

# 分子雲のスペクトラル・トモグラフィー ～分子輝線の精密解析でおうし座分子雲の 構造に迫る～



土橋 一 仁

〈東京学芸大学教育学部 〒184-8501 東京都小金井市貫井北町 4-1-1〉

e-mail: dobashi@u-gakugei.ac.jp

この研究では、非常に高い周波数分解能観測によって得られた $\text{HC}_3\text{N}$ 分子輝線と $\text{CCS}$ 分子輝線のデータを解析して、分子ガスの複数の速度成分（視線速度が比較的そろったガス塊）を検出し、それらの視線方向上での重なり具合を調べる解析法について紹介する。使用したデータは、元々おうし座分子雲中の高密度領域（TMC-1）の磁場を計測するために取得した45 GHz帯の分子輝線である。データの取得には、野辺山45 m鏡に搭載された新しいZ45受信機とPolariS分光計を利用した。解析の結果、TMC-1は異なる4つの速度成分から成り、視線速度の低い順に視線上の遠方から並んでいることが分かった。これは、分子雲コア全体が、おそらく重力により収縮していることを意味している。この記事では、研究の経緯と結果について解説する。

## 1. 研究開始前夜

名古屋大学の学生だった頃からの友人である中村文隆氏（国立天文台）から、彼の研究計画への参加を最初に打診されたのは2011年頃のことだったと記憶している。45 GHz帯の $\text{CCS}$ 分子輝線のゼーマン分裂を検出して、分子雲コアでの磁場の計測にチャレンジしようという野心的なプロジェクトだ。過去、幾つかのグループによって同じ試みがなされたが[1, 2]、あまりに難易度が高く、誰もが納得するような成功例は報告されていなかった。それを実現するために、新しい高感度受信機と高い周波数分解能をもつ電波分光計を開発して野辺山45 m電波望遠鏡に搭載し、有名な「おうし座分子雲」で磁場を測定するつもりらしい。

中村氏は元々、磁気流体力学の緻密なシミュレーションを武器に、星間雲や星形成の研究に取り組む優秀な理論家である。私自身は観測系の人

間だが、学生時代から割りと気が合った（私の方が1学年上）。研究に疲れると、他の学友らと共に、安酒屋でお酒を飲んで騒いだりした。名古屋名物の台湾ラーメン（+青菜+あさり+キュウリ）もちょくちょく食べにいった。彼は理論計算だけでは飽き足らなくなったらしく、自ら観測的な研究もたくさんやっていることは知っていたが、今度は観測装置を作ることからやるつもりらしい。もっとも、新しい受信機については大阪府立大学の小川英夫氏のグループに開発してもらい、電波分光計については鹿児島大学（当時）の亀野誠二氏と水野いづみ氏のグループが制作しているものを利用させてもらうとのことだったが、とにかく、その馬力には呆れるほど感心した。詳細については関連する他の記事に委ねるが、新しい受信機は“Z45” [3]、分光計は“PolariS” [4]と名付けられ、以後数年間、実際の観測に投入されることになった。

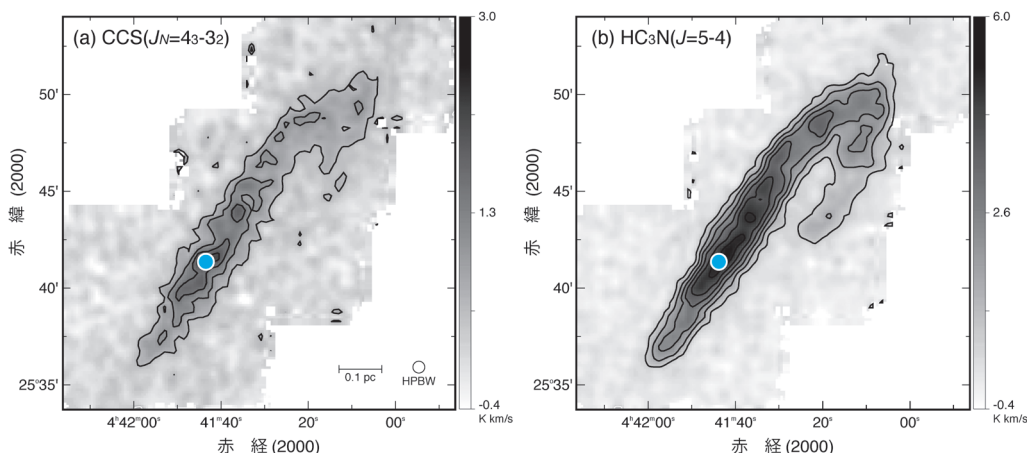


図1 おうし座分子雲中の高密度領域であるTMC-1の (a) CCS分子輝線と (b) HC<sub>3</sub>N分子輝線の強度分布. 青丸は観測点の座標.

