

IRAS 22198+6336 のフレアの解析

宮本 祐輔

2015 年 3 月 30 日

概 要

今回 IRAS 22198+6336 の強度変動の解析を行った。IRAS 22198+6336 は日立 32m 電波望遠鏡で 2012 年から観測を続けている。また、このモニターでは $\text{El} > 15^\circ$ で IRAS 22198+6336 を観測しているので 1 日より短い強度変動を捉えることが可能になっている。そして今回はそのうちの 2014 年 7 月に発生したフレアについて解析を行った。2014 年 7 月のデータを使用した理由は全てのスペクトル成分が観測できるように IRAS 22198+6336 の強度変動が始まる数日前から観測を開始していたためである。その結果、6 つのスペクトル成分が観測され、ピーク時には静穏時の 25 倍ほどのフラックス密度が観測された。スペクトルの変動期間は 3.57 日-7.87 日で、またスペクトルの成分ごとのピークの時間には最大 4.3 日のずれがあった。各スペクトルごとにピークに達する時間が違っていたのは IRAS 22198+6336 のそれぞれのメーザー放射をしている成分は、中心星の周囲に球殻状に位置していて、この励起源の中心星の変動に伴ってメーザー放射の強度も変動しているに過ぎないと考えられるからである。

目次

1 研究目的	p.3
1.1 大質量星の形成	p.3
1.2 6.7GHz メタノールレーザー	p.3
2 研究背景	p.3
3 観測詳細	p.4
4 結果	p.5
4.1 バインディング数について	p.5
4.2 IRAS 22198+6336 のスペクトル図	p.5
5 考察	p.7
5.1 ガウスフィッティングによる IRAS 22198+6336 の定量的な強度変動の評価	p.7
5.2 IRAS 22198+6336 のレーザー放射領域の下限値の導出	p.9
5.3 ダスト温度の導出	p.10
5.4 IRAS 22198+6336 のレーザー放射領域について	p.10
6 今後の課題・展望	p.10
謝辞	p.11
付録 ダスト温度導出	p.11
参考文献	p.13

1 研究目的

1.1 大質量星の形成

この研究の目的はメタノールメーザーに見られる周期的な強度変動の原因の解明にあり、最終目的は大質量星の形成過程の解明になる。大質量星とは太陽質量の 8 倍以上の質量を持つ天体のことであるが、その形成過程の標準モデルはまだ確立されていない。小質量星や中質量星はすでに標準モデルが確立されており、実際に観測例もある。

その標準モデルを簡潔に説明すると、まず高密度分子雲コアの重力崩壊の結果、その内部に非常に小さな原始星が形成される。それが外層の物質の降着により質量を増して主系列星にまで成長する、というものである。

これを大質量星に当てはめようとするとき 2 つの問題が障壁となり大質量星を形成するモデルとなり得ないことが分かる。その 2 つの問題とは

(1): 寿命問題

(2): フィードバック問題

である。

まず寿命問題とは、大質量星の寿命の短さからくる問題で、小・中質量星の典型的な質量降着率 $10^{-5} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ で質量を増加させていくと考えると、大質量星の寿命は 200-300 万年と短いので、せいぜい $30-40 M_{\odot}$ 程度までしか大質量星は成長しなくなってしまうという問題である。

次に、フィードバック問題とは、中心星が主系列星 ($10^8 M_{\odot}$) になった後、その中心星が膨大な放射をするために、周囲の星間微粒子が中心星に降着することができないという問題で、 $10^{-5} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ の条件の元では $10-20 M_{\odot}$ より大きい星を球対称的な降着により形成することが困難である、という問題である。

これを解消するために現在二つの形成シナリオ (降着説と合体説) が提唱されている。降着説とは降着率が $10^{-5} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 程度ではなく、 $10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 程度なら $30-40 M_{\odot}$ 以上の質量を持つ大質量星の形成も可能である説のことで、合体説とは、大質量星は星団の高密度な中心部に存在しているので、星同士の衝突・合体によって大質量星が誕生したという考えのことである。

