

令和元年6月19日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05293

研究課題名(和文)メタノールメーザーのゼーマン効果分光実験に基づく星間磁場の精密測定

研究課題名(英文)Accurate measurement of Zeeman effect of methanol for deduction of interstellar magnetic field

研究代表者

小林 かおり (Kobayashi, Kaori)

富山大学・大学院理工学研究部(理学)・教授

研究者番号：80397166

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：星形成領域における偏波観測によりメタノールメーザーの回転遷移の分裂が観測されている。この原因として星間磁場によるゼーマン効果が考えられる。ゼーマン効果のパラメーターであるg因子が既存の研究では不十分であるため、強磁場下のマイクロ波分光によって実験室標準として取得することができた。実験結果の解析には内部回転の効果を取り込んだ。実験室分光の結果から相対的に分裂幅が大きいと期待される108 GHzのメタノールメーザーサーベイを野辺山45m電波望遠鏡を用いて行い、2天体を108 GHzメーザーの候補と明らかにすることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

星間空間で観測されるメタノールのメーザーによる回転遷移に分裂が観測されている。この分裂の原因として星間空間の磁場が考えられる。分裂幅から磁場を求めるに当たって、実験室でかけた磁場に対する分裂の幅を測定し、標準データとして決定しておくことが不可欠である。本研究では、この実験室標準データを得るために、強磁場下でマイクロ波分光によってメタノール分子の約30の回転遷移の分裂を観測した。同時にこれらのデータを適用できると思われる天体を検討するために野辺山45m電波望遠鏡を用いたサーベイ観測を行った。

研究成果の概要(英文)：Splittings of strong maser emissions in the star-forming regions have been observed. These splittings may be explained by the Zeeman effect due to the interstellar magnetic field. The laboratory data of the Zeeman effect to the methanol rotational transitions are essential to determine the interstellar magnetic field. We carried out a measurement by using microwave spectroscopy. Internal rotation was also included in our analysis. Based on the results, we carried out a 108 GHz methanol maser survey by using Nobeyama 45 m radio telescope. Two sources were found to be possible candidates.

研究分野：分子分光学

キーワード：ゼーマン効果 メーザー メタノール マイクロ波分光 宇宙磁場 星間現象

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

星間磁場は重力と並んで星形成過程を支配する重要な力であり、生まれる星や惑星の性質、進化にどのような影響を与えるかを理解する上で不可欠な要素である。このような星間磁場の計測では、星間分子雲中の赤外線源（原始星）や衝撃波領域から放射されるメタノールメーザーによる分裂がゼーマン効果によるものであれば有力な指標となる。このメタノールメーザーの分裂は既に電波望遠鏡により観測されている [1]。磁場強度 B の下では、ゼーマン効果の大きさは $\Delta E = g \mu_M B$ と表わされる (μ_M は磁気モーメント)。ゼーマン分裂 ΔE から磁場強度 B を得るには、 g 因子と呼ばれる比例定数の値が必要となるが、メタノール分子のゼーマン効果は 25 GHz 帯の遷移しか実験室での測定例がなく [2]、過去の研究ではこの g 因子が他の遷移に対しても仮定されている。しかし、 g 因子は遷移毎に異なるため、この仮定は正しくない。そのため、いかに電波天文観測の質を向上しても、得られた磁場の値には 1 桁以上の大きな系統誤差が含まれている。このことは、星形成分野をはじめとした理論天文学で、磁場を含む精密なモデル構築の大きな不確定要素となっている。

2. 研究の目的

近年、星間分子雲中の星形成領域から放射されるメタノールメーザーの分裂が電波望遠鏡で観測されている。この要因として、星間磁場によるゼーマン分裂が有力な候補と考えられる。分裂幅を決める磁場強度に対するゼーマン効果の大きさ (g 因子) は特定の値が仮定されている。しかし g 因子は遷移ごとに異なるため、この仮定は誤りであり、これまでの星間磁場測定には大きな不定性が含まれている。本研究では、重力と並んで星形成過程を制御する重要な要素である星間磁場計測の不定性をこれまでの 1 桁という大きさから誤差数 10% まで高精度化し、磁場を含む星形成機構の定量的理解に貢献することを最終目的とする。そのために、実験室分光による g 因子の基礎データ取得から電波望遠鏡によるゼーマン効果観測とその解釈まで、一貫した研究手法を世界に先駆けて確立することを目指す。

3. 研究の方法

本研究は、メタノール分子の磁場下における周波数変調型マイクロ波分光計を用いた実験による g -因子の決定、電波望遠鏡によるメタノールメーザー観測に基づいた星間磁場強度の決定というステップを進める。分光実験では、既存のマイクロ波分光装置をゼーマン効果測定に特化した吸収セルに置き換え、これにネオジム永久磁石により作成した約 0.7 T (7,000 G) 程度の一様磁場を印加することでメタノール分子の基本的な回転遷移のゼーマン効果精密測定を行った (図 1)。

