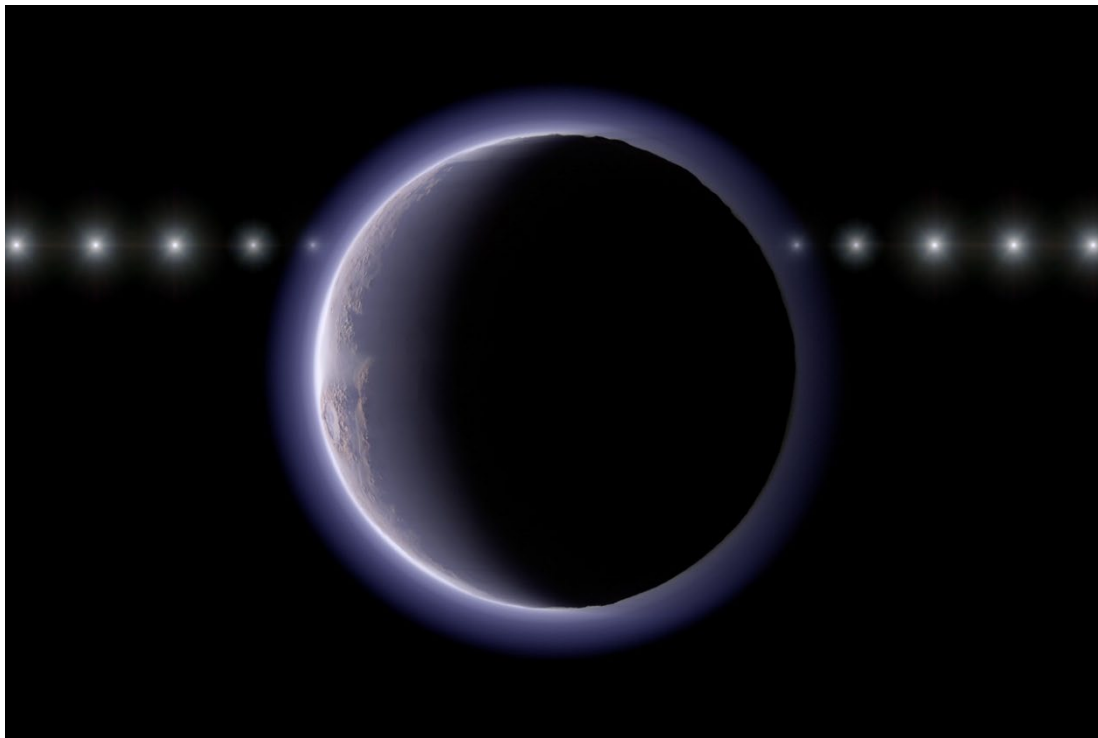


研究成果

2026年5月5日

冥王星以外で初めて、太陽系外縁天体に大気を発見



太陽系外縁天体 2002 XV₉₃ が恒星を隠す様子。大気によって緩やかに暗くなっていった現象が捉えられた。

(クレジット：国立天文台)

発表概要

国立天文台（石垣島天文台）の研究者を中心とする、アマチュア観測家とプロの天文学者の連携研究チームは、2024年1月10日に太陽系外縁天体「(612533) 2002 XV₉₃」が背景の恒星の手前を通過する掩蔽（えんぺい）とよばれる現象を、日本国内3地点で観測しました。その結果、星の光が天体の縁で予想外になだらかに変化する様子を捉え、詳細な解析から、2002 XV₉₃ の周囲に非常に薄い大気が存在することを明らかにしました。今回の成果は、冥王星以外の太陽系外縁天体で初めて大気の実在を示したものです。さらに、惑星・準惑星・大型衛星を除いた太陽系天体としては、2002 XV₉₃ が明確に大気の実在が示された初めての天体となり、太陽系で大気が観測された最遠の天体となります。直径約500キロメートル級の比較的小さな天体でも、少なくとも一時的には大気を持ち得ることを示した今回の発見は、太陽系天体の大気形成や揮発性物質の保持、そして太陽系外縁天体の活動性に関する従来の理解を見直す成果です。

本研究成果は2026年5月5日（日本時間）に、英国の科学専門誌『Nature Astronomy』に掲載されました。



図 1：主要な太陽系外縁天体の大きさと、大気の検出状況を比較した模式図。冥王星では大気存在が知られている一方、準惑星であるエリス、ハウメア、マケマケ、そして準惑星候補天体クワオアーでは明確な大気の証拠は得られていない。本研究によって、これらよりも小さな太陽系外縁天体である (612533) 2002 XV₉₃ に大気の証拠が見いだされ、太陽系外縁天体の大気に関する理解に新たな可能性を示した。

