

卒業論文

野辺山 45m 電波望遠鏡を用いた
アンモニア分子輝線観測

茨城大学 理学部理学科 学際理学コース

学籍番号：08s6005s

氏名：影近早香

概要

宇宙には、数多くの星が存在している。その星を作る材料となるのが、星間物質である。星間物質はその圧力や温度に応じて様々な相をもち、その中の分子雲は主にガスから成り、温度は 10K 程度と低温で、他の相に比べて、 H_2 が高密度である。そのため、自己重力が顕著で、この重力により収縮し、さらに高密度な分子雲コアを形成する。分子雲コアがさらなる重力収縮や質量降着を繰り返し、長い年月を経て星が誕生していく。このように、星形成の過程は大まかには理解されているが、その過程での物理的な構造など、様々な点が明らかになっていない。

その手掛かりを得るために有効なのが電波である。電波は電磁波の中で波長が最も長い為、星間物質などによる散乱を受けにくく、地上から遠くの宇宙まで見ることが可能となる。また、先述したとおり分子雲は極低温である為、赤外線や可視光線領域では見ることができない。その為電波を用いることが最良の手段である。さらに、今回対象とした NH_3 分子をはじめ、多くの分子が電波領域に回転スペクトル線を持ち、特に NH_3 分子は他の分子よりも H_2 が高密度でなければ放射が起きない。また、 NH_3 の回転エネルギー準位は温度の差が顕著であるのに、近い周波数で放射をしているため、同時に観測できる。これらの利点から NH_3 分子を選択し、さらにスペクトルから温度、質量、光学的厚さなどの物理量を得ることができる。

さらに、今回対象とした分子雲コアは、オリオン大星雲内に位置している。オリオン大星雲では、極めて若い星が確認されており、現在最も活発な星形成の一つとして知られている。

本研究では、先行研究(島尻他)が行ったダスト連続波観測から得られた、オリオン大星雲に位置する約 500 個の分子雲コアの内、20 天体に対し、野辺山 45m 電波望遠鏡を用いて、 NH_3 分子輝線観測を行った。得られたスペクトルから、光学的厚さ、温度、柱密度、 NH_3 の質量、先行研究で導出されたダスト質量の補正、そこからさらに H_2 の柱密度を導出し、それらの値の比較を行った。

NH_3 と H_2 の柱密度を比較したところ、これまでの研究(Johnstone et al.,2010)から、尤もらしい値といえた。さらに、得られた温度をマップ上にプロットしたところ、北から南にかけて高温から低温になる傾向が見られた。

目次

1 章：観測の背景

- 1.1 星形成
- 1.2 オリオン大星雲
- 1.3 電波
- 1.4 電波望遠鏡
- 1.5 野辺山 45m 電波望遠鏡
- 1.6 アンモニア分子輝線

2 章：実験内容

- 2.1 装置
- 2.2 観測のための準備－観測テーブルの作成
- 2.3 観測
- 2.4 解析

3 章：実験結果

- 3.1 スペクトル
- 3.2 スペクトルから得られる値
- 3.3 物理量の導出

4 章：考察

- 4.1 NH_3 と H_2 の質量比
- 4.1 温度傾向

5 章：参考文献

1. 観測の背景

1.1 星形成

星形成で考えるべき最初のものは、星間物質である。星間物質とは、星と星の間に存在する物質である。この星間物質は主にガス(水素がほとんどを占めている)とダストから成り、その質量比はおおよそ $M_G:M_D=100:1$ と、ガスが主となっている。星間物質は圧力や温度に応じて、H I (中性水素原子)ガス雲、雲間物質、H II (電離水素)領域、分子雲、コロナルガスの 5 種類に分類することができる(図 1)。中でも分子雲は水素分子 (H_2) が主成分で、温度はおおよそ 10K、水素分子密度は $n(H) \sim 10^2 - 10^3 [cm^{-3}]$ と低温度、高密度であるため、自己重力が顕著である。この大きな重力によって収縮していき、水素分子密度が $n(H) > 10^5 [cm^{-3}]$ と非常に高密度な分子雲コアと呼ばれる領域を形成する。重力収縮がさらに進み、水素分子密度が $n(H) > 10^{11} [cm^{-3}]$ を超えると、星の光球に相当するものが形成され、原始星が誕生する。原始星は周囲にできる円盤からガスが降着し、質量が増えるとともに円盤の垂直方向へガスが吹き出している。約 10^6 年程度で降着が概ね終わると、円盤は外部から見えなくなり、さらにゆっくりと収縮し、内部の温度が上がっていく。内部温度が水素燃焼がおこる温度(おおよそ $10^7 [K]$)程度になり、収縮が押しとどめられて主系列星となる。元は分子雲コアを作っていた外層部が散逸するとともに、原始星円盤の名残として、原始惑星系円盤が形成される。この原始惑星系円盤はガスや塵からなり、ここが惑星の生まれる母体となる。

このように、星の誕生は大まかにはわかっているが、完全に理解されているわけではない。

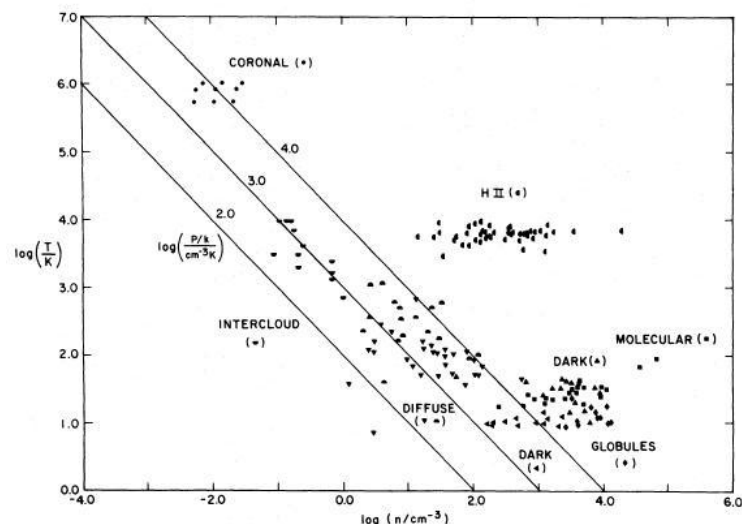


図 1 星間物質の諸相(Myers 1978 より)

1.2 オリオン大星雲

オリオン座は冬の空に見える、最も見つけやすく、有名な星座のひとつである。オリオン座は2つの1等星と、5つの2等星からなる。オリオン座の真ん中に位置する3つの星の下に、ぼんやりと明るい部分がある。これはオリオン大星雲(図2)で、星雲の中にあるトラペジウム星の強い放射によって温められたガス雲である。

トラペジウムはラテン語で台形を意味し、その文字通り4つの星で台形を作っている(図3)。トラペジウムは非常に若い星からなり、これらはオリオン大星雲で形成されたものである。このことから、この領域では星が新しく形成されている事が分かる。オリオン大星雲は地球から約1600光年の位置にあり、主に H_2 から構成され、その質量は $10^5 M_\odot$ のオーダーである。オリオン大星雲はオリオンA分子雲とオリオンB分子雲に分けられる(図4)。本研究では先行研究(島尻ほか)で検出されたオリオンA分子雲内の分子雲コアを観測した。



図2 オリオン大星雲(M42)



図3 トラペジウム

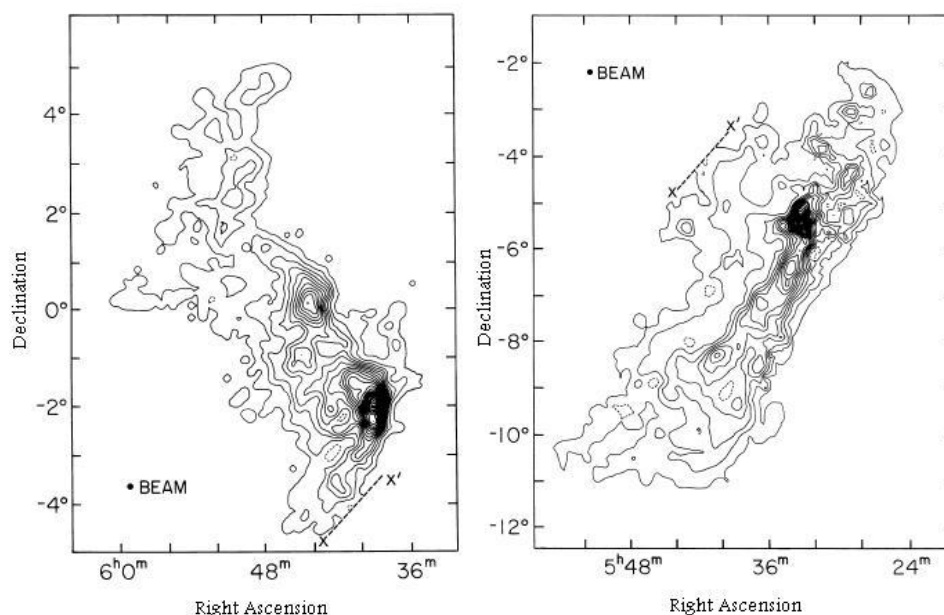


図4 (左)オリオンB分子雲 (右)オリオンA分子雲 (Maddanlena et al,1986 より一部改変)

1.3 電波

電波は電磁波の中で、波長が最も長いものを指す。特に電波天文学では 10mm–1mm のミリ波、遠赤外線との境界である 1mm 以下のサブミリ波を用いている。電波は波長が長い為、星間物質による散乱を受けにくく、地上から宇宙の奥まで見る事が可能である。また、シンクロトロン放射、中性水素原子、極低温である分子ガスなどは、可視光線や赤外線では見えず、電波による観測が手段となる。さらに、今回対象としたアンモニア分子をはじめ、多くの分子が電波領域に回転スペクトル線をもつ。代表的なものとして、CH₃OH メーザー(6GHz)、CO[J=1-0](115GHz)、NH₃[(J,K)=(1,1)-(1,1)](23.694GHz)、SiO[J=1,v=2] メーザー(42GHz)などがある。これらの回転スペクトルを観測することで、
このように、星形成を調べる上で電波を用いることは非常に有効的である。

1.4 電波望遠鏡

電波望遠鏡のうち単一鏡型電波望遠鏡で主要なものとして、世界最大のアレシボ 305m 電波望遠鏡、オフセットパラボラ光学系を使用した GTB100m 電波望遠鏡、日本で電波観測専用では最大の野辺山 45m 電波望遠鏡がある。干渉計型電波望遠鏡ではアタカマ砂漠に建設された、アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計がある。

本研究では、国立天文台野辺山観測所にある、45m 電波望遠鏡(図 5)を用いて、単一鏡観測を行った。単一鏡型電波望遠鏡は、大きく分けてアンテナ、受信機、バックエンド、計算機で構成されている。(図 6)



図 5 野辺山 45m 電波望遠鏡

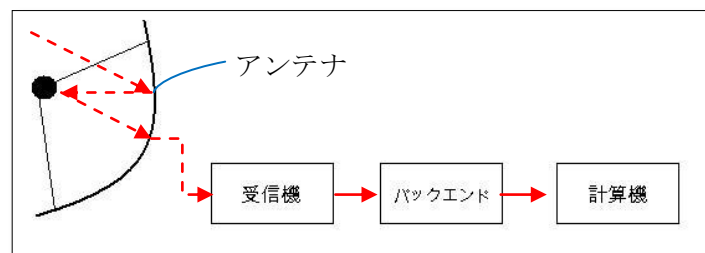


図 6 単一鏡型電波望遠鏡の構造

1.4.1 アンテナ

アンテナには、天体からの電波を集める役割と、指向性を持たせる役割がある。天体からの電波は非常に微弱であるため、広い面積で電波を集める事や、アンテナ自体が発生する雑音を小さくする必要がある。可視光線では、レンズを使って光を屈折させ集光する屈折望遠鏡と、反射鏡を利用した反射望遠鏡とがあるが、電波では反射による方法を用いている。野辺山 45m 電波望遠鏡のような形のものはカセグレン式と呼ばれ、主鏡と副鏡からなる。主鏡は天体からの電波を反射して副鏡に集め、副鏡はその電波をさらに反射してアンテナ中央の開口部へ入れる働きがある。

アンテナの性能を評価するものとして、開口能率、ビーム能率、角度分解能がある。

1.4.1.1 開口能率

アンテナ表面の精度を表す指標として、開口能率 η_A がある。 η_A は式(1)で表される。

$$\eta_A \equiv \left(\frac{A_e}{A_p} \right) \quad (1)$$

ここで、 A_p は物理的な開口面積、 A_e は有効開口面積である。物理的な開口面積とは、アンテナを正面から見たときにできる円の面積で、アンテナの直径を $D[m]$ とすると、式(2)である。

$$A_p = \pi \left(\frac{1}{2} D \right)^2 \quad (2)$$

有効開口面積とは、天体に向いてアンテナとして働く部分の面積であり、すなわち開口能率とは、アンテナの物理的面積に対してどれだけ電波を集めているか、を表していることになる。

1.4.1.2 ビーム能率

さらに、アンテナの性能を評価する指標として、ビーム能率 η_b がある。これは式(3)で定義される。

$$\eta_b = \left(\frac{\Omega_{ML}}{\Omega_A} \right) \quad (3)$$

ここで、 Ω_A はアンテナの全ビームが占める立体角である。また、 Ω_{ML} はメインローブが占める立体角であり、すなわちビーム能率とは、メインローブの立体角が、アンテナが見ている立体角をどれだけ占めているか、という意味を持つ。従って、 $\eta_b = 1$ が理想的なのは明らかである。

1.4.1.3 角度分解能

角度分解能は、天体をどれだけ細かく見分けられるか、の能力で、単一鏡型電波望遠鏡では半値幅 θ_{FWHM} で表される。半値幅とは、メインローブの値の半分の値をもつところの幅であり、式(4)で定義される。

$$\theta_{\text{FWHM}} \sim \frac{\lambda}{D} \quad (4)$$

半値幅が小さい(メインローブの幅が狭い)方が、より細かく天体を区別できることを意味する。その為、波長(λ)が長い電波では、よりアンテナ直径(D)が大きくなる必要があるとなる。

1.4.2 受信機

アンテナで集められ、開口部から入った電波は、いくつかの鏡で反射され受信機へと伝わる。この電波が電氣的信号に変換されバックエンドへ送られるまでに様々な行程があるが、本研究で行ったものについて説明する。

最初に、宇宙からの電波は非常に微弱であるため、増幅する必要がある。さらに、今回は 23[GHz]と高い周波数を観測したが、高周波は扱いが難しくなる。従って、扱いやすい周波数に変換する必要もある。以下、野辺山 45m 電波望遠鏡を例にとる。

受信した電波(Radio Frequency、以下 RF)はホーン、アイソレータ 1 を通り HEMT アンプで直接増幅される。リングフィルタで局部発信信号(Local Oscillator frequency、以下 LO)と結合され、ミキサによって低い周波数(中間周波数、Intermediate Frequency、以下 IF)に変換、再びアイソレータ 2 を通り IF アンプで増幅される。アイソレータ 1 から IF アンプでの増幅までは、内部が 20K に冷却された真空デュワー内で行われる。デュ

ワーから出てきた信号は、さらにミキサで変換されより低い周波数の IF 信号となり、その後分光計で検出できる周波数と帯域幅の信号に変換され、バックエンドへ送られる(図 7)。

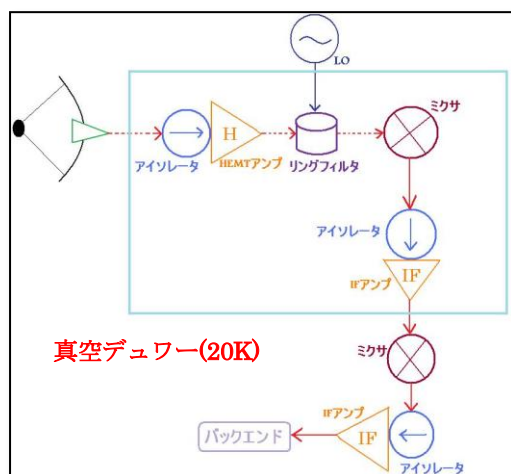


図 7 ビーム伝送系イメージ

1.4.3 バックエンド

検波器、分光器は望遠鏡の後端に位置するのでバックエンドと呼ばれる。天体からの電波のスペクトルは、大きく、連続波と線スペクトルに分けられる。このスペクトルに応じて受信方法も分けられる。

1.4.3.1 検波器

検波器は連続波観測で用いて、広い周波数幅の電波をそのまま 2 乗検波器で検波する。これは天体の出す連続波電波の強度を測定し、その緩やかな周波数依存性から天体の物理状態を調べることが可能である。

1.4.3.2 分光器

分光器は分光観測で用いて、天体の出す分子輝線スペクトルなどの線スペクトルを受信し、分光計で周波数方向に分解する。周波数がドップラー効果で変化する事から、その分子がどのように運動しているかを明らかにすることができる。

1.4.4 計算機

計算機はバックエンドで得られた情報を処理し、記録するところである。

1.5 野辺山 45m 電波望遠鏡

野辺山 45m 電波望遠鏡は 1982 年に完成した、電波観測専用の望遠鏡としては日本最大の電波望遠鏡である。(単純に大きさの最大としては臼田宇宙観測所の 64m パラボラアンテナがある。)観測可能な波長は 1.5cm~1.3mm。45m という大きさや、11 台の受信機など、ミリ波観測のトップレベルのアンテナである。その特長として、以下の 5 つの点が挙げられる。

1.5.1 自重変形の解消

電波は地上で観測できることも多くの利点の内の一つであるが、それが不利益を生むこともある。重力があるために、アンテナの高度角変化によって自重変形が起きてしまう。これを解消するのが、ホモログラス変形法である。ホモログラス変形法は変形によってずれた主鏡の焦点位置の変化に応じて副鏡を駆動し、焦点距離が変化するのみで、鏡面の形状自体は回転放物面を保持、実際上の集光力を維持するものである。これは 1960 年代初期に数学的検討がなされ、1972 年に建設されたマックスプランク研究所の 100m 鏡に初めて採用され、以来、口径の大きなアンテナの構造に採用されている。

1.5.2 追尾精度

電波望遠鏡では、半値幅の数分の一という高い指向精度が求められる。この追尾精度を高めるために、野辺山 45m 電波望遠鏡ではマスターコリメーターを用いている。これは、電波望遠鏡の中心にある、独立したタワーに高精度の小型望遠鏡を搭載し、この望遠鏡と光ビームでリンクすることで、天体を追尾する方法である。これにより、追尾精度は 0.1 秒角となり、臼田 64m(5 秒角)より良く、アタカマ砂漠に 2002 年に設置された ASTE(0.1 秒角)と同じと、非常に高くなっている。ただし、風などの外部による指向ズレは完全には補正できないため、実際の追尾精度は観測中に定期的にチェックする必要がある。