研究計画に誘われた当時、東京学芸大学の私の研究室には、たまたま若い学生が大勢在籍していた（修士生と学部生の全部で十数人）。彼らに卒業論文や修士論文のテーマを与えなければならないという事情もあったので、当時ポスドク研究員をやってもらっていた下井倉ともみ氏とともに、中村氏のお誘いによることにした。学生にとっても、他大学の学生や教員と触れ合ったり、野辺山45 m鏡等の観測装置に慣れ親しむメリットは大きい。

中村氏が集めた研究メンバーには、私にとっては昔馴染みの懐かしい人が多かった。受信機開発の第一人者である小川氏は、私が名古屋大学の学生だった頃から大変お世話になった先生であり、亀野氏は一緒に天文月報の編集員をつとめた仲間だ。また、Z45受信機を45 m鏡に実装する際に活躍した茨城大学の米倉覚則氏も、学生時代からの友人である。詳細については省略するが、上記の面々と共に観測機器を整え、本格的な観測をスタートすることができたのは、2014年度になってからだった。観測には、当時総合研究大学院大学の学生だった谷口琴美氏と東京学芸大学の学生だった落合哲氏も加わった。その他、長い研究期間を通して、多くの仲間が研究に参加した。関連

する他の記事で紹介されている通り、数年間の努力の結果、磁場を計測するための研究は成功を収めることができた [5]。

さて、前置きが長くなったが、この記事で紹介する内容は、磁場の計測に関することではない。磁場の計測とは別に、磁場を計測するために取得したデータを異なる視点から解析することにより、分子雲の視線方向（奥行き方向）の構造を調べるための研究方法を考案した。この記事では、その方法の紹介しつつ、解析結果について報告する。

## 2. 観測した分子輝線のデータ

CCS分子輝線のゼーマン分裂に関する研究では、非常に高い感度と周波数分解能をもつ素晴らしいデータが得られた。一般に、分子輝線の分光データ（スペクトル）を解析すると、輝線を放射している分子ガスの温度、密度、および速度を計測することができる。速度は電磁波のドップラー効果を利用して計測するので、周波数分解能（小さな周波数差を区別する能力）の高いデータほど速度分解能（小さな速度差を区別する能力）も高いデータになる。研究に使用したPolariS分光計の周波数分解能は60 Hzである。これは、速度分

表1 解析に使用した分子輝線の物理定数 (Splatalogueによる). 見かけの速度差は,  $\text{HC}_3\text{N}$  の  $J=5-4, F=5-4$  の輝線に対する相対的な速度差で, 単位はキロメートル毎秒 (km/s).

分子	遷移	静止周波数 (MHz)	見かけの速度差 (km/s)	相対強度	備考
CCS	$J_N=4_3-3_2$	45379.04600	...	...	...
$\text{HC}_3\text{N}$	$J=5-4, F=5-5$	45488.83680	9.7331	0.0134	サテライト
$\text{HC}_3\text{N}$	$J=5-4, F=4-3$	45490.26140	0.3447	0.2592	メイン
$\text{HC}_3\text{N}$	$J=5-4, F=5-4$	45490.31370	0.0000	0.3200	メイン
$\text{HC}_3\text{N}$	$J=5-4, F=6-5$	45490.33730	-0.1555	0.3940	メイン
$\text{HC}_3\text{N}$	$J=5-4, F=4-4$	45492.10850	-11.8282	0.0134	サテライト

解能に換算すると 40 cm/s (毎秒 40 cm) に相当する. つまり, 遠方の星間雲中の分子ガスの運動を, 赤ちゃんがハイハイするくらいの速度に切り分けて観察することができるのである. 専門的な感覚でいうと, この速度分解能は驚異的である. これほど高い速度分解能のデータを, 見たことがなかった. しかも, 合計30時間も積分し, データ処理の方法も工夫したので [6], ノイズはとても少ない (40 cm/s の速度分解能で rms ノイズは 40 mK).

「すごいデータですね. このスペクトルをみっちり解析すれば, 分子雲の内部構造を正確に描き出すことができるかもしれませんね」と最初に口にしたのは, 亀野氏だった. 私も他の仲間も皆, 磁場の検出とは別に, スペクトルの精密な速度解析に取り組んでみるべきだと考えた. 結局, この解析は私が担当することになった.

