



宇宙の水の異常なオルト：パラ比の意味を解明

～宇宙・太陽系の水の起源の定説を覆す～

研究成果のポイント

- ・長年にわたり謎であった彗星や星間雲に存在する水の異常なオルト：パラ比の意味を解明。
- ・従来考えられてきた「宇宙で水ができた時の温度を示すもの」ではないことを明らかにした。
- ・宇宙や太陽系の水の起源に関する過去の観測結果の再解釈、理論の見直しを提言。

研究成果の概要

宇宙や彗星で観測される水のオルト：パラ比^{※1}は、地球の水（オルト：パラ＝3：1）よりもパラ H₂O が多いことが知られています（オルト：パラ＝0.1～2.5：1）。天文学ではこのオルト：パラ比から、宇宙の極低温環境下で水が生成したときの温度を知ることができると考えられてきました。しかし、この仮説が正しいかは明らかになっておらず、宇宙の水の異常なオルト：パラ比が本当は何を意味しているのかは、初観測からおよそ 30 年経つにも関わらず、全くわかっていませんでした。

我々は、宇宙で水ができる化学反応を実験室内で忠実に再現し、できた水のオルト：パラ比を直接測定することに成功しました。結果として、 $-263\text{ }^{\circ}\text{C}$ （ $=10\text{ K}$ ）で水を作ったにも関わらず、そのオルト：パラ比は地球と同じ高温状態（オルト：パラ＝3：1）となることがわかり、従来考えられていたような「宇宙で水ができた時の温度を示すもの」ではないことが明らかになりました。

本研究は、宇宙や太陽系における水の起源の定説を覆し、今までの天体観測の結果を解釈し直す必要があることを意味しています。今後、本研究の結果を用いて、宇宙でどのようにして水ができ、太陽系の彗星や地球に運ばれてきたのかについて、飛躍的に理解が進むことが期待できます。

本研究成果は、サイエンスに 2016 年 1 月 1 日（金）（米国東部時間）に掲載されました。

論文発表の概要

研究論文名：Statistical ortho-to-para ratio of water desorbed from ice at 10 kelvin

（10 ケルビンの氷から脱離する水のオルト：パラ比は統計重率に従う）

著者：羽馬哲也，香内 晃，渡部直樹（北海道大学低温科学研究所）

公表雑誌：Science

公表日：米国東部時間 2016 年 1 月 1 日（金）（オンライン公開）

研究成果の概要

（背景）

宇宙には水（ H_2O ）が、星が生まれる以前の星間雲から、原始惑星系円盤、太陽系の彗星や氷衛星、地球にいたるまで普遍的に存在します。そのため、水は星間雲から太陽系までの進化をつなぐ分子であり、宇宙でできた水がどのような性質をもっているかを調べることで、星間雲や彗星の環境を知ることができ、太陽系がどのようにして形成されたのかを探ることができます。

特に近年では、宇宙の水のオルト：パラ比が注目されています。水（ H_2O ）分子は水素原子核のスピン^oの向きがそろっているオルト H_2O と反対向きのパラ H_2O という 2 種類に分類できます（図 1）。地球の温度環境（ $27\text{ }^\circ\text{C}=300\text{ K}$ ）では、オルト H_2O とパラ H_2O の存在比は量子力学的な性質から 3：1 になります。しかし、 $-223\text{ }^\circ\text{C}$ （ $=50\text{ K}$ ）以下の低温ではパラ H_2O のほうが存在量が多くなります。星間雲や彗星の水のオルト：パラ比は地球よりもパラ H_2O が多いことが知られています（図 1）。たとえば彗星ではオルト：パラ $=2.5：1$ であり、このオルト：パラ比は $-243\text{ }^\circ\text{C}$ （ $=30\text{ K}$ ）に対応します。オルト→パラ間の転換は気相では極めて遅いため、天文学では「宇宙の水のオルト：パラ比は水が生成した時点で決まり、オルト：パラ比を観測すれば過去に水ができた時の温度を知ることができる」、また「彗星の水は 46 億年前に $-243\text{ }^\circ\text{C}$ （ $=30\text{ K}$ ）の環境で生成した」と考えられてきました。

しかし、オルト：パラ比が本当に水の生成時の温度を示すかどうかを調べる実験は、オルト H_2O とパラ H_2O を別々に高感度に検出することが困難なため今まで行われてきませんでした。そのため、宇宙の水の異常なオルト：パラ比がもつ本当の意味は、30 年にわたる観測にも関わらず不明でした。

