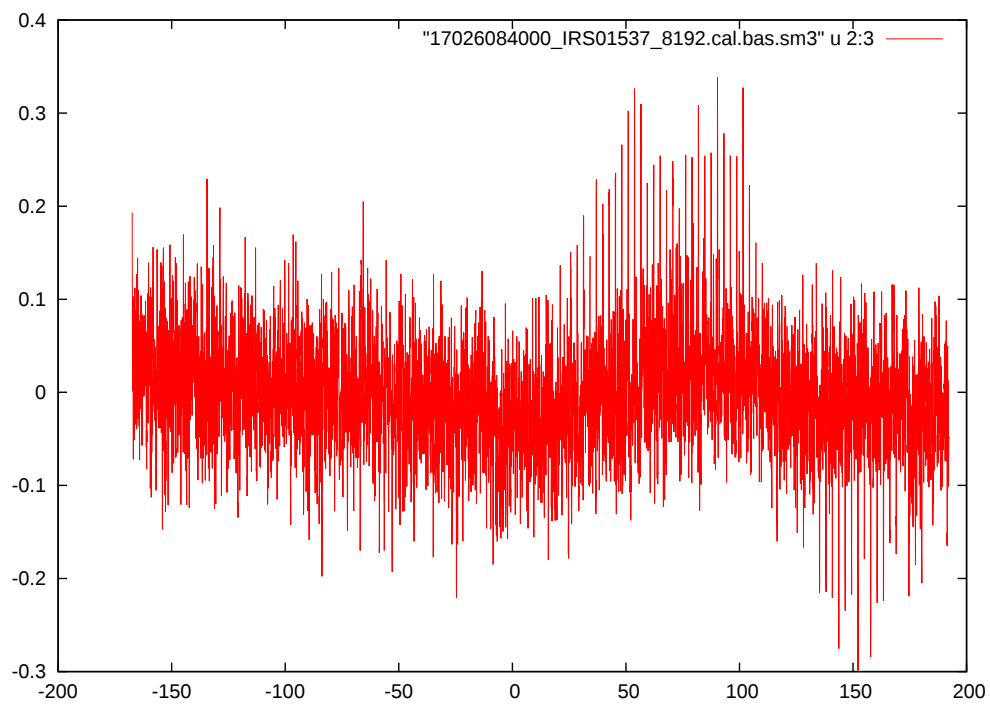
図付録 B.37 17023085100(yydddhmmss) から 300sec



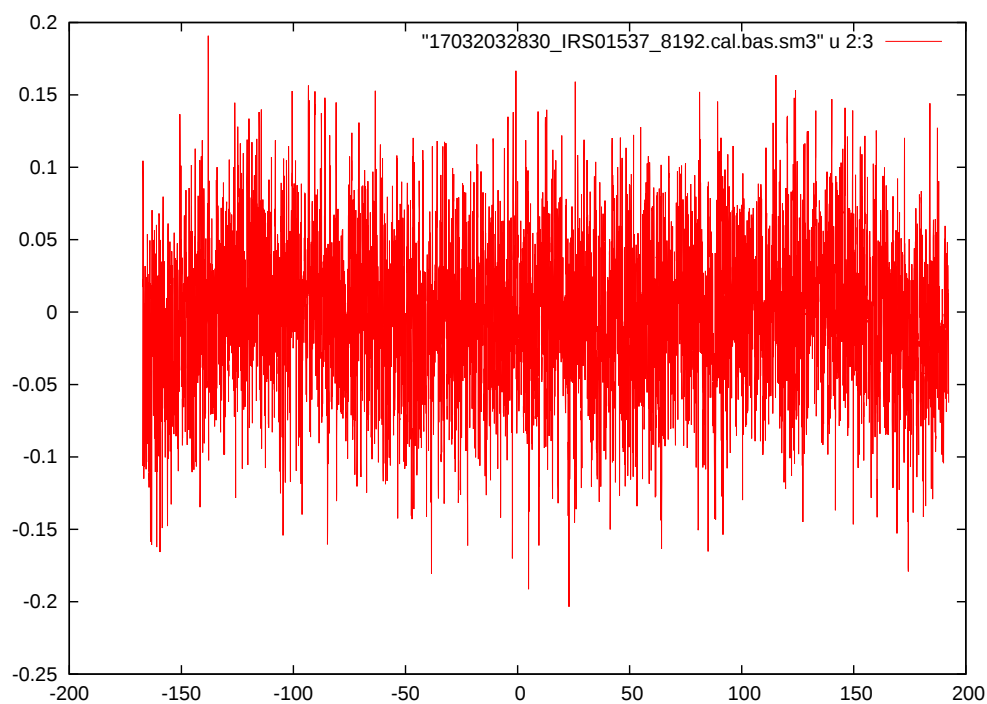
図付録 B.38 17024084700(yydddhmmss) から 300sec



