

卒業論文

ALAM アーカイブデータを用いたサブミリ波 連続波及び CO(3 - 2)分子輝線による 原始惑星系円盤の構造解析

2015 年度
(平成 27 年度)

茨城大学理学部理学科科学際理学コース

12s6019t

高原 美汐

論文要旨

星や惑星系は、星間物質を漂う分子雲の中でも高密度な分子雲コアが重力収縮することにより形成される。原始惑星系円盤もその収縮過程により形成され、惑星系の母体であると考えられている。そのため、原始惑星系円盤の構造を解釈することは、惑星系の形成過程を考える上で非常に重要である。TW Hya は原始惑星系円盤をもつ天体の中でも比較的観測例が豊富であり、前主系列星として今日の星形成の研究においても重要な位置を占めている。本研究では ALMA で得られたアーカイブデータをもちいてこの天体のデータ解析を行った。この解析では原始惑星系円盤の構造を考察することを目的としている。本論文では連続波及び CO(3 - 2)分子輝線の解析結果について述べる。

目次

論文要旨.....	2
1. 研究背景.....	4
1.1 原始惑星系円盤	4
1.2 TW Hya.....	5
2. 観測.....	6
2.1 一酸化炭素分子輝線.....	6
2.2 観測機器	6
2.3 観測データ	6
3. 結果.....	7
3.1 連続波.....	7
3.2 CO(3-2)分子輝線.....	8
3.4 物理量の導出.....	11
4. 考察.....	13
6. Appendix.....	14
A 輝度温度への換算.....	14
B 質量の導出.....	15
参考文献.....	18

1. 研究背景

1.1 原始惑星系円盤

星や惑星系は、星間空間を漂う分子雲(水素ガス密度にして 10^2 個 cm^{-3} 以上)の中でも高密度領域である、水素ガス密度 10^4 個 cm^{-3} 程度の分子雲コアが重力収縮することにより形成される。原始惑星系円盤もその収縮過程により形成されると考えられている。星の形成過程において、最初に、中心密度が 10^6 個 cm^{-3} を超えた分子雲コアの領域が重力的に不安定になりガスが収縮し始め、 $0.01M_{\odot}$ 程度の質量をもった原始星ができる。そしてその周辺にあるガスが原始星に降着することによって $1M_{\odot}$ 程度の原始星となる。降着するガスは角運動量を持っているため、星周円盤を形成して降着する。ガス降着は星周円盤の質量が中心星に比べて 10%以下の質量になるまで進み、この段階の星周円盤と呼ばれている円盤はガスとダストから構成されており、そのサイズは 100AU である。図 1.1 に一般的に考えられている原始惑星系円盤の形成過程の概念図を示す。

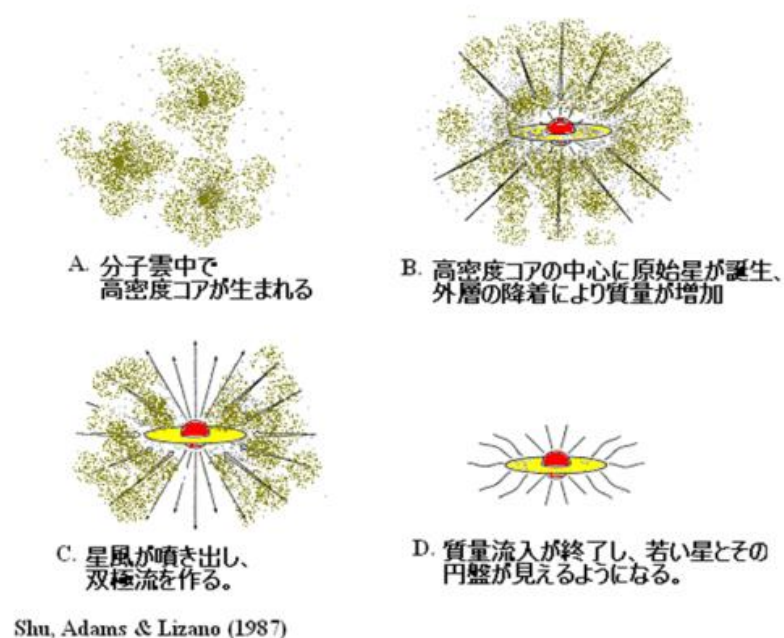


図 1.1 原始惑星系円盤形成過程の概念図

(Shu, Adams & Lizano 1987 より)