1.5.3 受信機の切り替え

電波望遠鏡を用いた観測は様々な周波数で行われるが、その周波数によって使用する受信機は異なり、野辺山 45m 電波望遠鏡では 11 台の受信機を有している。この使用する受信機の切り替えは、反射鏡によって行われる。ホーンから入った電波がミラーで反射され受信機に入る事は先述したが、この過程でいくつかの反射鏡を組み合わせ、使用したい受信機へと電波を導くことができる。下の図 8 で例を挙げれば、Mirror 1 を抜けば受信機 A へ、Mirror 1 を入れ、Mirror 2 を抜けば受信機 B へ、Mirror 1、Mirror 2、Mirror 3 を入れれば受信機 C へ、Mirror 1、2 を入れ、Mirror 3 を抜けば受信機 D へと伝送される。

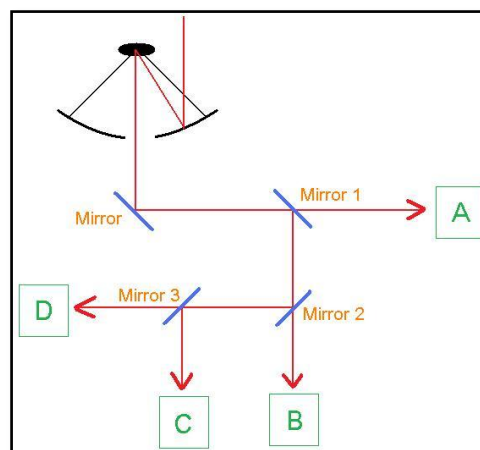


図 8 ミラー切り替えのイメージ

1.5.4 主鏡面の調整

主鏡面がどんなに広く、たくさんの電波を集光しても、鏡面の凹凸により電波が乱反射し、焦点に定まらなくなる。その鏡面の凹凸を調べる手段として、1985 年から電波ホログラフィという方法を導入している。人工衛星から発せられている 19.45Hz の電波を利用して位相分布を得て、鏡面誤差を求めるものである。このデータから約 600 枚のパネルそれぞれをモータにより $10\mu\text{m}$ 単位で上下駆動し、鏡面精度を高めている。

1.5.5 熱変形対策

電波望遠鏡の重要な問題の一つとして、日射によるパネルの変形がある。野辺山 45m 電波望遠鏡の主鏡面パネルは、大半が CFRP(炭素繊維強化プラスチック)でできている。金属は日射による温度変化により、膨張したり収縮したりする。この膨張、収縮を防ぐために、CFRP が用いられている。CFRP は炭素繊維を樹脂で固めたもので、複合材の設計により熱膨張係数をゼロにすることも可能である。また密閉された骨組み構造内を 50 台の扇風機で攪拌し、熱の分散を図るなど、熱変形への対策が様々なされている。

1.6 アンモニア分子輝線

分子雲コアが星形成の過程を知る手掛かりとして重要であること、主に水素分子からなる事を先述した。分子雲コアには存在比率が水素分子に比べると非常に小さいが、CO や NH₃ なども存在する。アンモニア分子が十分励起されるのに必要な水素密度(臨界密度)は CO の臨界密度より高い為、より高密度な領域の観測に多く使われてきている。また、NH₃ 分子の回転準位は、(1,1)、(2,2)、(3,3)と上がるとエネルギーも 10K–100K へと上昇する。それにより NH₃ の持つ温度の差も顕著であり、また、それぞれの周波数が非常に近いところ((1,1) : 23.694[GHz]、(2,2) : 23.722[GHz]、(3,3) : 23.870[GHz])に現れるため、一つの望遠鏡、受信機、分光計で同時に観測ができることが、NH₃ 分子を観測する最大のメリットであるといえる。

1.6.1 NH₃ 分子

アンモニア NH₃ 分子は 1968 年に、星間空間のガスでその存在が発見された。アンモニア分子は窒素原子(N)を頂点とした三角錐型で、対称コマ分子である(図 9)。

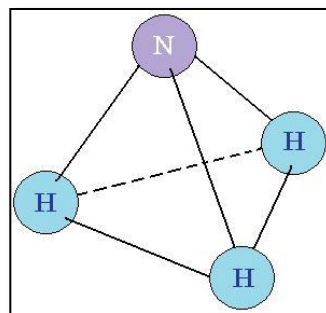


図 9 NH₃ 構造の模式図

1.6.2 スペクトル

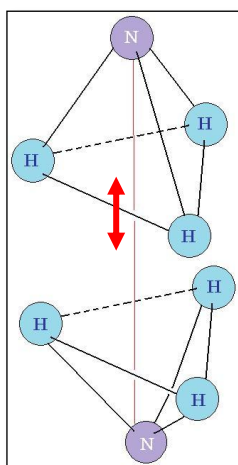


図 10 反転遷移の
模式図

このような対称コマ分子では、反転遷移という特徴的な遷移がある。3 つの水素原子(H)で作られた面を、窒素原子が通り抜け、振動する遷移である(図 10)。この遷移では波長が 1.27cm、約 23GHz の放射をする。アンモニア分子のスペクトルは、メインのスペクトルに加え、対になったサテライトが 2 つ表れ、合計 5 つのピークが観測される(図 11)。この 5 つのピークの内、中心のもっとも強いピークは先述した反転遷移による放射である。他 4 つのピークは、回転準位の超微細構造による分裂である。

アンモニア分子の回転準位は、反転遷移によって 2 つに分かれる(図 12)。さらに、分かれた二つが、核磁気モーメントと電子の磁気双極子モーメントの相互作用により 3 つずつに分かれ、計 6 つの状態に分かれる。これがアンモニア分子

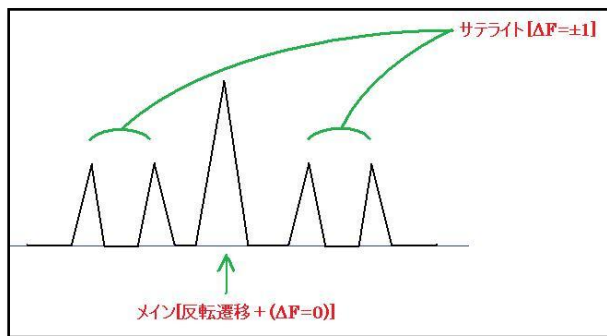


図 11 NH₃分子のスペクトル模式図

の回転準位の超微細構造である (図 13)。ここで適切な選択律 ($\Delta F=0, \pm 1$) がなされると、上下の準位間の許容遷移が 5 つのピークを生む。

本研究ではこれらのスペクトルを用いて、NH₃ の温度、光学的厚み、柱密度を導出し、それらの相関から分子雲の構造を考察する。

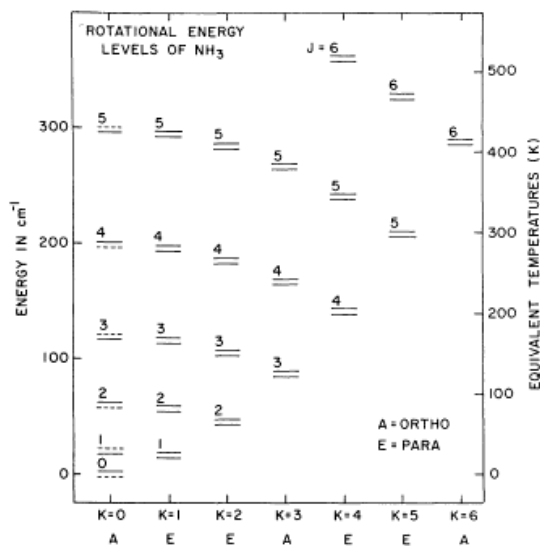


図 12 NH₃分子の回転エネルギー準位
(Ho, P. T. P. et al., 1983 より転載)

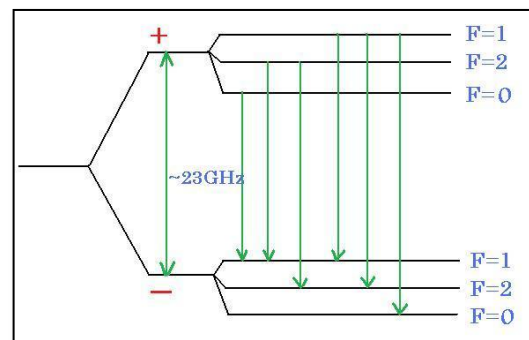


図 13 $(J, K)=(1, 1)$ の超微細構造模式図

2.観測

2.1 装置

国立天文台野辺山観測所の 45m 電波望遠鏡とそれに付随する受信機、分光器を用いた。

2.2 観測のための準備－観測テーブルの作成

天体をアンテナで観測し、そのアンテナを動かす為に、指示書(観測テーブル)を作らなければならない。指示書は ①ソーステーブル ②スキャンテーブル ③デバイステーブル の3つから成り、以下にその作り方を示す。

また、アンテナが正しく天体を見ているかを確認する”ポインティング”という作業を、観測の開始時(と終了時)にしなければいけない。ポインティングとは、アンテナが中心で天体を見ているか、を確認する作業である。これは5点十字スキャンで行われる(図14)。正しく向いている場合、表示された5つのスペクトルにおいて、中心で最も強度が強くなる。これが正しくない場合には、上下左右方向にオフセットを入力し、正しい向きに直すことが必要となる。ポインティングでは確実に強度を得るために、強度が強い天体を対象にする。(今回は Orion-KL という天体を用いた。)

従って、ポインティングの為に指示書の作り方も併せて示す。

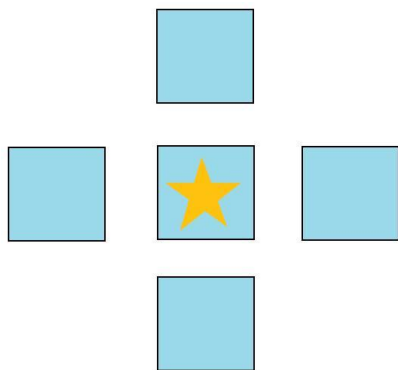


図 14 5点十字スキャン

観測テーブル(obstable)を開くための手順

- (i)解析用の PC(野辺山観測所内の PC)から、解析サーバー（ここでは an01u）にログインする。
- (ii)シェルを開き、obstable1 に ssh で接続。コマンドは以下。
- ```
「 ssh -X obstable1
 Password 」
```
- (iii)接続されたら、コマンド「obs&」を入力。

#### 2.2.1 観測用ソーステーブル

- (1) Source Table の RADEC をクリックすると、詳しい内容が出る。
- (2) File name , Source name は分かりやすいように付ける。今回は DC\*\*\* (表 1)。  
その他、詳細な設定は以下の通りとした。
- Velocity : 0km/s    ○Frame : LSR    ○Defi : Radio  
○RADEC : 図 11 の通り    ○Sys : RADEC    ○Epoch : J2000  
○For only ~ : 全て 0
- (3) Save

#### < 解説 >

- ・ LSR : Local Standard of Rest 太陽近傍の星を 50 個ほどとり、その平均的な運動にのった慣性系。観測天体の運動を測定する座標系として用いる。
- ・ RADEC : Right Ascension , Declination 赤経、赤緯のこと。天の赤道が赤緯 0 度で、春分点と秋分点が、太陽が通る道である黄道との交点になる。春分点を赤経の原点(0 度)としている。天の北極は北極星で赤緯面と 90 度を成す。
- ・ J2000 : 西暦 2000 年での春分点に基づいた平均赤経・赤緯(2000 年分点)。1992 年以降、これが用いられている。B1950 は西暦 1950 年での春分点に基づいたもので、1991 年まで使われていた。参考にする論文で用いられている座標の分点が、何年のものなのか、注意が必要となる。

表 1 コア名と赤経(RA)・赤緯(DEC)

| 天体名   | RA(2000)[ h, m, s] | DEC(2000)[ ° , ' , " ] |
|-------|--------------------|------------------------|
| DC003 | 5 35 26.95         | -5 20 36.38            |
| DC005 | 5 35 23.33         | -5 01 24.42            |
| DC009 | 5 35 25.34         | -5 24 30.38            |
| DC010 | 5 35 20.11         | -5 00 48.42            |
| DC012 | 5 36 18.89         | -6 22 11.78            |
| DC013 | 5 35 23.33         | -5 12 30.38            |
| DC014 | 5 35 24.14         | -5 07 48.40            |
| DC015 | 5 35 26.54         | -5 05 36.38            |
| DC016 | 5 35 29.76         | -5 03 48.42            |
| DC017 | 5 36 22.94         | -6 46 05.12            |
| DC018 | 5 35 29.76         | -4 58 42.42            |
| DC020 | 5 35 08.06         | -5 35 54.38            |
| DC021 | 5 36 24.94         | -6 24 53.68            |
| DC022 | 5 36 18.53         | -6 45 29.16            |
| DC023 | 5 35 32.16         | -5 05 42.40            |
| DC024 | 5 35 08.88         | -5 55 48.32            |
| DC027 | 5 35 02.83         | -5 46 06.37            |
| DC028 | 5 35 04.85         | -5 35 00.38            |
| DC029 | 5 35 10.08         | -5 35 06.40            |
| DC030 | 5 35 20.11         | -5 05 06.40            |

### 2.2.2 ポインティング用ソーステーブル

- (1)Source Table の RADEC をクリック。
- (2)SiO List の Ori-KL をゲットして、セーブ。

### 2.2.3 観測用スキャンテーブル

- (1) Scan Table の Line をクリックすると詳しい内容が出る。
- (2) Sample List をクリックし、Center を Get する。
- (3) 詳細な設定は以下の通りとした。
  - Scan pattern : center    ○Integration time : 20sec
  - coordinate system : RADEC
  - coordinate mode : offset from center で RA 軸上で±40m ずらし
  - Sequence pattern : 1\*    ○sequence number : 500
  - Calibration mode : R-sky    ○calibration time : 20sec
  - interval : 15sequences に設定。
- (4) File name は+40m ずらしが「cent40p」-40m ずらしが「cent40m」とした。

<解説>

  - ・ Scan pattern の Center は 1 点を見るという方法。他の Scan pattern には例えば、5 点十字スキャンがある。
  - ・ Sequence pattern の 1\*はオフ点と対象を交互に見るか、Number は何回見るかという指示。
  - ・ Calibration time は Integration time と同じにする。
  - ・ Offset のずらし量は、対象の RA が 5h35m より大きいものは+40m、小さいものは-40m とした。これは、過去に得られていた電波強度分布図より、off 点の放射がコアのデータに影響を与えないほど小さくなるように考慮したものである。

### 2.2.4 ポインティング用スキャンテーブル

- (1)Sample list の point5 をゲット。
- (2)Offset coordinate system が AZEL になっていることを確認して Save。

### 2.2.5 観測用デバイステーブル

- (1)Line をクリック。
- (2)あらかじめ島尻氏(国立天文台野辺山研究員)により用意されていたプリント通りに各値を入力し (MAC の USE も)、名前を「shima」で保存。

### 2.2.6 ポインティング用デバイステーブル

- (1)Line をクリック。
- (2)Sample list から h40siob をゲットする。

### 2.2.7 COSMOS への送信

各観測天体に対して、File name, Source Table, Scan Table, Device Table を適宜指定し、完了したら Save&Send をし、COSMOS に送る。

## 2.3 観測の実行

観測時間：9月23日午前1時～8時

### 2.3.1 ポインティング手順

- (1)メインコンソールの画面にアカウント名とプロジェクト名を入れて、オブザーバーを変えた。
- (2)File name からポインティング用(ここでは pointKL)の指示書を指定した。
- (3)電波吸収体が伝送系に入っていないことを確認し、受信電波が H40 に導かれるようにミラーを設定した。
- (4)Tuning 用のパソコンで ■ ボタンを押し、メインコントロール PC で Tuning を押した。
- (5)Tuning 用のパソコンで Tuning Start を押し、PLL ロックがかかったら Status monitor を押した。
- (6)メインコントロール PC で IFLE を押し、完了したら AC45 を押した。
- (7)メインコントロール PC で START OBSERVATION を押し、開始した。
- (8)対象との差が  $2^\circ$  以下になったら、SLAVE にした。
- (9)メインコントロール PC の右画面で、分光計 A19 のデータを表示し、Base Line を引いた。
- (10)出てきたズレの平均値を見ながらオフセットを決め、タイミング良く入力した。
- (11)指向性が正しい場合に期待されるスペクトルのパターンが出たら(図 15)、ポインティングを終了した。

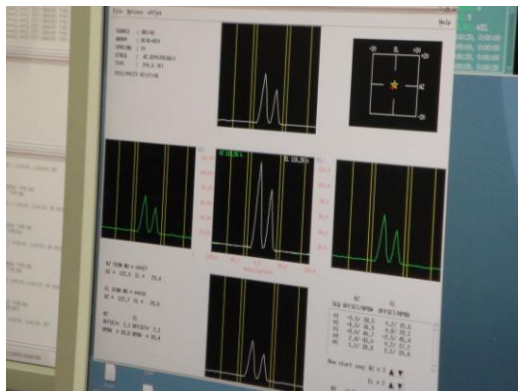


図 15 ポインティング完了時のスペクトル

### 2.3.2 観測手順

- (1)受信電波が H22 に導かれるようにミラーを設定した。
- (2)File name から観測用(ここでは DR\*\*\* )の指示書を指定した。
- (3)①ポインティング手順の(4)～(6)と同様の操作を行った。
- (4)メインコントロール PC で START OBSERVATION を押し、観測を開始した。
- (5)分光計 Array から(1,1)、(2,2)、(3,3)のデータを同時に表示し、スペクトルを確認した。
- (6)RMS がおよそ 0.07K を切る程度で観測を止め、次の天体へと移った。
- (7)DR010~DR030 (但し 026 は除いた) で行った。

#### <解説>

- ・ TUNING は IF 系と分光系 (AC45) との調整である。そのため、観測周波数やデバイスの設定が異なる場合は、その都度行わなくてはならない。
- ・ 今回、コアの部分のデータで信憑性の低いものがあったので、対象範囲を RA(5h34m50sec~5h35m40sec)、DEC(-5° 16' ~-5° 28' )までとした。

## 2.4 解析

観測で得られたデータを水戸に送り、newstar を用いて解析を行った。手順を以下に示す。

### 2.4.1 Large INTEG

- (1)newstar を開き、一番下の欄で、解析するデータの場所を指定した(図 16)。

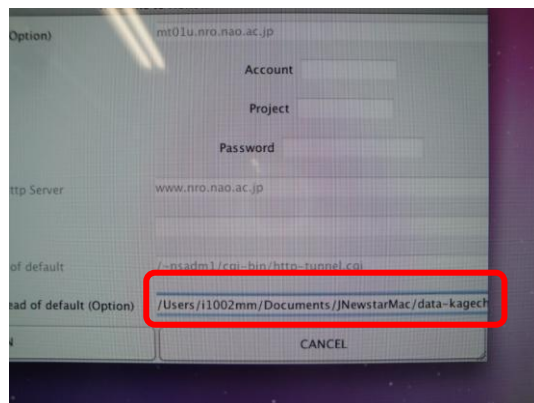


図 16 データ場所の指定

(2) トップ画面で LargeINTEG を選択する。

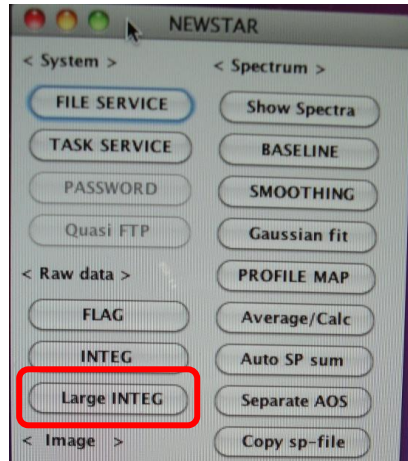


図 17 トップ画面での Large  
INTEG

(3)schedule が入力名、spectrum file が出力名となる。

(4)File List から解析するものを選択し、Done を押した。

(5)名前は何でもよいが、ここでは DC010 とした。

(6)細かな設定は以下の通りで行った。

- ☐Integration mode : normal   ☐Process mode : all data in ~   ☐Array : All array
- ☐Integ weight :  $1/(\text{rms}^2)$    ☐RMS : fixed   ☐Multi~ : Off
- ☐Type of naming : None