（研究手法・成果）

宇宙で水は、星間塵^{※2}と呼ばれる極低温の小さな塵の表面で酸素と水素が化学反応を起こすことで、まず氷として生成します（図 2）。その後、生成した氷に星間雲・原始惑星系円盤では強い光が照射されることで、彗星では加熱されることで水が気相へ放出され、オルト：パラ比が観測されます。本研究では、宇宙で氷ができ、気相へ放出される過程を実験室内で忠実に再現し、そのオルト：パラ比を共鳴多光子イオン化法^{※3}という手法を用いて直接測定しました（図 3）。その結果、 $-263\text{ }^\circ\text{C}$ （ $=10\text{ K}$ ）で氷を作ったにも関わらず、その氷から放出された水のオルト：パラ比は、 10 K に対応するオルト：パラ $=0.3：1$ ではなく、地球と同じ高温状態（オルト：パラ $=3：1$ ）になることがわかりました。つまり、水のオルト：パラ比は生成時の温度を示すものではないことが明らかになりました。

（今後への期待）

本研究によって、太陽系が過去に星間雲から進化してきた間に、水がどのようにして生成され、彗星などの天体に取り込まれていったのか、その理解を飛躍的に進めることができます。たとえば彗星の水のオルト：パラ比から彗星が 46 億年前に 30 K で生成したという仮説は正しくなく、太陽系ができたばかりの頃がどのような温度環境であったかを知るためには、新しい理論が必要となります。

また、宇宙で観測される異常なオルト：パラ比の起源としては、水が氷から放出された後に経験する化学反応が従来考えられていたよりもはるかに重要であることがわかりました。化学反応は天体の物理環境（温度、圧力など）に大きく依存するため、今後、宇宙の水のオルト：パラ比とその場で起きている化学反応の関係を調べることで、天体の物理環境が詳細にわかるようになります。さらに、アルマ望遠鏡や彗星のロゼッタ探査機などから得られた最新の観測結果を正しく理解するためにも、本研究の結果は大いに役立ちます。

お問い合わせ先

所属・職・氏名：北海道大学低温科学研究所 助教 羽馬 哲也（はま てつや）

TEL：011-706-5474 FAX：011-706-7142 E-mail：hama@lowtem.hokudai.ac.jp

ホームページ：http://www.lowtem.hokudai.ac.jp/astro/index.html

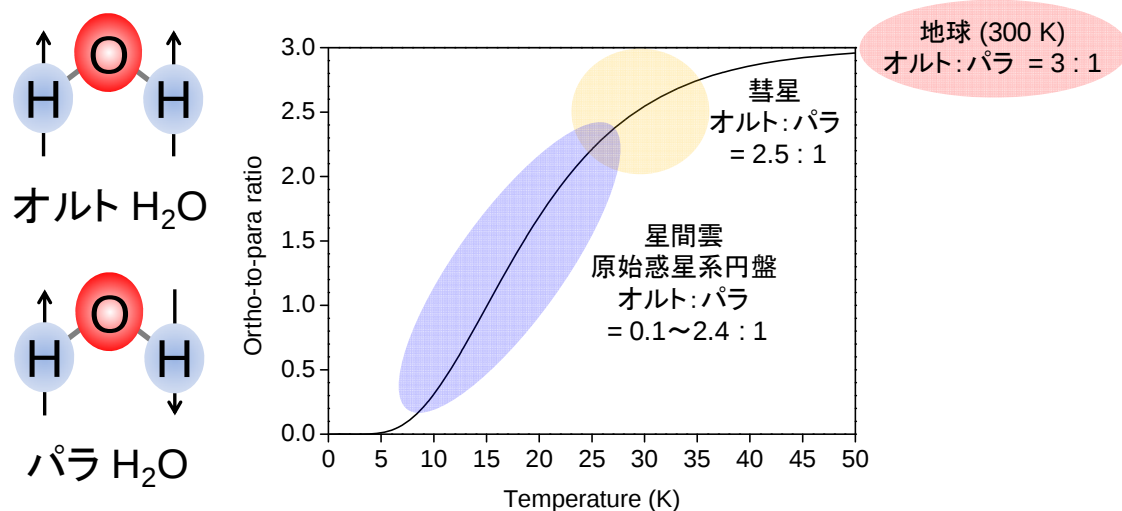


図1 オルト H_2O とパラ H_2O 。50 K 以下の低温では、パラ H_2O の方がオルト H_2O よりも安定になり、オルト：パラ比は高温状態（オルト：パラ＝3：1）から変化し、パラ H_2O の存在量が増える。