1.2 TW Hya

TW Hya は太陽から距離 $54 \pm 6 \text{ pc}$ (Hipparcos; van Leeuwen 2007) に位置する前主系列の古典的 T タウリ型星である。この天体は観測例が豊富であり、赤外線からサブミリ波に至る波長との観測から、恒星質量は $\sim 0.8 M_{\odot}$ (Rucinski & Krautter 1983) であり、円盤質量は $0.05 M_{\odot}$ (Bergin et al. 2013) 以上だと考えられている。TW Hya は年齢が $\sim 10 \text{ Myr}$ (Kastner & et al. 1997; Webb et al. 1999) と、同様の円盤を持つ前主系列星と比較して中心星年齢が進んでいるにもかかわらず、多くの分子スペクトルと強い連続波放射を持った、巨大なガス/ダスト円盤を持っている。この円盤は、半径 4 AU 以上に熱い内部円盤が広がっており、約 200 AU 以上まで大きく冷たいダスト円盤を持っていると考えられている。(Vacca & Sandell 2011) また、比較的近傍にあり傾きが $7^{\circ} \pm 1^{\circ}$ (Qi et al. 2004) でほとんど正面を向いているという点から、円盤構造の調査に適していると言える。図 1.2 はハッブル宇宙望遠鏡で観測された TW Hya の画像である。

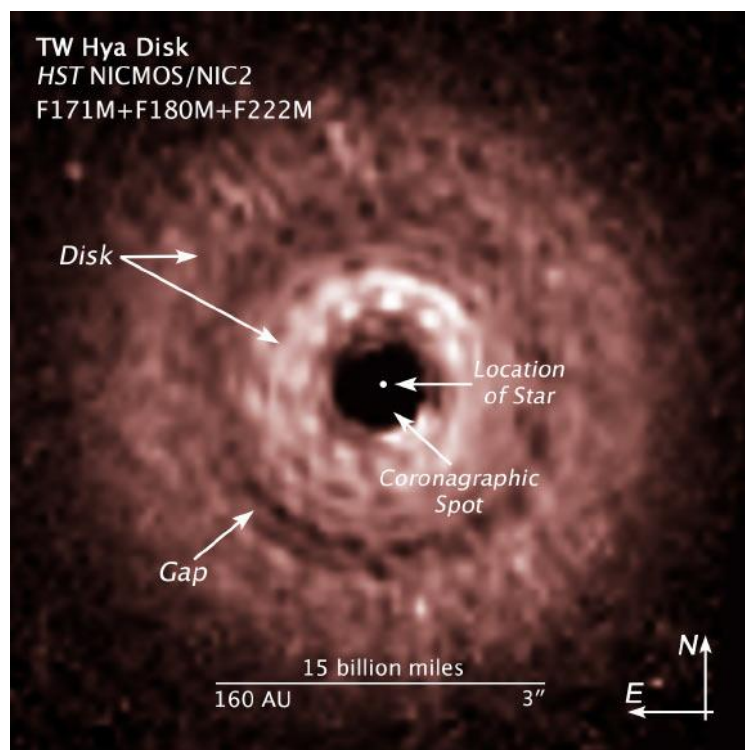


図 1.2 TW Hya の原始惑星系円盤

(NASA/ESA/J. Debes, STScI/H. Jang-Condell, University of Wyoming et al)

2. 観測

2.1 一酸化炭素分子輝線

星形成は分子雲コアの重力収縮によっておこるため、分子雲コアはその過程をたどる上で重要な対象である。星間空間を漂う星間ガスの主成分は水素であるが、分子雲の主成分である水素分子は低温において電磁波を放出することができない。そのため、分子雲の研究には一酸化炭素(CO)などのミリ波・サブミリ波帯の回転遷移による分子輝線の観測がよく利用される。一酸化炭素は水素分子の次に多く存在する分子であり、炭素原子と酸素原子の電気陰性度の違いから電波を放出しやすい構造をしている。