(7)画面左上の Exec から Activate program を押した。

#### <解説>

- ・ LINTEG とは、生データを時間積分して、各分光系ごとにスペクトルを出すプログラム。
- ・ Integ weight はコンディションの移り変わりによるデータの質(具体的には放射のない周波数範囲での rms レベル)で重みをつけて、平均を得る作業。

## 2.4.2 SHOW SPECTRA

(1) トップ画面で show spectra を選択した。

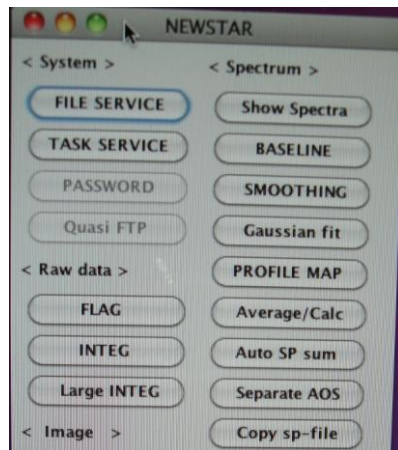


図 18 Show Spectra

(2) File list から表示したいものを選択。

(3) 詳細な設定は以下の通りとした。

○X-axis : 適宜      ○Y-axis : 適宜でもよいが、All range が最初は便利

○Spectrum Window : SP.All      (○reference freq. : それぞれ指定)

(4) 画面左上の Exec の Activate を押した。

(5) 次のスペクトルを表示するときは、Save&Next で表示する。

(6) 終了するときは画面左上の Exit を押し、バーに Finish と表示され、show spectra の窓に、Ended successfully となっていることを確認した。

<解説>

- show spectra はあらゆる場面で使う。最終確認だけではなく、適宜確認するために必要。
- reference freq.は最後の確認の場合に、入力する。詳細は(F)で。
- 次のスペクトルを表示するときに Save をし忘れないこと、終了するときに Exit を押し忘れないこと。これをしないと読み込まれたファイルが正しく閉じられない。

### 2.4.3 Base Line

(1) トップ画面で BASE LINE を選択する。

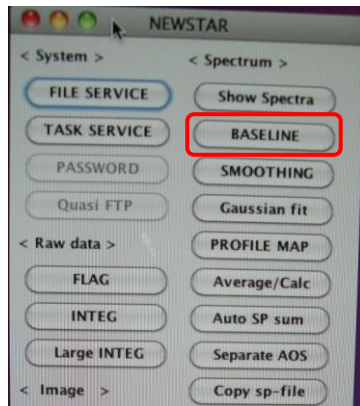


図 19 Base Line の選択

(2) File List から処理したいもの(.INTEG)を呼び出して、Spectrum File を同名に、Class が.BASE になっていることを確認した。

(3) 細かな設定は以下の通りとした。

- Function : Polynomial      ○X,Y-axis : 適宜      ○Rest Freq. : from header
- Execution Mode : 適宜

(4) 画面左上の Exec を押した。

(5) Set Range で、一番左のサテライトの左に 2 本、再び Set Range で一番右のサテライトの右に 2 本引いた。

(6) その後、画面左上の GO を押して実行した。

(7) 画面左上の SHOW の Results で結果を見て、正しい処理が行われたかを確認した。

#### <解説>

- Base line を引く、という作業は、ノイズなどを考慮し、放射のないところをゼロレベルに設定する作業のこと。ポインティングで行ったのと同様の処理である。
- Polynomial は多項式、という意味で、多項式でフィットする、というもの。
- Execution Mode は一つ一つ確認しながら作業するときは interactive 一気に処理を進める時は Back ground を選択する。

#### 2.4.4 周波数分け

(1) トップ画面で Copy sp-file を押した。

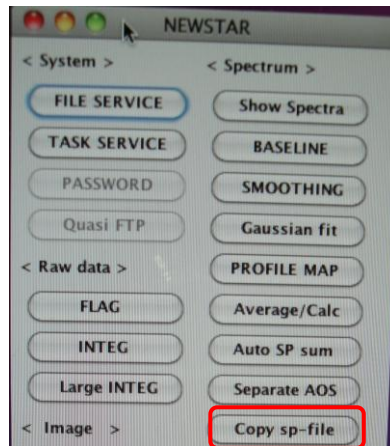


図 20 Copy sp-file の選択

(2) 編集したい File を選択する。(BASE)

(3) 名前を付けて下の窓にコピーしたいスペクトル ID 番号を入力する。

ex) (1,1)をコピーしたい場合は 1,4 と入力する。(2,2)なら 2,5 とする。

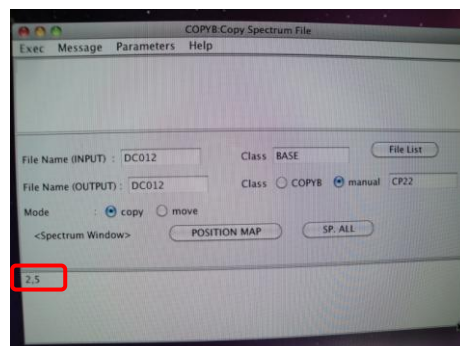


図 21 スペクトルの取り出し指定

(4) Exec を押して実行した。

(5) Show spectra で確認した。

<解説>

- ・独立な偏波成分を積分するために、(1,1)、(2,2)をそれぞれ選択するための作業。

### 2.4.5 Auto SP Sum

(1) トップ画面で Auto SP Sum を押した。

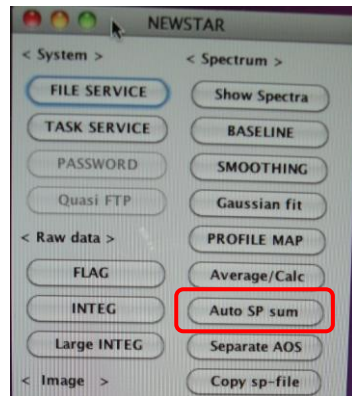


図 22 Auto SP Sum の選択

(2) 積分したいファイル(.CP)を File List から選択した。

(3) Exec を押して実行した。

(4) Show spectra で確認した。

< 解説 >

- ・ (1,1) の 2 つの偏波成分、(2,2) の 2 つの偏波成分を積分する作業。
- ・ 2 つの独立な成分を積分することで、ルート 2 だけ rms レベルが向上する。

### 2.4.6 Show spectra

最後に、全ての処理が済んだスペクトルを確認した。但し、Center Frequency を Manual にし、適当な値を入力した(値は以下を参照)。それを速度表示して、おおよそ 10km/s のところにメインピークが出ていることを確認した。

