

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	野津 翔太
論文題目	Chemical structures of protoplanetary disks and possibility to locate the position of the H ₂ O snowline using spectroscopic observations		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>原始惑星系円盤において、円盤内側は中心星の放射による加熱のため高温となり H₂O は気体となる。円盤外側では低温のため、H₂O はダスト表面に凍結する。この境界は「H₂O スノーライン」と呼ばれ、太陽型星の場合、中心星から数天文単位の位置にある。ダストの合体成長で惑星を作る際、スノーラインの内側では地球型の岩石惑星が形成される。スノーライン外側では H₂O の凍結によりダストの総量が増加し、また氷をまとったダストは岩石ダストに比べ破壊されにくいため巨大なコアが形成される。巨大コアはガスをまとめて木星型の巨大ガス惑星となる。この意味で H₂O スノーラインの観測はとても重要な課題である。</p> <p>円盤内のH₂Oガスや氷成分の撮像観測によってスノーラインを検出することは、空間分解能が足りないために困難である。しかし、円盤はほぼケプラー回転していることを使うと、輝線プロファイルの解析から輝線放射領域の中心星からの距離の情報が得られる可能性がある。そこで申請者は、円盤中のH₂O存在量とその分布を化学反応計算で調べた結果を元に多数のH₂O輝線プロファイルを計算し、水分子輝線の高分散分光観測によるH₂Oスノーライン測定の可能性を調べた。</p> <p>まずおうし座 T 型星 (第 2 章) およびハービッグ Ae 星 (第 3 章)、それぞれの周りの円盤の物理構造モデルの下で化学反応計算を実行した。その結果 H₂O ガスは H₂O スノーライン内側の円盤赤道面近傍だけでなく、スノーライン外側の表層部高温領域・光脱離領域にも多く存在することが分かった。この結果を元に多数のオルソ H₂¹⁶O 輝線のプロファイルを計算し、H₂O スノーライン検出に使用可能な輝線を探索したところ、アインシュタインの A 係数が小さく ($\sim 10^{-6}$-10^{-3} s⁻¹) 励起エネルギーが比較的高い (~ 1000K) 輝線を使えば、円盤赤道面のスノーライン内側からの放射が、外側の円盤表層部からの放射に卓越し、H₂O スノーラインの位置を測定できることが分かった。このような特徴を持つ H₂¹⁶O 輝線が、中間赤外線からサブミリ波までの幅広い波長帯に多数存在し、その強度は波長が短いほど、中心星の温度が高く H₂O スノーライン位置が中心星から離れているほど大きいことが分かった。</p> <p>次いでパラ H₂¹⁶O, H₂¹⁸O 輝線についても同様の計算を実行した (第 4 章)。その結果 ALMA (アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計) で観測可能な周波数領域に H₂O スノーライン観測に適した輝線を多数発見した。また、サブミリ波帯の H₂O 輝線は A 係数が赤外線帯の輝線より小さいため、円盤外側の領域からの放射強度が小さくなり、励起エネルギーが数百 K と比較的低い輝線も H₂O スノーライン同定に使用できることが明らかとなった。さらに H₂¹⁸O は H₂¹⁶O に比べて分子数密度が 1/560 と小さいことを考慮すると、</p>			

H_2^{18}O 輝線を使えば、より赤道面に近い領域の H_2O ガスを捉えることができ、赤道面の H_2O スノーライン位置の測定に適していることも分かった。

以上の考察に基づき、円盤からの H_2O 輝線検出を目指し、ALMAを用いて若い中質量星HD163296の円盤の高分散分光観測を行った（第5章）。しかしながら観測時間が当初要求時間の20%程に留まったこともあり、水輝線の検出には至らなかった。それでも輝線のフラックスの上限値を出すことができ、モデル計算結果との比較を行ってダスト不透明度やスノーラインの位置に制限を加えることができた。またALMAによるダスト連続波放射の高解像度観測（空間分解能約15天文単位）も行ったところ、多重リング・ギャップ構造を発見した。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