分子輝線の観測からは分子雲内での分子ガスの分布や、温度、密度、質量など分子雲の基本的な物理量を推定することができる。

2.2 観測機器

ALMA 望遠鏡(アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計)は、チリのアタカマ砂漠にあり、口径 12m のアンテナ 50 台 12m アレイと、日本製のアンテナ 16 台からなる望遠鏡システムモリタアレイの合計 66 台を組み合わせた干渉計方式の巨大望遠鏡である。ミリ波・サブミリ波領域では世界最大の基線長を誇り、この望遠鏡を使用することにより、天体を既存の望遠鏡よりはるかに高感度かつ高分解能で観測可能であり、より詳細な円盤構造を描き出すことができる。

2.3 観測データ

本研究では、ALMA アーカイブデータの中から、TW Hya のサブミリ波連続波と CO(3-2)分子輝線のデータを使用した。このデータは 2011 年 4 月 22 日に観測され、観測は 1.5 時間の観測を 3 回続けて計 4.5 時間行われた。達成した分解能は $1.68''$ であり、91AU に相当する。CO(3-2)分子輝線の静止周波数は 345.801GHz である。

3. 結果

3.1 連続波

連続波の強度図を図 3.1 に示す。この強度図は観測して得られた 350.845GHz の連続波マップである。色が赤いほど強度が強く、青くなっていくほど強度が弱いので、図から天体中心に集中した放射を検出出来ていることがわかる。強度値は 1.36[Jy/beam]であった。ノイズレベルは $1\sigma = 1.42 \times 10^{-3}$ [Jy/beam]であり、コントラストは[100,200,300,400,500] σ で引いた。

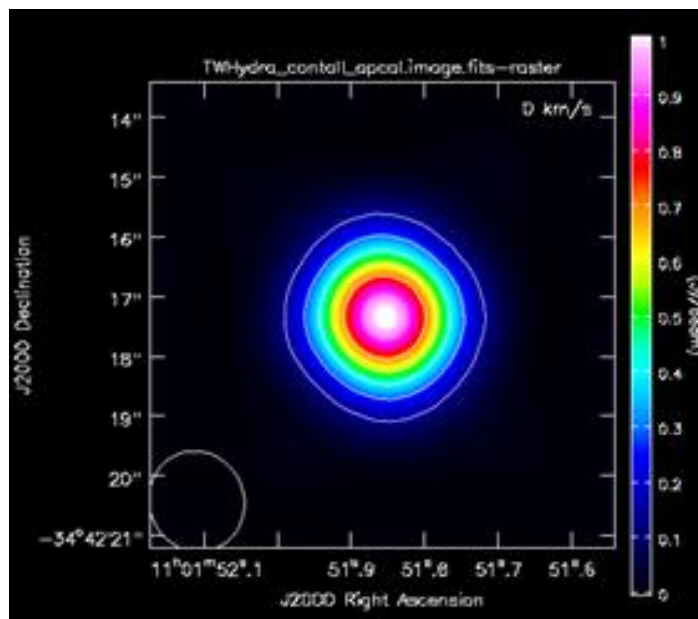


図 3.1 連続波強度図
(ALMA アーカイブデータより)

3.2 CO(3-2)分子輝線

CO(3-2)分子輝線の積分強度図を図 3.2 に示す。分子輝線画像データを速度方向に積分したものであり、分子輝線のチャンネルマップから演算の範囲は radio velocity の 2.0~4.0[km/s]間で指定し図を作成した。ノイズレベルは $1\sigma = 0.033[\text{Jy/beam} \cdot \text{km/s}]$ でありコントアは[30,70,110,150,190] σ で引いた。積分強度値は約 30[Jy/beam $\cdot$ km/s]であった。

