

2023年2月16日

報道関係者各位

慶應義塾大学
国立天文台
神奈川大学

天の川銀河中心核近傍で「おたまじゃくし」分子雲を発見 ーブラックホールと戯れ中？ー

慶應義塾大学大学院理工学研究科の金子 美由起（修士課程2年）と同理工学部物理学科の岡 朋治教授、国立天文台、神奈川大学からなる研究チームは、天の川銀河（銀河系）の中心核「いて座A*（エースター）」近傍に孤立して存在する「おたまじゃくし」分子雲を発見しました。この分子雲は、天球面上で円弧状の形態を有し、その円弧に沿って視線速度が単調に変化していることが明らかになりました。この空間速度構造は点状重力源周りのケプラー軌道によって極めてよく再現され、その重力源の質量は太陽の10万倍と推定されました。また他波長において対応天体が存在しないことは、この点状重力源が高密度の星団などではないことを意味します。現時点では、点状重力源が中質量ブラックホール^{*1}である可能性が最有力視されます。本天体は、分子ガスの分布・運動の解析から発見された中質量ブラックホール候補天体の中で、最も確度が高いと考えられます。

本研究成果は、1月10日発行の米国の天体物理学専門誌『The Astrophysical Journal』に掲載されました。

1. 本研究のポイント

- ・天の川銀河の中心核近傍において「おたまじゃくし（Tadpole）」状の空間速度構造を持つ分子雲を発見。
- ・上記速度構造は、太陽の10万倍の質量をもつ点状重力源周りのケプラー軌道によって再現される。
- ・この点状重力源は、想定質量と対応天体の不在から、中質量ブラックホールである可能性を指摘。

2. 研究背景

宇宙にあるほとんどの銀河の中心には、太陽の数百万倍の質量をもつブラックホールが潜んでいます。このような超巨大ブラックホールは、より小さな質量のブラックホールの合体により形成・成長すると考えられています。しかし、形成の途中段階で現れることが予見される中質量（ 10^2 - 10^5 太陽質量^{*2}）のブラックホールについては、候補天体がいくつか報告されているものの、確実な検出例はありません。

銀河系中心核「いて座A*」もまた、太陽の400万倍の質量をもつ超巨大ブラックホールと考えられています。その近傍には、中質量（数千太陽質量）ブラックホールの存在が示唆されている星団「IRS13E」があります。しかしながら、IRS13Eが中質量ブラックホールを含むとする説には異論もあり、確実ではありません。一方で、本研究グループでは、銀河系中心分子層^{*3}に発見されたコンパクトかつ異様に速度幅^{*4}が広い分子雲の存在に基づいて、同領域にはIRS13E以外にも中質量ブラックホールが複数存在する可能性を指摘しています（2017年7月18日プレスリリース等）。ただし、ブラックホール以外の天体・要因でも同様の分子雲を生成することは可能であり、上記解釈は

一義的ではありません。その確認のためには、ブラックホールのような点状重力源が生じるガスの運動状態を、正確に再現している分子雲を検出することが本質的に重要です。このような研究は、銀河中心核超巨大ブラックホールの形成・成長過程を明らかにすることにつながるため、非常に重要であると言えます。

