

極低温の氷表面で動き回る炭素原子を観測

～宇宙における炭素鎖生成の起源解明に貢献～

ポイント

- ・ 極低温（マイナス 263°C～223°C）の氷表面における炭素原子の振る舞いを初めて観測。
- ・ 宇宙の極低温環境に存在する氷微粒子が有機分子の炭素鎖形成の母胎であることが明らかに。
- ・ 宇宙における複雑有機分子形成のメカニズムの全容解明に期待。

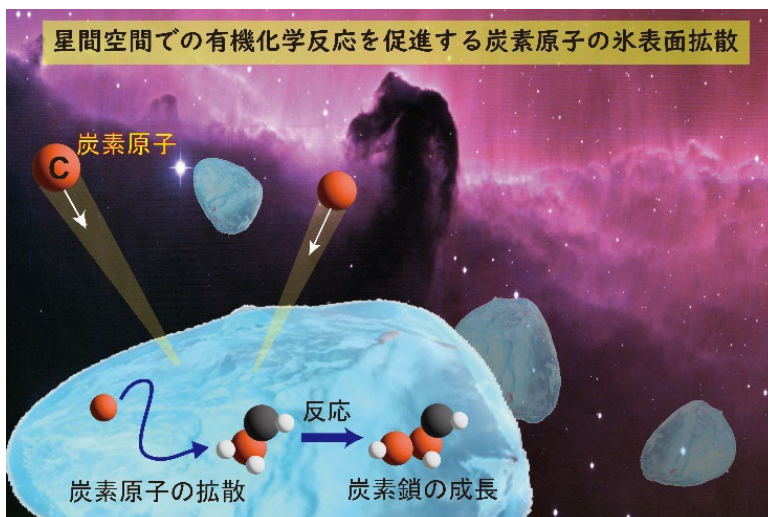
概要

北海道大学低温科学研究所の柘植雅士助教と渡部直樹教授らの研究グループは、極低温の氷表面における炭素原子の振る舞いを、独自に開発した手法を用いて観測することに初めて成功しました。

炭素は宇宙で4番目に存在量が多い元素です。それゆえ、宇宙空間には数多くの種類の有機分子が存在しています。こうした分子の起源は星が誕生する以前の宇宙の極低温空間にあると考えられています。多くの有機分子は炭素原子が複数個連なった炭素鎖を持っていますが、炭素鎖がどのように成長したかは、これまで分かっていませんでした。宇宙に浮遊する氷微粒子表面で鎖が成長する説が有力でしたが、これまでそれを裏付ける証拠がありませんでした。また、最近の理論的研究では、炭素原子は氷表面に強く結びつき動けない事が予想されており、炭素鎖形成の起源は謎とされてきました。

研究グループは、これまで実験的に観測が難しかった極低温氷表面の炭素原子の動きを2種類のレーザーを用いた独自の手法で観測することで、氷表面に強く結びつく炭素原子が存在する一方で、ある炭素原子はマイナス 250 °Cを越えたところで活発に動き出し、炭素鎖を形成し始めることを初めて確認しました。本研究は、水素などに比べ比較的重たく動きにくい炭素原子であっても、極低温氷表面で自由に動き回り、大きな有機分子の骨格を作りうることを初めて示したもので、宇宙に大量に存在する有機分子の起源に関する理解が格段に進展することが予想されます。

なお、本研究成果は、2023年9月15日（金）公開のNature Astronomy誌に掲載されました。



宇宙空間では氷微粒子上に炭素原子が降り注ぐ。炭素原子を検出する独自の手法を用いて、炭素原子の拡散（氷表面を動き回ることを）を捉えた。

炭素原子の関わる化学反応により、様々な有機分子中の炭素鎖が成長することが期待される。

背景は実際の星間分子雲（馬頭星雲と呼ばれる有名な分子雲）の写真。

【背景】

宇宙空間には星が生まれる極低温（最低温度マイナス 263°C）の領域である星間分子雲*¹が存在します。極低温という化学反応に適さない環境にもかかわらず、星間分子雲には有機分子を含む多種多様な化学種が存在することが近年の天文観測から明らかとなってきました。原子や単純な分子からこれらの化学種が生成されていく過程を化学進化と呼びます。星間分子雲に浮遊している氷微粒子*²が化学進化において重要な役割を果たしていることは古くから提案され、実験的にも証明されてきました。氷星間塵上の化学進化で重要となるのは、ラジカル*³と呼ばれる非常に反応性の高い化学種です。星間分子雲での多様な有機分子の存在は、炭素を含むラジカル種の反応が活発に生じていることを示唆します。しかしながら、多くの有機分子が持つ炭素鎖（炭素原子が複数個連なったもの）がどのように成長するかは、これまで分かっていませんでした。