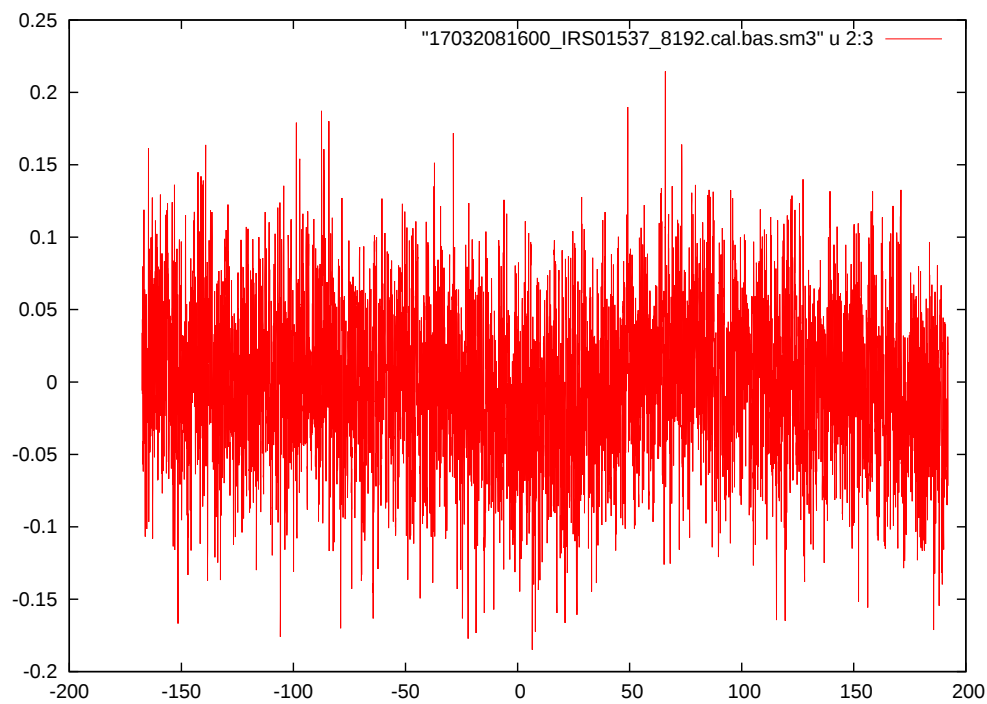
図付録 B.39 17026035230(yydddhmmss) から 300sec



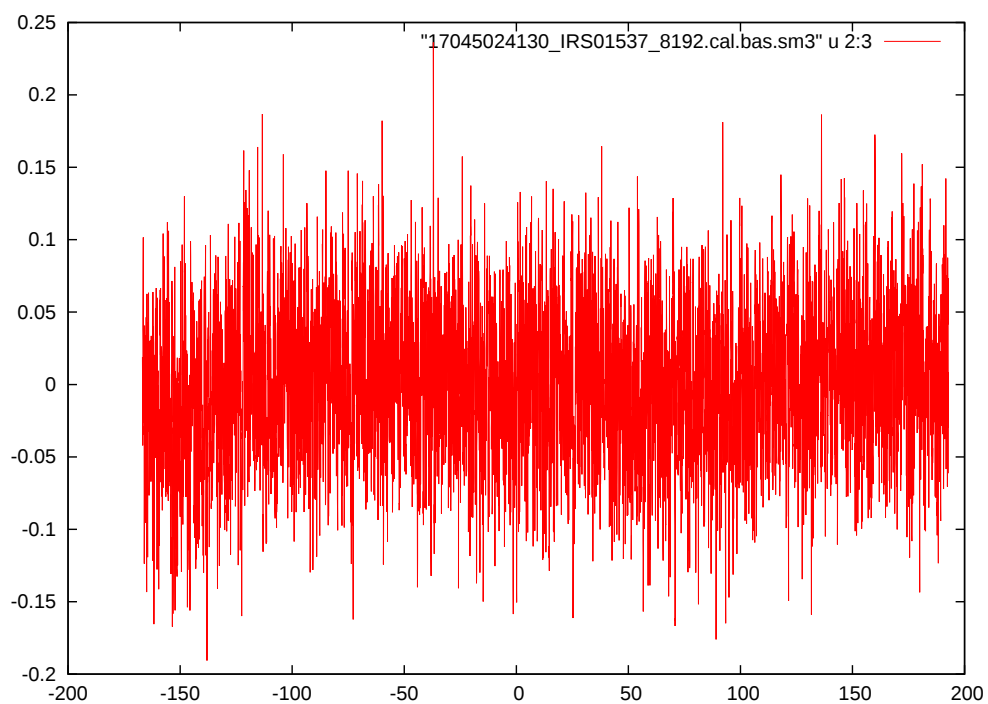
図付録 B.40 17026084000(yydddhmmss) から 300sec