解析するデータは, おうし座分子雲の中の

TMC-1 と呼ばれる細長い高密度領域のある一点 (図1の青丸) に対して取得した 45 GHz 帯の CCS 分子輝線と  $\text{HC}_3\text{N}$  分子輝線のスペクトルである. 両分子輝線の物理定数を, 表1にまとめる. CCS 分子輝線はゼーマン分裂を検出するために観測したものであり,  $\text{HC}_3\text{N}$  分子輝線はゼーマン分裂を示さない対照輝線として同時観測したものである. 図2に, これらの分子輝線のスペクトルの概形を示す. 図2の縦軸は輝線の強度で, 横軸は視線速度である. 視線速度とは, ガス粒子の速度の観測者の視線への射影成分で, 観測者から遠ざかる方向を正にとる. 図中の CCS 分子輝線には, 表示の関係上, -3 K のオフセットを与えてある. 輝線の強度は, 慣例的に絶対温度の K (ケルビン) で表す.

図2では, CCS 分子輝線には分子雲のもつ視線速度 (約 6 km/s) のところに1つのピーク (山) があるが,  $\text{HC}_3\text{N}$  分子輝線は一見すると3つのピークに分かれている. これは,  $\text{HC}_3\text{N}$  分子輝線には, 表1に示すように, 超微細構造と呼ばれるエネルギー的に接近した5つの異なる輝線があるからである. この記事では, 5つの輝線のうち, 図2で両端に現れる比較的弱い2つ輝線を「サテライト輝線」と呼び, 真ん中の強い輝線を「メイン輝線」と呼ぶことにする. メイン輝線は, 非常に接近した3つの超微細構造が混ぜ合わさったものである (表1).

これら  $\text{HC}_3\text{N}$  のサテライト輝線とメイン輝線, および CCS 分子輝線を関連付け, 次の章で述べ

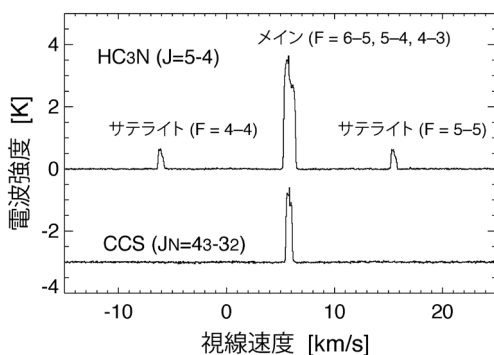


図2 CCS分子輝線と $\text{HC}_3\text{N}$ 分子輝線の概形.

る手順で丹念に解析すると、観測した分子雲の奥行き方向の情報を引き出すことができる。

### 3. 解析方法と結果

#### 3.1 HC<sub>3</sub>Nのサテライト輝線から速度成分を決める

まず、HC<sub>3</sub>Nのサテライト輝線を解析する。ここから先は、分子輝線の扱いに慣れていない読者には、やや難解かもしれない。多少理解できないことがあっても、気にせず読み進んでいただきたい。

乱流の無い静かな分子ガス塊からは放射されるHC<sub>3</sub>Nのサテライト輝線のように、光学的厚さ(←後述する)の小さな分子輝線のスペクトルは、視線速度に対してガウス関数でよく近似できるという性質がある。ガス塊の中の粒子の速度分布がいわゆるマクスウェルの速度分布(←1次元では速度のガウス関数)になるからである。しかし、図3に黒線で示した実際のスペクトルは、単純な1個のガウス関数では表せない複雑な形をしている。これは、少しずつ異なる視線速度をもつ複数のガス塊が観測者の視線上に重なっているからである。このようなガス塊を、速度成分と呼ぶことにする。図3のスペクトルは、4個のガウス関数

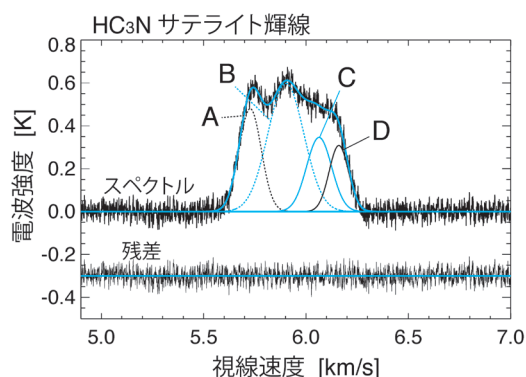


図3 観測されたHC<sub>3</sub>Nのサテライト輝線のスペクトルと、4個の速度成分A-D(青と黒の実線と破線)の和として再現したスペクトル(細い青線)。図のサテライト輝線は、2個の超微細構造( $F=4-4$ と $5-5$ )を平均したもの。