だがこの二つの説を裏付ける現象はまだ発見されておらず、どちらのシナリオが正しいのかという結論は出ていない。また、寿命問題とフィードバック問題により小・中質量星形成の標準モデルも当てはまらないことが分かる。なので大質量星の形成過程を解明することは充分意義のあることである。

1.2 メタノールメーザー

メタノールメーザーに見られる周期的な強度変動の原因の解明と大質量星形成過程の解明の関連性は、大質量星の光度の周期的変動に起因していると思われる現象が検出されたためである。

またメタノールメーザーを用いる理由は、それが大質量星形成領域のみで観測でき、かつ明るいからである。また大質量星は星の材料となるガスやダストの濃い領域で形成されるが、電波ならガスやダストの影響を受けにくいと観測可能であるという利点もある。

2 研究背景

これまでに、メタノールメーザーで周期変動を示す天体は 12 確認されているが、その周期は 30 日程度から 600 日を越えるものまでである。その中で IRAS 22198+6336 は 2 番目に短い周期を示す天体であり、山口大学で初めて確認された (Fujisawa et al. 2014)。

そこでは、5つのスペクトル成分と34.6日ごとのフレアの周期があり、スペクトルのピークは1.8日ずれているとある(図1、図2はFujisawa et al. 2014より抜粋)。

また、これまでのような観測の頻度が月に1度やそれ以下では、このIRAS 22198+6336のような30日以下の周期を持つ天体は発見できないだろうともある。

それを受けて茨城大学の日立32m電波望遠鏡で、Fujisawa et.al 2014では議論されていないフレアの立ち上がり期間の変動傾向や、微弱な成分の変動傾向及び他の成分に対する遅延を明かにしていく目的で追観測を行った。

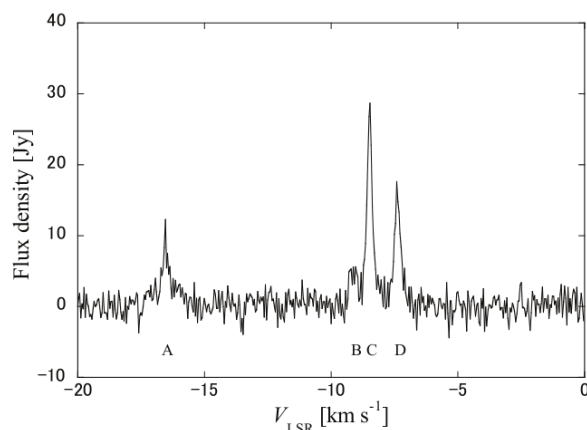


図1: 2011年(MJD=55819)に観測されたIRAS 22198+6336のスペクトル

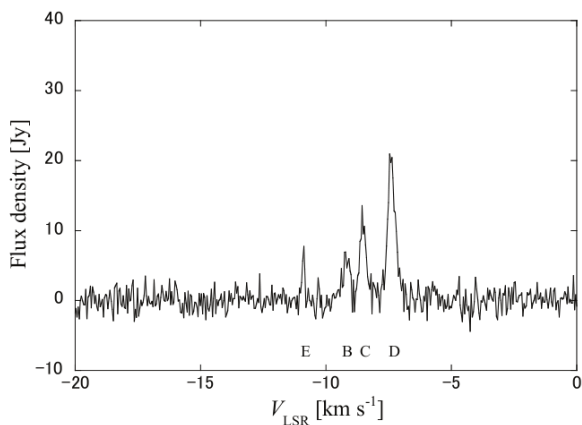


図2: 2012年(MJD=56235)に観測されたIRAS 22198+6336のスペクトル

3 観測詳細

IRAS 22198+6336の観測は2012/12/30から2014/01/10及び2014/05/05から現在まで、日立32m電波望遠鏡を用いて毎日モニター観測している。またフレアの前後及び期間中は各観測日内で $EL=15^\circ$ 以上の時でIRAS 22198+6336を観測することで可能な限り高頻度のモニター観測を行った。