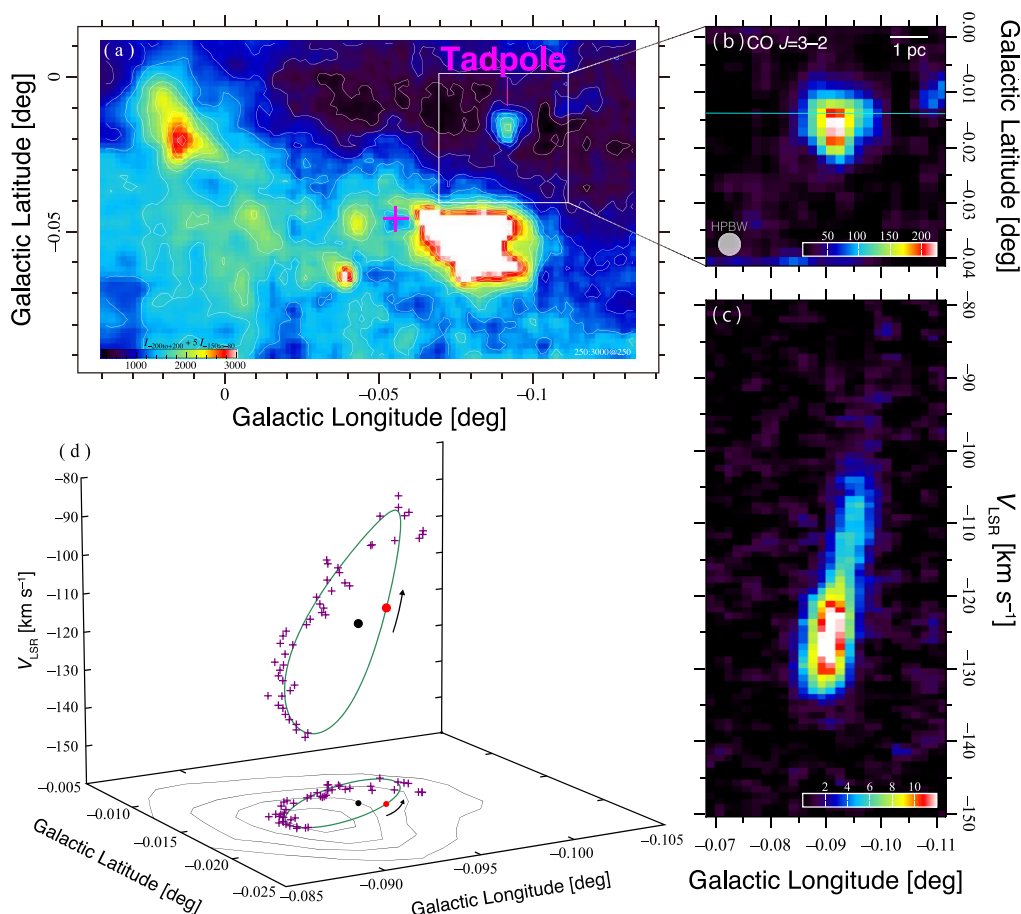


図1 (a) 銀河系中心核 いて座A* (十字印) 周辺の一酸化炭素 (CO) 346 GHz 回転スペクトル線の積分強度図。(b) 「おたまじゃくし」周辺の拡大図。(c) 図(b)中の水色線に沿って作成した位置-速度図。(d) 各速度におけるピーク強度位置 (紫十字) とケプラー軌道 (緑実線) を重ねた3次元図。

3. 研究内容・成果

本研究チームは、ジェームズ・クラーク・マクスウェル望遠鏡^{※5}を使用して取得された一酸化炭素 (CO) の回転スペクトル線サーベイデータを精査し、点状重力源との相互作用によって生じたと考えられるコンパクトかつ広速度幅な分子雲の探査を集中的に行いました。その結果の一つとして、「いて座A*」の北西、約3分角 (20光年の距離に相当) 離れた方向に一つの特異な分子雲を発見しました。これは周囲の分子雲群から明瞭に孤立しており、「おたまじゃくし」様の空間速度構造をもつという特徴があります (図1a-c)。国立天文台野辺山宇宙電波観測所45m望遠鏡で取得されたCOおよびCS (硫化炭素) サーベイデータ中でも、その存在が確認されました。

詳細な解析の結果、「おたまじゃくし」は天球面上で円弧状の形態を有し、それに沿って視線速度が連続的に変化していることが明らかになりました（図 1d）。この空間速度構造は、一つの閉じた軌道上に沿って分子ガスが分布・運動していることを示唆しています。そしてこの観測された空間速度構造は、10 万太陽質量の質点周りのケプラー軌道によって極めてよく再現されました。このことは、「おたまじゃくし」がそのように巨大な質量をもつ点状重力源を周回していることを意味しています。そして、複数の分子スペクトル線強度の情報から得られる物理状態のふるまいも、ガスが点状重力源に捕捉された様子を示していることが分かりました。