を足し合わせたスペクトルでよく再現できる。つまり、観測した方向には4つの速度成分があり、それらが視線上に重なって見えているということが分かるのである。図3に示すように、4個の速度成分を視線速度の低い順にA, B, C, Dとする。

速度成分の数は、なぜ4個だと分かるのだろうか?なぜ3個ではないのだろうか?と疑問に思う読者も多いであろう。少々複雑なので詳細は省略するが、速度成分の数を決めるには、まず1個の速度成分(ガウス関数)で観測されたスペクトルをフィットして残差のカイ二乗(←フィットの良さの指標)を計算し、次に成分数を2個に増やして再度フィットしてカイ二乗を計算し、さらに成分数を3個に増やして……という作業を繰り返し、残差のカイ二乗が十分によくなくなる速度成分の個数を求める、という方法をとる。この方法を使って、観測されたスペクトルを再現するために最低限必要な成分数は4個であることが分かる。また、データを再現する上で、5個以上の成分は必要ではないことも分かる。他の種類の分子輝線とも比較すると、おそらく速度成分は4個という結論で間違いない。

#### 3.2 CCS分子輝線から視線上での重なりを解く

視線上での速度成分の数が決まったら、次にこれらの視線上での重なりを考察する。そのために、CCS分子輝線を解析する。CCS分子輝線とHC<sub>3</sub>N分子輝線(メイン+サテライト)は、分子雲の中のほぼ同じ領域から放射されていることが期待されるので、CCS分子輝線も上記の解析で得られた4個の速度成分(A-D)と同じ速度成分から構成されると仮定する。「同じ」というのは、物理的に同一のガス塊という意味で、個々のガウス関数が最大になる速度も同じになる。

ただし、CCS分子とHC<sub>3</sub>N分子は分子量や存在量が異なるので、線幅や強度は同じではない。特に、CCS分子輝線は光学的に薄い、ということに注意しなければならない。

ここで、光学的厚さについて少々説明する。

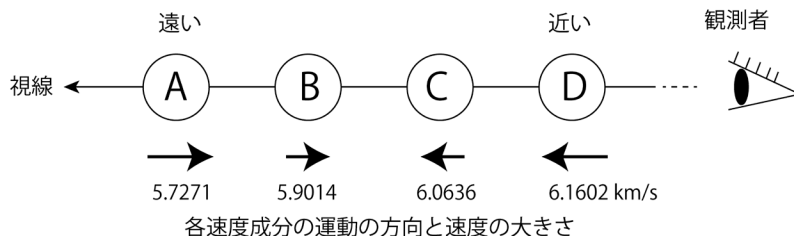


図4 観測者の視線上の遠い方から A, B, C, D の順に4個の速度成分が並んでいる場合が、観測された CCS 分子輝線 (図5) を最もよく再現できる. 矢印の下の数字は各速度成分の視線速度で、単位はキロメートル毎秒 (km/s). 矢印は視線速度の平均 (約 5.95 km/s) に対する各速度成分の相対速度の方向と大きさを表す.

CCS 分子輝線を放射するガス塊が観測者の視線上に2つ重なっているとす。観測者から見て近い方のガス塊が放射する輝線は遮るものがないのでそのまま観測者に到達するが、観測者から見て遠い方のガス塊が放射する輝線は近い方のガス塊に一部吸収され、弱められてから観測者に到達する。吸収量は「光学的厚さ」と呼ばれる量で表される。光学的厚さは、しばしばギリシャ文字の $\tau$ で表される。たくさん吸収される場合には、近い方のガス塊の光学的厚さは大きい、または光学的に厚い、と表現する。ほとんど吸収されない場合には、光学的厚さが小さい、または光学的に薄い、と表現する。この研究で扱うスペクトルの場合、 $\text{HC}_3\text{N}$  のサテライト輝線は光学的に薄い ( $\tau=0.1$  程度) が、CCS 分子輝線は薄くなく ( $\tau=$

2程度)、背後からやってくる輝線をある程度吸収してしまう。つまり、図3のサテライト輝線の4個の成分は、観測者の視線上でどのような順序で並んでいてもその合計は同じ形のスペクトルとして観測されるが、CCS 分子輝線の場合には、並ぶ順序によって観測されるスペクトルの形が異なる。