研究グループは炭素を含む化学種のうち、もっとも単純な炭素原子に着目しました。炭素原子はラジカル種であり、様々な化学種と反応して炭素鎖の成長に寄与すると考えられます。炭素原子が氷表面で反応を起こすためには、まず初めに氷表面上を動き回って反応相手を見つける必要があります。実験から炭素が氷表面を動き始める温度を決定することで、炭素原子が関わる反応、更には、氷微粒子上での化学進化について理解を深めることに繋がります。

【研究手法】

一般的な分析手法を用いて氷表面に存在する炭素原子をその場観察することはできません。研究グループは 2 種類のレーザーを用いた独自の手法を開発し、その観察を可能としました。低温科学研究所で独自に開発した真空実験装置内（図 1）に宇宙空間に存在する氷微粒子を再現し、炭素原子を発生させる装置を用いて氷表面に炭素原子を付着させました。この炭素原子を一つ目のレーザーで氷表面から真空中に飛び出させ、出てきた炭素原子を第 2 のレーザーを用いて分析することで、氷表面に存在する炭素原子を観察しました。

【研究成果】

本実験から、氷に付着した一部の炭素原子は極低温の条件下でも氷表面を動き回ることが明らかになりました。本発見は、最近の理論的研究から示唆されていた「炭素原子は氷表面に強く結びつき動けない」という描像と大きく異なるものであり、氷微粒子上で炭素原子が様々な分子種と化学反応を起こし大きな有機分子を生成しうることを示しています。氷微粒子上での化学進化は 10 万年というタイムスケールで進行するため、10 万年の間に氷星間塵（直径およそ 0.0001 mm）の表面をくまなく動き回ることができる温度を知ることが重要です。実験から決定した炭素原子が動き始めるのに必要なエネルギー（活性化エネルギー*⁴）から、およそマイナス 250 °Cを超えると炭素原子が活発に動き回ることが分かりました。星間分子雲では、その中で星の形成が進むにつれて、最低マイナス 263°C 程度であった環境の温度は徐々に上昇していきます。従って、温度上昇に伴い炭素原子が動き始め、炭素鎖の生成を伴う活発な化学進化が起きることになります（図 2）。

【今後への期待】

本研究で決定された温度をもとに化学進化のシミュレーションを行うことで、動き回る炭素原子の化学反応が有機分子の生成にどのように寄与するかを明らかにすることができます。また、本研究で見いだされた現象は、炭素原子の存在量が多く、温度が比較的高い領域で最も重要となります。本研究成果は、そのような領域における長い炭素鎖を持った有機物の起源として、炭素原子の氷表面反応

を考慮することの重要性を示唆するだけでなく、将来的な天文観測の指針となります。

星間分子雲の氷微粒子表面では、炭素原子だけでなく様々なラジカル種が複雑な分子の生成に関わっています。その中でも、ほんのわずかなラジカル種（水素原子、炭素原子、OH ラジカル）についてのみ、氷微粒子表面での振る舞いが明らかになってきました。氷微粒子表面での化学進化過程の全容に迫るためには、他の重要なラジカル種の振る舞いを明らかにしていくことが必要です。研究グループでは、独自に開発した実験手法を駆使し、その全容解明に向けた研究を進めていきます。

【謝辞】

本研究は日本学術振興会 (JSPS) の科学研究費助成事業 (JP23H03982、JP22H00159、JP21H01139、JP18K03717、JP22F22013、JP17H06087) の助成を受けたものです。

論文情報

論文名	Surface Diffusion of Carbon Atoms as a Driver of Interstellar Organic Chemistry (宇宙空間における有機化学反応を促進する炭素原子の表面拡散)
著者名	柘植雅士 ¹ 、Germán Molpeceres ² 、相川祐理 ² 、渡部直樹 ¹ (¹ 北海道大学低温科学研究所、 ² 東京大学大学院理学系研究科)
雑誌名	Nature Astronomy
DOI	10.1038/s41550-023-02071-0
公表日	2023年9月15日(金)(オンライン公開)

お問い合わせ先

北海道大学低温科学研究所 助教 柘植雅士 (つげまさし)

T E L 011-706-5474 メール tsuge@lowtem.hokudai.ac.jp

北海道大学低温科学研究所 教授 渡部直樹 (わたなべなおき)