日立32m電波望遠鏡のビームサイズは5分角で、観測帯域、分光点数、速度分解能はそれぞれ8MHz、8192点、 $4.4 \times 10^{-2} \text{ km s}^{-1}$ となっている。積分時間は5分で、rmsノイズ(1σ)は0.3Jyである。

また、IRAS 22198+6336 を高頻度で観測することにより、1 日の中で全積分することで、約 3 時間の積分時間を確保することも可能になっていて、 $3\sigma \sim 0.1\text{Jy}$ ほどの高感度も達成できる。

4 結果

4.1 解析に使用する観測データの決定方法について

IRAS 22198+6336 の解析をするに当たり、どの観測データを IRAS 22198+6336 からの電波を観測したとして、解析に使用するかということについて今回は以下のような基準を設けた。

検出感度は 3σ とする。さらに、 3σ に満たない観測データについても、複数データを 1 つにまとめることで検出感度 3σ を達成するようにした (バインディングと呼ぶ)。

また、バインディングについても以下のような基準を設けた。

- まず 1 日の全てのスキャンを積分し、 3σ 以上の検出が見られた成分に対し、 3σ を達成できる最低バインディング数をその日のバインディング数とする。
- バインディング数を統一するのは同じ観測日内だけとする。なので、観測日ごとにバインディング数が違うことがある。

その結果、各観測日ごとのバインディング数は表 1 のようになった。

表 1: IRAS 22198+6336 の観測日ごとのバインディング数及び 1 日ごとのスキャン数

観測コード	観測日 (yyyy/mm/dd,UT)	バインディング数	スキャン数
P14194S	2014/07/13,04:25 - 2014/07/13,17:44	14 or 15	2
P14195S	2014/07/14,00:18 - 2014/07/14,15:52	1	29
P14196S	2014/07/15,00:14 - 2014/07/15,17:36	1	38
P14197S	2014/07/16,00:10 - 2014/07/16,17:32	1	38
P14198S	2014/07/17,00:06 - 2014/07/17,17:28	1	38
P14199S	2014/07/18,00:02 - 2014/07/18,17:24	1	38
P14200S	2014/07/18,23:58 - 2014/07/19,17:20	1	38
P14201S	2014/07/20,03:09 - 2014/07/20,17:16	1	33
P14202S	2014/07/20,23:50 - 2014/07/21,17:12	1	38
P14203S	2014/07/21,23:46 - 2014/07/22,17:08	3 or 4	12
P14204S	2014/07/22,23:42 - 2014/07/23,17:04	9 or 10	4

4.2 IRAS 22198+6336 のスペクトル図

4.1 で行ったバインディングを踏まえて、今回 (UT) 2014/07/12,00:26-2014/07/26,17:04 (MJD=56850.0-56864.7) までの観測データの解析を行った結果、MJD=56851.2-56861.7 で IRAS 22198+6336 のスペクトルが確認された。IRAS 22198+6336 の速度成分は全部で 6 つ確認でき、A から順に ($V_{\text{LSR}} = -16.90 \text{ km s}^{-1}$)、B (-16.06 km s^{-1})、C (-10.91 km s^{-1})、D (-9.15 km s^{-1})、E (-8.51 km s^{-1})、F (-7.34 km s^{-1}) とした。

図 3 に IRAS 22198+6336 のフレア時スペクトル (黒) と静穏時 (緑) のスペクトルを示す。フレア時のスペクトル (黒) は観測コード P14198S における積分時間 190 分のスペクトル図で、静穏時のスペクトル (緑) は P14193S における積分時間 190 分のスペクトル図である。

また図 4、図 5 に IRAS 22198+6336 の全スペクトル成分のフレア期間中のフラックス密度の変化の詳細を示す (図 4:linear 形式、図 5:log 形式)。

また、Fujisawa et al. 2014 とのスペクトル成分の比較を行う。表 2 に、今回観測されたスペクトルと Fujisawa et al. 2014 で観測されていた速度成分のアルファベットとの対応を載せる。