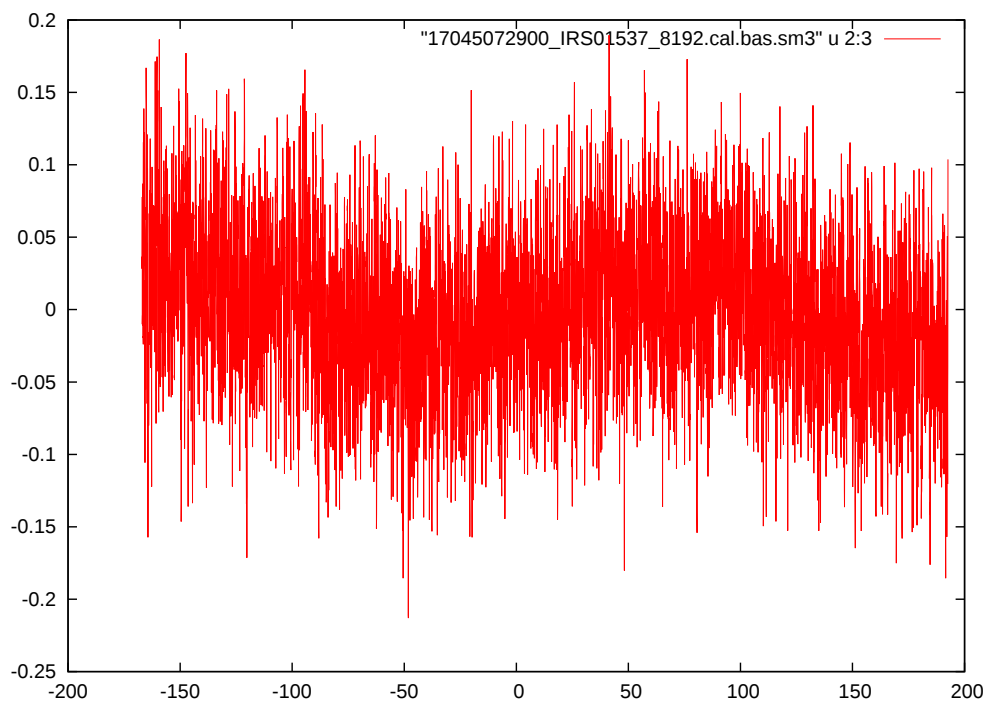
図付録 B.41 17032032830(yydddhmmss) から 300sec