さらに本研究チームは、この点状重力源の正体を探るべく、「おたまじゃくし」を含む天域のさまざまな波長のイメージを確認しました。しかし、想定される位置に明るい天体が発見できないことから、点状重力源が星団である可能性は低いと考えられます。また、軌道要素から与えられる質量密度の下限値が膨大であることから、この点状重力源が中質量ブラックホールである可能性が強く示唆されます。以上の事実を総合すると、この「おたまじゃくし」は約 10 万太陽質量の不活性なブラックホールとの重力相互作用によって加速された分子雲であると考えられます。

4. 今後の展開

本研究により、銀河系中心核「いて座 A*」近傍に、新たに一つの中質量ブラックホール候補天体を発見しました。その痕跡である「おたまじゃくし」は周囲から明瞭に孤立しており、空間速度構造は単調なものでした。このことは、同分子雲の異常な速度幅に関して点状重力源との相互作用以外の解釈を棄却します。したがって、分子ガスの分布・運動から示唆された中質量ブラックホール候補天体の中で、最も確度が高いものであると考えられます。銀河系中心核「いて座 A*」から非常に近い距離にあることから、将来的に「おたまじゃくし」を駆動する中質量ブラックホールは超巨大ブラックホールに飲み込まれていく運命にあると考えられます。

本研究チームは、アルマ望遠鏡^{※6}を用いた高解像度観測を予定しています。これにより、ケプラー軌道上にある分子ガスを明瞭に捉えられる可能性があります。詳細な構造を捉えられれば、精密な軌道パラメータを決定できることが期待されます。また同様の研究では、過去に高分解能観測によって中質量ブラックホール候補天体の実体を捉えた例があります（2017 年 9 月 5 日プレスリリース）。したがって、アルマ望遠鏡での観測と対応天体の探索から、「おたまじゃくし」を形成する点状重力源の実体が明らかになるかもしれません。



図 2 中質量ブラックホールと戯れる「おたまじゃくし」の想像図

<参考文献>

- ・慶應義塾大学プレスリリース (2017年7月18日)
「天の川銀河中心部で新たに2つの『野良ブラックホール』候補を発見」
<https://www.keio.ac.jp/ja/press-releases/2017/7/18/28-21984/>
- ・慶應義塾大学プレスリリース (2017年9月5日)
「天の川銀河で中質量ブラックホール候補の実体を初めて確認」
<https://www.keio.ac.jp/ja/press-releases/2017/9/5/28-23915/>

<原論文情報>

本研究成果は、1月10日発行の米国の天体物理学専門誌『The Astrophysical Journal』に掲載されました。論文の題目、および著者と所属は以下の通りです。

“Discovery of the Tadpole Molecular Cloud near the Galactic Nucleus”

金子 美由起 (慶應義塾大学 大学院理工学研究科 修士課程2年)

岡 朋治 (慶應義塾大学 理工学部 物理学科 教授)

横塚 弘樹 (慶應義塾大学 大学院理工学研究科 修士課程2022年3月修了)

榎谷 玲依 (慶應義塾大学 理工学部 物理学科 研究員)

竹川 俊也 (神奈川大学 工学部 物理学教室 特別助教)

岩田 悠平 (国立天文台 科学研究部 特任研究員)

辻本 志保 (慶應義塾大学 大学院理工学研究科 博士課程2021年3月修了)

『The Astrophysical Journal』, January 10, 2023, vol. 942, Number 1, 46 (8pp)