(制作：有松亘、クレジット：国立天文台)

発表内容

本研究の背景

海王星の外側に広がる太陽系外縁部は、地球や太陽から遠方に位置する、太陽系最後にして最大のフロンティアといえる領域です。こうした領域に存在する太陽系外縁天体は極低温（表面温度-220°C以下）の環境にあるため、それらの多くは「活動性や変化のほとんどない静かな世界」であると考えられてきました。

太陽系外縁天体に大気は存在するのでしょうか。太陽系外縁天体の表面は極寒の世界であるため、気体となって大気を作り得るのは、メタン、窒素、一酸化炭素のような極めて揮発性の高い物質に限られます。こうしたいわゆる「超揮発性物質」は、表面を覆う氷として、一部の太陽系外縁天体で存在が確認されています。一方、表面から気化したガスを大気として保つには十分な重力が必要であり、大気が存在する可能性は表面重力の比較的強い、非常に大きな天体のみに限られるとされてきました（図 1）。実際に、太陽系外縁天体で大気存在が確認されているのは、これまで発見されている外縁天体のなかでは最大のサイズを持つ、冥王星（直径およそ 2380 キロメートル）だけです。これまで冥王星以外にも、エリス、ハウメア、マケマケなど、比較的大きなサイズを持った準惑星（もしくは準惑星候補、直径およそ 1000~2000 キロメートル）の太陽系外縁天体に対して大気の探索が行われてきましたが、いずれも明確な検出には至っていませんでした。

こうした準惑星天体よりさらに小さな、直径 1000 キロメートル以下の太陽系外縁天体については、表面重力がさらに小さいため、大気が存在できるとは考えられていませんでした。一方で、もしもこうした小さな天体にも未知の活動が存在すれば、一部の天体が一時的に大気を持つ可能性は否定できません。しかし、こうした小さな太陽系外縁天体で大気の有無が観測によって詳しく確かめられた例はほとんどなく、実態は分かっていませんでした。