そこで、図4のように、速度成分 A-D を観測者の視線上に置き、遠い方からの並び順を ABCD, ABDC, ACBD, ACDB, ……、DCBA という具合に変えながら、どのような順序で並んでいる場合に観測された CCS 分子輝線に最も合うスペクトルが得られるか、計算した。その結果、図4のように、遠方から ABCD の順に並んでいる場合が最も合うことが分かった (図5)。

当初は、BDAB というように、割とランダムな並び順になるだろうと予想していたので、規則正しくアルファベット順に ABCD と並んでいるという結果を少し奇異に感じた。何か間違えたのだろうか？ しかし、解析にミスは見当たらなかった。

観測のために研究仲間が野辺山に集合した折、この解析結果を見せた。それを見た中村氏がすぐさま、「こ、これは……TMC-1 の重力収縮を捉えているんじゃないですか!？」と少し興奮した声をあげた。「あっ! そうかもしれない。」と、皆すぐ中村氏の言いたいことを理解した。4個の視線速度は A, B, C, D の順で大きくなるが、これらがこ

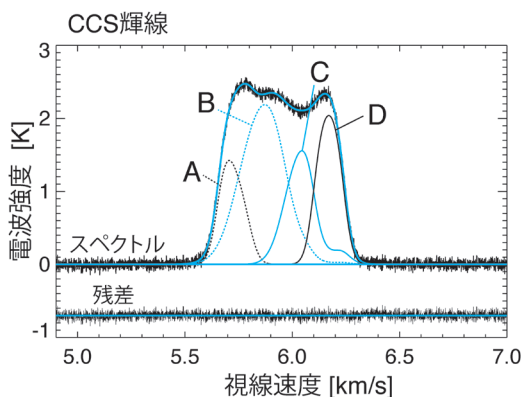


図5 観測された CCS 輝線と、図4のように4個の速度成分が ABCD の順に並んだ場合に再現されるスペクトル。

の順で視線上に遠い方から並んでいるとすると、平均速度(約5.95 km/s)から見た各成分の相対速度は、図4の下段の矢印で示すようになる。つまり、全ての速度成分が中心に向かって運動していることになる。これはちょっとした発見かもしれない。中村氏と亀野氏は、磁場の測定のために別途進めていたゼーマン分裂の解析の途中結果と付き合わせながら、いろいろと想いを巡らせているようだった。

しかし、私自身は、実は解析で得られた視線上での並び順に十分な確信をもてないでいた。数はかなり限られるが、ABCDという並び順以外にもCCSの観測データをそれなりによく再現し得る並び順が存在したからだ。別の輝線でも同じ結果が得られるか、確かめたい。そこで、 $\text{HC}_3\text{N}$ のメイン輝線についても、同じ解析を行うことにした。

### 3.3 収縮運動か? $\text{HC}_3\text{N}$ のメイン輝線での確認

とはいえ、 $\text{HC}_3\text{N}$ のメイン輝線の解析は難しい。取得したメイン輝線は光学的に割と厚く( $\tau=12$ 程度)、サテライト輝線やCCS分子輝線の解析では気にならなかった分子雲周辺や隣接する速度成分の間にある希薄なガスによる輝線の放射

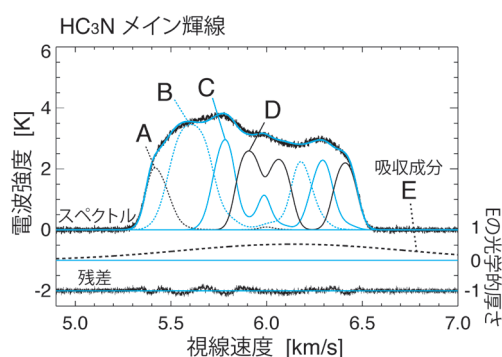


図6 観測された $\text{HC}_3\text{N}$ のメイン輝線と、4個の速度成分がABCDの順に並んだ場合に再現されるスペクトル。ただし、速度成分Dと観測者の間に、吸収にのみ寄与する速度成分Eが存在すると仮定した。図では、Eは光学的厚さで表されている。

や吸収も影響する。さらに、3本の超微細構造(表1の $F=4-3, 5-4, 6-5$ )が混合している。試行錯誤しながら解析した結果を、図6に示す。図中の1個の成分(例えば黒線のD)に3個の山があるのは、3個の超微細構造によるものである。

解析では、次の(1)-(3)のことが分かった。

- (1) A-Dの4個の速度成分の他に、輝線の吸収にのみ寄与し、放射には寄与しない第5の速度成分の存在を仮定しないと、観測されたスペクトルを再現することはできない。この第5の速度成分をEと呼ぶ。
- (2) 速度成分Eの視線上での位置は、Dよりも観測者に近いところにある。また、Eの視線速度(6.24147 km/s)はD(6.1602 km/s)よりも大きい。
- (3) このEも含め、5個の速度成分の視線上での並び順は、観測者から遠い方からABCDEとなる。これ以外の並び順では、観測されるスペクトルを再現することはできない。