<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/aca66a>

doi: 10.3847/1538-4357/aca66a

<用語説明>

※1) ブラックホール: 極端に強い重力を持ち、光すらも抜け出せないほど周囲の時空を歪める暗黒天体。アインシュタインの一般相対性理論によりその存在が予言された。

※2) 太陽質量: 天文学で使われる質量の単位。1太陽質量=1.99×10³⁰ kg。

※3) 銀河系中心分子層: 「いて座A*」から半径1000光年程度の範囲に広がる特に激しい運動状態の領域。

※4) 速度幅: 観測されるスペクトル線は、ドップラー効果により観測者との視線方向の相対速度(視線速度)に応じて周波数が増減する。この周波数の変化量を測定することで、天体の視線速度を知ることができる。周波数で表されたスペクトル線幅を視線速度に換算したものを「速度幅」という。

※5) ジェームズ・クラーク・マクスウェル望遠鏡: ハワイのマウナケア山頂にある、口径15mのサブミリ波望遠鏡。現在は東アジア天文台によって運用されている。

※6) アルマ望遠鏡 (ALMA: アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計): 南米のチリ共和国北部にある、アタカマ砂漠の標高約5000メートルの高原に建設された巨大電波望遠鏡。国立天文台を代表とする東アジア、米国国立電波天文台を代表とする北米連合、欧州南天天文台を代表とするヨーロッパなどの国際共同プロジェクトとして進められている。

※ご取材の際には、事前に下記までご一報くださいますようお願い申し上げます。

• 研究内容についてのお問い合わせ先

慶應義塾大学 理工学部 物理学科 教授 岡 朋治 (おか ともはる)

TEL : 045-566-1833 E-mail : tomo@phys.keio.ac.jp

<http://aysheaia.phys.keio.ac.jp/index.html>

• 本リリースの配信元

慶應義塾広報室 (望月)

TEL : 03-5427-1541 FAX : 03-5441-7640

E-mail : m-pr@adst.keio.ac.jp <https://www.keio.ac.jp/>

神奈川大学 広報部 (椎野)

TEL : 045-481-5661

E-mail : kohou-info@kanagawa-u.ac.jp

国立天文台 天文情報センター 広報室

TEL : 090-1257-7980 (広報室長 山岡)

E-mail : media_contact@ml.nao.ac.jp

国立天文台 野辺山宇宙電波観測所 広報グループ (西村)

TEL : 090-9358-0365

E-mail : atsushi.nishimura@nao.ac.jp

March 6, 2023

Keio University
National Astronomical Observatory of Japan
Kanagawa University

“Tadpole” Molecular Cloud Discovered near the Center of the Milky Way — Interacting with a Black Hole? —

A team of researchers has identified an isolated “Tadpole” molecular cloud near Sagittarius A* at the galactic nucleus of the Milky Way. The discovery was made by Miyuki Kaneko, a 2nd Year Master’s student in the Graduate School of Science and Technology at Keio University, and Professor Tomoharu Oka who works in the Department of Physics at the Faculty of Science and Technology at the same school. Researchers from the National Astronomical Observatory of Japan and Kanagawa University also contributed to the study. The molecular cloud they discovered is shaped like an arc in space and its radial velocity clearly varies monotonically along this arc. The researchers were able to replicate this spatial-velocity behavior by using a Keplerian orbit modeled around a point-like massive object (point mass) estimated to have a mass 100,000 times that of the Sun. Examinations of other wavelengths did not reveal any luminous counterpart, meaning that this point mass is not a high-density stellar cluster. At this point in time, the most likely explanation is that the point mass is an intermediate-mass black hole¹. This object may be the most convincing candidate for an intermediate-mass black hole among any that have been discovered from molecular gas kinematics.

This paper was published in the January 10 issue of *The Astrophysical Journal*, an American academic journal that specializes in astrophysics research.

1. Main Points of Research

- Researchers have discovered a molecular cloud with a tadpole-like structure in position–velocity space near the galactic nucleus of the Milky Way.
- This position-velocity structure can be reproduced by Keplerian motion around a point mass of 100,000 times that of the Sun.
- The discovered point-like massive “object” may, in fact, be an intermediate-mass black hole due to its assumed mass and the absence of such corresponding objects in that vicinity.