研究の詳細

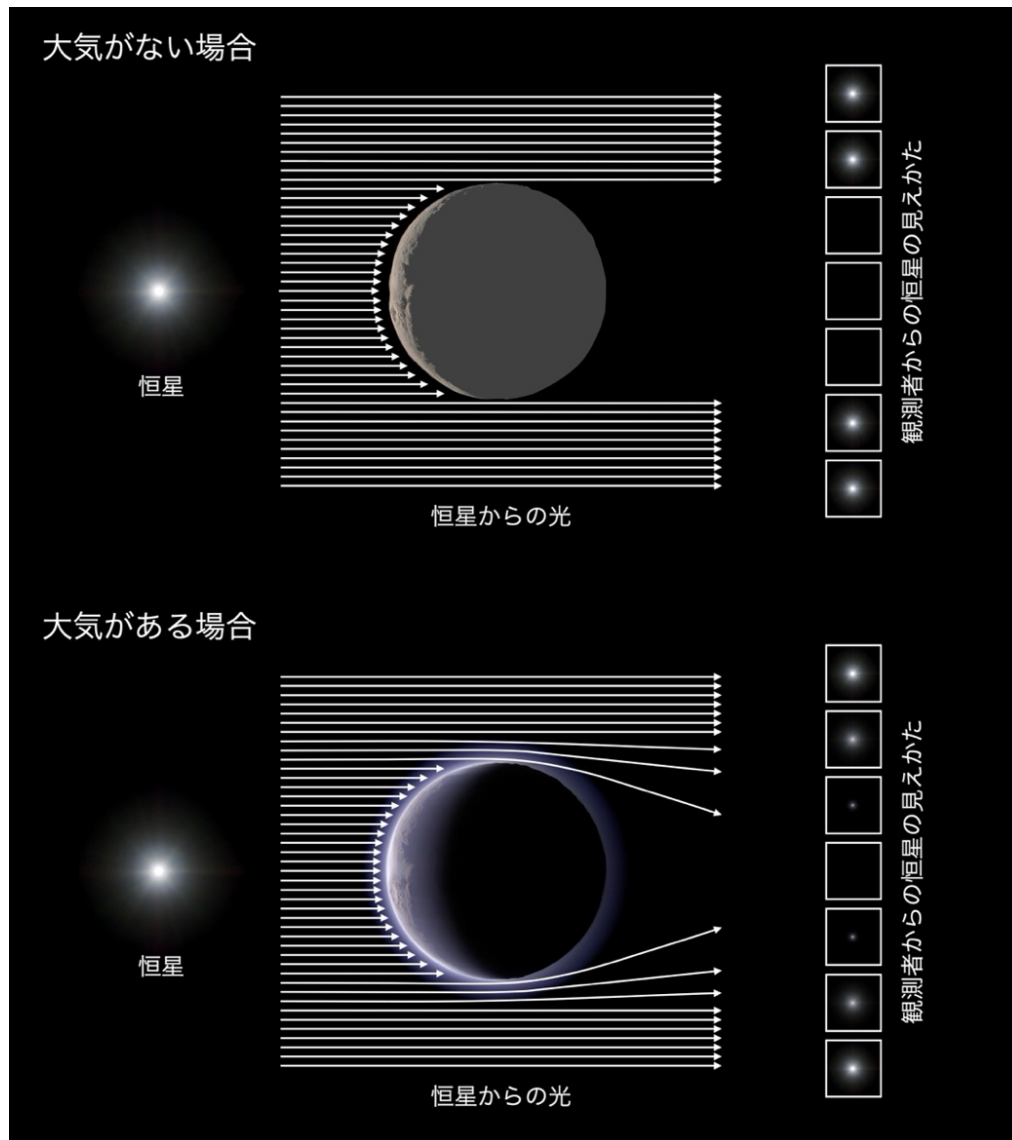


図 2：恒星掩蔽観測で太陽系外縁天体の大気の有無を見分ける仕組みの概略図。大気がない場合、恒星の光は天体の縁で急に遮られるため、恒星は一気に見えなくなる。これに対し、大気がある場合には、恒星からの光が大気で屈折するため、恒星の明るさはなだらかに変化する。掩蔽観測によってこうしたなだらかな明るさの変化を調べることで、遠方の小天体の極めて希薄な大気を明らかにすることができる。

(制作：有松亘、クレジット：国立天文台)

研究チームは 2024 年 1 月 10 日（日本時間）、太陽系外縁天体の大気や環などについて、恒星掩蔽（恒星食）を利用して包括的に調べる連携観測キャンペーン TABASCO（『タバスコ』:Trans-Neptunian Atmospheres and Belts Analysis through Stellar-occultation Coordinated Observations）の一環として、太陽系外縁天体のひとつである、カイパーベルトに位置する (612533) 2002 XV₉₃（以下、2002 XV₉₃、参考画像 1、2）による掩蔽を日本国内で観測しました。2002 XV₉₃ は観測時、地球から約 55 億キロメートル（地球と太陽の距離の約 37 倍）の距離にあり、太陽・地球から見て冥王星よりもわずかに外側に位置しています（参考画像 3）。この天体は冥王星やエリス等の準惑星天体よりもはるかに小さく、直径は約 500 キロメートルと見積もられています。

研究チームは、この天体が背景の恒星を隠す掩蔽を利用し、天体の周囲にある非常に薄いガスの大気を探る観測に挑みました。天体に大気がなければ、恒星の光は掩蔽されるタイミングで、天体の縁でほぼ瞬時に途切れるはずですが。これに対し、大気がある場合には、星の光がその大気で屈折するため、影の縁で明るさがなだらかに変化します（図 2）。そのため掩蔽観測は、遠くて暗い天体の大気について、地上から高い精度で調べることができる強力な方法となります。

研究チームは、2002 XV₉₃ が 2024 年 1 月 10 日にぎょしゃ座にある見かけの明るさ約 15 等の恒星を掩蔽する可能性を独自に予報し、日本国内の 3 地点（京都府京都市、長野県木曾郡木曾町、福島県田村郡三春町）で観測を実施しました。京都では口径 20 センチメートル望遠鏡を用いた小型観測システム SoCoSoCo PONCOTS（ソコソコポンコツ）、長野では東京大学木曾観測所の口径 1.05 メートルのシュミット望遠鏡に搭載された Tomo-e Gozen（トモエゴゼン）カメラ、福島ではアマチュア観測家、細井克昌（ほそい・かつまさ）さんが運用する口径 25 センチメートル望遠鏡が用いられました。これら 3 地点それぞれで観測データの取得に成功し、このうち 2 地点（京都・長野）では、同日 22 時 12 分から 22 時 13 分（日本時間）にかけて発生した、最長およそ 18 秒間の継続時間を持つ、2002 XV₉₃ による掩蔽の観測に成功しました。

