

氏 名 鍵 絵里子

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第264号

学位授与の日付 平成9年3月24日

学位授与の要件 数物科学研究科 天文科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学位論文題目 Microwave and Infrared Spectroscopy
of Interstellar Metal-bearing Molecules

論文審査委員 主査教授 海部 宣男
助教授 中井 直正
助教授 出口 修至
助教授 川口 建太郎
助教授 山本 智(東京大学)

論文内容の要旨

これまでに、主として電波望遠鏡により約100種の星間分子が観測されているが、その殆どは水素・炭素・酸素・窒素(H, C, O, N)からなる分子であり、金属元素を含む分子種はわずか7個(NaCl, NaCN, AlCl, AlF, MgNC, MgCN, KCl)に過ぎない。金属元素の種類では、4つである。星間空間の金属化合物の大部分は星間塵という形態に凍結されていると考えられてきたが、これら金属元素の宇宙存在度と固相へのdepletionを考慮すると、以下の2つの問題が提起される。

- 1) マグネシウム・珪素・鉄(Mg, Si, Fe)の3つの元素の宇宙存在度はほぼ同程度で、C, O, Nに次いで多く存在する。これらは星間塵の構成元素として知られているが、Siの化合物は既に7分子種、Mgは2分子種が星間空間で検出されているのに対し、Feに関してはいくつか(FeS, FeO)探査されたにもかかわらず未だ検出例がない。しかもFeよりも難揮発性であるAlの化合物は検出されている。星での核合成によってできる最重元素である、Feの存在形態はどうなっているのか。
- 2) 星間空間で検出されている7つの含金属分子の存在量は、各々の金属元素の存在量のわずか0.01-0.4%に相当するに過ぎない。とすると、Na, Mg等を含むこれまで探査が行われていない未知の化合物が検出される可能性は、まだ残っているか。

これらの問題を解明していくことは、その存在形態に未知な部分が多く残されている星間塵の形成過程を論じる上で、非常に重要な情報となり得る。さらに、金属を含む星間分子が晩期型星IRC+10216周辺部のみで観測されており、この天体には分子種の帰属がなされていない微弱な分子輝線（未同定線）が電波領域で約200本観測されているという事実からも、新しい金属化合物が検出される可能性は大きい。

これら金属化合物の探査を電波望遠鏡を用いて行う場合、個々の分子固有の分光学的情報は不可欠のものである。しかも、その情報は電波領域での遷移周波数を精度よく予想するのに十分な高分解能データでなくてはならない。しかし、金属化合物は一般に融点が高く実験室での生成が困難であり、またその電子配置から現われるスペクトルパターンが複雑である等の理由から、これらの情報が未だ乏しいのが現状であった。

これらの問題点を克服するべく、本研究では、金属化合物生成用高温セルを開発し、新たに製作した高感度高分解能であるミリ波サブミリ波分光器と組み合わせて、3種の金属(Mg, Fe, Na)の化合物の吸収スペクトルの検出に成功した。とりわけ含金属星間分子として検出される可能性の高いMg化合物(MgO, MgNC)、Fe化合物(FeCO)、Na化合物(NaSH)について吸収セル内で分子を生成、そのマイクロ波及び赤外スペクトルを測定し、さらに分光データに基づいて電波望遠鏡による観測を行い、これら金属化合物の星間空間での気相存在度を検討した。

製作したミリ波サブミリ波分光器の電波源は、ガンダイオード発振器から発振する60-100 GHz帯のマイクロ波を、ショットキーダイオード通倍器を用い3または4通倍することにより得た。ガン発振器の周波数は、シンセサイザの周波数を4通倍した3.2-3.6 GHzのマイクロ波を局部発振器として基準にし、位相を安定化した。シンセサイザの周波数を掃引することで広範囲にわたって迅速な周波数サーベイが可能であり、これはこの分光器の特徴の1つである。変調は、両極性矩形波による周波数変調法を採用した。

検出器は液体ヘリウム冷却InSbホットエレクトロン検出器を用い、その出力をロックインアンプを用いて位相検波し、AD変換器を通してコンピュータに取り込んだ。シンセサイザの周波数掃引が容易なため、微弱なシグナルに対し長時間積算による信号/雑音比の向上が実現できる。システム全体の感度は、硫化カルボニルの同位体種、 $^{18}\text{O}^{12}\text{C}^{34}\text{S}$ のスペクトルを測定し、分子の最小検出密度として 5×10^7 個/cm³を得た。これは、星間分子として重要なラジカルや励起状態にある分子を検出するのに十分な感度であった。Mg化合物(MgO, MgNC)、Na化合物(NaSH)の生成には、各々金属塊(Mg, Na)を加熱して蒸気とする放電結合型高温セルを用いたが、Fe化合物(FeCO)については出発物質に液体Fe(CO)₅を用いたため、高温セルは必要としなかった。

以上の装置を用いて測定したスペクトルを記す。

1. MgNCラジカルの変角振動励起状態における純回転スペクトル
2. 同位体置換種MgN¹³Cラジカルの子波スペクトル
3. MgOの電子励起状態($a^3\Pi_1$)における純回転スペクトル
4. FeCOラジカルの子波子波スペクトル
5. NaSHの子波子波スペクトル