< 入力する周波数 >

MA シリーズ 現代の天文学 16 巻「宇宙の観測Ⅱ－電波天文学」P343 表 7 より、以下の値を用いた。

- ・ (1,1) : 23.694506 GHz
- ・ (2,2) : 23.722634 GHz

### 3.1 スペクトル

以上の手順で得られたスペクトルを以下に表す。

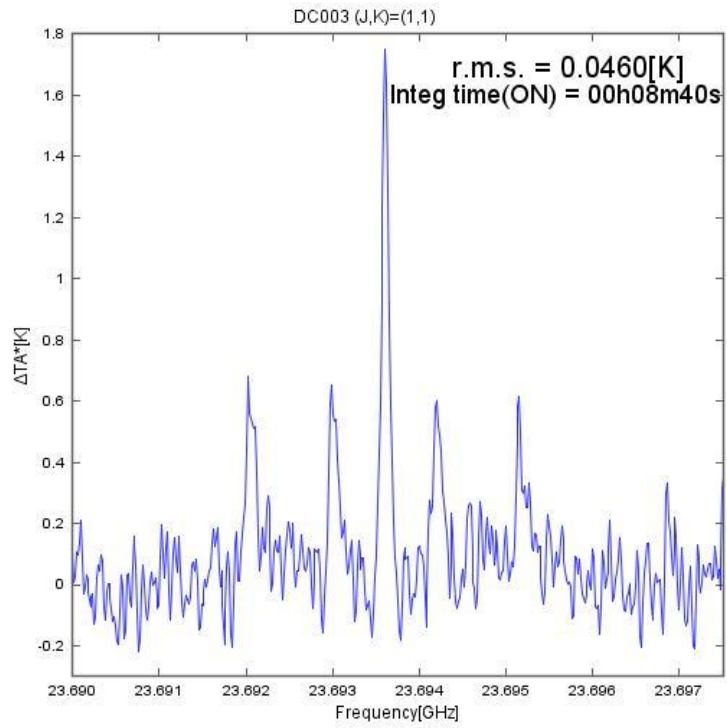


図 23 DC003  $(J,K)=(1,1)$  のスペクトル

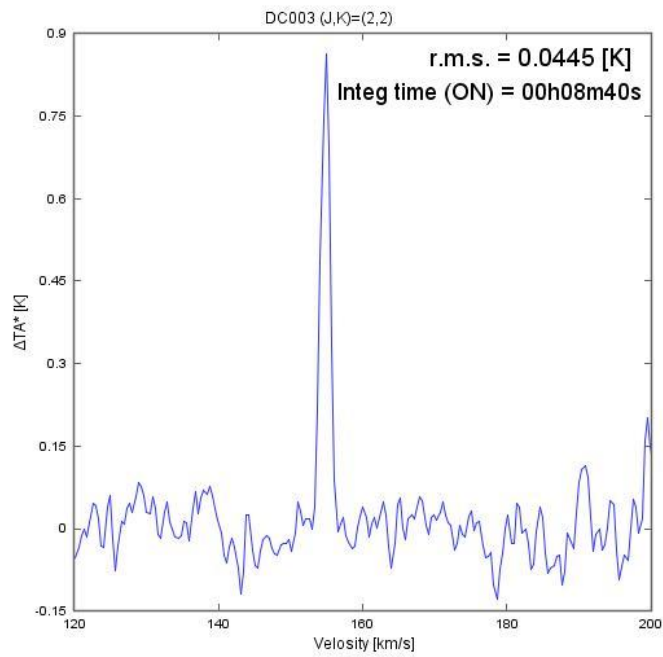


図 24 DC003  $(J,K)=(2,2)$  のスペクトル

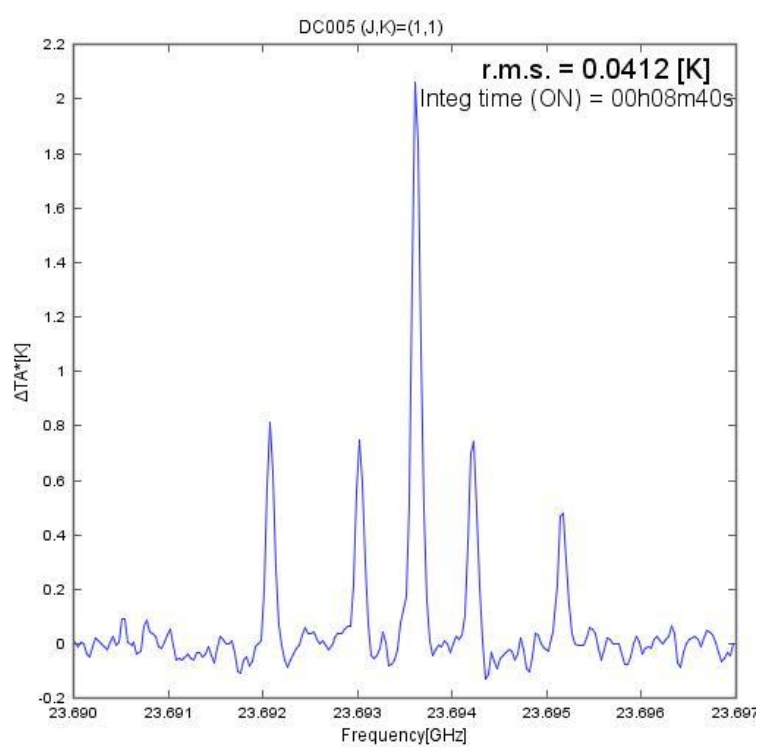


図 25 DC005  $(J,K)=(1,1)$  のスペクトル

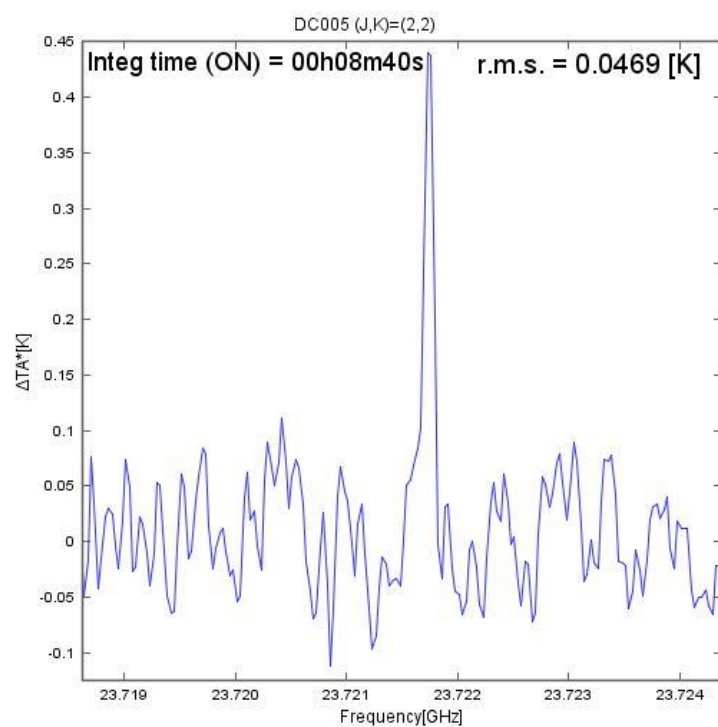


図 26 DC005  $(J,K)=(2,2)$  のスペクトル

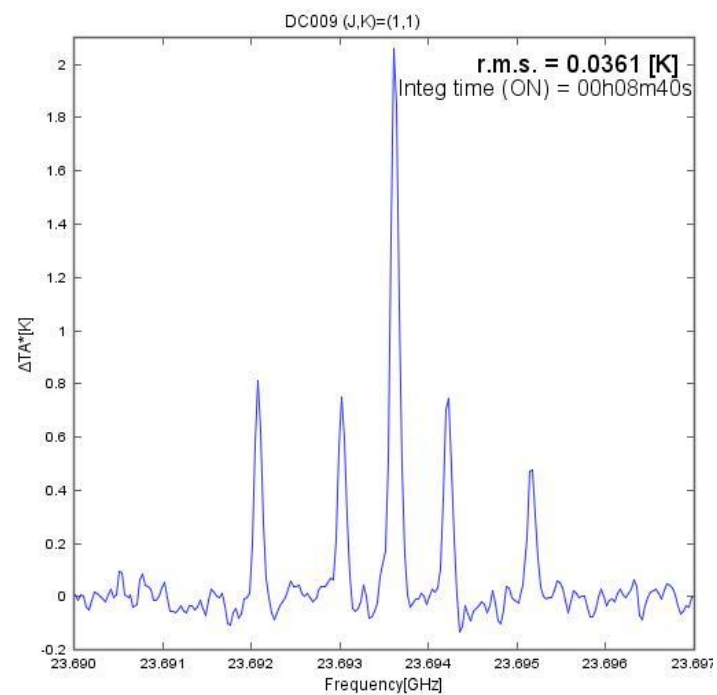


図 27 DC009  $(J,K)=(1,1)$  のスペクトル

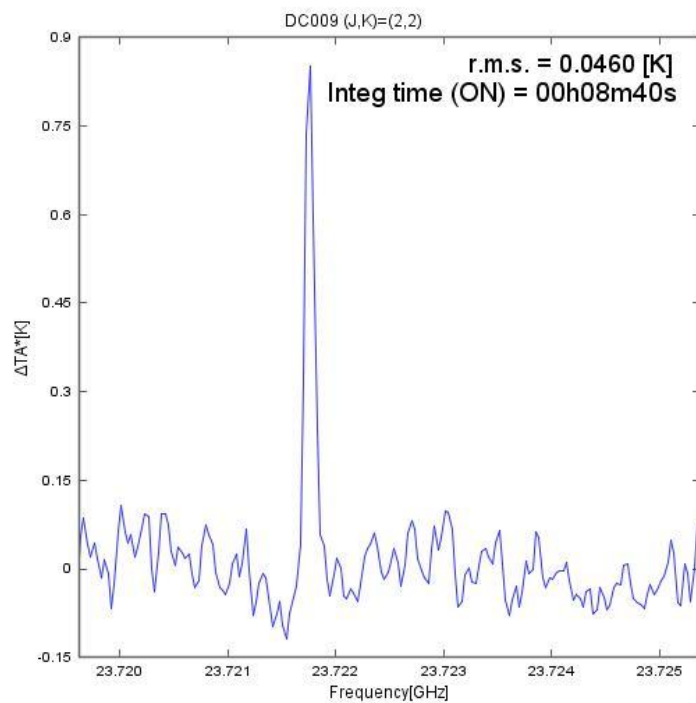


図 28 DC009  $(J,K)=(2,2)$  のスペクトル

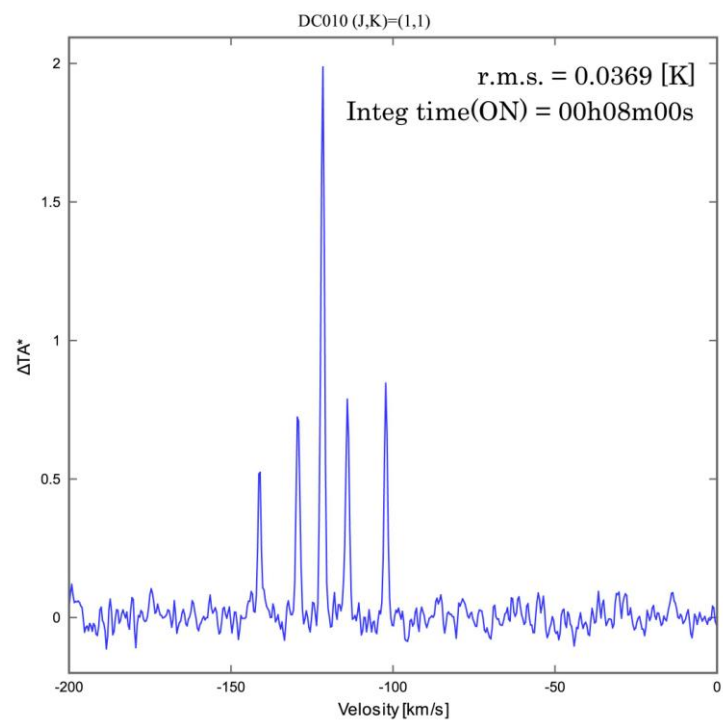


図 29 DC010  $(J,K)=(1,1)$  のスペクトル

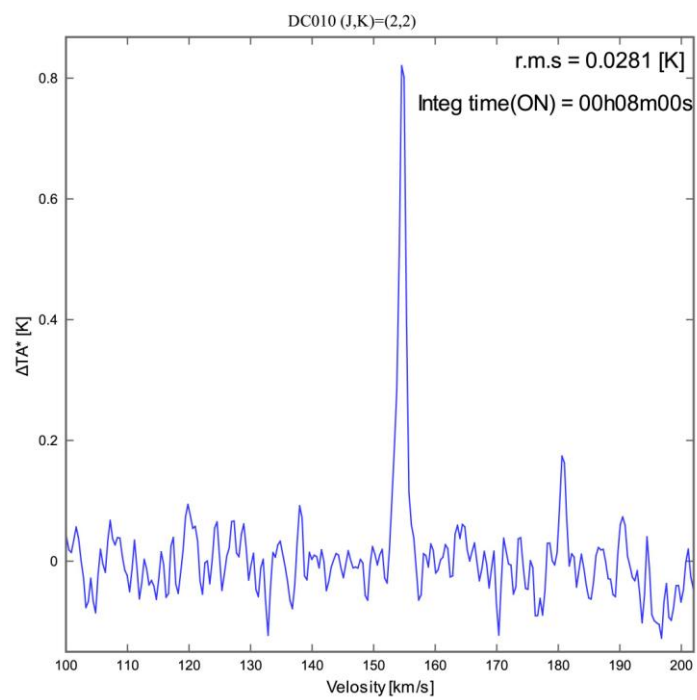


図 30 DC010  $(J,K)=(2,2)$  のスペクトル

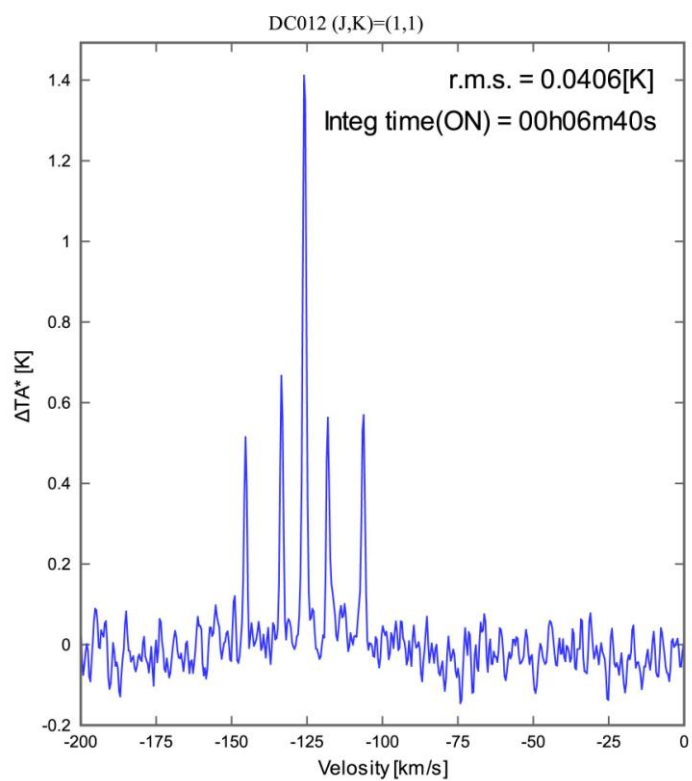


図 31 DC012 ( $J,K$ )=(1,1)のスペクトル

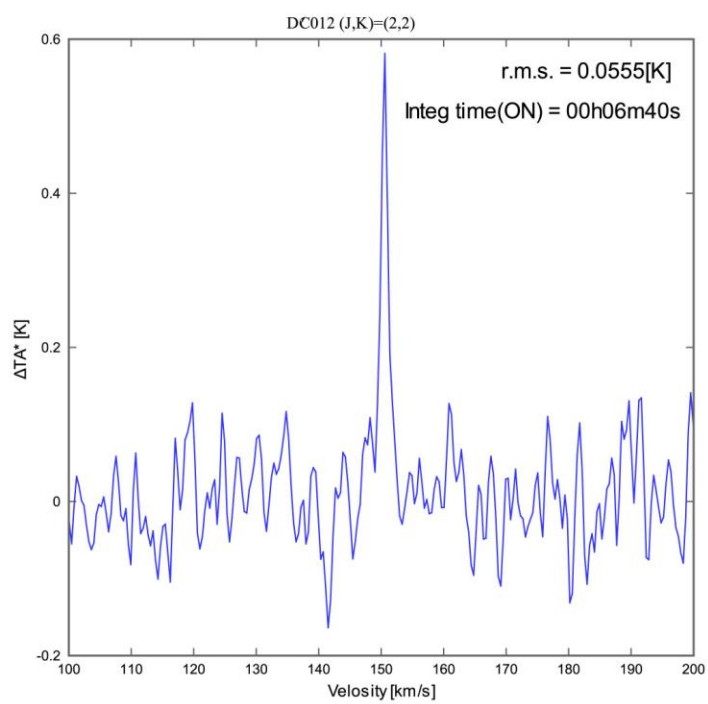


図 32 DC012 ( $J,K$ )=(2,2)のスペクトル

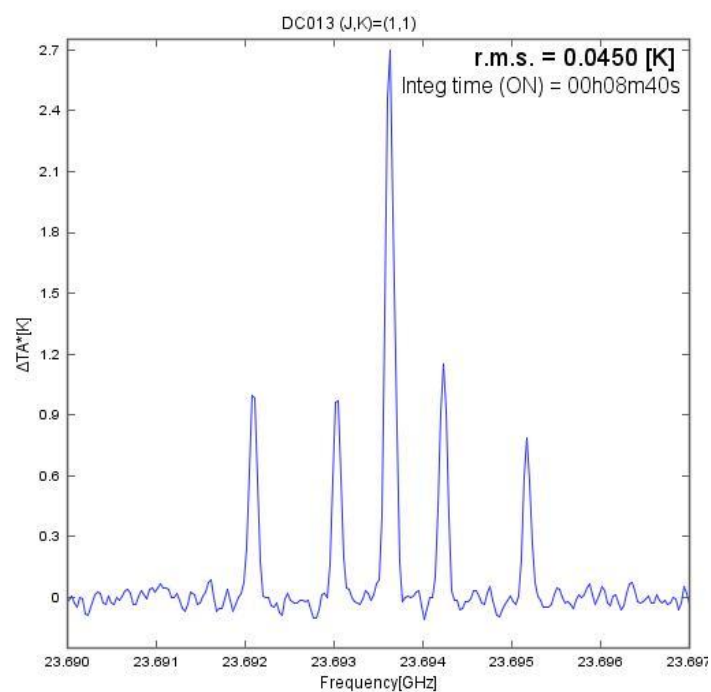


図 33 DC013  $(J,K)=(1,1)$  のスペクトル

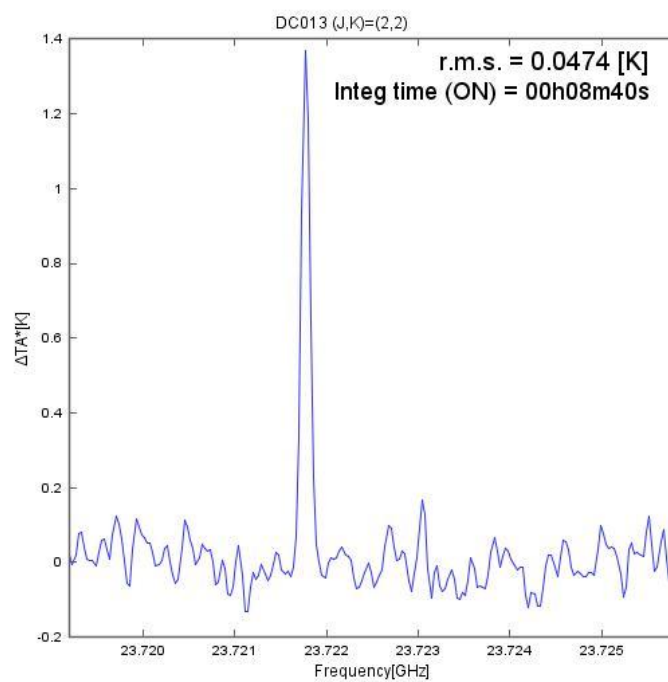


図 34 DC013  $(J,K)=(2,2)$  のスペクトル

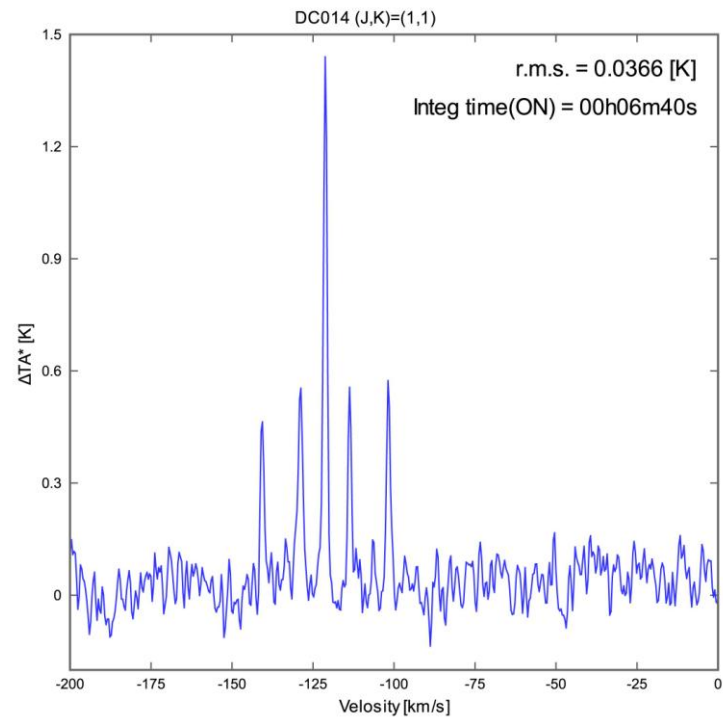


図 35 DC014  $(J,K)=(1,1)$  のスペクトル

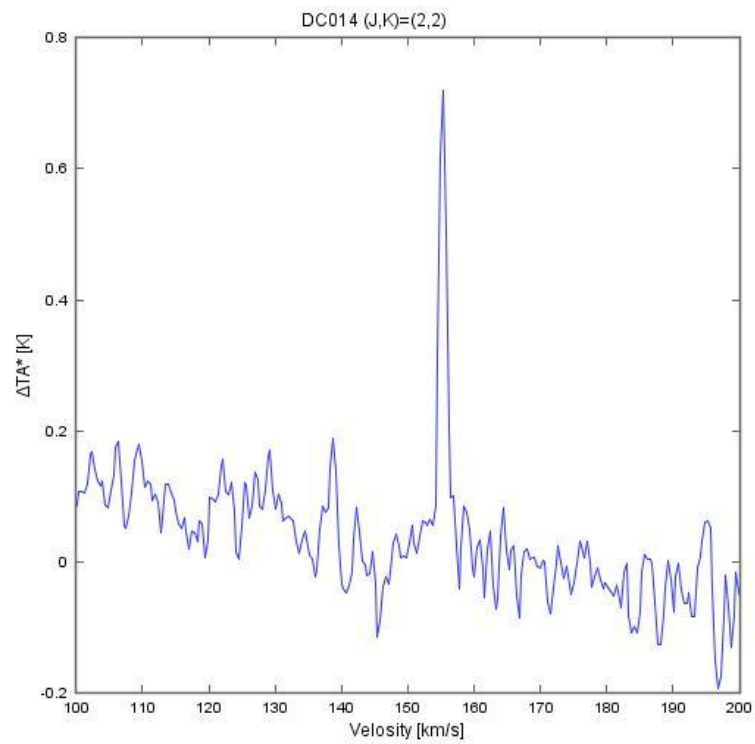


図 36 DC014  $(J,K)=(2,2)$  のスペクトル

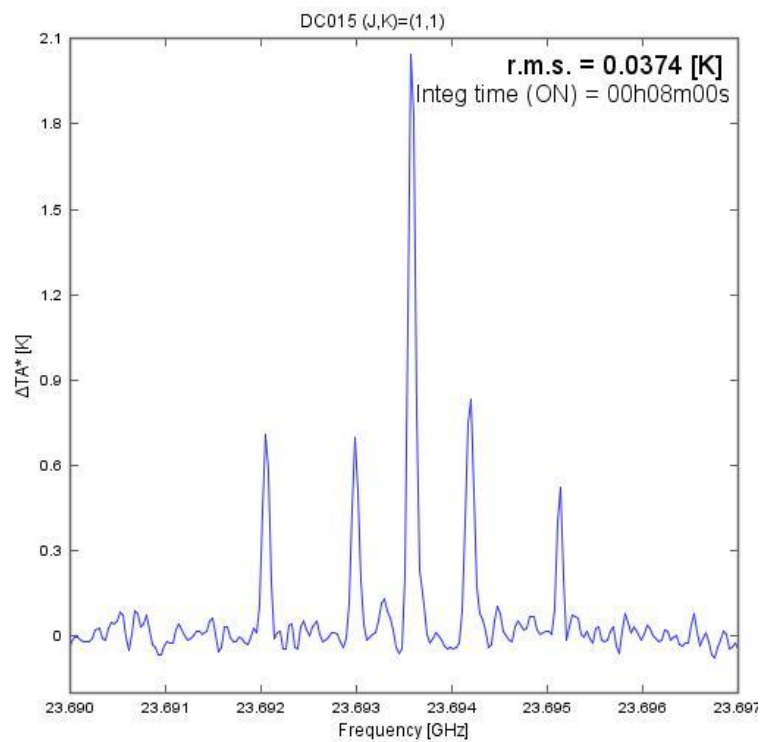


図 37 DC015  $(J,K)=(1,1)$  のスペクトル

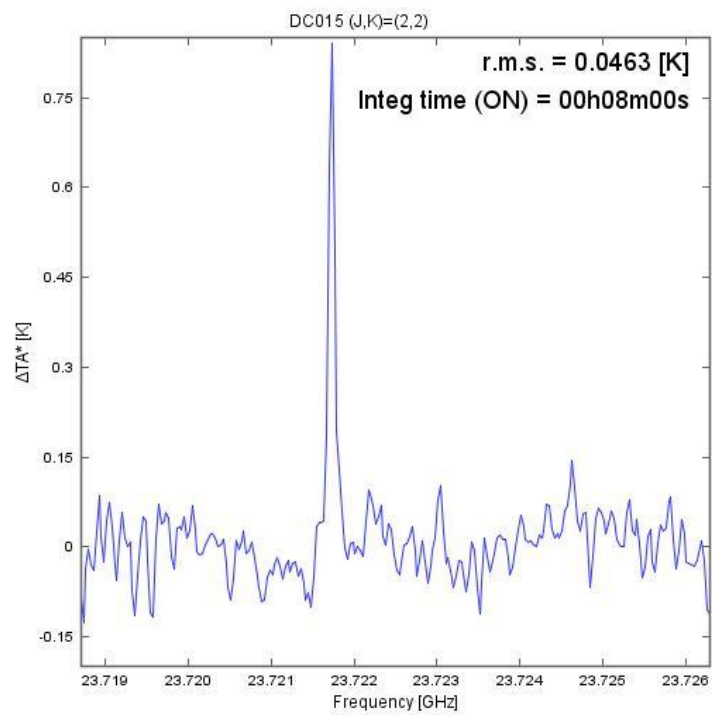


図 38 DC015  $(J,K)=(2,2)$  のスペクトル

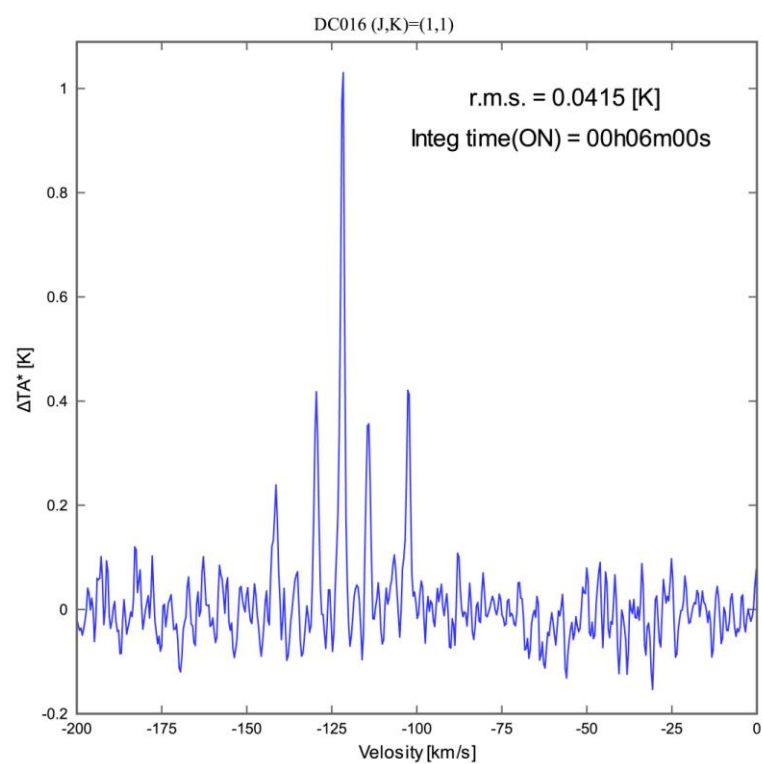


図 39 DC016  $(J,K)=(1,1)$  のスペクトル

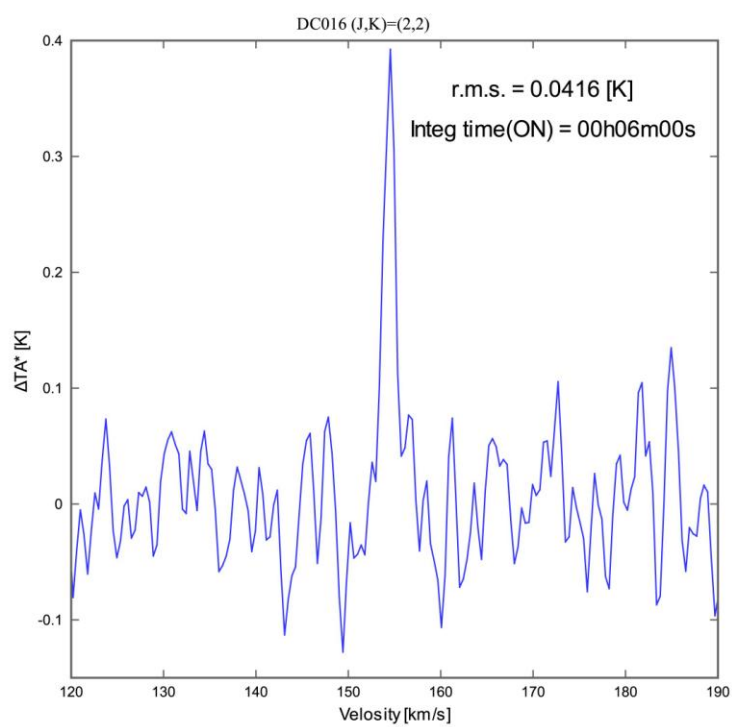


図 40 DC016  $(J,K)=(2,2)$  のスペクトル

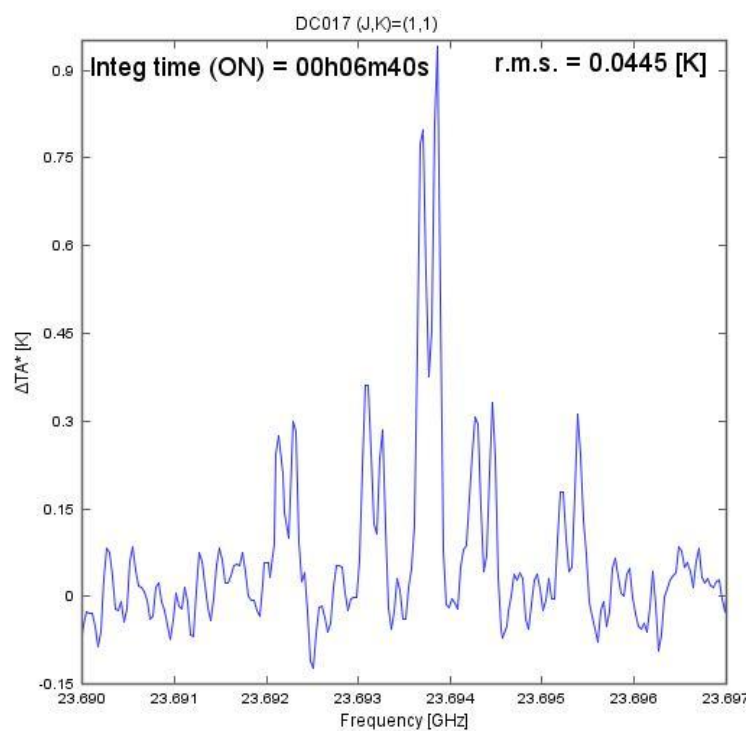


図 41 DC017  $(J,K)=(1,1)$  のスペクトル

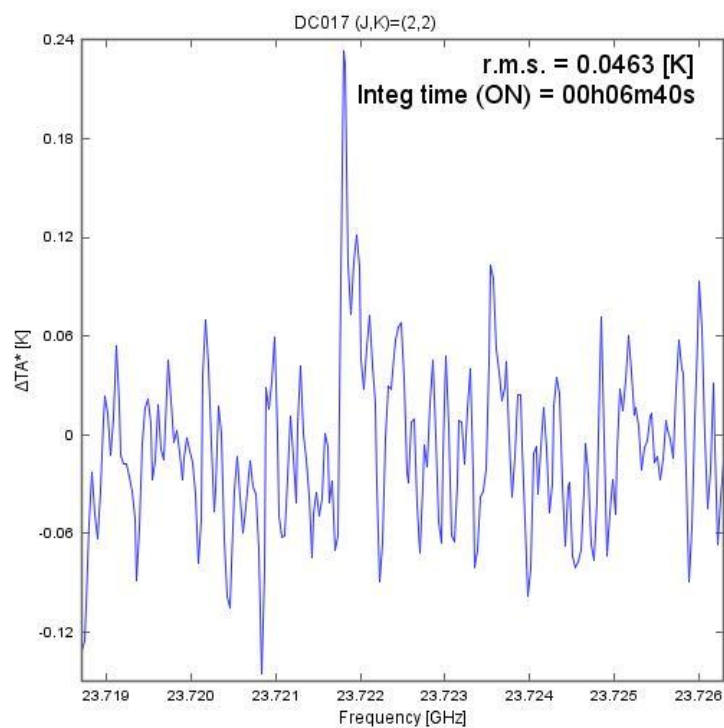


図 42 DC017  $(J,K)=(2,2)$  のスペクトル

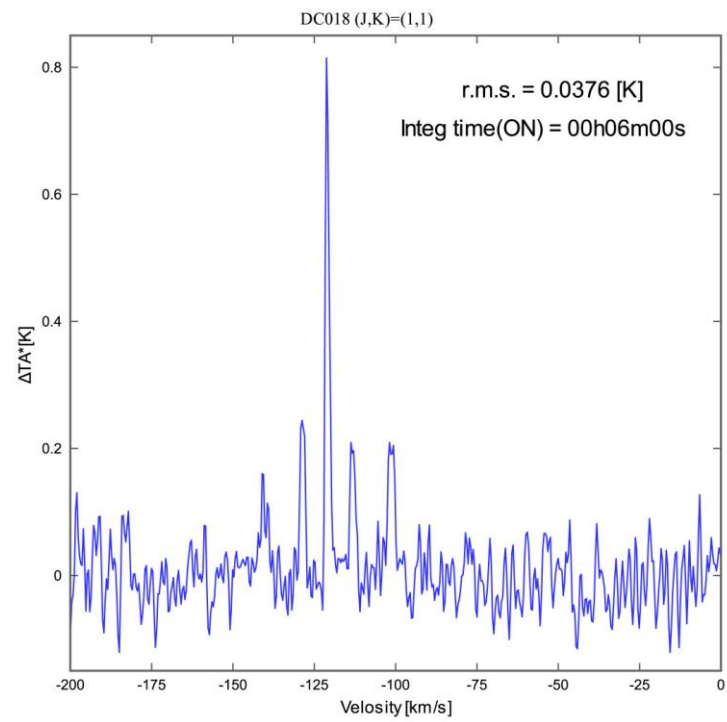


図 43 DC018  $(J,K)=(1,1)$  のスペクトル

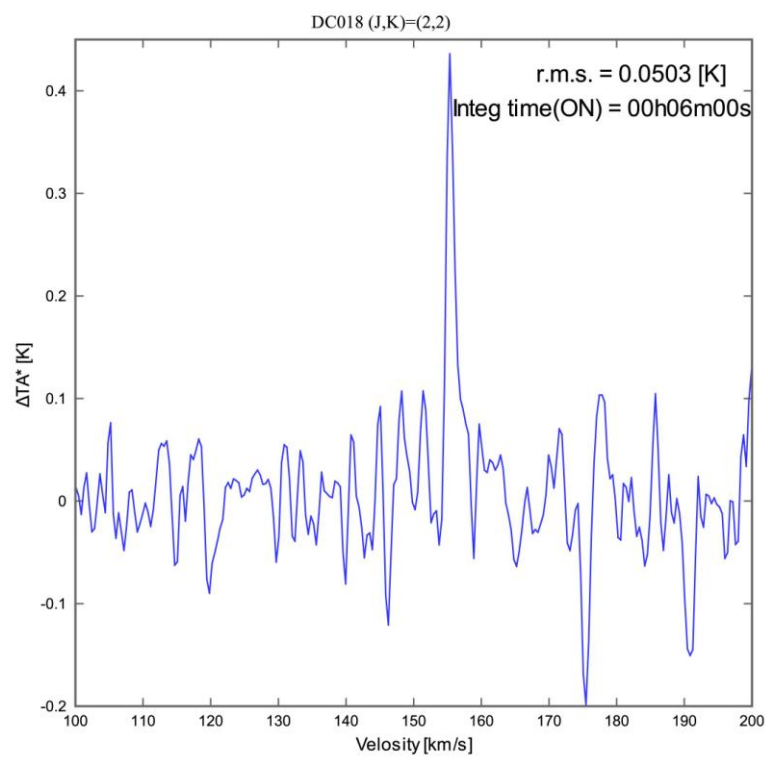


図 44 DC018  $(J,K)=(2,2)$  のスペクトル

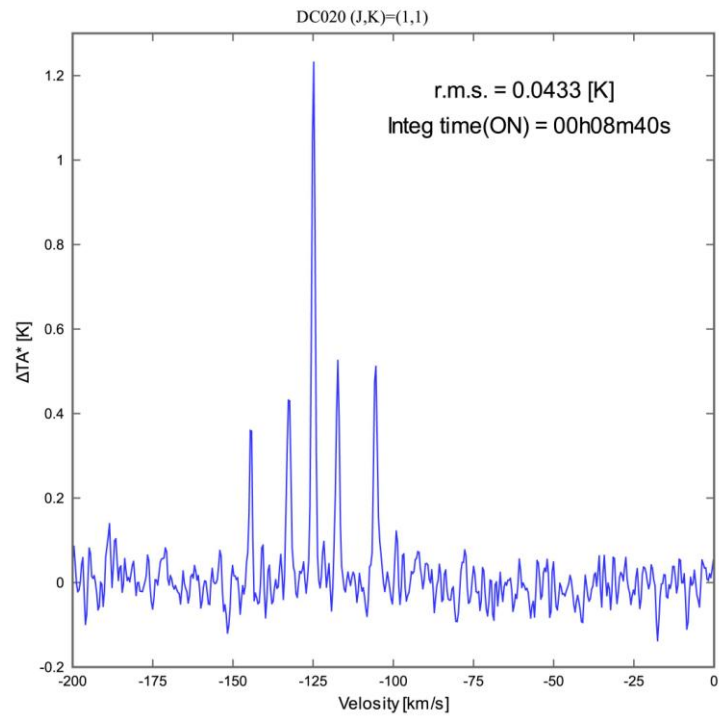


図 45 DC020  $(J,K)=(1,1)$  のスペクトル

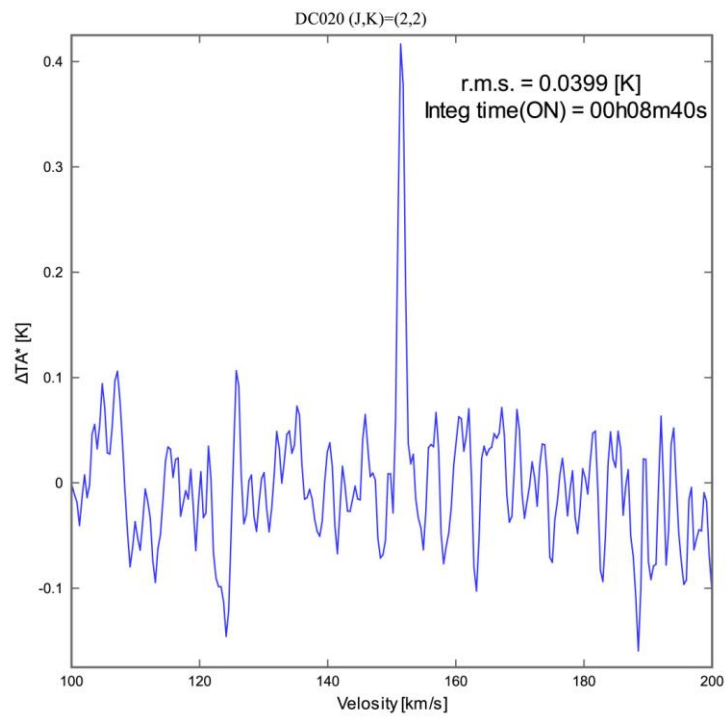


図 46 DC020  $(J,K)=(2,2)$  のスペクトル

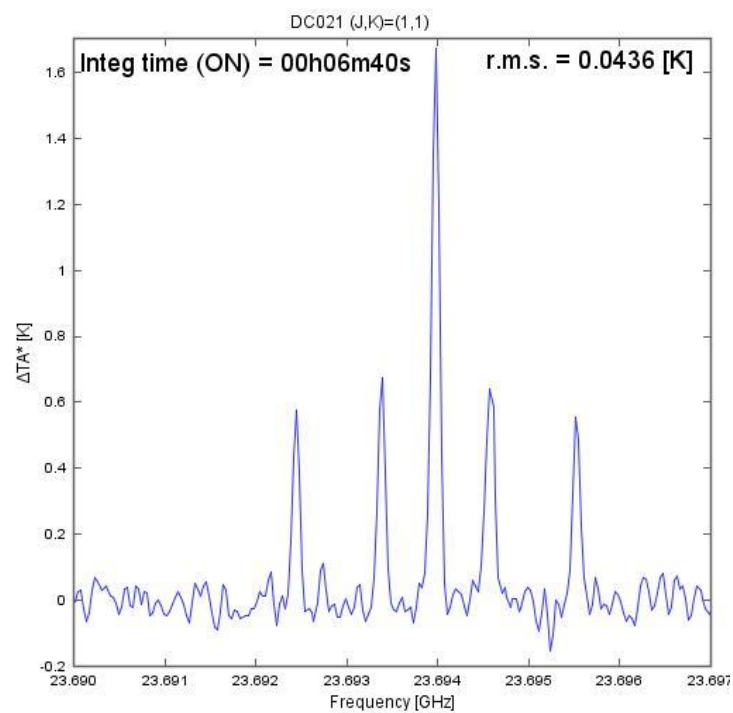


図 47 DC021  $(J,K)=(1,1)$  のスペクトル

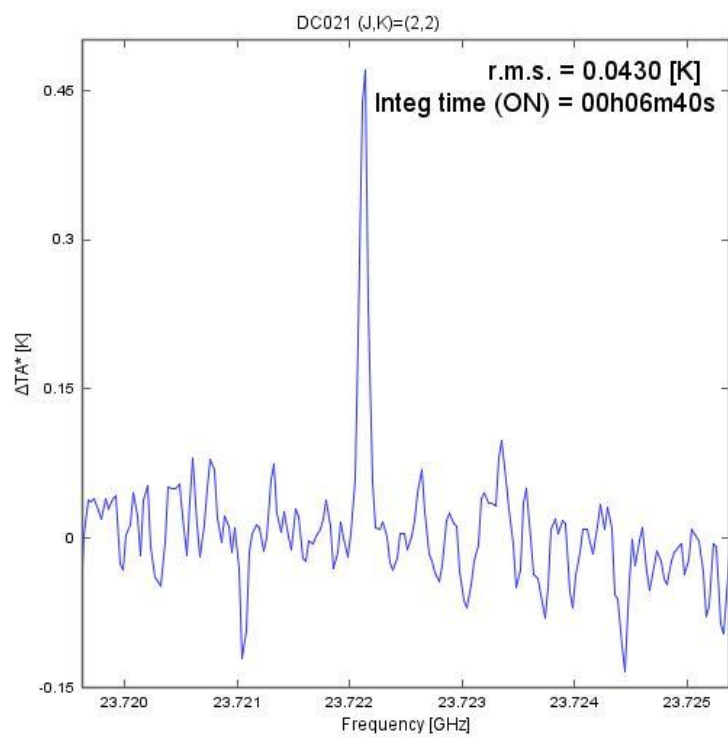


図 48 DC021  $(J,K)=(2,2)$  のスペクトル

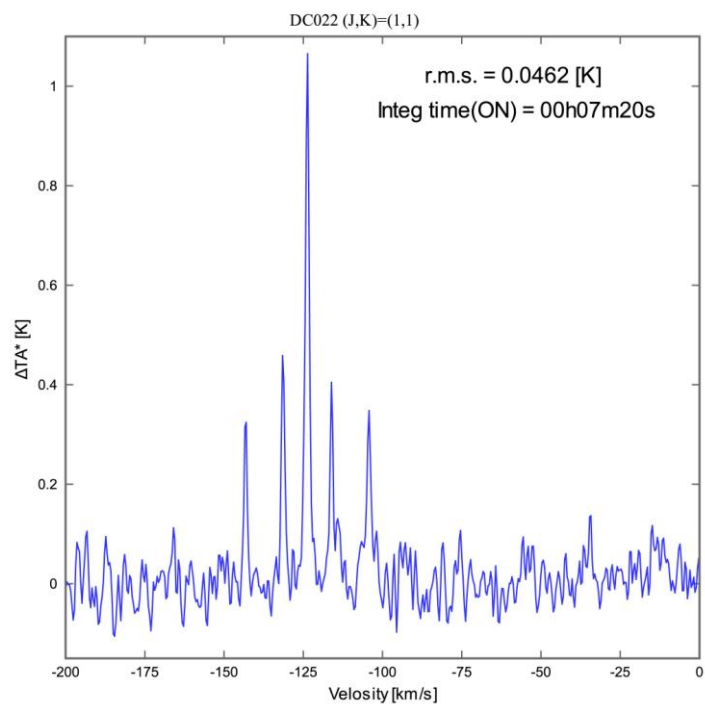


図 49 DC022  $(J,K)=(1,1)$  のスペクトル

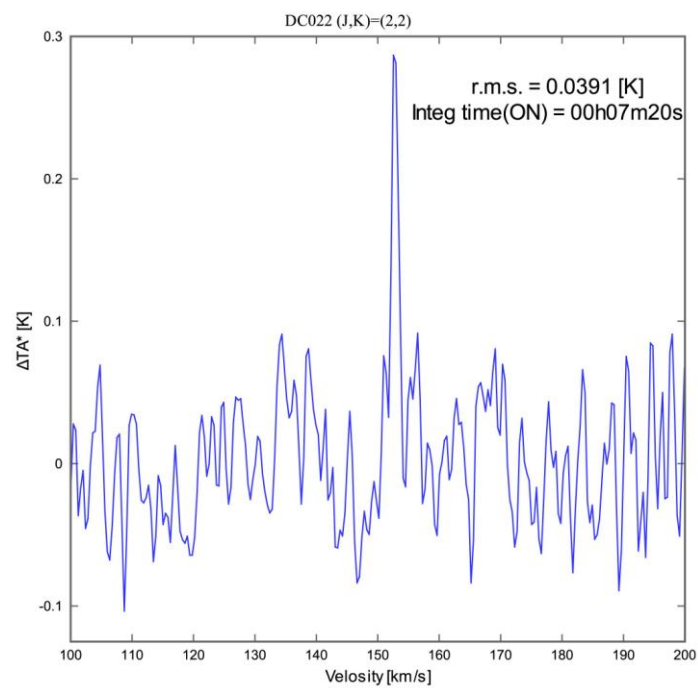


図 50 DC022  $(J,K)=(2,2)$  のスペクトル

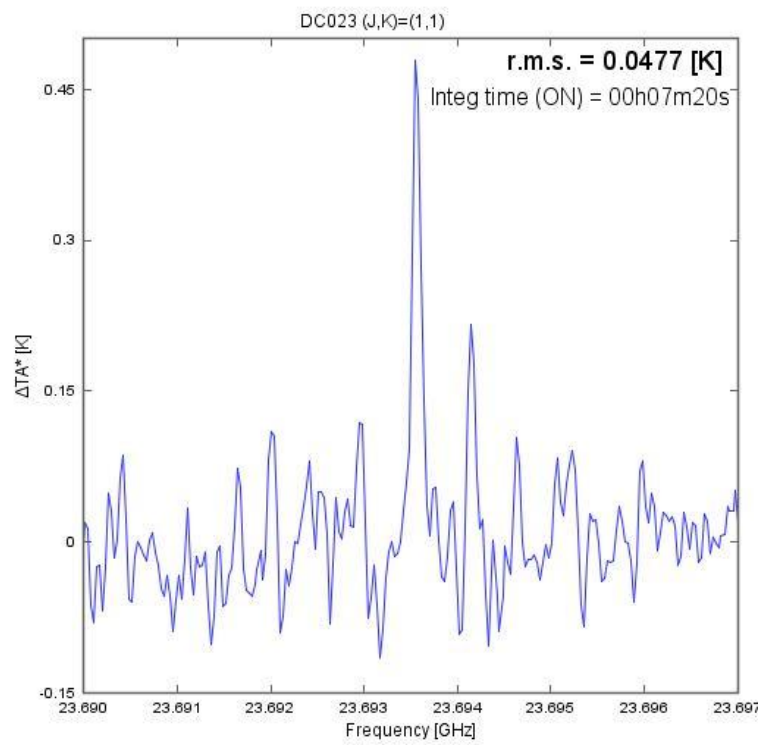


図 51 DC023  $(J,K)=(1,1)$  のスペクトル

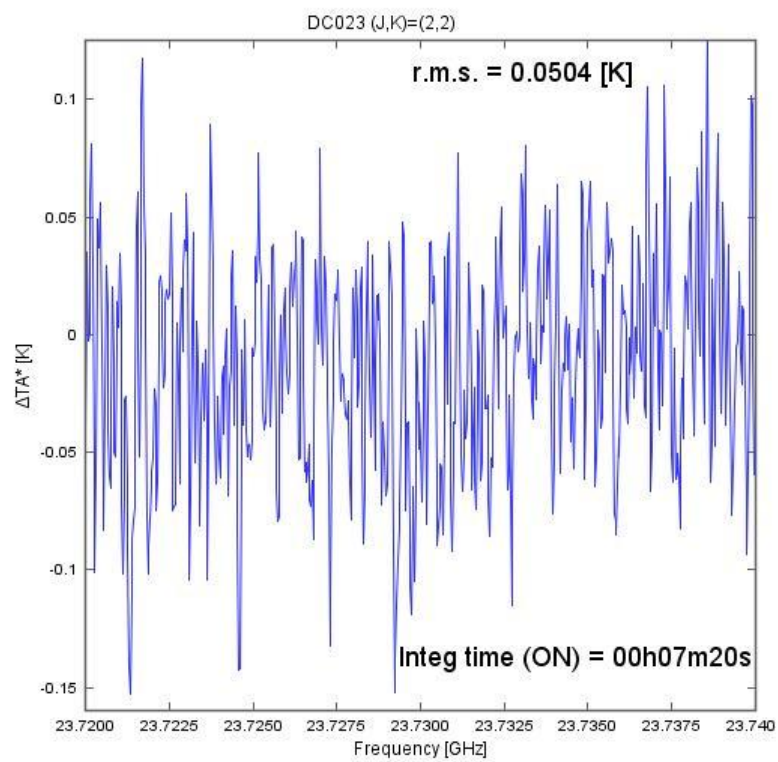


図 52 DC023  $(J,K)=(2,2)$  のスペクトル

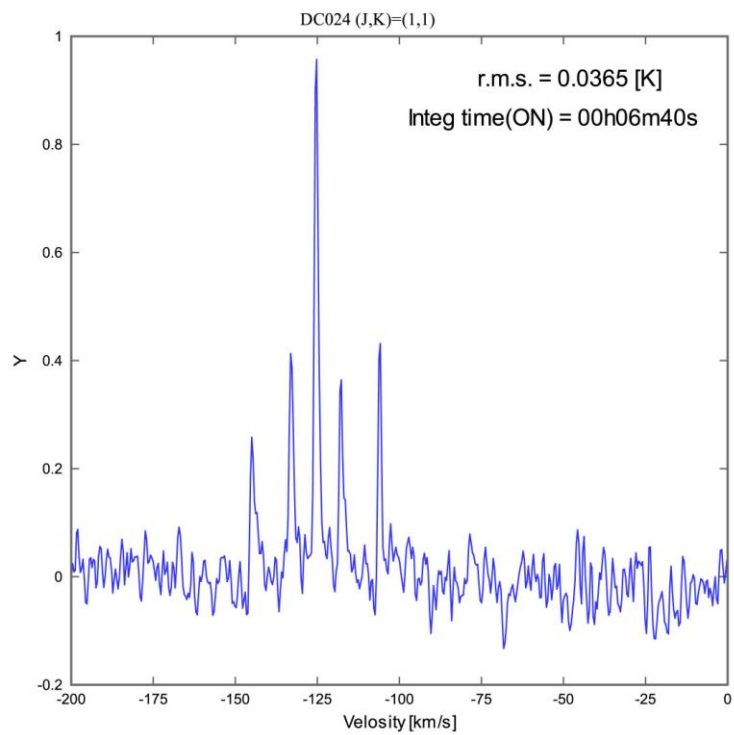


図 53 DC024  $(J,K)=(1,1)$  のスペクトル

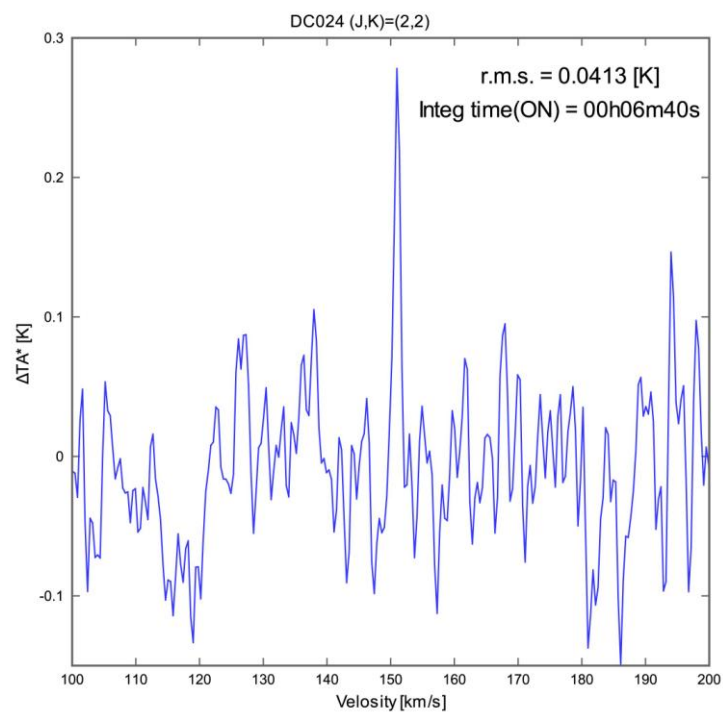


図 54 DC024  $(J,K)=(2,2)$  のスペクトル

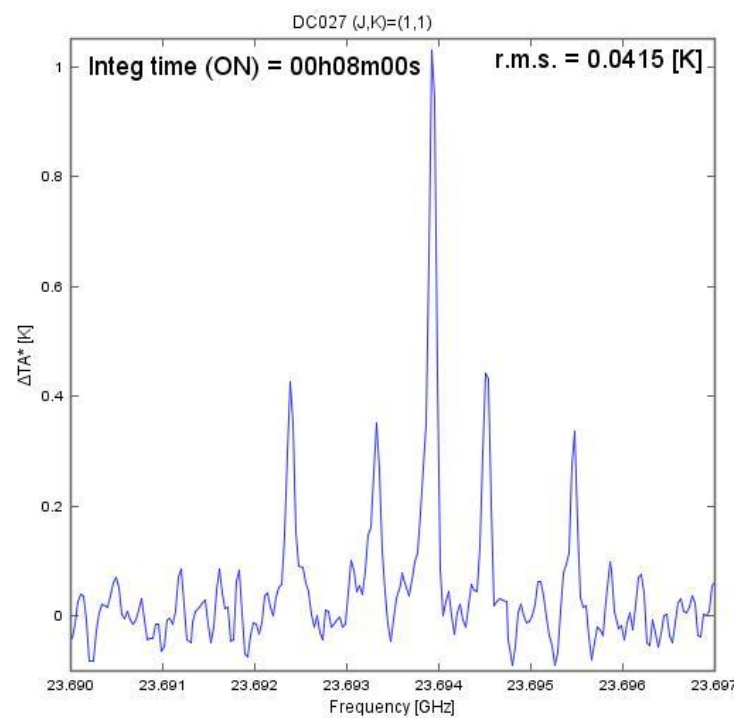


図 55 DC027  $(J,K)=(1,1)$  のスペクトル

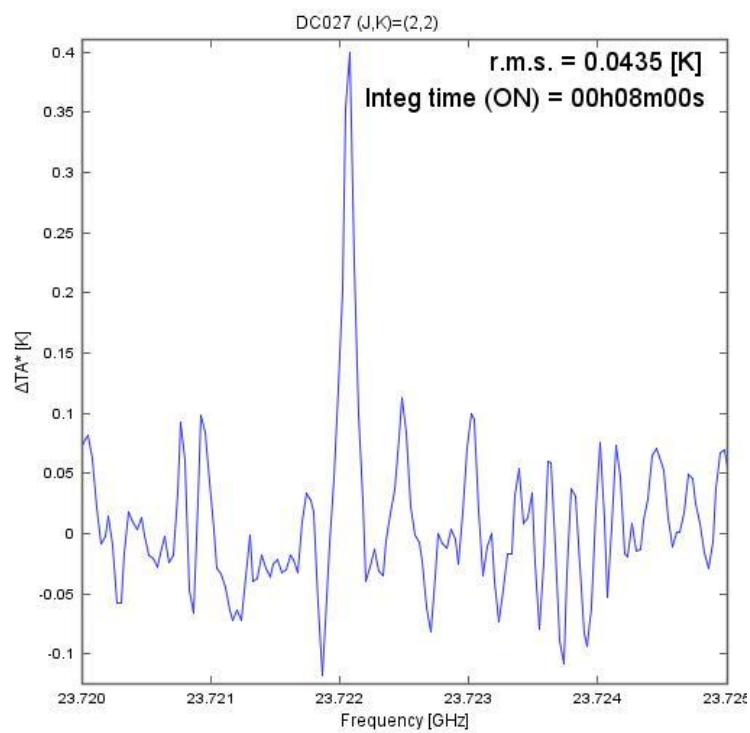


図 56 DC027  $(J,K)=(2,2)$  のスペクトル

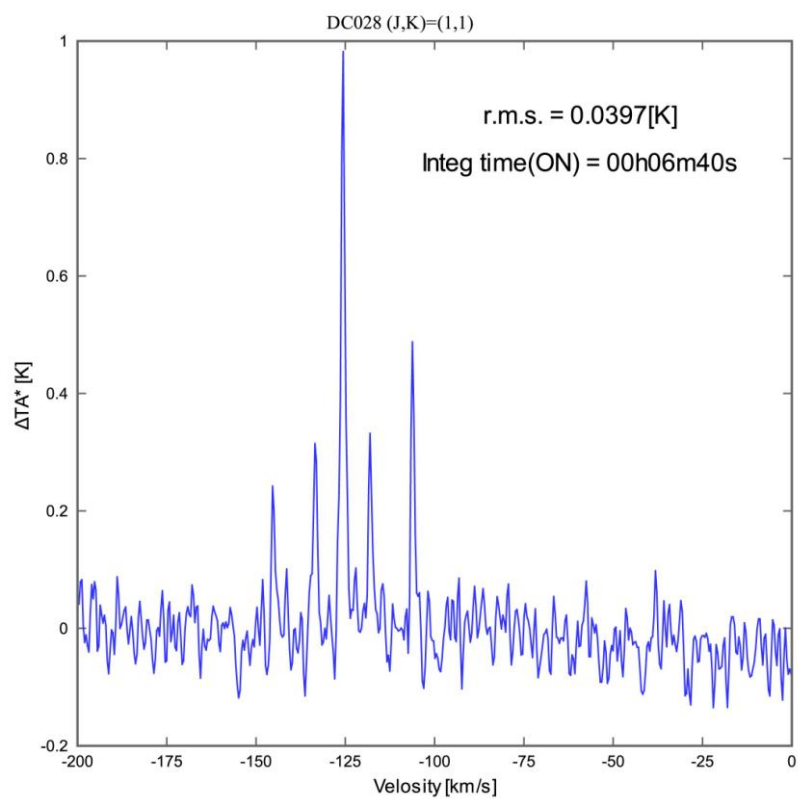


図 57 DC028  $(J,K)=(1,1)$  のスペクトル

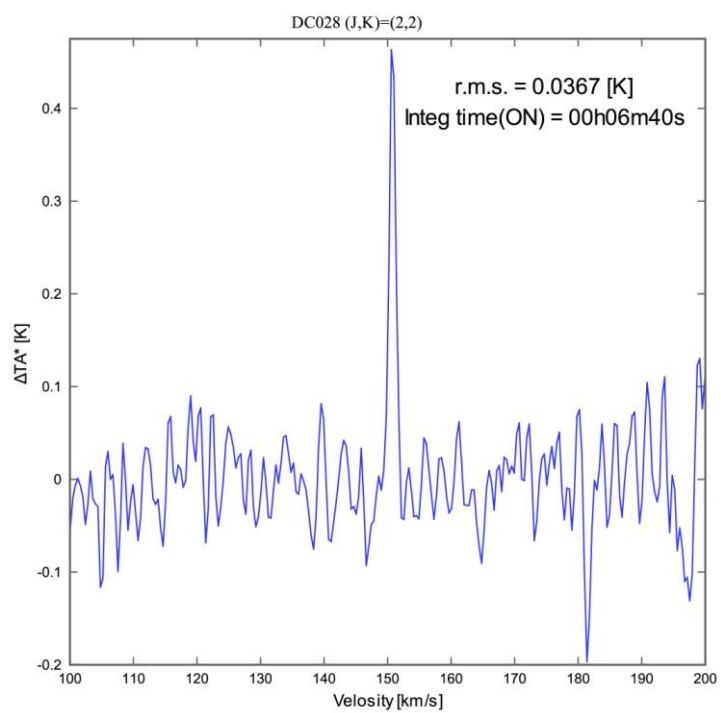


図 58 DC028  $(J,K)=(2,2)$  のスペクトル

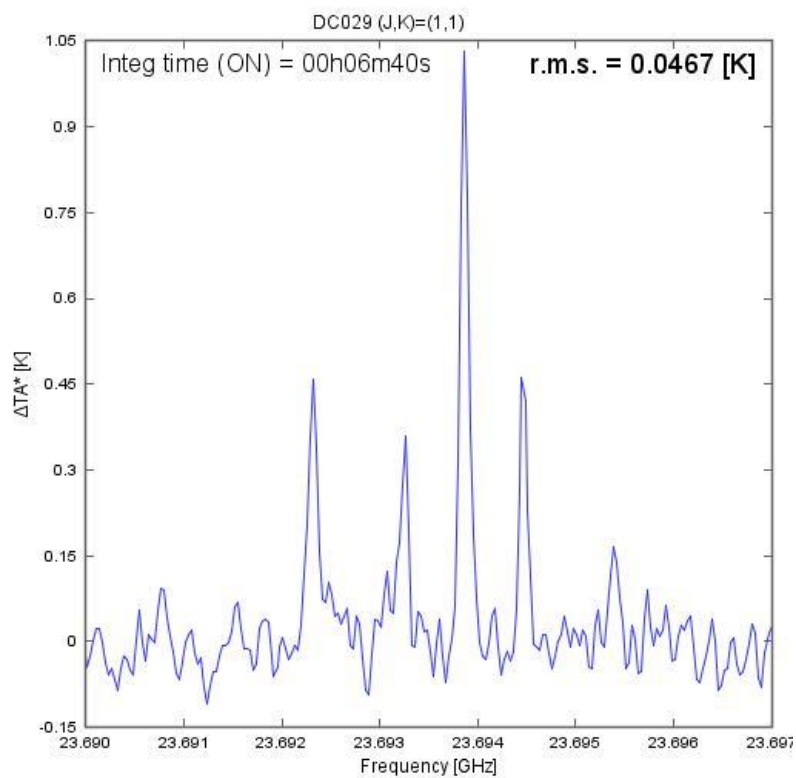


図 59 DC029  $(J,K)=(1,1)$  のスペクトル

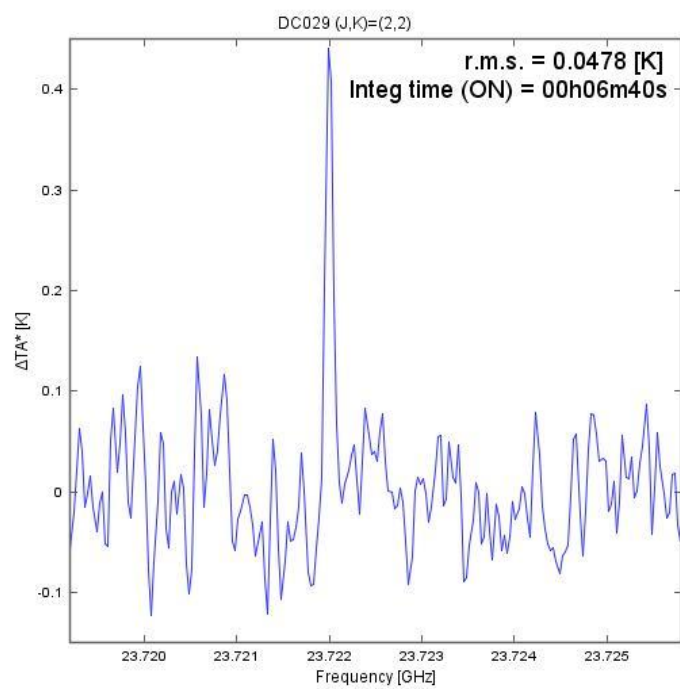


図 60 DC029  $(J,K)=(2,2)$  のスペクトル

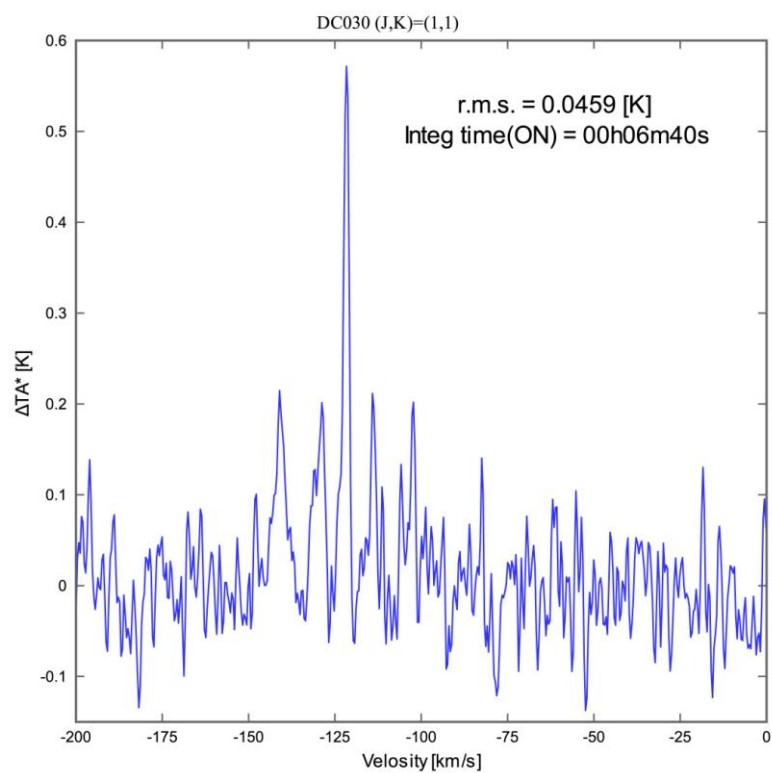


図 61 DC030  $(J,K)=(1,1)$  のスペクトル

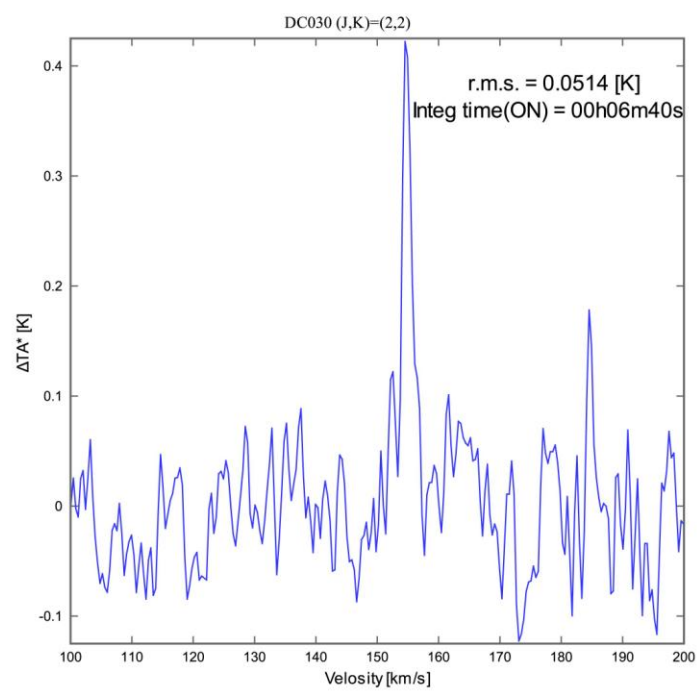


図 62 DC030  $(J,K)=(2,2)$  のスペクトル

### 3.実験結果・解析

#### 3.2 スペクトルから得られる値

各スペクトルから得られた $(J,K)=(1,1)$ 放射の測定値を以下の表 2 に示す。

ただし、 $\Delta T_A^*(1,1,m)$ ：メイン成分のアンテナ温度、 $\Delta T_A^*(1,1,s-i)$ ：サテライトの内側 2 本のスペクトルのアンテナ温度の平均、 $\Delta T_A^*(1,1,s-o)$ ：サテライトの外側 2 本のスペクトルのアンテナ温度の平均、 $\Delta V$ ：メイン成分の視線速度である。また、 $(J,K)=(2,2)$ 放射から得られた測定値は表 3 に示す。同様に、 $\Delta T_A^*(2,2m)$ ：メイン成分のアンテナ温度、 $\Delta V$ ：メイン成分の視線速度である。

表 2  $(J,K)=(1,1)$ のスペクトルから得られた各値

| コア名   | $\Delta T_A^* (1,1,m)[K]$ | $\Delta T_A^* (1,1,s-i)[K]$ | $\Delta T_A^* (1,1,s-o)[K]$ | $\Delta V[km/s]$ |
|-------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------|
| DC003 | 1.5925                    | 0.5565                      | 0.45105                     | 1.516            |
| DC005 | 1.1729                    | 0.4014                      | 0.288                       | 1.283            |
| DC009 | 2.0624                    | 0.7659                      | 0.66355                     | 1.385            |
| DC010 | 1.9872                    | 0.75565                     | 0.6847                      | 1.306            |
| DC012 | 1.4113                    | 0.615                       | 0.542                       | 1.458            |
| DC013 | 2.7799                    | 1.10815                     | 0.9244                      | 1.33             |
| DC014 | 1.3784                    | 0.5048                      | 0.42885                     | 1.358            |
| DC015 | 2.1403                    | 0.7761                      | 0.6443                      | 1.083            |
| DC016 | 1.0302                    | 0.38685                     | 0.3295                      | 1.395            |
| DC017 | 0.7254                    | 0.2585                      | 0.2616                      | 3.189            |
| DC018 | 0.8143                    | 0.2265                      | 0.18445                     | 1.427            |
| DC020 | 1.2315                    | 0.47875                     | 0.43595                     | 1.298            |
| DC021 | 1.6723                    | 0.67535                     | 0.5778                      | 1.27             |