長野で得られた観測データからは、掩蔽の始まりと終わりの両方で、恒星の光が約 1.5 秒かけてなだらかに減光・回復する様子が確認されました（図 3 上段）。さらに福島でも、天体本体による掩蔽は発生しなかったものの、影の縁に近い位置で、ゆるやかな減光の兆候が見つかりました（図 3 下段）。このような緩やかな光度変化は、天体に大気がまったくない場合に期待される鋭い変化とは異なる、予想外の発見でした。研究チームは、回折や恒星の見かけの大きさだけでは説明できないことを示したうえで、冥王星型の温度構造を仮定した大気モデルを用いて詳細な解析を行いました。その結果、主成分をメタン、窒素、一酸化炭素のいずれと仮定しても、表面圧力 100~200 ナノバール程度の薄い大気を想定すると、すべての観測地点で得られた観測データを非常によく再現できることが分かりました。

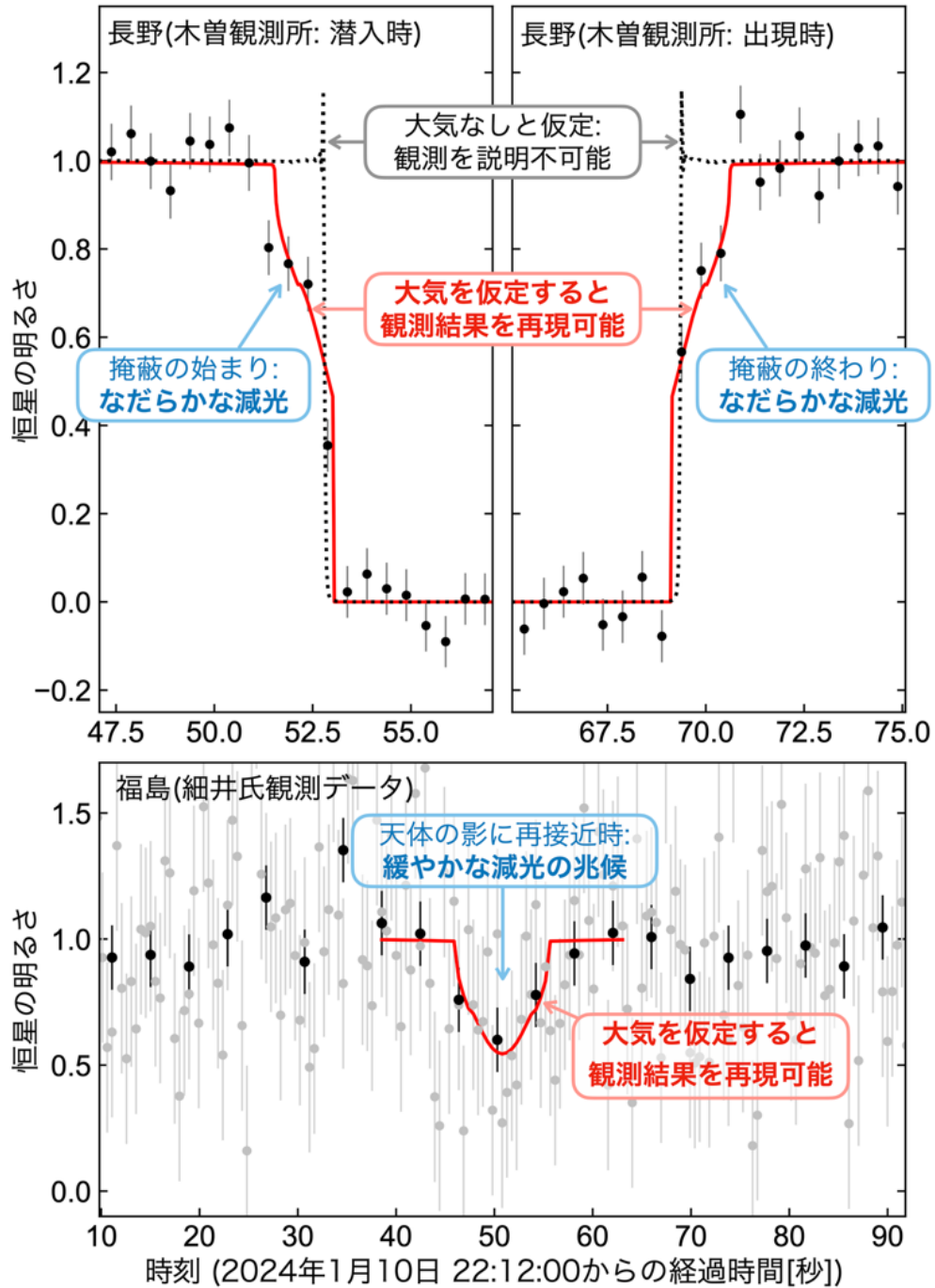
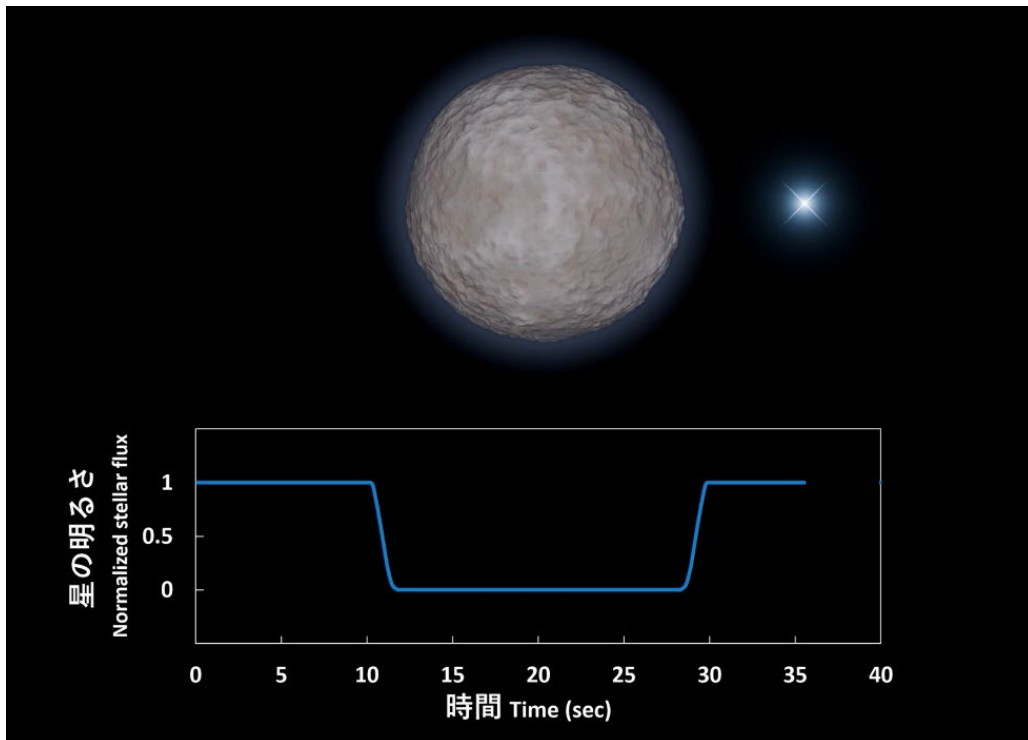