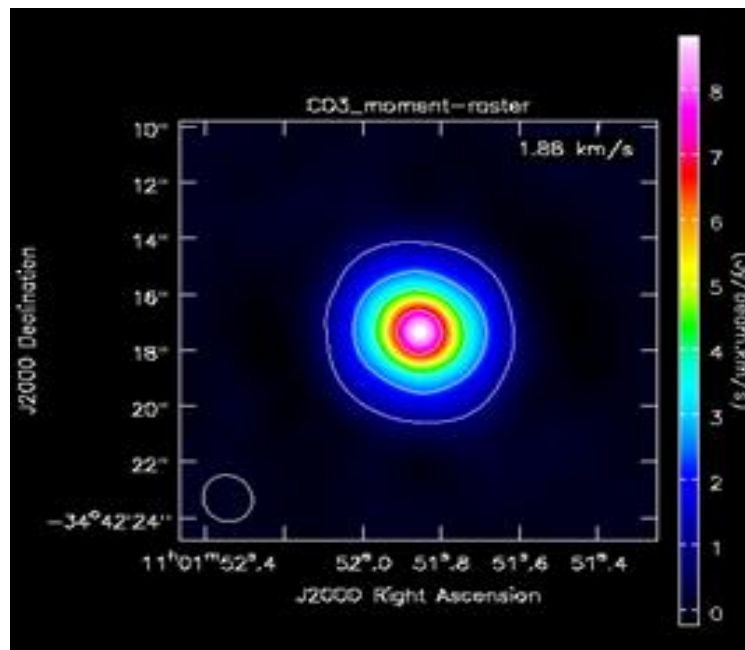


図 3.2 CO(3-2)分子輝線の積分強度図

CO(3-2)分子輝線の速度場を図 3.3 に示す。図 3.2 と同様に、演算を行う範囲は 2.0～4.0[km/s]で指定し、クリッピングの範囲は 0.1～9999Jy/beam で指定し図を作成した。図より速度勾配が見て取れ、青い方が手前、赤い方が奥に向かう成分とした回転構造を示していることがわかる。

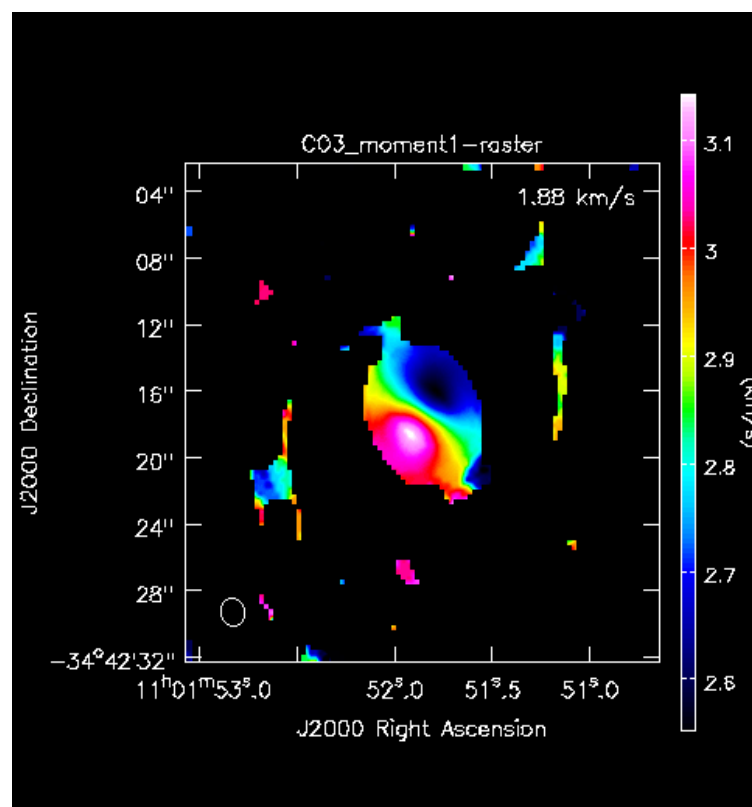


図 3.3 CO(3-2)分子輝線の速度場図

図 3.4 は円盤を長軸方向に切った位置速度(P-V)図にケプラー回転のグラフを重ねたものである。ケプラー回転は以下の式でプロットした。

$$v = \sqrt{-\frac{GM}{54 \times AU \times r}} \times \sin 7^\circ + 2.86$$

ここで、 G ：万有引力定数、 M ：太陽質量、 AU ：1 天文単位であり、 $\sin 7^\circ$ は傾き、2.86 は Systemic Velocity である。これより、TWHya の回転側がケプラー回転で良く再現できると言える。

