

放射型ミリ波・サブミリ波分光器SUMIREを用いた300 GHz帯における CH₃OHのライン強度と遷移周波数の精密測定

(理化学研究所^a, 電気通信大学^b, 芝浦工業大学^c, Jet Propulsion Laboratory^d)

○小山 貴裕^a・酒井 剛^b・渡邊 祥正^{a,c}・玉内 朱美^a・仲谷 峻平^{a,d}・坂井 南美^a

Precise measurement of line intensities and frequencies of CH₃OH in 300 GHz band by using emission-type millimeter and submillimeter-wave spectrometer SUMIRE (RIKEN^a, UEC^b, SIT^c, JPL^d) Takahiro Oyama^a, Takeshi Sakai^b, Yoshimasa Watanabe^{a,c}, Akemi Tamanai^a, Riouhei Nakatani^{a,d}, Nami Sakai^a

【Abstract】 Thanks to the recent development of the radio observation technique, the spectral lines of various interstellar molecules can be observed with high sensitivity. As a result, a huge number of molecular lines are detected including unidentified lines, it makes the astronomical analysis more complex. Those lines could originate from minor isotopologues and/or low-lying vibrational states of major interstellar molecules such as methanol (CH₃OH). However, the laboratory-based spectroscopic measurements and theoretical estimations of the intensities as well as frequencies are insufficient for those molecules. To overcome this problem, it is crucial to carry out accurate measurements of the line intensities and frequencies for those molecules in laboratory. In this study, the line frequency and intensities of CH₃OH have been measured in the frequency from 294 GHz to 364 GHz, which corresponds to ALMA Band 7, by newly installed cryogenic receiver on the SUMIRE (Spectrometer Using superconductor MIXer REceiver: Watanabe et al. 2021, PASJ, 73, 372). As reported in the previous measurement in 200 GHz band, there is a discrepancy between the measured and calculated frequencies as J increased. Significant discrepancy in intensities is also found between intensities measured by SUMIRE and those listed in the JPL database.

【序】 ALMA に代表される電波望遠鏡の発展に伴う電波天文観測の高精度化の結果、幅広い周波数領域において様々な星間分子の輝線が高感度に観測されるようになった。それにともない膨大な数の未帰属線が検出されるようになり、星間化学研究を難しくしている。これら未帰属線は、豊富に存在する既知の星間分子の希少同位体種もしくは振動励起状態由来だと考えられるが、それら分子の実験室分光測定および遷移周波数や線強度の理論予想は現代の電波天文学の観測精度に対して十分とは言えない。この問題を解決するには、実験室でのこれら分子の遷移周波数と線強度の精密測定が不可欠である。メタノール (CH₃OH) は星間空間に普遍的に存在する分子であり、星間有機分子の親分子として重要な役割を果たす[1]。我々は先行研究として、メタノールおよびその重水素同位体について、ALMA Band 6 (216-264 GHz) 周波数領域における回転遷移の周波数と線強度を実験室分光で精密決定した。その結果、測定値と天文学データベースにある理論予想値との間に回転量子数 J に依存した体系的な誤差があることが明らかになった[2-4]。このような理論予想値との違いは他の ALMA Band でも生じている可能性が高い。そこで本研究では、新たに開発した ALMA Band 7 (294-364 GHz) 受信器を用いて、メタノールの遷移周波数と絶対強度 $S\mu^2$ の精密測定を行った。

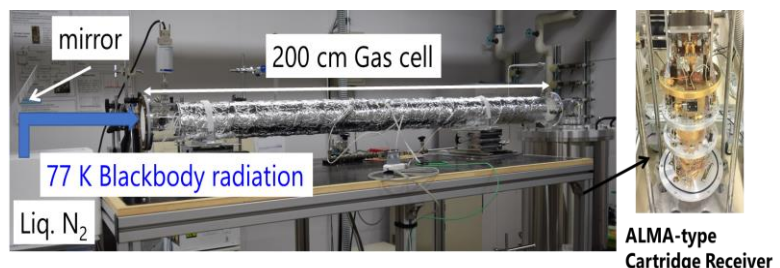


Fig. 1. Experimental apparatus.

【実験】 回転遷移の測定は、当研究室で開発したミリ波・サブミリ波分光器 (Spectrometer Using superconductor Mixer Receiver: SUMIRE) を用いて行った[2] (Fig. 1). CH_3OH (純度 99.9%) は、圧力 5.0×10^{-1} Pa, 温度 297.1 K でポロシリケート製のガスセル (直径 10 cm, 長さ 200 cm) に導入した. 測定試料からの熱放射を液体窒素 (77 K) の黒体放射を背景にして、サイドバンド分離型の ALMA タイプカートリッジ受信機で検出した. 検出されたシグナルは相関型分光器で分光した. 新たに開発した受信機の測定可能周波数は 294 GHz から 364 GHz であり、これは ALMA 望遠鏡の Band 7 に対応する. 本実験装置の周波数分解能は 88.5 kHz である.