図3：長野（上段）と福島（下段）で観測された、2002 XV₉₃による恒星掩蔽イベント時に観測された恒星の光度変化。誤差棒付きの点が実際の観測値で、大気がないと仮定した場合（上段の点線参照）には説明不可能な、なだらかな恒星の光度の変動が影の周縁で見られた。大気を仮定した光度変動モデル（赤線）を採用すると、こうしたなだらかな変動がよく再現できていることが分かる。

(Arimatsu et al. (2026) より改変)



2002 XV₉₃ が恒星を隠す前後の、恒星の明るさの変化を模式的に表した動画。

(クレジット：国立天文台)

動画：YouTube 国立天文台チャンネル <https://youtu.be/pHgoRPLFopl>

研究の意義と波及効果

今回見つかった大気は、地球大気と比較しておよそ 1,000 万分の 1、冥王星の大気と比較してもおよそ 100 分の 1 程度の大気圧しかない、非常に薄いものである一方で、これまで他の太陽系外縁天体に対して得られていた上限と同等か、それを上回る水準のものです。このことは、冥王星よりもずっと小さな、太陽からより遠方に位置する天体でも、条件次第では大気を持ち得ることを示しています。この結果により、「明確に観測可能な大気は大きな惑星や準惑星、もしくは一部の大型衛星に限られる」という従来の常識が、必ずしも成り立たない可能性が出てきました。