この実験室分光に基づき 108 GHz ($E_{0_0-1_1}$) の遷移が相対的に磁場に対する分裂幅が大きいことから今後の観測対象候補の一つとして考えられた。しかしながら 108 GHz のメタノールメーザーは少ないため、観測天体の候補を求めて野辺山 45 m 電波望遠鏡を用いたサーベイ観測を 36 天体について行った。比較のため、95, 96, 107 GHz の遷移も測定した。

4. 研究成果

ネオジム磁石による約 0.7 T の磁場をかけることによって、分子の回転遷移をゼーマン効果による分裂させることができた。約 30 本の遷移についてこの分裂を観測することができた。分裂幅は様々であるが、おおよそ 1-7 MHz であった。これらの遷移から g 因子を求めるための解析には通常の回転だけでなくメタノール内のメチル基のねじれ振動 (内部回転) の寄与も取り入れた。図 1 に示されている 2 つの遷移は同じ回転遷移でねじれ振動の基底状態と第 1 励起状態である。ねじれ振動の励起によって明らかに分裂幅が増加していることが明白である。解析の進行につれてシュタルク効果の寄与も考慮する必要があることも判明した。このような解析の結果我々の得た g 因子は量子化学計算の結果 [3] とも一致している。さらにメタノールの同位体 (CH_3OD) での実験も続けている。

108 GHz のメタノールメーザーサーベイを野辺山 45 m 電波望遠鏡によって観測した観測データについても解析が終了した。108 GHz メタノールメーザーは従来、限られた数の天体でしか見つかっていないが、線幅やピークのシフト等の検討から本観測では 2 天体が 108 GHz メーザーの候補と明らかにすることができた。図 2 に 108 GHz のメタノールメーザー候補となった天体の観測を示す。熱的な成分に加えて、線幅の狭いメーザーが見えている。

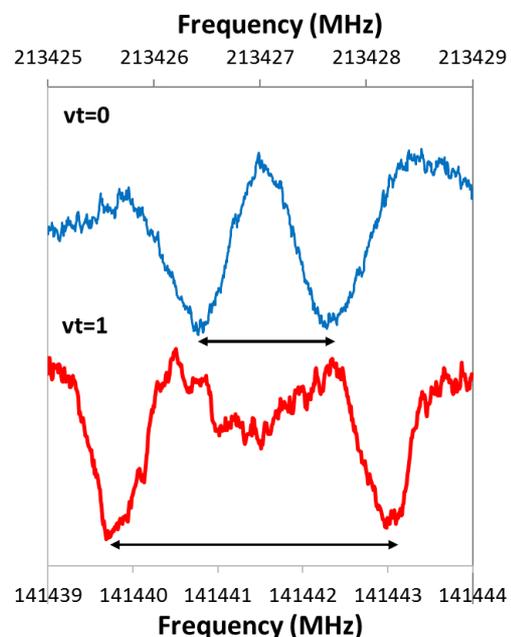


図 1 約 0.7 T の磁場を印加した際の回転遷移の分裂。上下はそれぞれ振動基底状態 ($E_{1_1-0_0}$, $v_t = 0$, $E_{1_1-0_0}$) および振動第 1 励起状態 ($v_t = 1$, $E_{0_0-1_1}$) の遷移である。

実験室分光と野辺山 45 m 電波望遠鏡データの解析から偏波観測が可能となった電波望遠鏡 ALMA による観測提案を検討したが、現在の偏波観測では十分な感度がないため、今後、観測を行えるよう、108 GHz、あるいはその他の周波数でのメーザーによる観測可能性を検討している。また、ALMA 以外の低周波数帯での観測については、米国電波天文台 NRAO の干渉計 VLA に提出した観測提案が採択されており、6.7 GHz メタノールメーザーとの比較も可能になると期待される。

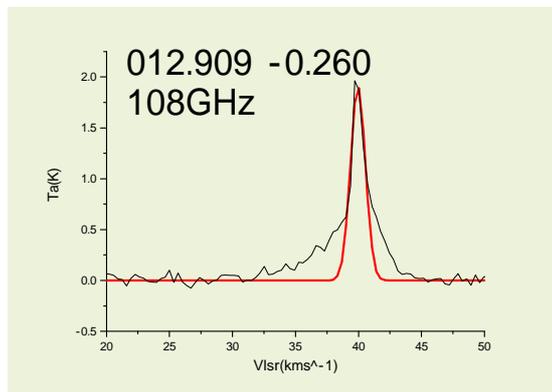


図 2 野辺山 45 メートル電波望遠鏡によって観測された 012.909-02.60 における 108 Hz メーザー

<引用文献>

- Vlemmings, W. H. T., Proc. IAUS 287, 31 (2012).
 Jen, C. K., Phys. Rev., 81, 197 (1951).
 Lankhaar, B., Vlemmings, W., Surcis, G. et al. Nature Astronomy, 2, 145, (2018)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