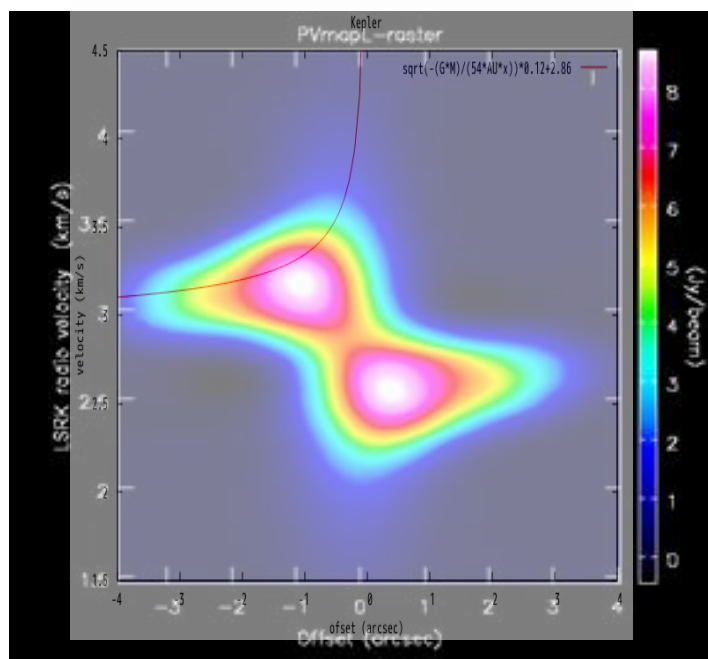


図 3.4 P-V 図とケプラー回転のグラフの重ね合わせ

3.4 物理量の導出

得られた連続波の強度より円盤質量を導出した。また、CO(3-2)分子輝線で得られた強度を輝度温度に換算した値と、積分強度値より質量を導出した。表 1、表 2 には導出に用いた値も合わせてまとめた。

円盤の質量は式(1)

$$M = \frac{F_\nu D^2}{\kappa_\nu B_\nu(T)} \quad (1)$$

で近似される。ここで F : 観測フラックス、 D : 距離、 κ : ダストの吸収係数、 $B_\nu(T)$: ある温度のプランク関数である。ダストの吸収係数は $\kappa_\nu = 3.4 \times 10^{-2} [cm^2/g]$ と仮定し、プランク関数 B_ν に関しては式(2)のレイリージーンズ近似を用いて、温度を 20K と仮定して求めた値を使用した。

$$\begin{aligned} B_\nu(T) &= \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} \\ &\cong \frac{2\nu^2 kT}{c^2} \end{aligned} \quad (2)$$

各物理量は ν : 振動数、 k : ボルツマン定数、 T : 20K、 c : 光速である。これより、連続波の強度値から導出した円盤質量は $M = 1.43 \times 10^{-3} M_\odot$ となった。

CO(3-2)分子輝線の強度値を輝度温度に換算するのは式(3)より導出した。この式の導出過程は Appendix A に記述した。

$$T[K] = 1.222 \times 10^6 \left(\frac{\text{arcsec}}{\theta_{maj}} \right) \left(\frac{\text{arcsec}}{\theta_{min}} \right) \left(\frac{1}{\nu^2} \right) F_\nu \quad (3)$$

各物理量は $\theta_{maj}[\text{arcsec}]$: 長軸半値幅、 $\theta_{min}[\text{arcsec}]$: 短軸半値幅、 ν : 振動数、 F_ν : 観測フラックスである。観測フラックス F_ν は、CO(3-2)分子輝線のチャンネルマップの中で一番強度が強い値を使用した。これより、CO(3-2)分子輝線の強度値を輝度温度に換算すると、 $T=34K$ となった。

また、式(4)を用いて CO(3-2)分子輝線の積分強度値から質量を導出した。この式の導出過程は Appendix B に記述した。

$$\begin{aligned} M_{H_2} &= \frac{\mu_{H_2} m_H}{X_{mol}} \frac{3c^2}{16\pi^3 \nu^3} \frac{kT_{ex}}{hB} \frac{1}{J+1} \frac{1}{\mu^2} \exp\left(\frac{hB(J+1)(J+2)}{kT_{ex}}\right) \\ &\quad \times (d \times 1.496 \times 10^{13})^2 \iint I_\nu d\nu d\Omega \end{aligned} \quad (4)$$

各物理量は μ_{H_2} : 系の分子ガスの平均分子量、 m_H : 水素原子の質量、 X_{mol} : 水素分子に対する

分子存在量、 h : プランク定数、 B : 回転定数、 J : 回転量子数、 μ : ダイポールモーメント、 d : 天体からの距離、 $\iint I_\nu d\nu d\Omega$: 積分強度値である。これより、CO(3-2)分子輝線の積分強度値から導出した質量は $3.08 \times 10^{-5} M_\odot$ となった。