では、この予想外の大気はどこから来たのでしょうか。2002 XV₉₃ に大気があったとしても、表面の重力が弱くガスを保持し続けることが難しいため、別の場所からガスが供給されない限りは 1000 年程度で失われてしまうと考えられています。そのため今回の研究では、その起源として、地下の揮発性物質に関連した天体内部からのガス放出、すなわち低温火山活動のような現象と、比較的最近に起きた小天体衝突という、主に二つの可能性が考えられます。いずれの場合であっても、太陽系外縁天体に対する「活動性や変化のほとんどない世界」という従来の見方を大きく見直すこととなります。もし衝突起源であれば、今後数年のうちに大気圧が単調に低下していくことが予想されます。一方で、大気圧に単調な低下が見られないか、季節的な変化が見つければ、天体内部に由来するガス供給を支持する手がかりとなります。今後の継続観測とジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡による分光観測が、今回発見された大気の起源と素性に迫るうえで決定的な役割を果たすと期待されます。

さらに今回の成果は、木曾観測所のような『オールドスクール』な天文台を含む、国内の中小望遠鏡と、アマチュア・プロの垣根を超えた研究者の連携によって、太陽系外縁天体の大気検出という最先端の研究にも迫れることを示しました。大規模望遠鏡・観測装置だけに依存せず、機動的な多地点観測網を構築することで、太陽系の果てで起きる希少な現象を世界に先駆けて捉えられることが実証されたのです。今後、こうした連携観測は、巨大望遠鏡や宇宙望遠鏡による観測を補完しつつ、観測天文学の新しい柱になっていくと期待されます。

論文情報

論文タイトル

“Detection of an atmosphere on a trans-Neptunian object beyond Pluto”

著者

Ko Arimatsu, Fumi Yoshida, Tsutomu Hayamizu, Satoshi Takita, Katsumasa Hosoi, Takafumi Ootsubo, Jun-ichi Watanabe

掲載誌

Nature Astronomy

掲載日

2026年5月5日（日本時間）、2026年5月4日（現地英国時間）

DOI: [10.1038/s41550-026-02846-1](https://doi.org/10.1038/s41550-026-02846-1)

研究助成

本研究は、JSPS 科研費（課題番号 18K13606、21H01153）の支援を受けて実施されました。また本研究で実施した TABASCO 観測キャンペーンは光赤外線天文学大学間連携（OISTER）プログラムの一環として実施され、実施にあたっては国際掩蔽観測者協会東アジア（IOTA/EA）の支援を受けています。

用語解説

太陽系外縁天体

海王星より外側、太陽系外縁部を公転する天体の総称。カイパーベルト天体・散乱円盤天体・オールト雲天体が含まれ、極低温の世界であることから、太陽系誕生以降、活動性や変化がほとんどないと考えられてきました。

(612533) 2002 XV₉₃

本研究の観測ターゲットである、カイパーベルトに位置している太陽系外縁天体。軌道長半径は約 59 億キロメートル（地球と太陽の距離の約 40 倍）、軌道離心率は 0.13、軌道傾斜角は 13° で、観測当時は冥王星よりわずかに遠方、約 55 億キロメートル（地球と太陽の距離の約 37 倍）にありました。括弧内の 612533 は、軌道が十分よく分かり、国際天文学連合（IAU）の

小惑星センター (MPC) によって正式に登録された天体に与えられる永久番号です。一方、2002 XV₉₃ は発見時に付けられた仮符号で、2002 は発見年、最初の文字 X は発見年の 12 月前半に登録されたことを示します。後ろの V93 は、その半月の中での登録順を表す符号です。

恒星掩蔽 (恒星食)

手前の天体が背景の恒星の前を横切り、恒星の光を一時的に隠す現象。掩蔽される際の光の消え方を詳しく調べることで、横切る天体の大きさや形だけでなく、その周囲に薄い大気があるかどうか調べることができます。

揮発性物質 (超揮発性物質)

低温でも比較的気体になりやすい物質のこと。太陽系外縁天体では、メタン、窒素、一酸化炭素などの超揮発性物質が大気の原因になり得ると考えられています。

ナノバール (nanobar)