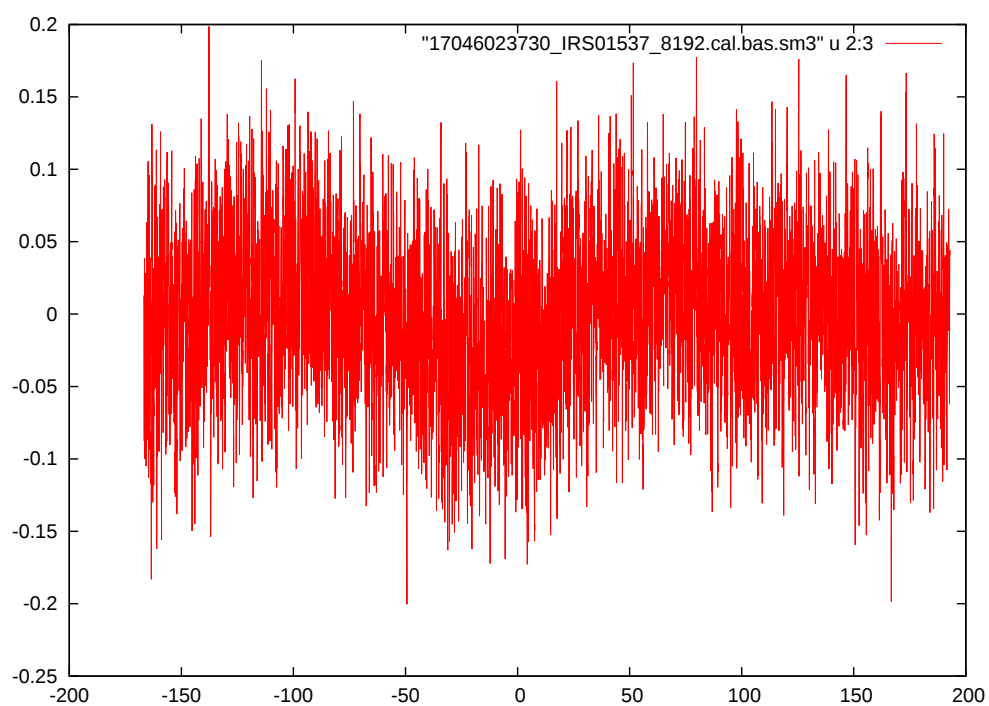
図付録 B.42 17032081600(yydddhmmss) から 300sec



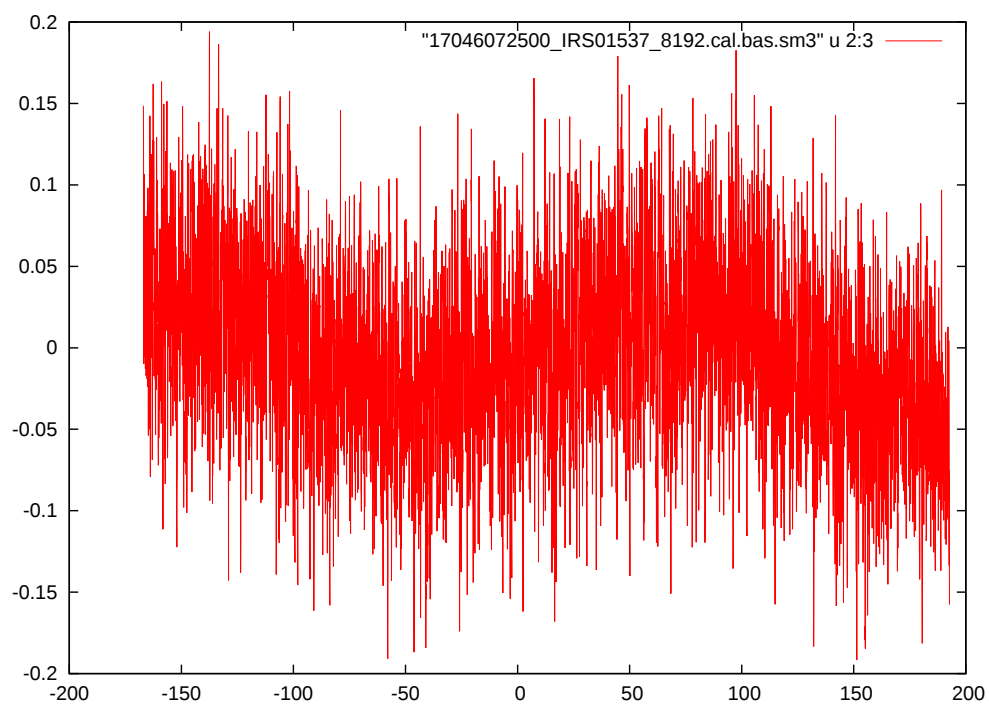
図付録 B.43 17045024130(yydddhmmss) から 300sec



図付録 B.44 17045072900(yydddhmmss) から 300sec



図付録 B.45 17046023730(yydddhmmss) から 300sec



図付録 B.46 17046072500(yydddhmmss) から 300sec