| DC022 | 1.0653                    | 0.4314                      | 0.336                       | 1.401            |
| DC023 | 0.4788                    | —                           | —                           | 1.395            |
| DC024 | 0.957                     | 0.38825                     | 0.34445                     | 1.464            |
| DC027 | 1.0142                    | 0.39285                     | 0.36415                     | 1.393            |
| DC028 | 0.982                     | 0.3232                      | 0.365                       | 1.31             |
| DC029 | 1.0108                    | 0.4059                      | 0.29915                     | 1.297            |
| DC030 | 0.5714                    | 0.20625                     | 0.208                       | 1.864            |

—は検出されなかった事を示す

表 3  $(J,K)=(2,2)$  のスペクトルから得られた値

| コア名   | $\Delta T_A^*(2,2,m)$ [K] | $\Delta V$ [km/s] |
|-------|---------------------------|-------------------|
| DC003 | 0.8732                    | 1.497             |
| DC005 | 0.4743                    | 1.144             |
| DC009 | 0.8776                    | 1.213             |
| DC010 | 0.8207                    | 10.997            |
| DC012 | 0.5815                    | 7.034             |
| DC013 | 1.3857                    | 1.29              |
| DC014 | 0.7098                    | 11.785            |
| DC015 | 0.8269                    | 1.092             |
| DC016 | 0.3925                    | 10.995            |
| DC017 | 0.2506                    | 1.041             |
| DC018 | 0.436                     | 11.785            |
| DC020 | 0.4165                    | 7.825             |
| DC021 | 0.4954                    | 1.092             |
| DC022 | 0.2868                    | 8.997             |
| DC023 | 0.2781                    | 8.227             |
| DC024 | 0.2781                    | 7.425             |
| DC027 | 0.3906                    | 1.374             |
| DC028 | 0.4632                    | 7.033             |
| DC029 | 0.4693                    | 1.053             |
| DC030 | 0.4222                    | 10.987            |

### 3.3 物理量の導出

スペクトルから得られた値から、分子雲コア内のアンモニアに関する物理量を導出する。  
その為の式を以下に示す。

#### 3.3.1 光学的厚さ： $\tau$

表 2 の値と式(5)を用いて、光学的厚さ  $\tau$  を導出する。

$$\frac{\Delta T_A^*(1,1,m)}{\Delta T_A^*(1,1,s)} = \frac{1-e^{-\tau(1,1,m)}}{1-e^{-\tau(1,1,s)}} \quad (5)$$

但し、内側 2 本のピークでは  $\tau(1,1,s) = 0.28\tau(1,1,m)$ 、外側 2 本のピークでは  $\tau(1,1,s) = 0.22\tau(1,1,m)$  を用いる。

#### 3.3.2 温度：T

表 2 と光学的厚さ  $\tau$ 、式(6)を用いて、温度 T を導出する。

$$T = -41.5 / \ln \left[ -\frac{0.282}{\tau(1,1,m)} \ln \left( 1 - \frac{\Delta T_A^*(2,2,m)}{\Delta T_A^*(1,1,m)} \times (1 - e^{-\tau(1,1,m)}) \right) \right] \quad [K] \quad (6)$$

#### 3.3.3 柱密度：N

表 2 と光学的厚さ  $\tau$ 、温度 T と式(7)を用いて、(J,K)=(1,1)の柱密度 N(1,1)を導出する。

$$N(J,K) \cong \frac{J(J+1) \times \Delta V \times T \times \tau(J,K)}{6.1295 \times 10^{-24} \times K^2 \times \nu} \quad [cm^2] \quad (7)$$

また、柱密度を  $[g/cm^2]$  で考える時、 $\Sigma(J,K)$  とすると

$$\Sigma(J,K) = 17 \times \frac{N(J,K)}{N_A} \quad [g/cm^2] \quad (8)$$

となる。但し、ここでは  $N_A$ (アボガドロ数)  $= 6 \times 10^{23} [mol^{-1}]$  とする。

また、(J,K)=(2,2)での柱密度 N(2,2)は、ボルツマン分布で表される式(9)を用いて導出する。

$$N(2,2) = N(1,1) \times \frac{5}{3} \exp \left( -\frac{41.5}{T} \right) \quad (9)$$

光学的厚さと温度の結果を表 4 に、柱密度を表 5 に示す。

表 4 各コアにおける光学的厚さ、温度

| コア名   | $\tau$ (1,1,m) | $\tau$ (2,2,m) | T[K]  |
|-------|----------------|----------------|-------|
| DC003 | 0.678          | 0.31           | 22.87 |
| DC005 | 0.43           | 0.15           | 19.91 |
| DC009 | 0.97           | 0.31           | 18.30 |
| DC010 | 1.13           | 0.32           | 16.58 |
| DC012 | 1.585          | 0.39           | 15.66 |
| DC013 | 1.155          | 0.42           | 19.36 |
| DC014 | 0.905          | 0.39           | 19.12 |
| DC015 | 0.825          | 0.24           | 17.68 |
| DC016 | 0.990          | 0.27           | 16.26 |
| DC017 | 1.1025         | 0.26           | 15.02 |
| DC018 | 0.00885        | —              | 21.93 |
| DC020 | 1.220          | 0.27           | 15.01 |
| DC021 | 1.1245         | 0.22           | 14.46 |
| DC022 | 1.100          | 0.20           | 13.92 |
| DC023 | —              | —              | —     |
| DC024 | 1.330          | 0.24           | 13.94 |
| DC027 | 1.4875         | 0.35           | 15.77 |
| DC028 | 1.040          | 0.37           | 17.92 |
| DC029 | 0.934218       | 0.33           | 20.92 |
| DC030 | 1.145          | 0.70           | 23.62 |

表 5 各コアにおける柱密度

| コア名   | N(1,1)<br>[( $\times 10^{14}$ ) $\square/\text{cm}^2$ ] | N(1,1)<br>[( $\times 10^{-8}$ ) $\text{g}/\text{cm}^2$ ] | N(2,2)<br>[( $\times 10^{14}$ ) $\square/\text{cm}^2$ ] | N(2,2)<br>[( $\times 10^{-9}$ ) $\text{g}/\text{cm}^2$ ] |
|-------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| DC003 | 6.313                                                   | 1.789                                                    | 1.714                                                   | 4.856                                                    |
| DC005 | 5.094                                                   | 1.443                                                    | 1.056                                                   | 2.992                                                    |