表 1 円盤質量と輝度温度換算に用いた値

	連続波		CO(3-2)分子輝線
F_ν [Jy/beam]	1.36	F [Jy/beam]	8.65
D [pc]	54	θ_{maj} [arcsec]	1.68
B [erg/cm ²]	7.3×10^{-13}	θ_{min} [arcsec]	1.53
ν [GHz]	350.845	ν [GHz]	345.801
k [J/K]	1.38×10^{-23}		
c [m/s]	3.0×10^8		

表 2 質量導出に用いた値

μ_{H_2}	2.34	T_{ex} [K]	20
m_H [g]	1.6733×10^{-24}	h [erg/s]	6.63×10^{-27}
X_{mol}	6.0×10^{-5}	B [Hz]	5.7×10^{10}
c [cm/s]	3.0×10^{10}	J	2
π	3.14	$\mu[g^{\frac{1}{2}}cm^{\frac{5}{2}}s^{-1}]$	0.122×10^{-18}
ν [GHz]	345.801	d [pc]	54
k [J/K]	1.38×10^{-23}	$\iint I_\nu d\nu d\Omega$ [Jy.km/s]	30

4. 考察

解析結果から、円盤が回転していること、また、ケプラー回転の速度と良く一致していることが分かった。物理量の導出において、連続波強度値から導出した円盤質量について、TW Hya の円盤質量は約 $5.0 \times 10^{-2} M_{\odot}$ と考えられているので、およそ正しい値を導出できた。しかし、CO(3-2)強度値から導出した円盤質量とは大きく異なっており、これは仮定が成り立っていないなどの原因が考えられる。

6. Appendix

A 輝度温度への換算

まず、ビームの立体角を求める。クリーンビームは最大値が 1 のガウス関数で、FWHM(半値幅)を長軸と短軸でそれぞれ θ_{maj} , θ_{min} とする。ガウス関数の標準偏差 σ_{maj} , σ_{min} は

$$\theta_{maj} = 2\sqrt{2\ln 2}\sigma_{maj} \quad (\text{A.1})$$

$$\theta_{min} = 2\sqrt{2\ln 2}\sigma_{min} \quad (\text{A.2})$$

という関係なので、ビーム立体角は

$$\Omega_{beam} = 2\pi\sigma_{maj}\sigma_{min} = \frac{\pi}{4\ln 2}\theta_{maj}\theta_{min} \quad (\text{A.3})$$

となる。

ビーム立体角の単位は sr で FWHM の単位は rad である。1rad=180×3600/π arcsec という関係を用いて立体角を sr、FWHM を arcsec で記述すると、(A.4)(A.5)式が得られる。

$$\left(\frac{\Omega_{beam}}{sr}\right) = 2.66326 \times 10^{-11} \theta_{maj} \theta_{min} \quad (\text{A.4})$$

$$\left(\frac{I_\nu}{\text{Jy sr}^{-1}}\right) = 3.75479 \times 10^{10} \left(\frac{srcsec}{\theta_{maj}}\right) \left(\frac{arcsec}{\theta_{min}}\right) F_\nu \quad (\text{A.5})$$

周波数 ν における強度 I_ν と輝度温度 T_B の関係は式(A.6)で定義される。

$$T_B \equiv \frac{\lambda^2}{2k} I_\nu \quad (\text{A.6})$$

ここに式(A.5)を代入し、周波数を GHz 単位に、フラックス密度を Jy 単位に調整すると Jy/beam の単位を輝度温度 K に換算する(A.7)式を得ることができる。

$$T[\text{K}] = 1.222 \times 10^6 \left(\frac{arcsec}{\theta_{maj}}\right) \left(\frac{arcsec}{\theta_{min}}\right) \left(\frac{1}{\nu^2}\right) F_\nu \quad (\text{A.7})$$