表 2: 今回観測されたスペクトルと Fujisawa et al. 2014 で観測されていた速度成分のアルファベットとの対応表

速度成分 (km s^{-1})	今回観測されたスペクトル	Fujisawa et al. 2014 で観測されていたスペクトル
-16.90	A	-
-16.5	-	A
-16.06	B	-
-10.91	C	E
-9.15	D	B
-8.51	E	C
-7.34	F	D

ここで、Fujisawa et al. 2014 で観測されていた速度成分 A の -16.5 km s^{-1} とは今回観測した速度成分 A の -16.90 km s^{-1} と B の -16.06 km s^{-1} を一つの成分として観測していたのでこのような表記にした。つまり、今回の観測ではより詳細に IRAS 22198+6336 を観測できたと言える。

また各観測日の中で、統計的な上下変動が見られるが、これはポインティング較正、大気・開口能率の仰角依存性の較正が不十分だったために起きている現象であり、今後 109.8+21(Cep A) による較正解析を実施する予定である (6 今後の課題・展望 でも触れる)。

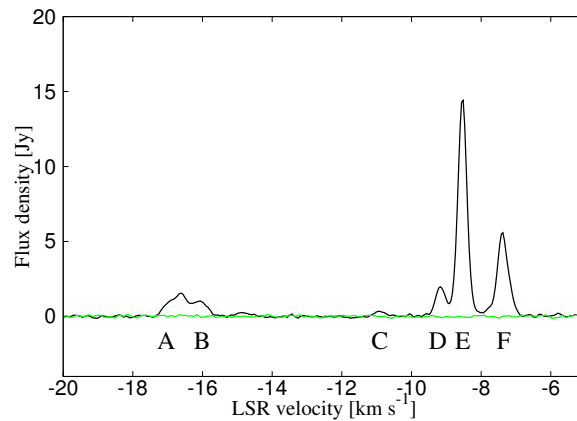


図 3: IRAS 22198+6336 のフレア時のスペクトル (黒) と静穏時のスペクトル (緑)。フレア時は P14198S の、静穏時は P14193S の 1 日積分のスペクトルになっている。

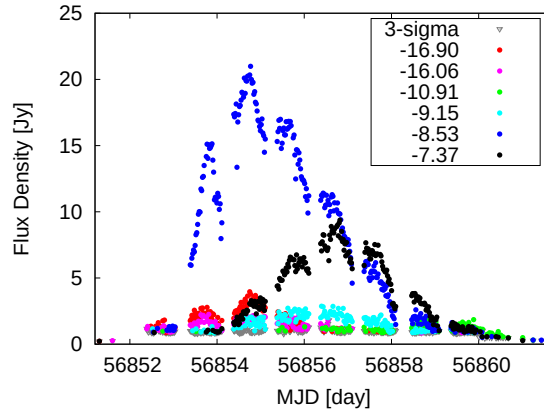


図 4: IRAS 22198+6336 の全スペクトル成分のフレア期間中のフラックス密度の変化の詳細 (linear 形式)

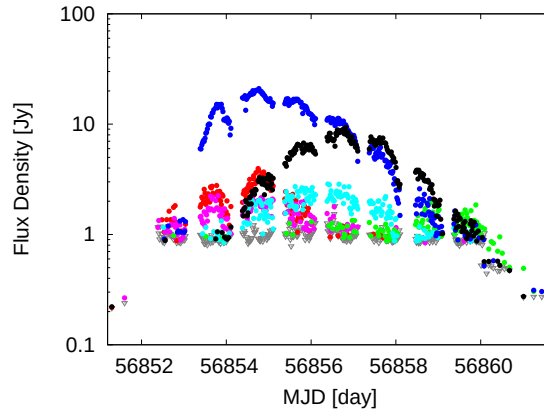


図 5: IRAS 22198+6336 の全スペクトル成分のフレア期間中のフラックス密度の変化の詳細 (log 形式)