このような特徴をもつ速度成分Eの正体は、濃密な分子雲を取り巻く比較的希薄な分子ガスであると考えられる。低密度のガスに含まれるCCS分子や $\text{HC}_3\text{N}$ 分子は輝線を放射しないが、吸収には寄与する。

以上の結果は、前節で述べたCCS分子輝線の解析結果を強く支持するものである。ここまでの解析を終えた時点で、私はやっと「これはTMC-1の収縮運動に間違いないぞ!」という確信を得ることができた。

## 4. 分子雲全体も収縮している!

ここで、ふと疑問が湧いた。CCSや $\text{HC}_3\text{N}$ 分子輝線は、分子雲の濃密な領域からしか放射されない。分子雲周辺のガス密度の低い希薄な領域でも、分子雲の収縮は起きているのだろうか。希薄な領域でも放射される分子輝線を使って同様の解析をすれば、分子雲全体の運動を調べることができはるはずである。そのような分子輝線としては、

一酸化炭素 (CO) の同位体分子のうち、炭素  $^{12}\text{C}$  が  $^{13}\text{C}$  に置き換わった  $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$  と、 $^{16}\text{O}$  が  $^{18}\text{O}$  に置き換わった  $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$  が放射する輝線 (110 GHz 帯) が適している。これらの同位体分子は  $^{13}\text{CO}$ 、 $\text{C}^{18}\text{O}$  と呼ばれる。分子雲の主成分は水素分子ガス ( $\text{H}_2$ ) であるが、CCS や  $\text{HC}_3\text{N}$  分子輝線は、水素分子の密度が  $1\text{ cm}^3$  (立方センチメートル) あたり数万個以上の濃密な領域でないとは放射されない。一方、 $^{13}\text{CO}$  や  $\text{C}^{18}\text{O}$  の分子輝線は、 $1\text{ cm}^3$  あたり数百個以上あれば放射されるので、分子雲周辺の希薄な部分を調べるのに適している。

野辺山宇宙電波観測所のホームページには、過去に 45 m 鏡で取得されたデータの一部分が公開されている\*1。幸運なことに、古いデータではあるが TMC-1 の  $^{13}\text{CO}$  や  $\text{C}^{18}\text{O}$  のデータも収録されていたので、早速ダウンロードして解析してみたことにした。

図7(a) に、 $^{13}\text{CO}$  と  $\text{C}^{18}\text{O}$  の分子輝線のスペクトルを示す。 $^{13}\text{CO}$  のスペクトルをよく見ると、上端がつぶれて平らになっているが、矢印 X で示した低速度側の方が矢印 Y で示した高速度側よりやや高くなっている。これは、分子雲の内部が外部より少し高温である収縮中の分子雲で見られる特徴である [7]。また、矢印 Z で示した部分には、不自然な盛り上がりが見られる。これは、おそらく TMC-1 の手前にある重力的につながりのない別の分子雲によるものと思われる。さらに、 $\text{C}^{18}\text{O}$  分子輝線を見ると、上端がデコボコした分布になっている。一酸化炭素分子は、濃密な領域ではダスト粒子に吸着して気相中の量が少なくなるが、光学的に薄い  $\text{C}^{18}\text{O}$  分子輝線にはその効果がよく現れる [8]。

これらの情報をもとに、分子雲のモデルを作ることにした。ただし、前章のような個別の速度成分を仮定するのではなく、密度や温度が連続的に変化するモデルを設定し、観測されるであろう分