2. Background of Research

Black holes with millions of times more mass than the Sun lurk at the center of most galaxies in our universe. These “supermassive” black holes are believed to form and grow through smaller black holes merging. However, scientists have yet to confirm the existence of intermediate-mass black holes (those with 10^2 – 10^5 solar masses)² which should appear during the formation of a supermassive black hole, although several potential candidates have been proposed.

The nucleus of our Milky Way Galaxy, Sagittarius A*, also harbors a supermassive black hole with a mass of 4 million times that of the Sun. There is a cluster of stars in this vicinity known as “IRS 13E” which was suggested to have an intermediate-mass black hole (of several thousand solar masses). However, this hypothesis has not been proved and there are other competing explanations. The group conducting this current study, though, has pointed out the possibility that multiple intermediate-mass black holes could exist in the same general area other than IRS 13E, based on the discovery of compact clouds with unusually broad velocity widths³ (ref. July

18, 2017, press release) in the Central Molecular Zone⁴. These phenomena, however, may not be caused by a black hole either. It is possible for other objects and factors to generate similar molecular clouds, meaning that it is still open to interpretation. To confirm their hypothesis, they must be able to detect and accurately reproduce the gas kinematics that are produced by a gravitational mass point that resembles a black hole. This type of research is vital because it sheds light on the formation and evolution of the supermassive black holes at galactic nuclei.