5 考察

5.1 ガウスフィッティングによる IRAS 22198+6336 の定量的な強度変動の評価

図 2 で示したように、IRAS 22198+6336 の成分ごとにフラックス密度のピークに達する時間が異なっている。そこで、成分間で最大でどれだけピークに達するまでの時間のずれがあるのか、またそもそもの時間変動間隔やどのくらいのフラックス密度まで強度が上昇するのかといった基本パラメータを導出するために、以下の式で定義されるガウス分布の変動を仮定し、関数フィッティングを行った。ガウス分布の変動を $G_{\mu, \text{FWHM}(x)}$ 、 a を振幅、 μ を平均値、FWHM をガウス分布の半値全幅とすると、

$$G_{\mu, \text{FWHM}(x)} = a \cdot \exp \left(-\frac{(x - \mu)^2}{2 \cdot \frac{\text{FWHM}^2}{8 \cdot \ln 2}} \right)$$

整理すると、

$$G_{\mu, \text{FWHM}(x)} = a \cdot \exp \left(-\frac{(x - \mu)^2 \cdot \ln 2}{\left(\frac{\text{FWHM}}{2}\right)^2} \right)$$

となる。

なお、ガウスフィッティングを行う際には、観測日 MJD から共通して 56851 day を引いてから実施した。また、 μ と FWHM はそれぞれ平均値、半値全幅のパラメータだが、これは言い換えるとそれぞれ変動ピーク日と変動期間を示している。

各成分に対するガウスフィッティングの結果を図 6-8 に、表 3 にガウスフィッティングのパラメータを表記する。また、図 6-8 で使用した色は図 4,5 のものと同期している。

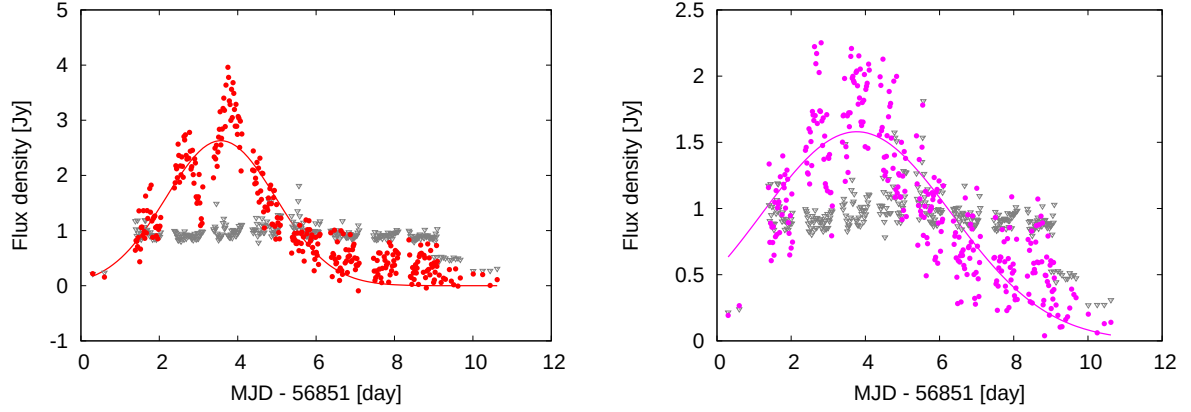


図 6: 視線速度-16.90 km s^{-1} と-16.06 km s^{-1} の成分に対するガウスフィッティングの結果。実線がフィッティング関数に相当する。