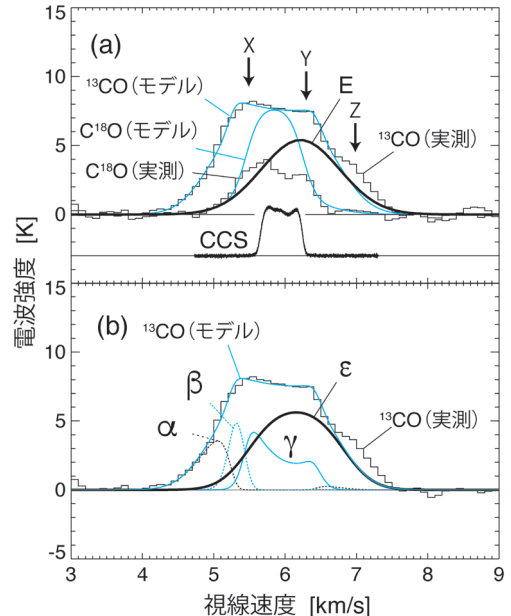


図7 (a)  $^{13}\text{CO}$  および  $\text{C}^{18}\text{O}$  の分子輝線。細い黒線は、実測したスペクトル (野辺山宇宙電波観測所のデータアーカイブより)。青線は、図8のモデルに基づいて計算したスペクトル。太い黒線は、図6の速度成分 E。3つの矢印 (X, Y, Z) については、本文を参照。比較のために、図5の CCS 分子輝線も示す。(b) 図8のモデルに基づいて計算した  $^{13}\text{CO}$  分子輝線のうち、領域  $\alpha$  (細い黒の破線)、 $\beta$  (青の破線)、 $\gamma$  (青の実線)、 $\epsilon$  (太い黒の実線) から放射される成分。

子輝線を計算した。図8に、そのモデルを示す。モデルでは、TMC-1 を細長い円柱状の分子雲とし、ガスの温度、速度分散、密度、および収縮速度の分布を円柱の中心軸に対して対称であるとした。また、分子雲を濃密な内部と希薄な外部の4つの領域 ( $\alpha$ - $\epsilon$ ) に分け、それぞれから放射されるスペクトルも計算した。モデル計算に基づいて得られたスペクトルのうち、実際の観測スペクトルを最もよく再現する  $^{13}\text{CO}$  と  $\text{C}^{18}\text{O}$  の分子輝線を、図7に示す。また、その時のガスの温度、速度分散、密度、および収縮速度の分布を、図8の下段に示す。

\*1 野辺山宇宙電波観測所のホームページ <https://www.nro.nao.ac.jp/~nro45mrt/html/results/data.html>

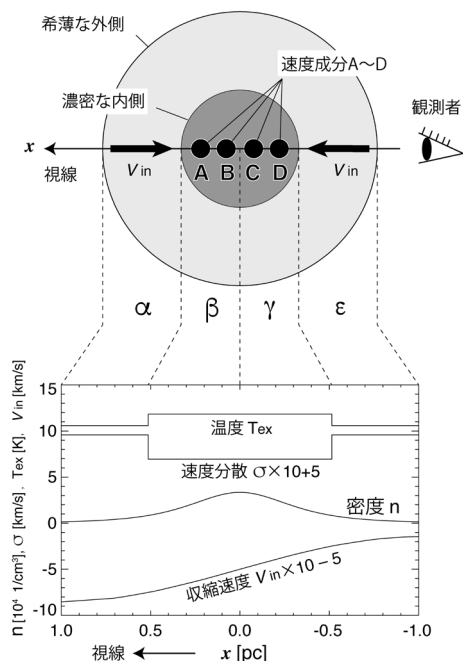


図8 上段は、円柱状の分子雲の断面図。図3-6の速度成分A-Dは、濃い灰色で示した分子雲の濃密な部分にある。薄い灰色は希薄な分子雲の周辺部で、 $^{13}\text{CO}$ や $\text{C}^{18}\text{O}$ 分子輝線で検出される。視線に沿ったガスの温度 ( $T_{\text{ex}}$ )、速度分散 ( $\sigma$ )、水素分子の密度 ( $n$ )、収縮速度 ( $V_{\text{in}}$ ) を下段の図のように設定した場合に観測されるスペクトルを計算した。また、分子雲の $\alpha$ - $\epsilon$ の4つの部分に分け、それぞれの部分から放射されるスペクトルも計算した。

図7の $^{13}\text{CO}$ のスペクトルについては、図中の矢印Zの盛り上がり以外の部分はよく再現できている。 $\text{C}^{18}\text{O}$ については、ダストへの吸着が起きているであろうスペクトルの中心部分以外の裾野の部分は再現できている。

図7(a)に、 $\text{HC}_3\text{N}$ のメイン輝線の解析でその存在が示唆された速度成分Eを、太い黒の実線で示す。図7(b)には、4つの領域から放射されるスペクトルを個別に示す。面白いことに、速度成分Eは、領域 $\epsilon$ から放射されるスペクトルと非常に似ている。これは、速度成分Eが速度成分Dの手前にある希薄な分子ガスである(図4・図8)、という3.3節での推定を支持する結果である。