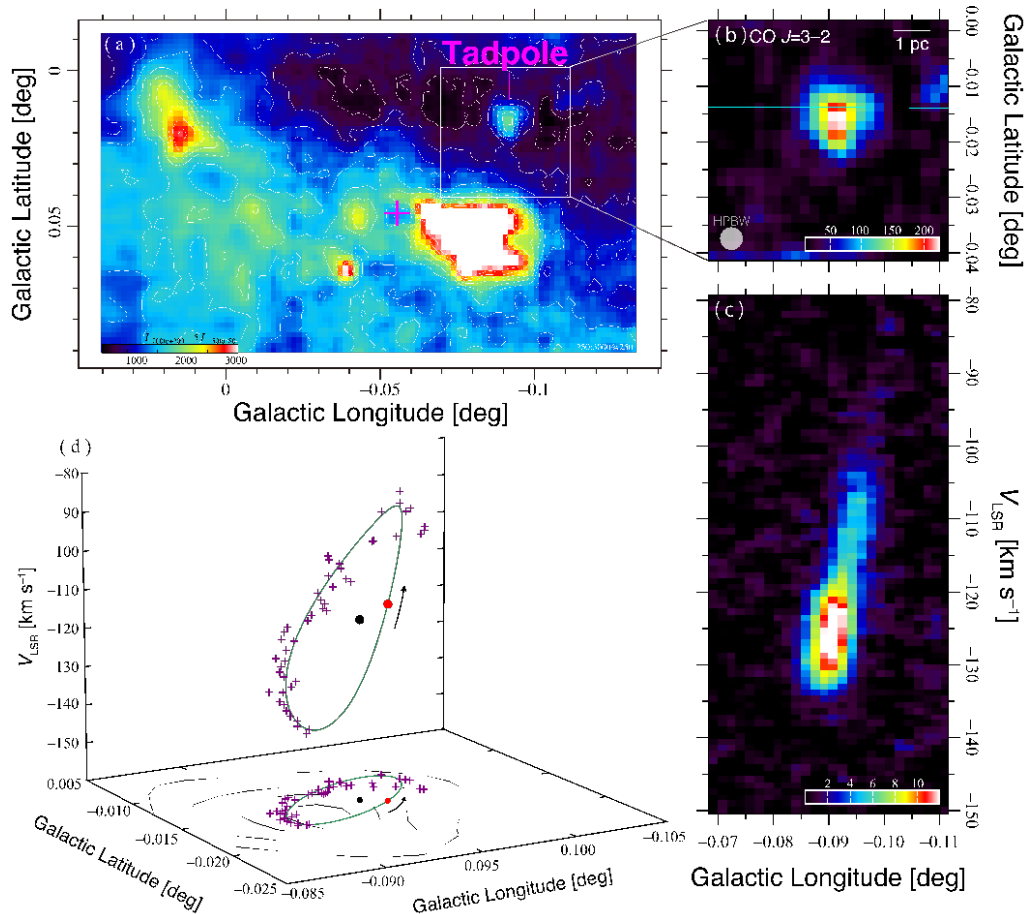


Figure 1: (a) Map of velocity-integrated CO 346 GHz emission near the galactic nucleus (Sagittarius A* is marked by a +). (b) Zoomed map of the area around the “Tadpole.” (c) Position-velocity map along the light blue line in Figure (b). (d) 3D diagram of intensity peak positions at each velocity (purple crosses) and Keplerian orbits (solid green lines).

3. Research Design and Findings

The research team used the James Clerk Maxwell Telescope⁵ to gather data on carbon monoxide (CO) line spectra and searched specifically for molecular clouds that were both compact and had broad velocity widths, characteristics they believed would imply the workings of a point mass as a source of gravity. One of their findings included a peculiar molecular cloud that was to the northwest of Sagittarius A*, about three arcminutes away (equivalent to 20 light years). This molecular cloud was clearly isolated and had a distinctive tadpole-like shape in position-velocity space (Figure 1: a-c). They were able to corroborate the existence of this object by using CO and CS line data from the Nobeyama Radio Observatory’s 45m telescope.

Detailed analysis revealed that the discovered molecular cloud is shaped like an arc in space and its radial velocity clearly varies monotonically along this arc. (Figure 1: d). This spatial velocity structure suggests that the molecular gas is moving and being distributed along a single closed orbit. The team was also able to reproduce this when using a Keplerian orbit around a presumed point mass of 100,000 times the mass of the Sun. This implies that the “Tadpole” is orbiting a point-like gravitational source that has enormous mass. In addition, the behavior of physical conditions suggested by the spectral line intensity ratios also demonstrates that the gas is being trapped by a point-like gravitational source.

The team then tried to identify this point mass by examining various wavelength images of the area surrounding the Tadpole. However, they were unable to find any luminous objects in the predicted vicinity, meaning that it is very unlikely the point mass is a star cluster. Furthermore, the lower limit to the mass density derived from the orbital parameters is enormous, suggesting the point mass is an intermediate-mass black hole. Taken together, these facts provide evidence that the “Tadpole” is a molecular cloud accelerated by the gravitational interaction with an inactive black hole of approximately 100,000 solar masses.

4. Future Developments

This research paper reveals the discovery of a new candidate intermediate-mass black hole in the vicinity of the galactic nucleus, Sagittarius A*. Their proof is the existence of a “Tadpole” molecular cloud which is clearly isolated from other molecular clouds, and which has a monotonous spatial velocity structure. This rules out the possibility that the Tadpole’s unusual velocity width could be caused by anything other than an interaction with a point-like gravitational source. Therefore, the Tadpole’s is the most convincing candidate for an intermediate-mass black hole that has been discovered from molecular gas kinematics thus far. Due to its extremely close proximity to Sagittarius A*, it is likely that the intermediate-mass black hole which drives the Tadpole will eventually be swallowed by the supermassive black hole at the galactic nucleus.

The research team from this paper plans to make high-resolution observations using the ALMA⁶. This may allow them to delineate the spatial velocity structure of molecular gas in a Keplerian orbit more clearly. Once this detailed structure is obtained, the scientists hope to determine its precise orbital parameters. In a similar previous study, high-resolution observations have captured emission from the immediate vicinity of a candidate intermediate-mass black hole (Press Release, September 27, 2017). Following these examples, the team’s ALMA observations and search for counterparts may unveil the nature and entity of the point mass that has formed the Tadpole.