B 質量の導出

直線分子での $\Delta J=1$ の回転遷移を考える。分子の回転エネルギーは以下のようになる。

$$E_J = hBJ(J+1) \quad (B.1)$$

ここで、 J :回転量子数、 B :分子の回転定数、 h :プランク定数である。次に局所熱力学平衡(LTE)を仮定する。全部で n 個の分子があるとする。LTE の仮定の下では、 J レベルにある分子の数 n_J は一つの温度 T_{ex} を用いて以下のように記述できる。

$$n_J = n g_J \frac{1}{Z} \exp\left(-\frac{hBJ(J+1)}{kT_{ex}}\right) \quad (B.2)$$

$$g_J = 2J + 1 \quad (B.3)$$

ここで、 k :ボルツマン定数、 g_J :レベル J にある分子の多重度である。 Z は分配関数であり以下のようになる。

$$Z = \sum_{J=0}^{\infty} g_J \exp\left(-\frac{E_J}{kT_{ex}}\right) = \sum_{J=0}^{\infty} (2J+1) \exp\left(-\frac{hBJ(J+1)}{kT_{ex}}\right) \quad (B.4)$$

$hB/kT_{ex} \ll 1$ のときオイラーマクローリン公式より

$$Z \sim \frac{kT_{ex}}{hB} \quad (B.5)$$

よって(B.2)式は以下のよう近似できる。

$$n_J = n g_J \frac{hB}{kT_{ex}} \exp\left(-\frac{hBJ(J+1)}{kT_{ex}}\right) \quad (B.6)$$

分子の放射の源泉関数が S_ν だとすると、観測で得られる輝度は

$$I_\nu = S_\nu (1 - e^{-\tau_\nu}) \quad (B.7)$$

である。 τ_ν は周波数 ν における光学的厚みである。

今、プロファイル関数 $f(\nu)$ を導入し輝度の周波数依存性を記述する。

$$\int f(\nu) d\nu = 1 \quad (B.8)$$

を満たす。これを用いると

$$I_\nu = S_\nu (1 - e^{-\tau_\nu}) f(\nu) \quad (B.9)$$

また、 ϵ_ν :放射係数、 κ_ν :吸収係数とすると、 S_ν は ϵ_ν/κ_ν なので以下のようになる。

$$I_\nu = \frac{\epsilon_\nu}{\kappa_\nu} (1 - e^{-\tau_\nu}) f(\nu) \quad (B.10)$$

次に、観測対象の視線方向の距離を L とすると τ_ν は以下ようになる。

$$\tau_\nu = \int_0^L \kappa_\nu dx \approx \kappa_\nu L \quad (\text{B.11})$$

よって、(B.10)式は

$$I_\nu = \varepsilon_\nu L \frac{1 - e^{-\tau_\nu}}{\tau_\nu} f(\nu) \quad (\text{B.12})$$

となる。 ε_ν はアインシュタイン係数 $A_{J+1,J}$ を用いて以下で表せる。

$$\varepsilon_\nu = \frac{1}{4\pi} n_{J+1} A_{J+1,J} h\nu \quad (\text{B.13})$$

よって、(B.12)式は以下ようになる。

$$I_\nu = \frac{h\nu}{4\pi} n_{J+1} A_{J+1,J} L \frac{1 - e^{-\tau_\nu}}{\tau_\nu} f(\nu) \quad (\text{B.14})$$

(B.6)式と(B.14)式より

$$I_\nu = \frac{h\nu}{4\pi} n g_{J+1} \frac{hB}{kT_{ex}} \exp\left(-\frac{hB(J+1)(J+2)}{kT_{ex}}\right) A_{J+1,J} L \frac{1 - e^{-\tau_\nu}}{\tau_\nu} f(\nu) \quad (\text{B.15})$$

となる。ここで $A_{J+1,J}$ は以下のように表せる。

$$A_{J+1,J} = \frac{64\pi^4 \nu^3}{3hc^3} \frac{J+1}{2J+3} \mu^2 \quad (\text{B.16})$$

μ はダイポールモーメントである。また、光学的に薄い場合 ($\tau_\nu \ll 1$)

$$\frac{1 - e^{-\tau_\nu}}{\tau_\nu} \sim 1 \quad (\text{B.17})$$

となるので、(B.15)式は以下ようになる。

$$\begin{aligned} I_\nu &= \frac{h\nu}{4\pi} n L (2J+3) \frac{hB}{kT_{ex}} (J+1) \mu^2 \exp\left(-\frac{hB(J+1)(J+2)}{kT_{ex}}\right) \frac{64\pi^4 \nu^3}{3hc^3} \frac{J+1}{2J+3} \mu^2 f(\nu) \\ &= \frac{64\pi^3 \nu^4}{3c^3} n L \frac{hB}{kT_{ex}} (J+1) \mu^2 \exp\left(-\frac{hB(J+1)(J+2)}{kT_{ex}}\right) f(\nu) \end{aligned} \quad (\text{B.18})$$