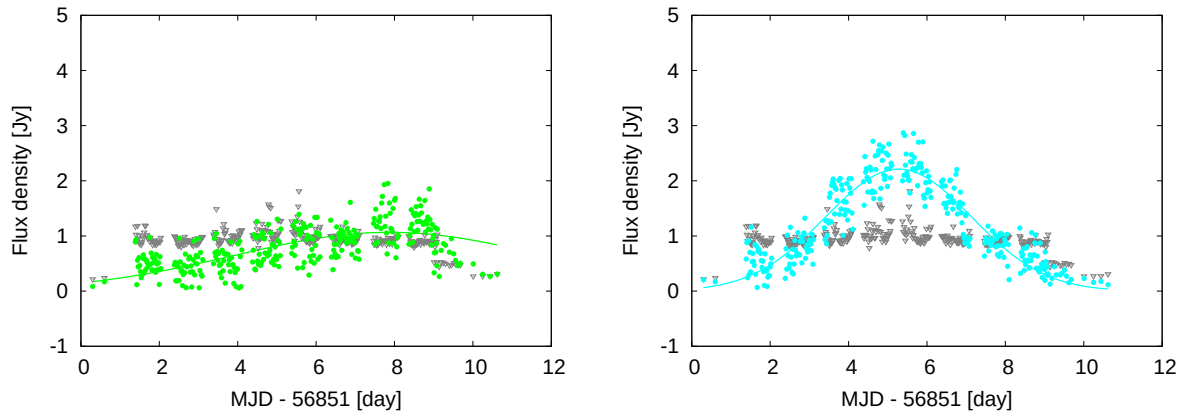


図 7: 視線速度-10.91 km s^{-1} と-9.15 km s^{-1} の成分に対するガウスフィッティングの結果。

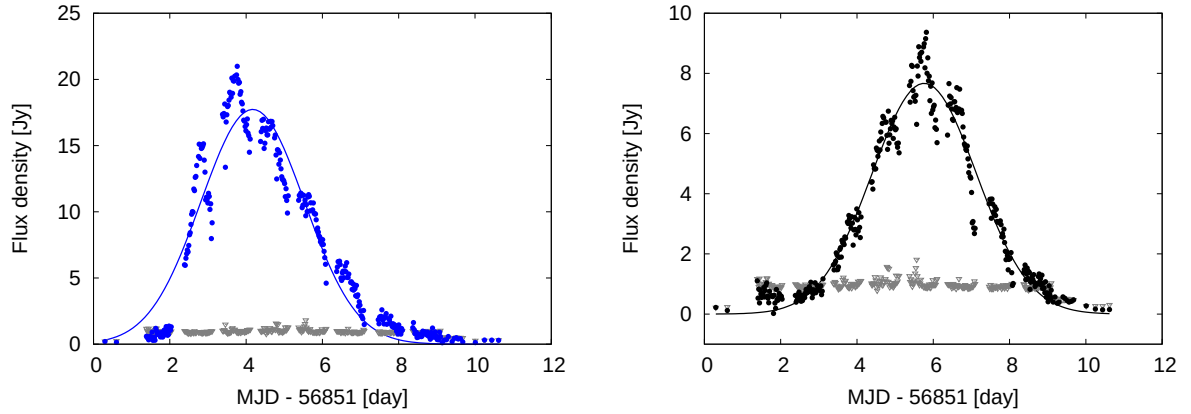


図 8: 視線速度-8.51 km s⁻¹ と-7.34 km s⁻¹ の成分に対するガウスフィッティングの結果。

表 3: IRAS 22198+6336 の各スペクトル成分に対するガウスフィッティングの結果。

成分 (km s ⁻¹)	a(振幅) (Jy)	μ (変動ピーク日) (day)	FWHM(変動期間) (day)
A:-16.90	2.63($\pm$ 0.05)	3.57($\pm$ 0.03)	3.30($\pm$ 0.08)
B:-16.06	1.58($\pm$ 0.03)	3.77($\pm$ 0.08)	6.04($\pm$ 0.20)
C:-10.91	1.07($\pm$ 0.02)	7.87($\pm$ 0.30)	9.34($\pm$ 0.69)
D:-9.15	2.21($\pm$ 0.03)	5.28($\pm$ 0.03)	4.39($\pm$ 0.08)
E:-8.51	17.74($\pm$ 0.24)	4.17($\pm$ 0.02)	3.20($\pm$ 0.05)
F:-7.34	7.67($\pm$ 0.07)	5.76($\pm$ 0.02)	3.23($\pm$ 0.03)