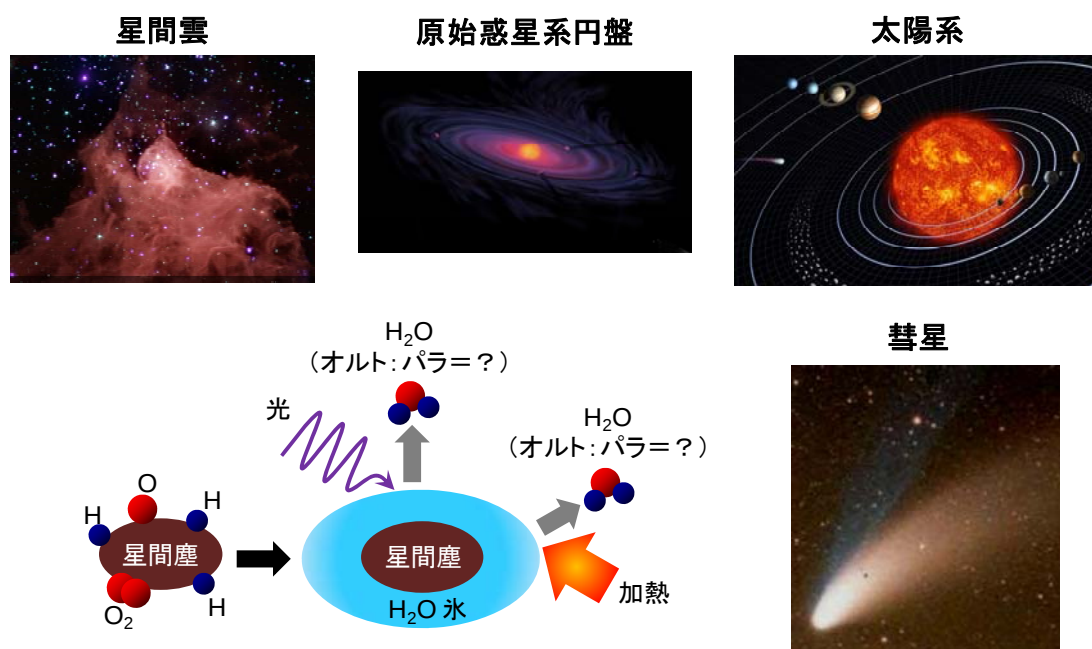


図2 （上）星間雲（星形成領域）から太陽系にいたるまでの天体の物理的進化

（下）天体の進化に伴う物質の化学的進化

星間塵の表面で酸素と水素が反応し氷が生成される。星間塵や彗星核の氷から放出される水のオルト：パラ比を観測することで、氷が生成したときの温度を知ることができると考えられてきたが、実験的証拠はなかった。

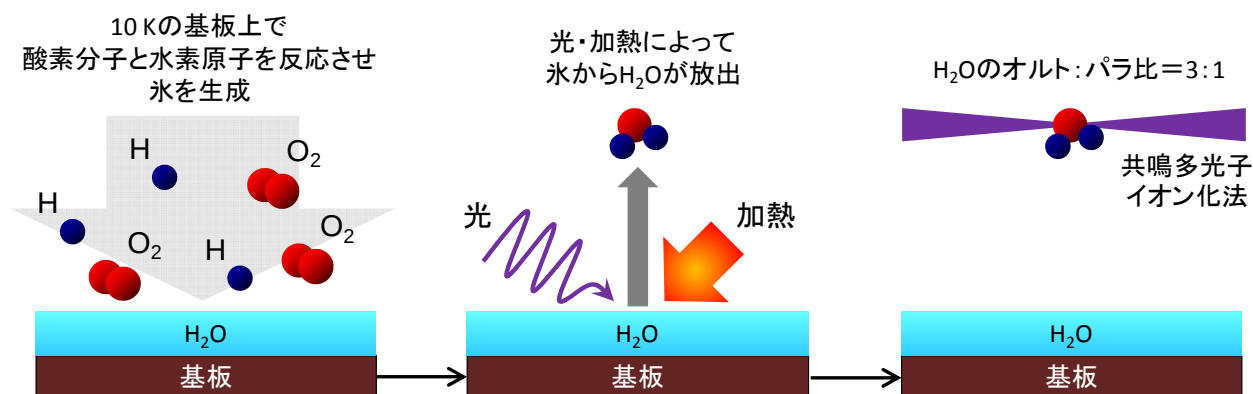


図3 実験の模式図。−263 °C (=10 K) で氷を作り，その氷から放出された水のオルト：パラ比を直接観測する。その結果，放出された水のオルト：パラ比は生成時の温度（オルト：パラ=0.3：1）を示さず，地球と同じ高温状態（オルト：パラ=3：1）になることがわかった。

〔用語解説〕

※¹ オルト：パラ比

水 (H₂O) 分子を構成する水素原子核はコマのように回転しており，これを「スピン」と呼ぶ。H₂O の場合，2 つの水素原子核のスピンの向きがそろっているオルト H₂O と反対向きのパラ H₂O という 2 種類に分類でき，異なる磁気的性質をもつ。地球ではオルト H₂O とパラ H₂O の存在比は 3:1。

※² 星間塵

星間雲に存在する 0.1 μm 程の微粒子。鉱物や炭素質物質を核として表面は氷に覆われている。この氷に覆われた星間塵が原材料となって太陽系の天体（彗星や惑星など）が作られる。

※³ 共鳴多光子イオン化法

集光したレーザー光を分子に照射をすると，分子はイオンになり電気信号として検出することができる（光イオン化法）。しかし，通常の光イオン化法では，オルト H₂O とパラ H₂O を区別して検出することができない。一方，共鳴多光子イオン化法では，レーザー光をある特定の波長に調整することによってオルト H₂O のみ，もしくはパラ H₂O のみを選択的にイオン化し高感度で検出することができる。