以上の解析から、円柱状のTMC-1は中心の軸に向かって全体的に収縮しているということが強く示唆される結果が得られた。

分子雲の収縮運動(速度構造や密度分布)を求められれば、そこからいろいろなことが分かる。詳しい解析結果については、内容が複雑なので紙面の都合があるので割愛するが、例えば、どのくらいの時間で分子雲が成長するのか、またその中でどのくらいの時間で星が誕生するのか、などの予想が立てられる。TMC-1そのものについては、その後の研究で、密度の濃い部分はより細かい複数のフィラメントが集まった構造をしていることも分かった。

以上の結果は2つの学術論文[9, 10]にまとめてあるので、興味のある専門家の方は、是非そちらをご覧ください。

1つ目の論文[9]の題目を決める際、「分子雲の奥行き方向の構造が分かるのは面白い。題目は“スペクトラル・トモグラフィー”がいい」と言ったのは、亀野さんだった。海底の地層や人間の体内を描き出せるトモグラフィー(断層映像法)とは、なるほど、ピンとくるネーミングだった。

## 5. おわりに

ここまで述べた視線方向の速度構造や密度構造の解析が可能になった最大の要因は、とびきり高い周波数分解能をもつPolaris分光計と、高感度を達成できるZ45受信機により、かつてないほど高い精度で $\text{CCS}$ 分子輝線や $\text{HC}_3\text{N}$ 分子輝線のデータを得られたことである。図7(a)に野辺山宇宙電波観測所のデータアーカイブから入手した古い $^{13}\text{CO} \cdot \text{C}^{18}\text{O}$ 分子輝線と、この研究で得られた新しい $\text{CCS}$ 分子輝線を同じスケールで表示したが、新しいデータの方がいかに細部までスペクトルの特徴を捉えているか、一見して分かるであろう。

光学的な厚さの異なる複数の輝線を組み合わせたり、超微細構造を利用するという解析方法そのものは、分子輝線の解析法を勉強すれば誰でも思



い付くであろう。しかし、いくら厳密な解析モデル構築しても、その結果を直接比較できる高精度のデータがなければ、いろいろな仮定が正しいか否かを検証することすらできない。

もう30年の前のことだが、大学院生の頃、「よいサイエンスは、よいデータから」という標語のような教を周囲の先生方から受けたことがある。よい研究をしたければ、まずは質の高いデータを取得するように心がけなさい、という意味だ。それは真に正しい考えである、と改めて実感した。この言葉を、自分の学生たちにも伝えようと思う。

## 謝 辞

研究を一緒に進めてきた共同研究者の皆さんに、感謝いたします。スペクトルの解析作業には、東京学芸大学の平原純一氏と後藤淳実氏も卒業研究の一環として参加しました。観測中は野辺山宇宙電波観測所の職員の皆さんに、大変お世話になりました。観測所の美味しい食事も、忘れられません。その他、観測を実現するために直接的・間接的に貢献していただいた全ての方々に感謝いたします。

## 参 考 文 献

- [1] Shinnaga, H., et al., 1999, in *Star Formation 1999*, ed. Nakamoto, T., (Nobeyama Radio Observatory,

Nagano), 175

- [2] Levin, S. M., et al., 2001, *ApJ*, 555, 850  
 [3] Nakamura, F., et al., 2015, *PASJ*, 67, 117  
 [4] Mizuno, I., et al., 2014, *JAI*, 3, 1450010  
 [5] Nakamura, F., et al., 2019, *PASJ*, 71, 117  
 [6] Yamaki, H., et al., 2012, *PASJ*, 64, 118  
 [7] Zhou, S., 1992, *ApJ*, 394, 204  
 [8] Bergin, E. A., et al., 2002, *ApJ*, 570, L101  
 [9] Dobashi, K., et al., 2018, *ApJ*, 864, 82  
 [10] Dobashi, K., et al., 2019, *ApJ*, 879, 88

## Spectral Tomography of Taurus Molecular Cloud 1

Kazuhito DOBASHI

*Department of Astronomy and Earth Sciences,  
 Tokyo Gakugei University, 4-1-1 Nukuikitamachi,  
 Koganei, Tokyo 184-8501, Japan*

Abstract: We have developed a new method to reveal the line-of-sight structure of molecular clouds based on analyses of the CCS and HC<sub>3</sub>N emission lines at 45 GHz, and applied it to the data observed toward Taurus Molecular Cloud 1. To obtain the data, we utilized the new receiver Z45 and the new spectrometer Polar-iS installed in the Nobeyama 45 m telescope. Results of the analyses show that there are 4 velocity components being located from father to nearer sites to the observer along the line-of-sight in the order of increasing radial velocity, which strongly indicates a collapsing motion of the cloud.