| DC009 | 6.846                                                   | 1.940                                                    | 1.181                                                   | 3.347                                                    |
| DC010 | 6.578                                                   | 1.864                                                    | 0.8972                                                  | 2.542                                                    |
| DC012 | 9.799                                                   | 2.776                                                    | 1.153                                                   | 3.267                                                    |
| DC013 | 7.638                                                   | 2.164                                                    | 1.492                                                   | 4.228                                                    |
| DC014 | 6.725                                                   | 1.905                                                    | 1.279                                                   | 3.624                                                    |
| DC015 | 4.807                                                   | 1.362                                                    | 7.661                                                   | 2.171                                                    |
| DC016 | 6.180                                                   | 1.751                                                    | 0.8030                                                  | 2.275                                                    |
| DC017 | 1.359                                                   | 3.852                                                    | 1.430                                                   | 4.051                                                    |
| DC018 | 0.07392                                                 | 0.02094                                                  | 0.01856                                                 | 0.05259                                                  |
| DC020 | 6.426                                                   | 1.821                                                    | 0.6741                                                  | 1.910                                                    |
| DC021 | 5.662                                                   | 1.604                                                    | 0.5351                                                  | 1.516                                                    |
| DC022 | 5.941                                                   | 1.683                                                    | 0.5026                                                  | 1.424                                                    |
| DC023 | —                                                       | —                                                        | —                                                       | —                                                        |
| DC024 | 7.483                                                   | 2.120                                                    | 0.6359                                                  | 1.802                                                    |
| DC027 | 7.544                                                   | 2.138                                                    | 0.9049                                                  | 2.564                                                    |
| DC028 | 6.542                                                   | 1.854                                                    | 1.076                                                   | 3.047                                                    |
| DC029 | 7.332                                                   | 2.077                                                    | 1.681                                                   | 4.763                                                    |
| DC030 | 13.66                                                   | 3.870                                                    | 3.929                                                   | 11.13                                                    |

### 3.3.4 Beam filling factor : $\eta$

アンテナが見ているビーム立体角( $\Omega_{\text{beam}}$ )に対して、放射領域がどの程度占めているかの指標として、**Beam filling factor** がある。放射領域がビーム立体角の一部を占めている場合、得られた出力はビーム立体角全体でにじませた量に対応したものが得られる。そのため、放射領域がビーム立体角の何割を占めているかを数値化する必要がある。 $\eta = 1$  の時は、放射領域がビーム立体角を満たしている状態である。 $\eta < 1$  の時は、放射領域はビーム立体角の一部を占めた状態である。

物質の温度  $T$  に対して輝度温度  $T_b$  は式(9) のようにかける。

$$T_b = T(1 - e^{-\tau_\nu}) \quad (10)$$

また、実際に観測される輝度温度は

$$T_{b(\text{obs})} = \frac{T_A^*}{0.8} \quad (11)$$

とかける。但し 0.8 は 45m 電波望遠鏡のビーム能率である。

実際に観測された輝度温度と輝度強度比から(局所熱力学平衡を仮定したとき期待される)輝度温度の差が **Beam filling factor** と考えられるので、式(12)が成り立つ。

$$T_{b(\text{obs})} = T_b \times \eta \quad (12)$$

従って式(9)は

$$\frac{\Delta T_A^*}{0.8} = T(1 - e^{-\tau_\nu}) \times \eta \quad (13)$$

となる。これより **Beam filling factor** は式(13)となる。

$$\eta = \frac{\Delta T_A^*}{0.8} \frac{1}{T(1 - e^{-\tau_\nu})} \quad (14)$$

### 3.3.5 $\Omega_{\text{beam}}$ の導出

$\Omega_{\text{beam}}$  とはビーム立体角である。 $\Omega_{\text{beam}}$  は半値幅を用いて、式(14)で表される。