【結果・考察】 300 GHz の周波数帯において、428 本のラインを測定し、その内 254 本について、ケルン大学分子分光データベース (CDMS) の周波数データを元に、メタノールのラインで帰属が確認できた. 残りの 174 本については、 $^{13}\text{CH}_3\text{OH}$, $\text{CH}_3^{18}\text{OH}$ およびねじれ振動の励起状態由来の遷移だと考えられる. SUMIRE で測定したスペクトルと CDMS の計算値から再現したスペクトルを比較したものを Fig. 2 に示す. 測定した線強度は、CDMS の値と概ね 10% の範囲内で一致しが、JPL データベースの値とは大きく異なっていた. 一方、測定した周波数と計算値を比較してみると、低い回転準位由来の遷移ではよい一致を示したが、高い準位では体系的な誤差が見られた (Fig. 3).

この原因は、データベースにおいて低い J の周波数の再現度を優先するために、高い J の遷移を分光解析から除いているためと考えられる. これまでの電波天文学では星間空間の極低温な物理環境 (~ 10 K) に起因して比較的エネルギーが低い準位の遷移が主に観測されてきた. しかし、電波天文観測の空間分解能が飛躍的に向上したことで、原始星周りの温度が高い領域 (> 300 K) の研究も行われるようになった. 原始惑星系円盤の化学組成の探求が、太陽系の化学的起源解明に重要だからである. 特に 200 GHz 帯, 300 GHz 帯は最もよく観測に用いられており、ALMA 観測において重要な周波数帯である. そのような研究において、データベース上にある周波数や強度の実測値との差異は、分子の存在量や温度の議論に大きな影響を与える. 他方、メタノールのような内部回転を持つ Floppy な分子について、周波数と強度の正確な理論予想は難しいのが現状である. 本研究は、実験室での直接測定に基づく遷移周波数と線強度 $S\mu^2$ の決定が、分子分光および電波天文学に不可欠であることを示すものである.

【参考文献】

[1] Garrod & Herbst, 2006, A&A, 457, 927. [2] Watanabe et al., 2021, PASJ, 73, 372. [3] Ohno et al., 2022, ApJ, 932, 101. [4] Oyama et al., 2023, ApJ, 957, 4.

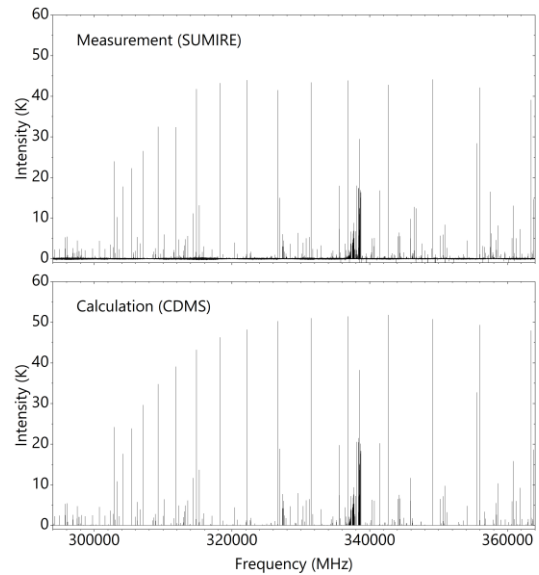


Fig. 2. Comparison of measured and predicted spectra of CH_3OH .

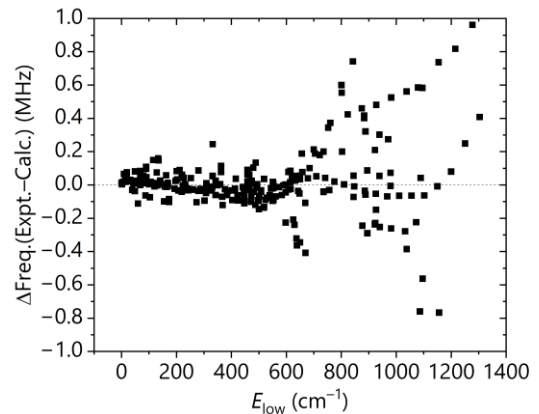


Fig. 3. Residual between measured and calculated frequencies.