Fig. 2: An artistic depiction of the “Tadpole” orbiting a black hole

References

- Keio University Press Release (July 18, 2017)
Two New Possible “Rogue Black Holes” found in the Center of the Milky Way
<https://www.keio.ac.jp/ja/press-releases/2017/7/18/28-21984/> (Japanese language only)
- Keio University Press Release (September 27, 2017)
First Detection of an Intermediate-Mass Black Hole Candidate in the Milky Way
<https://www.keio.ac.jp/en/press-releases/2017/Sep/27/49-24314/>

Details of Journal Article

This paper was published in the January 10 issue of *The Astrophysical Journal*, an American academic journal that specializes in astrophysics research. Below is the official title of the paper as well as the names and affiliations of its authors.

“Discovery of the Tadpole Molecular Cloud near the Galactic Nucleus”

Miyuki Kaneko	2nd year MA student, Graduate School of Science and Technology, Keio University
Tomoharu Oka	Professor, Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Keio University
Hiroki Yokozuka	Completed MA program in March 2022, Graduate School of Science and Technology, Keio University
Rei Enokiya	Project Researcher, Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Keio University
Shunya Takekawa	Assistant Professor, Department of Physics, Faculty of Engineering, Kanagawa University
Yuhei Iwata	Project Researcher, Division of Science, National Astronomical Observatory of Japan
Shiho Tsujimoto	Completed Ph.D. program in March 2021, Graduate School of Science and Technology, Keio University

The Astrophysical Journal, January 10, 2023, vol. 942, Number 1, 46 (8pp)

<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/aca66a>

doi: 10.3847/1538-4357/aca66a

Glossary and References

*1 Black Hole

A dark astronomical object that has such a strong gravitational pull that it distorts space-time so that not even light can escape. Its existence was predicted by Einstein's general theory of relativity.

*2 Solar Mass

A unit of mass used in astronomy. 1 Solar Mass = 1.99×10^{30} kg.

*3 Velocity Width

Observed spectral lines are deviated in frequency according to the relative velocity (line-of-sight or radial velocity) between the object and observer due to the Doppler effect. An object's radial velocity can be determined by measuring the amount of change in this frequency. A spectral line width expressed in frequencies can also be converted into radial velocity, which is then called “velocity width.”

*4 Central Molecular Zone

A region of the Milky Way Galaxy extending around Sagittarius A* with a radius of approximately 1,000 light years.

*5 James Clerk Maxwell Telescope

Submillimeter-wavelength radio telescope at the Mauna Kea Observatory in Hawaii. It is currently operated by the East Asia Observatory.

*6 The Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA)

A large radio interferometer on a plateau 5,000 meters above sea level in the Atacama Desert of northern Chile. The project is an international collaboration promoted by countries around the world with East Asia represented by the National Astronomical Observatory of Japan, the U.S represented by the North American Union, and Europe represented by the European Southern Observatory.

*Please direct any requests or inquiries to the contacts listed below in advance of any press coverage.

Inquiries about research

Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Keio University
Professor Tomoharu Oka
Tel. +81 45-566-1833
Email: tomo@phys.keio.ac.jp
<http://aysheaia.phys.keio.ac.jp/index.html>

Source of this release

Keio University Office of Communications and Public Relations (Mochizuki)
Tel. +81 3-5427-1541 Fax +81 3-5441-7640
Email: m-pr@adst.keio.ac.jp
<https://www.keio.ac.jp/en/>

Public Relations Office, Public Relations Center, National Astronomical Observatory of Japan
Tel. +81 90-1257-7980 (Head of the Public Relations Office, Yamaoka)
Email: media_contact@ml.nao.ac.jp

Public Relations Group, Nobeyama Radio Observatory, National Astronomical Observatory of Japan (Nishimura)
Tel. +81 90-9358-0365
Email: atsushi.nishimura@nao.ac.jp

Public Relations Department, Public Relations Division, Kanagawa University (Shiino)
TEL: +81-45-481-5661
Email: kohou-info@kanagawa-u.ac.jp