ここで、周波数と速度の関係 $\Delta \nu = \frac{\nu}{c} \Delta v$ を用いて、柱密度 $N = nL$ とすると

$$\begin{aligned} I_\nu &= \frac{16\pi^3 \nu^4}{3c^3} N \frac{hB}{kT_{ex}} (J+1) \mu^2 \exp\left(-\frac{hB(J+1)(J+2)}{kT_{ex}}\right) \frac{c}{\nu} f(\nu) \\ &= \frac{16\pi^3 \nu^3}{3c^2} N \frac{hB}{kT_{ex}} (J+1) \mu^2 \exp\left(-\frac{hB(J+1)(J+2)}{kT_{ex}}\right) f(\nu) \end{aligned} \quad (\text{B.19})$$

両辺を ν で積分して N について変形すると N は以下ようになる。

$$N = \frac{3c^2}{16\pi^3 \nu^3} \frac{kT_{ex}}{hB} \frac{1}{J+1} \frac{1}{\mu^2} \exp\left(\frac{hB(J+1)(J+2)}{kT_{ex}}\right) \frac{1}{\int f(\nu) d\nu} \int I_\nu d\nu \quad (\text{B.20})$$

N は分子の柱密度なので、水素分子の柱密度にする。水素分子に対する観測分子の存在量を X_{mol} とすると

$$N_{H_2} = \frac{1}{X_{mol}} N \quad (B.21)$$

系の分子ガスの平均分子量 μ_{H_2} は $\mu_{H_2} = 2.34$ ほどになる。これから N_{H_2} を質量柱密度にすると以下ようになる。

$$N_{H_2} = \mu_{H_2} \times m_H \times \frac{1}{X_{mol}} N \quad (B.22)$$

ここで、 m_H は水素原子の質量であり $m_H = 1.6733 \times 10^{-24} [\text{g}]$ である。式(B.22)において両辺を空間積分すると

$$\text{左辺} = \int_{Source} N_{H_2} d\Omega = \text{天体の総質量}$$

$$\text{右辺} = \mu_{H_2} \times m_H \times \frac{1}{X_{mol}} \int_{Source} N d\Omega$$

$$\text{ここで} \int_{Source} N d\Omega = FACTOR \times \iint I_\nu dv d\Omega \text{ である。}$$

また、観測データ FITS で測る際は arcsec^2 なので、天体までの距離を d として、補正項として $(d \times 1.496 \times 10^{13})^2$ をかける必要がある。よって以下ようになる。

$$\int_{Source} N d\Omega \text{ arcsec}^2 = FACTOR \times (d \times 1.496 \times 10^{13})^2 \iint I_\nu dv d\Omega \quad (B.23)$$

以上をまとめると質量は以下の式で導出される。

$$M_{H_2} = \frac{\mu_{H_2} m_H}{X_{mol}} \frac{3c^2}{16\pi^3 \nu^3} \frac{kT_{ex}}{hB} \frac{1}{J+1} \frac{1}{\mu^2} \exp\left(\frac{hB(J+1)(J+2)}{kT_{ex}}\right) \times (d \times 1.496 \times 10^{13})^2 \iint I_\nu dv d\Omega \quad (B.24)$$

参考文献

- シリーズ現代の天文学 6 星間物質と星形成 日本評論社 福井康雄、犬塚修一郎、大西利和、中井真正、舞原俊憲、水野亮
- シリーズ現代の天文学 16 宇宙の観測Ⅱ－電波天文学 日本経論社 中井直正、坪井昌人、福井康雄
- Andrews, S.M., Wilner, D.J., Hughes, A.M., et al. 2012, Apj, 744, 162
- Bergin, E. A., Cleeves, L. I., Gorti, U., et al. 2013, Natur, 493, 644
- Vacca & Sandell 2011
- Qi, C., Ho, P. T. P., Wolner, D. J., et al. 2004, ApJL, 606, L11
- TW HydraBand7 – CASA Guides
(<https://casaguides.nrao.edu/index.php?title=TWHydraBand7>)