表 3 より、-16.90(赤) の成分がまず初めにピークに達し、その後-16.06(ピンク)→-8.51(青)→-9.15(水色)→-7.34(黒)→-10.91(黄緑) の順番でピークに達している。

そして表 3 の変動ピーク日の欄より、IRAS 22198+6336 の成分間でのピークに達するまでの期間の最大のずれは 4.3 ± 0.33 日であった。

5.2 IRAS 22198+6336 のレーザー放射領域の下限値の導出

IRAS 22198+6336 の各成分のピークにずれがあることは以下のような仮定をおくことで解決できる。

IRAS 22198+6336 のそれぞれのレーザー放射をしている成分は、中心星の周囲に球殻状に位置していて、レーザー放射の強度もその励起源の光度変動に伴って変動している。また各レーザー成分は、奥行き方向にずれて位置しているためにそのずれに従って各成分の変動ピークにもずれが生じている。

つまり各成分間でのピークに達するまでの期間のずれは IRAS 22198+6336 のレーザー放射領域の下限値の導出につながる。また、IRAS 22198+6336 のレーザー放射領域の下限値を導出する式は単純に (ピークのずれの期間) $\times$ (光速) でよい。実際に今回求めた 4.3 ± 0.33 日を代入して天文単位で表すと 690-800AU になった。

5.3 ダスト温度について

IRAS 22198+6336 のレーザー放射領域の下限値が690-800AUであると導出したが、実際にIRAS 22198+6336の周囲に存在しているレーザースポットのダストの温度が、レーザー放射を引き起こす程度の温度に達するのか考察する。

もともとダストがレーザーを放射するようになるのは 100K-200K の間と言われている。また IRAS 22198+6336 の中心星の光度は $420\text{-}450L_{\odot}$ である (Hirota et al. 2008)。そこから中心星からどのくらいの距離にダストが存在するか考察する。なお、中心星の光度と周囲のダストまでの距離からダストの温度を導出する式は、ダストの温度を T 、中心星の光度を L 、中心星からレーザースポットまでの距離を R 、 σ をステファン・ボルツマン定数 ($= 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$) とすると

$$T = (16\pi\sigma)^{-\frac{1}{4}} \cdot R^{-\frac{1}{2}} \cdot L^{\frac{1}{4}}$$

で与えられるが、この式を導出する過程は付録に記述した。

上式に $L=420\text{-}450L_{\odot}$ 、 $R = 345\text{-}400 \text{ AU}$ を代入すると、ダストの温度は約 60-70K となりレーザー放射をする温度に達しないことが言える。また、 $L_{\odot}$ とは太陽光度のことであり、 $L_{\odot} = 3.84 \times 10^{26} \text{ W}$ である。

レーザー放射をする温度を達成することができないということは最初に置いた仮定が誤りであるという事を示している。これについては次節で触れる。

5.4 IRAS 22198+6336 のレーザー放射領域について

ダストの温度がレーザー放射をする温度まで上がらないということは初めに置いた IRAS 22198+6336 のそれぞれのレーザー放射をしている成分は、中心星の周囲に球殻状に位置しているという仮定が誤りである。そして、これを解消するために次の3つが挙げられる。

- IRAS 22198+6336 の明るさは太陽光度の 420-480 倍であるということが誤りである。
- IRAS 22198+6336 のレーザースポットの空間分布が球殻状ではなく楕円形のような形をしている。
- IRAS 22198+6336 は連星系であり、レーザースポットの強度の変化が中心星の変動に付随していない。

6 今後の課題・展望

今後の課題として、まず IRAS 22198+6336 の検出感度とバインディングについての考察が挙げられる。今回は検出感度を 3σ 、バインディング数は観測日ごとに統一としたが、検出感度を 5σ にした場合や、バインディングを速度成分ごとに行ったらどうなるのかなど複数の解析の条件があると思われる。