圧力を表す単位の一つで、1 ナノバールは 1 バール (=1000 ヘクトパスカル) の 10 億分の 1 の圧力に相当します。今回推定された 100~200 ナノバールという値は、地球表面の大気圧 (およそ 1 バール、すなわち 1000 ヘクトパスカル) と比較して非常に薄い大気であることを意味します。

TABASCO (タバスコ)

太陽系外縁天体の大気や環などを恒星掩蔽で調べるための連携観測キャンペーン。今回の 2002 XV₉₃ の恒星掩蔽イベント観測も、この枠組みの一環として実施されました。

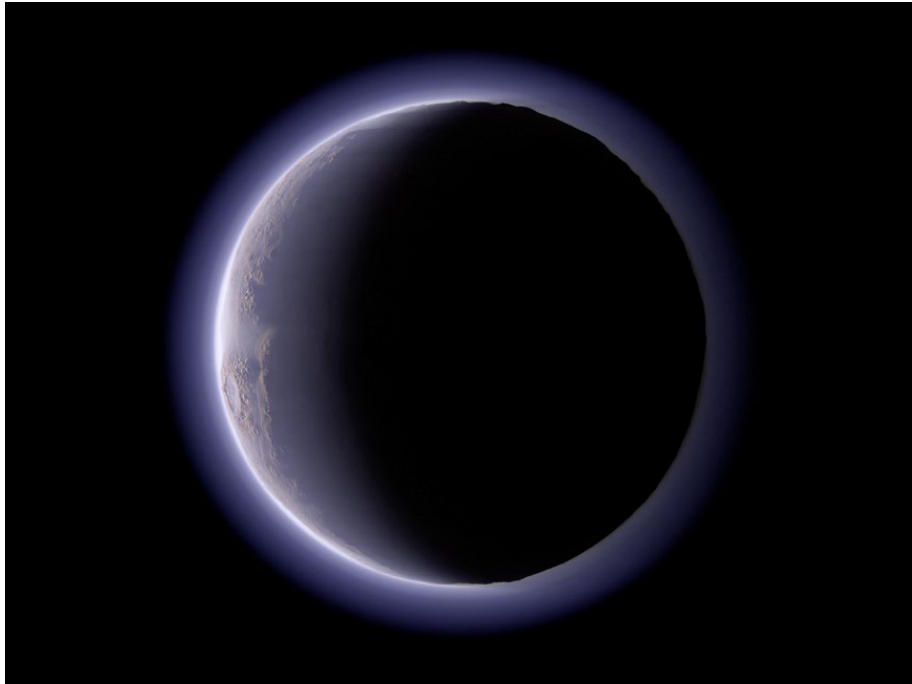
SoCoSoCo PONCOTS (ソコソコポンコツ)

京都での観測に用いられた小型の可視高速観測システム。口径 20 センチメートルの望遠鏡と高感度 CMOS カメラを組み合わせ、恒星掩蔽のような短時間で起こる現象を高い時間分解能で捉えることができます。前身の PONCOTS システムは 2022 年に、木星表面での天体衝突閃光を狙った観測としては、史上初めて検出に成功しました。

木曾観測所シュミット望遠鏡/Tomo-e Gozen (トモエゴゼン)

1974 年に長野県木曾郡に設立された木曾観測所の口径 1.05 メートルシュミット望遠鏡は、広い範囲の空を一度に観測できる広視野望遠鏡で、現在は東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センターによって運用されています。そこに搭載された Tomo-e Gozen は 84 枚の CMOS センサーで約 20 平方度の範囲の空を高速で連続撮像できる可視広視野動画観測システムで、2019 年に本格運用を開始しました。今回の研究では、この装置の高い感度と時間分解能によって、2002 XV₉₃ による恒星掩蔽のごくわずかな減光を精密に記録し、薄い大気存在を示す重要なデータを得ました。