$$\Omega_{\text{beam}} = \frac{\pi(\text{FWHM})^2}{4\ln 2} \quad (15)$$

### 3.3.6 $\Omega_{\text{NH}_3}$ の導出

$\Omega_{\text{NH}_3}$  はアンモニア分子の放射領域の立体角である。先ほどの  $\Omega_{\text{beam}}$  と  $\Omega_{\text{NH}_3}$  には、以下の関係がある。

$$\eta = \frac{\Omega_{\text{NH}_3}}{\Omega_{\text{beam}}} \quad (16)$$

従って式(14)と式(15)より、 $\Omega_{\text{NH}_3}$ 、式(16)が求まる

$$\frac{\Omega_{\text{NH}_3}}{\Omega_{\text{beam}}} \times \Omega_{\text{beam}} = \Omega_{\text{NH}_3} \quad (17)$$

### 3.3.4 質量

アンモニア分子の全質量  $M_{\text{NH}_3}$  は、これまでに導出した柱密度  $N(\text{NH}_3)$ 、立体角  $\Omega_{\text{NH}_3}$ 、分子雲までの距離  $d$  を用いて、式(17)で求めることができる。

$$M_{\text{NH}_3} = N(\text{NH}_3) \left[ \frac{\text{g}}{\text{cm}^2} \right] \times \Omega_{\text{NH}_3} \times (d[\text{cm}])^2 \quad (18)$$

但し、 $d=400[\text{pc}]$  とした。

これより求めたアンモニア分子の質量を表 6 で示す。

表 6 各コアにおけるアンモニア分子の質量

| コア名   | $M_{\text{NH}_3}[(\times 10^{26})\text{g}]$ | $M_{\text{NH}_3}[(\times 10^{-4})M_{\odot}]$ |
|-------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|
| DC003 | 6.786                                       | 3.413                                        |
| DC005 | 5.494                                       | 2.763                                        |
| DC009 | 7.035                                       | 3.538                                        |
| DC013 | 8.791                                       | 4.421                                        |
| DC015 | 6.016                                       | 3.025                                        |
| DC017 | 5.473                                       | 2.753                                        |
| DC021 | 4.988                                       | 2.508                                        |
| DC023 | —                                           | —                                            |
| DC027 | 3.293                                       | 1.656                                        |
| DC029 | 3.303                                       | 1.661                                        |
| DC010 | 8.200                                       | 4.124                                        |
| DC012 | 7.822                                       | 3.934                                        |
| DC014 | 5.733                                       | 2.883                                        |
| DC016 | 4.386                                       | 2.206                                        |
| DC018 | 2.194                                       | 1.103                                        |
| DC020 | 5.269                                       | 2.650                                        |
| DC022 | 4.798                                       | 2.413                                        |
| DC024 | 4.917                                       | 2.473                                        |
| DC028 | 3.905                                       | 1.964                                        |
| DC030 | 3.413                                       | 1.716                                        |

### 3.3.5 ダスト連続波観測で得たコア質量の補正

先行研究では、ダスト連続波観測からコア質量  $M_{H_2}$  を推論している(島尻ほか)。この質量は温度を 20[K]と仮定しているため、本研究で得られた温度を用いて補正する。補正後の質量を  $M'_{H_2}$  とする。

このために、式(18)を用いる。

$$M'_{H_2} = M_{H_2} \times \frac{B_v(T=20[K])}{B_v(T=NH_3)} \quad (19)$$

これより得られた質量  $M'_{H_2}$  を表 7 で示す。

表 7 各コアでの  $M_{H_2}$  と  $M'_{H_2}$

| コア名   | $M_{H_2}[M_{\odot}]$ | $M'_{H_2}[M_{\odot}]$ | $M'_{H_2}[(\times 10^{34})g]$ |
|-------|----------------------|-----------------------|-------------------------------|
| DC003 | 92.59                | 81.17                 | 16.14                         |
| DC005 | 44.81                | 39.28                 | 7.811                         |
| DC009 | 65.23                | 57.72                 | 11.48                         |
| DC010 | 25.95                | 31.48                 | 6.260                         |
| DC012 | 39.17                | 50.42                 | 10.03                         |
| DC013 | 63.84                | 55.96                 | 11.13                         |
| DC014 | 62.25                | 65.20                 | 12.96                         |
| DC015 | 31.28                | 27.42                 | 5.452                         |
| DC016 | 24.98                | 30.91                 | 6.147                         |
| DC017 | 17.10                | 14.99                 | 2.981                         |
| DC018 | 35.00                | 31.85                 | 6.332                         |
| DC020 | 13.94                | 18.75                 | 3.729                         |
| DC021 | 22.09                | 19.36                 | 3.850                         |
| DC022 | 17.60                | 25.59                 | 5.089                         |
| DC023 | 17.67                | 15.49                 | 3.080                         |
| DC024 | 11.64                | 16.90                 | 3.360                         |
| DC027 | 16.19                | 14.19                 | 2.822                         |
| DC028 | 21.16                | 23.70                 | 4.712                         |
| DC029 | 26.01                | 22.80                 | 4.534                         |
| DC030 | 37.07                | 31.25                 | 6.215                         |