次の課題には、4.2 でも触れた 109.8+21(Cep A) による IRAS 22198+6336 の較正が挙げられる。IRAS 22198+6336 を観測する際に、IRAS 22198+6336 の追尾角度が異なることに起因するポインティングのずれ、及び大気・開口能率の仰角依存性による影響が予想されるため、IRAS 22198+6336 から 5° 程度に位置し明るく、かつ強度が1日では変化しない 109.8+21 を較正天体として選び、IRAS 22198+6336 と交互に観測を行っていた。具体的には、

IRAS 22198+6336 ON 点 300sec → IRAS 22198+6336 OFF 点 300sec → Cep A 865 sec → ...

のサイクルで交互に観測をしていた。また、Cep A は9点法観測を実施している。

この較正により図4と図5に見られる統計的な上下変動を補正することで IRAS 22198+6336 のより正確な観測データが得られるようになる。

また IRAS 22198+6336 の各スペクトル成分に対するガウスフィッティングにおいても、ガウス分布ではないような分布をしている速度成分については、別の関数で関数フィッティングをするべきであると思われる。

今後の展望は、IRAS 22198+6336 のメーザー放射領域の空間分布速度分布はどうなっているのか確かめることで IRAS 22198+6336 は連星系なのかなどより詳細なことまで把握が可能になる。

謝辞

私がこの研究を進めることができたのは、多くの方々による支援があったからだと思っています。指導教員の百瀬様、米倉様はもちろん、研究員の宮本様、杉山様、現在博士課程の齋藤様には大変感謝しております。

また杉山様には IRAS 22198+6336 のデータの解析など、齋藤様にはプログラミングのことについて未熟な私について熱心に指導してくださり大変感謝しております。誠にありがとうございました。

付録 ダスト温度導出

ここではダスト温度を導出する式を導く。

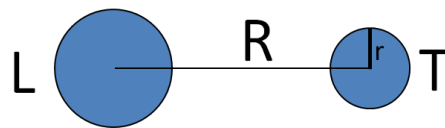


図 9: 中心星とその周りのガスの温度と光度の関係。左の丸が中心星で右の丸がガスで、ガスは中心星からのエネルギーを受け取っている。ここではガスが熱平衡であると仮定している。

図 9 のような中心星とそのエネルギーを受け取るガスを考える。まず、中心星から放出されている単位面積あたりのエネルギー S は

$$S = \frac{L}{4\pi R^2}$$

となっている。次に、ガスが受け取る総エネルギー L' を考える。ガスが中心星により照らされている面積は πr^2 であるから、

$$L' = S \cdot \pi r^2 = \frac{Lr^2}{4R^2}$$

となる。また、ガス自身が放出しているエネルギー l は、 σ をステファン・ボルツマン定数 ($= 5.67 \times 10^{-8} \text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$) として、

$$l = 4\pi r^2 \sigma T^4$$

と表せる。

ここで、ガスが熱平衡であるという仮定をおくと、 $l = L'$ になるので、

$$4\pi r^2 \sigma T^4 = \frac{Lr^2}{4R^2}$$

$$T = (16\pi\sigma)^{-\frac{1}{4}} \cdot R^{-\frac{1}{2}} \cdot L^{\frac{1}{4}}$$

とガスの温度を導出できた。また、ガスの温度はガス自身の大きさには依存しておらず、中心星の光度とそこからの距離のみに依存していることが確認できる。

参考文献

- [1] Fujisawa.K et al.2014,PASJ,66,78F
- [2] Hirota.T et al.2008,PASJ,60,961H
- [3] IRAS 22198+6336 の短期変動解析: 2014/06/10-06/21, 杉山 孝一郎
- [4] ポインティング結果、および IRAS 22198 の短期変動報告 in P14162S, 杉山 孝一郎
- [5] 星間物質と星形成 シリーズ現代の天文学 第6巻, 福井康雄・犬塚修一郎・大西利和・中井直正・舞原俊憲・水野亮