T E L 011-706-5501 メール watanabe@lowtem.hokudai.ac.jp

U R L <http://www.lowtem.hokudai.ac.jp/astro/>

配信元

北海道大学社会共創部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

【参考図】

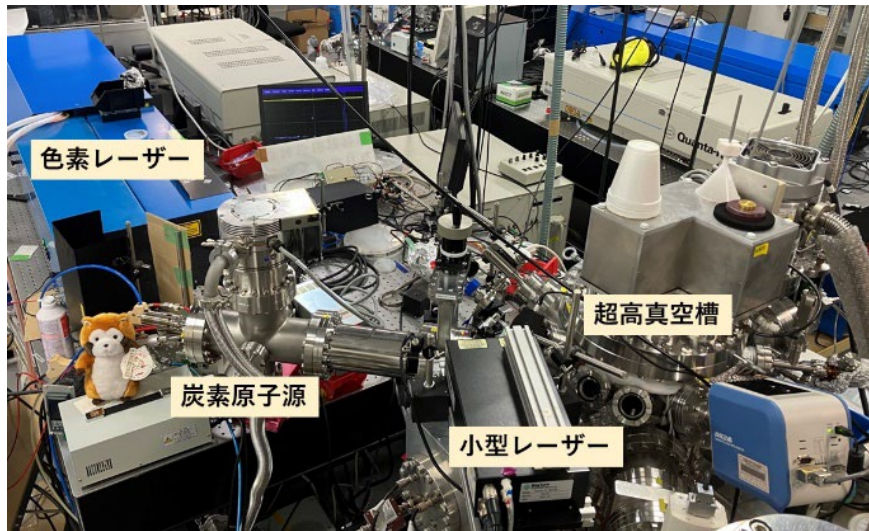


図 1. 低温科学研究所で開発し、本研究に用いた実験装置（名称：RASCAL）。宇宙環境を再現するための超高真空槽の中心部に極低温の氷を作製した。炭素原子源から供給される炭素原子を氷表面に付着させ、小型レーザーと色素レーザーを組み合わせると炭素原子の振る舞いを調べた。

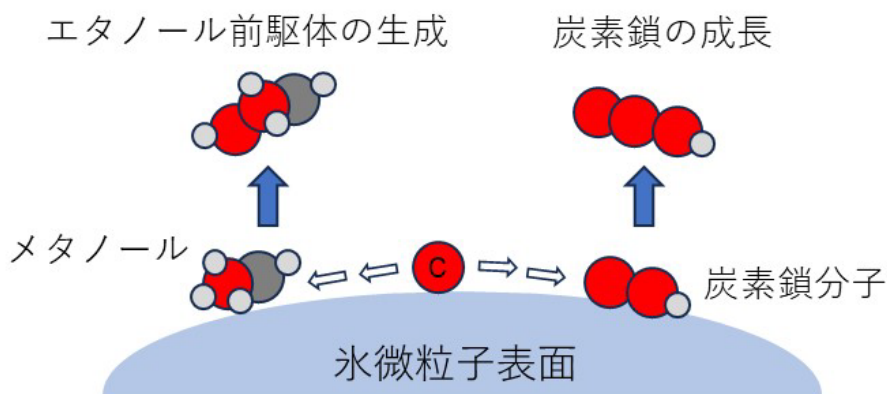


図 2. 氷表面を動き回る炭素原子の反応経路。炭素原子がメタノール分子 (CH_3OH) と出会うと、炭素原子が挿入され新たな分子 (CHCH_2OH) が生成する。この分子はエタノール ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) の前駆体と考えることができる。また、炭素鎖分子と出会うと、炭素鎖の成長が起きる。炭素鎖分子の生成は主に気相中で起こると考えられてきたが、本研究の結果は氷微粒子表面でも生成しうることを示唆する。

【用語解説】

- *1 星間分子雲 … 大量のガスと氷微粒子からなる星や惑星が誕生する領域であり、周辺にまだ星ができていないため熱源が無く、最低マイナス 263°C 程度の極低温になる。この環境下に存在する氷微粒子は有機分子よりも早い段階で形成され、その表面は様々な有機分子が生成する場所となっている。
- *2 氷微粒子 … 氷星間塵とも呼ばれ 0.0001mm 程度の直径を持つ微粒子。ケイ酸塩鉱物や炭素質物質を核とし、主に H_2O からなる氷を纏っている。
- *3 ラジカル … 不対電子をもつ分子・原子・イオンを指す。非常に反応性が高く、極低温の条件下であってもラジカル同士が出会うと速やかに化学反応が起きる。
- *4 活性化エネルギー … 物質がある状態から他の状態へ移るために必要なエネルギーのこと。温度が上がることで物質が持つ熱エネルギーが高くなり、初めて氷表面で炭素原子が動き始めることができる。