FeCOラジカルはフーリエ変換マイクロ波分光法により初めて8 - 30 GHz帯で検出された。しかし2mm帯の予測遷移周波数に誤差が付随する可能性があった為、本研究ではさらにFeCOの子波子波スペクトルを測定し、精度の良い遷移周波数を予測することができた。またNaSHは実験室分光では本研究が初の検出であり、スペクトルパターンから曲がった構造を持つ非対称コマ分子であることが判明した。

これらの実験室分光の結果に基づき、1, 4, 5について晩期型星IRC+10216周辺部での電波望遠鏡による探査およびスペクトルの検証を行った。MgNCラジカルは非常に低い変角振動 ν_2 (80cm⁻¹ ~ 120K)をもつことが本研究で明らかとなり、星間空間において水素分子との衝突のみによる励起を考えた場合、運動温度が50K以上ならばこの状態が観測されると期待できた。最近IRAM 30m電波望遠鏡により、5 mKと微弱ではあるが振動励起MgNCの検出が報告された。観測されたスペクトル線の強度は、励起が水素分子との衝突によることを示唆している。FeCOの探査は、IRAM 30m電波望遠鏡を用いて行った。雑音温度をrmsで4 mKまでおさえる積分を行ったが、FeCOラジカルの子波は検出できず、初の鉄化合物の発見には至らなかった。NaSHの子波の検証には、野辺山45m電波望遠鏡による83 GHz領域の既存のデータを用いたが、雑音レベルが充分低くないため検出されていない。今後、より雑音の少ないデータを取得することが望まれる。

本論文では、新しい星間分子の探査を実現する目的で、様々な金属分子を実験室で生成し、マイクロ波分光法によりそのスペクトル測定に成功した。この方法は、今後さらなる金属分子に応用が可能であり、未だ探査されていない星間分子候補の検出に貢献が期待される。また本研究でのFeCOラジカルで、これまで探査されたFe化合物は6つに上るが、依然としてFeを含む星間分子は検出できなかった。星周辺部ではFe元素は質量放出の過程で固相にとりこまれ、殆ど気相に存在しないと考えられる。

Microwave and Infrared Spectroscopy of Interstellar Metal-Bearing Molecules (金属を含む星間分子のマイクロ波および赤外線分光) と題する出願者の博士論文は、星間・星周空間での観測や実験室での情報がともにあまり得られていない含金属分子種に着目し、Mg、Fe、Naを含む2原子ないし3原子分子の実験室における測定・検出を行ったものである。出願者はこの研究で、サブミリ波における不安定なラジカルの測定が可能な高感度分光システムを製作し、また世界で初めてNaSH分子の実験室での分光測定に成功した。

論文は、1. 導入、2. 実験装置の製作、3. MgNCラジカルのマイクロ波分光、4. MgO分子の低エネルギー電子励起状態の分光的研究、5. FeCOラジカルのマイクロ波分光、6. NaSH分子のマイクロ波分光、7. まとめ、の7つの章と、測定されたMgOの周波数を記載した補遺とから構成される。

申請者は、実験装置の製作においては国立天文台野辺山宇宙電波観測所の川口建太郎助教授の指導のもとで金属化合物の測定に必要な高温セルを製作し、それをサブミリ波分光器と組み合わせるとともに、局部発信機の掃引により広範囲にわたって迅速に周波数をサーベイし高感度で未知の遷移の検出を可能にするシステムを製作した。

この実験装置を用いて以下の4つの実験を行い、かつその結果にもとづいて電波望遠鏡による観測で宇宙での検出を試みた。第一のMgNCラジカルは、星間・星周空間において出願者らが発見した含Mg化合物であるが、その低エネルギーの変角振動に着目し、初めてそれを実験室で測定した。また同位体置換種MgN¹³Cのサブミリ波スペクトルの測定にも成功した。変角振動励起状態の遷移は、その後IRAMの30m電波望遠鏡により赤色巨星IRC+10216において検出された。第二のMgOは星間・星周空間では未発見の分子であるが、その低電子励起状態における純回転遷移を初めて観測したが、検出には至らなかった。第三のFeCOのラジカルは、宇宙では非常に豊富であるにも関わらず星間・星周空間では未発見の鉄を含む分子の候補の一つである。そのサブミリ波スペクトルを高精度で測り、正確に求めた周波数にもとづいて電波望遠鏡によるIRC+10216での探査を試みたが、検出に至らなかった。第四のNaSHは、世界で初めて測定された分子である。そのスペクトルから分子定数を求め、電波望遠鏡のデータを調べたが、既存のデータでは検出されていないことが解った。

以上のように出願者は、赤色巨星が放出するダスト・分子において金属がどのような形で存在するかという基本的な課題の解明を進めるため、実験的な測定がまだ不十分にしかない含金属化合物の高感度測定を進めた。その結果、新しい分子種を含むいくつかの含金属分子・ラジカルの遷移周波数の高精度での測定に成功し、そのデータに基づいて電波望遠鏡による赤色巨星の観測やデータの調査を行った。現在のところは一部の検出にとどまっているとはいえ、出願者の研究は星間物質において金属がどのような形で受け継がれ、最終的に惑星まで至るかという課題を追求する上で先進的かつ着実な成果であり、分子分光学と宇宙化学の分野において優れた貢献をなしたものと評価される。

なお、本論文は共同研究の成果であるが、研究の主要部分はお願者が中心となって進めたものであり、審査委員は全員一致で、本論文が博士(理学)の学位を受けるにふさわしいものであると判定した。