- Kim, M. K., Hirota, T., Machida, M. N., Matsushita, Y., Motogi, K., Matsumoto, N., Burns, R.A., Honma, M., Extremely High Excitation SiO Lines in Disk-Outflow System in Orion Source I, The Astrophysical Journal, 64..1-7, (2019) DOI: 10.3847/1538-4357/aafb6b 査読あり
Hirota, T., RECENT PROGRESS IN HIGH-MASS STAR-FORMATION STUDIES WITH ALMA, Publications of the Korean Astronomical Society, 33, 21-30 (2018) DOI : 10.5303/PKAS.2018.33.2.021 査読あり
Hirota, T., Machida, M. N., Matsushita, Y., Motogi, K., Matsumoto, N., Kim, M. K., Burns, R. A., Honma, M., Disk-driven rotating bipolar outflow in Orion Source I, Nature Astronomy, 1, 0146-0146 (2017) DOI:10.1038/s41550-017-0146 査読あり

〔学会発表〕(計 18 件)

- 小林かおり, 星間分子観測のためのマイクロ波分光, 日本物理学会第 74 回年次大会, 2019 年
 高木光司郎, 常川省三, 小林かおり, 廣田朋也, 松島房和, メタノール分子のマイクロ波ゼーマン効果 III, 第 19 回分子分光研究会, 2019
Hirota, T., High-frequency/High-resolution observations of High-mass young stellar objects with ALMA and VLBI, Star formation with ALMA: Evolution from molecular clouds to protostars, 2019
Kobayashi, K., Microwave Spectroscopy of Interstellar Molecules, Weeds and Flowers, Laboratory Astrophysics Workshop 2018, 2018
 福島一晃, 小林かおり, 廣田朋也, 野辺山 45 m 電波望遠鏡による 108 GHz メタノールメーザーのサーベイ, 日本天文学会 2018 年春季年会, 2018 年
 高木光司郎, 常川省三, 小林かおり, 廣田朋也, 松島房和, メタノール分子のマイクロ波ゼーマン効果 II, 第 18 回分子分光研究会, 2018
 Takagi, K., Tsunekawa, S., Kobayashi, K., Hirota, T., Matsushima, F., Microwave Zeeman Effect of Methanol, The 2nd Asian Workshop on Molecular Spectroscopy, 2018
Hirota, T., Future KaVA+TNRT (or extended EAVN) for Star-formation Studies, NARIT-Key Science Workshop: Masers & Molecular Lines in Radio Astronomy, 2018
Hirota, T., High Resolution Observations of Orion Source I, High Mass Star Formation Workshop 2018, 2018
Hirota, T., Recent progress in high-mass star-formation studies, The Cosmic Cycle of Dust and Gas in the Galaxy: From Old to Young Stars, 2018
 高木光司郎, 常川省三, 小林かおり, 廣田朋也, 松島房和, メタノール分子のマイクロ波ゼーマン効果, 第 17 回分子分光研究会, 2017
 Fukushima, K., Kobayashi, K., Hirota, T., Methanol maser survey at 3 mm band with the Nobeyama 45 m radio telescope, NR045m/ASTE Single Dish Science Workshop 2017, 2017

Hirota, T., Machida, M. N., Matsushita, Y., Motogi, K., Matsumoto, N., Kim, M. K., Burns, R. A., Honma, M., ALMA observations of submillimeter H₂O and SiO lines in Orion Source I, IAU Symposium 336, "Astrophysical Masers: Unlocking the Mysteries of the Universe", 2017

Hirota, T., Interstellar and circumstellar maser observations with KaVA, TVN, and beyond, TVN2016: Thai VLBI Network (TVN) Collaborative Workshop, 2016

Hirota, T., KaVA Large Program for Star-Formation, East Asia VLBI Workshop 2016, 2016

福島一晃, 小林かおり, 廣田朋也, 野辺山 45 m 望遠鏡による 108 GHz メタノールメーザーサーベイ, 研究会「宇宙における生命素材物質のルーツ: 天文学と分光学の融合」, 2016

高木光司郎, 常川省三, 小林かおり, 廣田朋也, 松島房和, メタノール分子のマイクロ波ゼーマン効果 II, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016

Fukushima, K., Kobayashi, K., Hirota, T., Methanol maser survey observation with the Nobeyama 45 m telescope, Workshop for Interstellar Matter 2016, 2016

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.sci.u-toyama.ac.jp/phys/4ken/index.html>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：廣田 朋也

ローマ字氏名：HIROTA, Tomoya

所属研究機関名：国立天文台

部局名：水沢 V L B I 観測

職名：助教

研究者番号 (8 桁) : 10325764

研究分担者氏名：高木 光司郎

ローマ字氏名：TAKAGI, Kojiro

所属研究機関名：富山大学

部局名：その他の部局等 (五福キャンパス)

職名：名誉教授

研究者番号 (8 桁) : 60018976

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。