「京都モデル」とよばれる太陽系惑星形成の標準シナリオの基本は、原始太陽系円盤の中でダストが集合・合体して数キロメートルサイズの微惑星となり、さらにそれらが合体して惑星が形成されたという点にある。そこで重要となるのは、微惑星の成分である。原始太陽から離れたところでは、 H_2O は固体の氷となり岩石成分と交じり合っただけで氷微惑星ができる。原始太陽に近い場所では H_2O は原始太陽からの放射により加熱されて気体となるため、岩石主体の岩石微惑星ができる。この境界「 H_2O スノーライン」は、現在の太陽系のパラメータで考えると、中心星から約 2.7 天文単位の位置、すなわち火星と木星の間にある。この外側では氷微惑星が大きな惑星コアをつくってガスをまとって巨大ガス惑星（木星型惑星）となり、内側では岩石微惑星から岩石惑星（地球型惑星）が形成されることが説明される。

この標準シナリオ、ことに原始惑星系円盤の構造を観測的に検証することが喫緊の課題となっている。円盤を特徴づける半径の一つが H_2O スノーラインであり、そのため H_2O スノーラインの観測は、微惑星や惑星の形成過程を理解する上で極めて重要である。また地球上の水の起源を考える上でも大事である。申請者の研究はこの基本的課題に真っ向から取り組むもので、独自の方法論を編みだし、最新鋭の観測装置を使って自身の提案を観測的に検証しようという野心的な取り組みである点が高く評価できる。

円盤構造を観測するといっても、撮像観測には限界がある。 H_2O スノーラインは中心星から数天文単位という狭い領域にあるため、空間分解能が足りない。そこで申請者は分光観測データを使うことを考えた。円盤を観測して得られる輝線プロファイルは、ガスの回転運動起源のドップラー効果によりダブルピークをもつことが知られている。その幅は、円盤がほぼケプラー回転していることを使えば、距離情報に焼き直すことができる。輝線プロファイルから H_2O スノーライン半径が測定できるのである。

しかし問題が見つかった。申請者が、おうし座T型星およびハービッグ Ae 星それぞれの円盤中の H_2O の分布を計算した結果、 H_2O ガスは円盤赤道面の H_2O スノーライン内側だけでなく、円盤外側の表層部にも多く存在することが分かったのである。そこで申請者は数百ものオルソ H_2^{16}O 輝線のプロファイルを計算し、 H_2O スノーライン検出に使用可能な輝線を探索した結果、アインシュタインのA係数が小さく励起エネルギーがおおよそ1000Kの輝線を使えば、ALMAやSPICA（次世代赤外線天文観測衛星）で H_2O スノーライン半径の測定が可能であることを見出した。さらに申請者はパラ H_2^{16}O と H_2^{18}O 輝線についても同様の計算を繰り返し、 H_2O スノーライン観測にさらに適した輝線を多数発見した。じっさい H_2^{18}O 輝線を使うと、 H_2^{18}O の数密度が小さくて赤道面近くまで見通すことができるため、 H_2^{16}O 輝線を使う場合より H_2O スノーライン位置の同定にふさわしいのである。申請者はこの地道な作業の繰り返しにより、 H_2O スノーラインの位置測定に最適の方法論を提案するに至った。これは申請者の不断の努力の結晶といえる。

以上の考察に基づき申請者は、 H_2O 輝線検出を主目的のALMA観測提案を行い、10倍以上もの高い競争を勝ち抜いてHD163296の円盤の高分散分光観測を行った。観測時間が当初要求時間の20%程しかなかったこともあり、水輝線の検出には至らなかったが、原始惑星系円盤ダスト不透明度やスノーラインの位置に制限を加えることができた。今後も詳細なモデル計算研究とALMA・SPICA等を用いた観測的研究を継続の予定で、さらなる発展が期待できる。また、副産物として得た多重リング・ギャップ構造を発見したことも特筆すべきであろう。リング・ギャップ構造の起源は未解明であるが、今後の解析の進展に期待したい。

以上、本研究は原始惑星系円盤の構造理論の観測的検証という難題に真っ向から取り組むことで、新しい方法論を提案し、観測提案にまで結びつけた点が秀逸である。まだ観測的検証には至っていないものの、天文学研究の歴史に重要な一步を記した意義ある研究と判断できる。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成31年1月11日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当分の間、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公表可能日： 平成31年 3月 31日以降