### 3.3.6 $N(H_2)$ の導出

3.3.5 で導出した  $M'_{H_2}$  と式(19)を用いて、 $H_2$  の柱密度、 $\Sigma(H_2)[g/cm^2]$ を導出する。

$$\Sigma(H_2)[g/cm^2] = \frac{M'_{H_2}}{\pi(R_{obs})^2} \quad (20)$$

ここで、 $R_{obs}$  は先行研究からの値を用いており、表 7 で示す。さらに、 $1pc = 3 \times 10^{18}[cm]$  としている。

式(19)で導出した  $N(H_2)$  を、 $[/cm^2]$  に式(20)を用いて変換する。

$$N(H_2)[/cm^2] = \frac{N(H_2)[\frac{g}{cm^2}] \times 2}{N_A} \quad (21)$$

以上の結果を表 8 に示す。

表 8 各コアでの  $H_2$  の柱密度

| コア名   | $R_{obs}[pc]$ | $R_{obs}[(\times 10^{17})cm]$ | $N(H_2)[g/cm^2]$ | $N(H_2)[(\times 10^{22})\square/cm^2]$ |
|-------|---------------|-------------------------------|------------------|----------------------------------------|
| DC003 | 0.21          | 6.3                           | 0.1450           | 4.365                                  |
| DC005 | 0.16          | 4.8                           | 0.1160           | 3.492                                  |
| DC009 | 0.18          | 5.4                           | 0.1334           | 4.016                                  |
| DC010 | 0.10          | 3.0                           | 0.2214           | 6.642                                  |
| DC012 | 0.20          | 6.0                           | 0.08865          | 2.660                                  |
| DC013 | 0.17          | 5.1                           | 0.1464           | 4.407                                  |
| DC014 | 0.16          | 4.8                           | 0.1791           | 5.374                                  |
| DC015 | 0.11          | 3.3                           | 0.1713           | 5.157                                  |
| DC016 | 0.15          | 4.5                           | 0.09663          | 2.899                                  |
| DC017 | 0.12          | 3.6                           | 0.07871          | 2.369                                  |
| DC018 | 0.22          | 6.6                           | 0.04627          | 1.388                                  |
| DC020 | 0.10          | 3.0                           | 0.1319           | 3.956                                  |
| DC021 | 0.16          | 4.8                           | 0.05719          | 1.721                                  |
| DC022 | 0.15          | 4.5                           | 0.07999          | 2.400                                  |
| DC023 | 0.13          | 3.9                           | 0.06930          | 2.086                                  |
| DC024 | 0.12          | 3.6                           | 0.08253          | 2.476                                  |
| DC027 | 0.09          | 2.7                           | 0.1325           | 3.988                                  |
| DC028 | 0.11          | 3.3                           | 0.1377           | 4.132                                  |
| DC029 | 0.15          | 4.5                           | 0.07662          | 2.306                                  |
| DC030 | 0.20          | 6.0                           | 0.05495          | 1.648                                  |

#### 4.考察

解析の結果、コア DC018 については、光学的厚さ  $\tau$  が他に比べて非常に小さい値となった為、それから導出した各値の信憑性は低いと考え、参考値として扱う。また、コア DC018 の値が小さくなった原因として、他のコアと比較したとき、メイン成分に対して、サテライト成分が非常に弱く(表 9)、(1,1)、(2,2)ともにノイズが多かった事が挙げられる。また、DC023 はサテライト成分が出ず、物理量が導出できなかったため、考察では除外する。

表 9 各コアにおけるメインとサテライトのアンテナ強度比

| コア名   | $\Delta T_A^*(1,1,m)/\Delta T_A^*(1,1,s-i)$ | $\Delta T_A^*(1,1,m)/\Delta T_A^*(1,1,s-o)$ |
|-------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
| DC003 | 2.862                                       | 3.531                                       |
| DC005 | 2.922                                       | 4.073                                       |
| DC009 | 2.693                                       | 3.108                                       |
| DC010 | 2.630                                       | 2.902                                       |
| DC012 | 2.290                                       | 2.604                                       |
| DC013 | 2.509                                       | 3.007                                       |
| DC014 | 2.731                                       | 3.214                                       |
| DC015 | 2.758                                       | 3.322                                       |
| DC016 | 2.663                                       | 3.127                                       |
| DC017 | 2.806                                       | 2.773                                       |
| DC018 | 3.595                                       | 4.415                                       |
| DC020 | 2.572                                       | 2.825                                       |
| DC021 | 2.476                                       | 2.894                                       |
| DC022 | 2.469                                       | 3.171                                       |
| DC024 | 2.465                                       | 2.778                                       |
| DC027 | 2.582                                       | 2.785                                       |
| DC028 | 3.038                                       | 2.690                                       |
| DC029 | 2.490                                       | 3.379                                       |
| DC030 | 2.770                                       | 2.747                                       |

#### 4.1 $\text{NH}_3$ と $\text{H}_2$ の質量比

3章で求めた $(J,K)=(1,1)$ での $\text{N}(\text{NH}_3)[\text{g}/\text{cm}^2]$ と $\text{N}(\text{H}_2)[\text{g}/\text{cm}^2]$ から、その比をとったところ、表10のようになり、これはこれまでの研究(Johnstone et al,2010)から、尤もらしい値であると考えられる。(Johnstone では para- $\text{NH}_3$  について議論しているが、図9からわかるように、 $(J,K)=(1,1)$ 、 $(2,2)$ は para- $\text{NH}_3$  であるから、有効である。)

表10  $(J,K)=(1,1)\text{NH}_3$  分子と  $\text{H}_2$  分子の質量比

| コア名   | $\text{N}(\text{NH}_3)[\text{g}/\text{cm}^2]/\text{N}(\text{H}_2)[\text{g}/\text{cm}^2]$ |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| DC003 | $1.233 \times 10^{-07}$                                                                  |
| DC005 | $1.244 \times 10^{-07}$                                                                  |
| DC009 | $1.454 \times 10^{-07}$                                                                  |
| DC010 | $8.418 \times 10^{-08}$                                                                  |
| DC012 | $3.132 \times 10^{-07}$                                                                  |
| DC013 | $1.478 \times 10^{-07}$                                                                  |
| DC014 | $1.064 \times 10^{-07}$                                                                  |
| DC015 | $7.949 \times 10^{-08}$                                                                  |
| DC016 | $1.812 \times 10^{-07}$                                                                  |
| DC017 | $4.894 \times 10^{-07}$                                                                  |
| DC018 | $4.526 \times 10^{-09}$                                                                  |
| DC020 | $1.381 \times 10^{-07}$                                                                  |
| DC021 | $2.805 \times 10^{-07}$                                                                  |
| DC022 | $2.104 \times 10^{-07}$                                                                  |
| DC024 | $2.569 \times 10^{-07}$                                                                  |
| DC027 | $1.614 \times 10^{-07}$                                                                  |
| DC028 | $1.346 \times 10^{-07}$                                                                  |
| DC029 | $2.711 \times 10^{-07}$                                                                  |
| DC030 | $7.043 \times 10^{-07}$                                                                  |

## 4.2 温度の傾向

表 4 で示した温度を、ダスト連続波観測で得られたコアのマップ上にマッピングしたところ、図で示したように、北から南にかけて高温から低温となる傾向が見られた(図 13)。

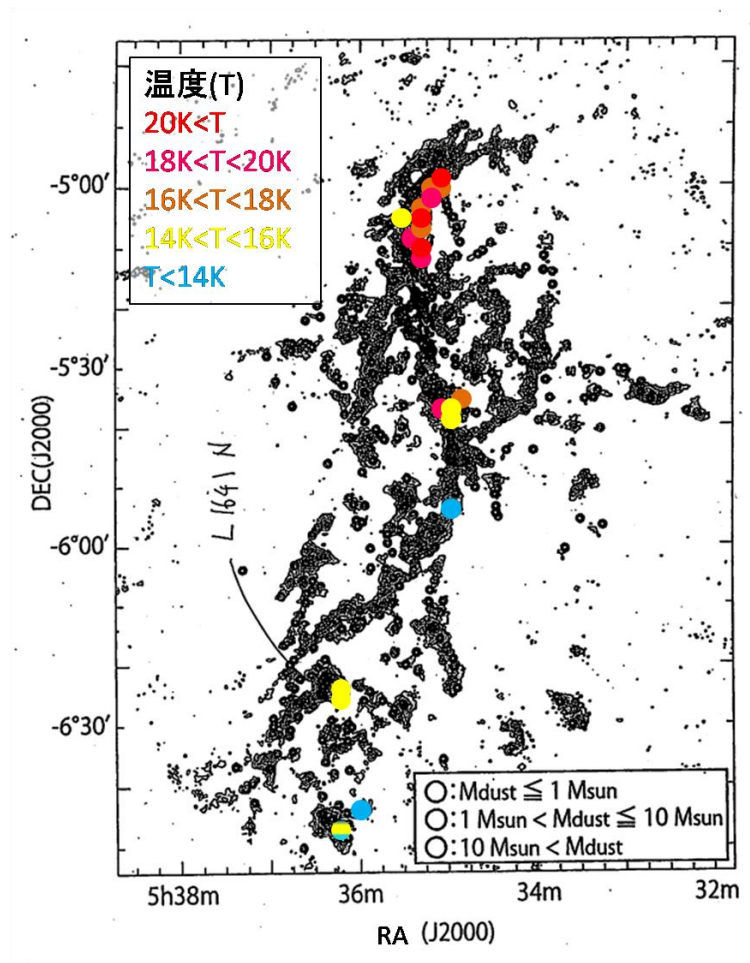


図 13 温度のマッピング

### 4.3 速度幅分布

各コアで得られた速度幅を、赤経(RA)、赤緯(DEC)に対して、図 14、図 15 のようにプロットした。コア DC017 が他のコアに比べて大きな速度を持っているのは、ダブルピークが観測されたことも考慮すると、二つの天体が重なって観測された為に、その速度が足された結果であると考えられる。図 14、図 15 は赤経は[hour]、赤緯は[Degree]で表示している。

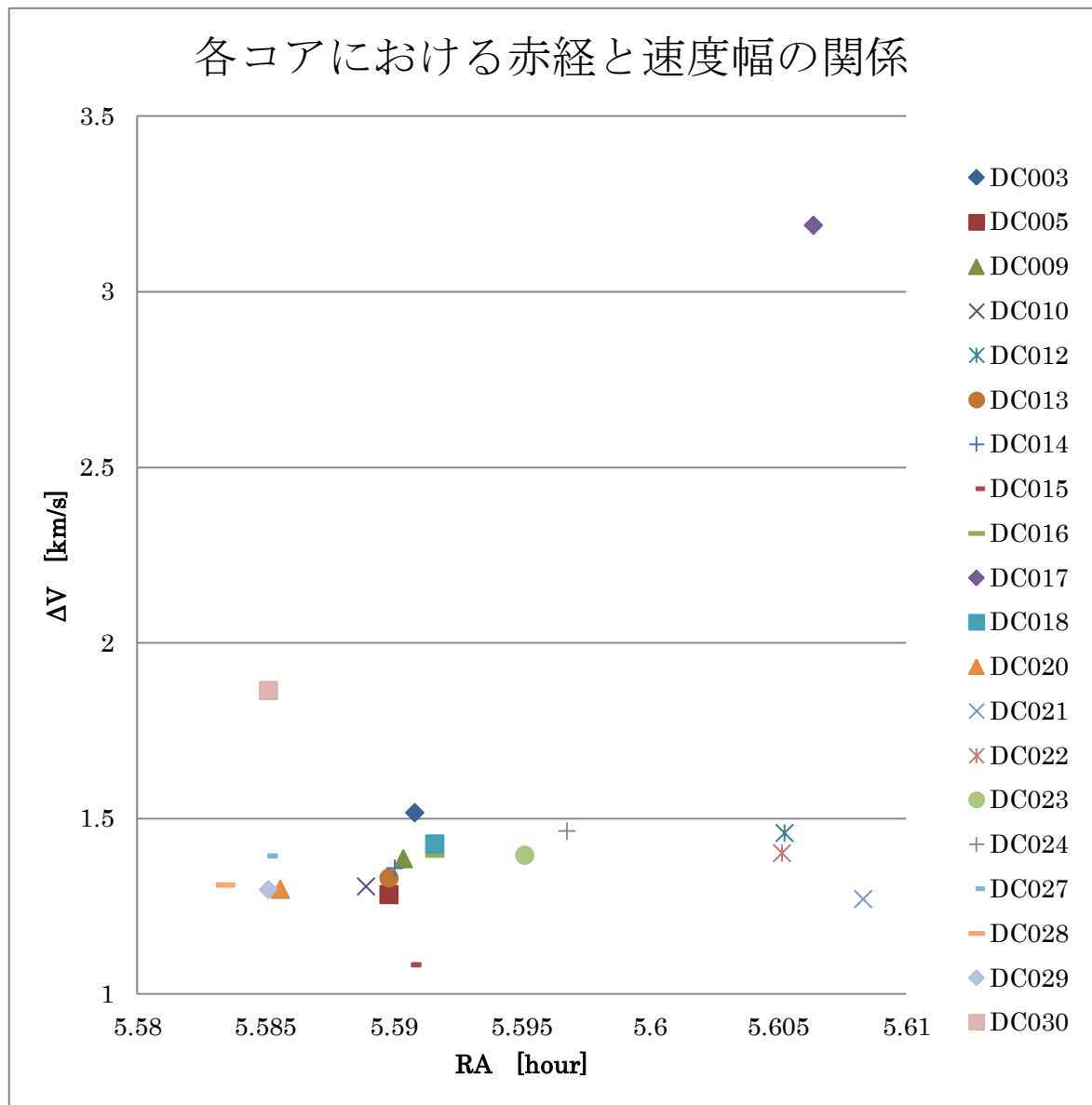


図 14 各コアにおける赤経と速度幅の関係

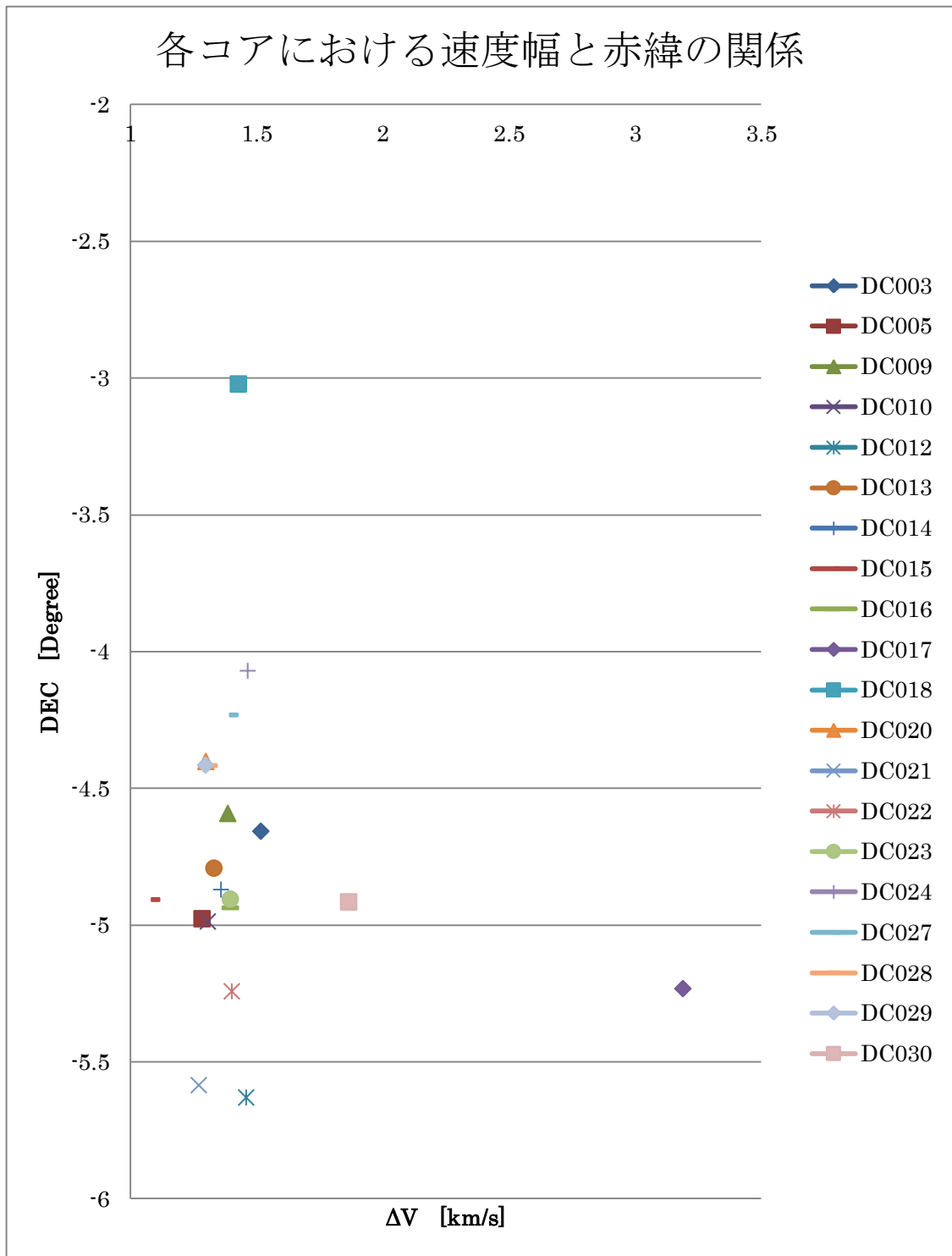


図 15 各コアにおける速度幅と赤緯の関係

## 5.参考文献

- ・ 宇宙の観測Ⅱ－電波天文学 シリーズ現代の天文学 第16巻  
中井直正・坪井昌人・福井康雄 [編]
- ・ 天文学大事典 上條 宰
- ・ Ho, P. T. P. & Townes, C. H. 1983, ARA&A, 21, 239H
- ・ The Formation of Stars Steven W. Stahler and Francesco Palla
- ・ Johnstone, Doug., Rosolowsky, Erik., Tafalla, Mario., et al. 2010, APJ, 711, 655
- ・ Maddalena, R.J., Morris, M., Moscowitz, J., et al. 1986, APJ, 303, 375
- ・ Shimajiri, Yoshito., Kawabe, Ryohei., Takakuwa, Shigehisa., et al. 2011, PASJ, 63, 105