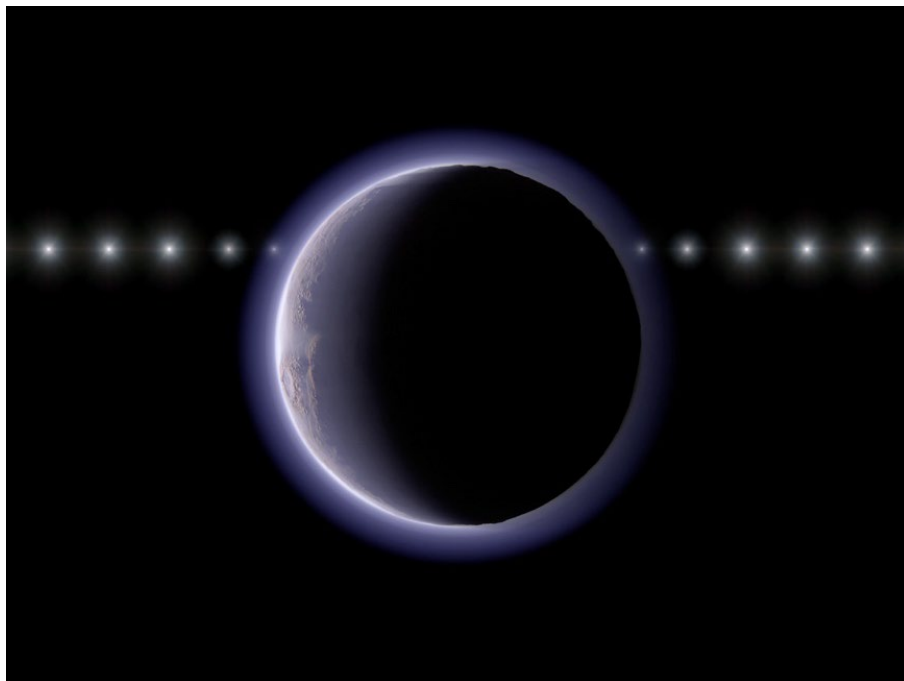
参考画像



参考画像 1：

本研究で大気が発見された太陽系外縁天体（カイパーベルト天体）、(612533) 2002 XV₉₃ の想像図。

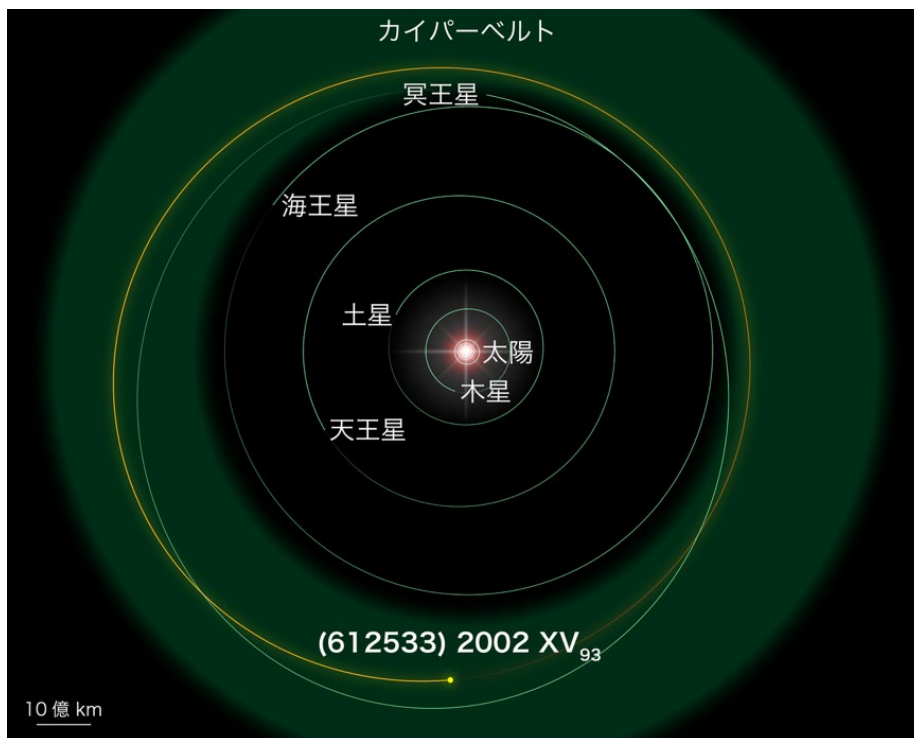
（制作：有松亘、クレジット：国立天文台）



参考画像 2：

本研究で大気が発見された太陽系外縁天体（カイパーベルト天体）、(612533) 2002 XV₉₃ が、背景の恒星を掩蔽する様子の想像図。

（制作：有松亘、クレジット：国立天文台）



参考画像 3 :

本研究で大気が発見された太陽系外縁天体、(612533) 2002 XV₉₃ の現在位置と軌道（黄点および黄線）、太陽系の惑星および冥王星の軌道（緑線）、およびカイパーベルト領域（緑帯）の位置との比較。

（制作：三上真世、クレジット：国立天文台）