



平成31年4月11日

報道機関各位

自然科学研究機構 国立天文台
計算基礎科学連携拠点
工学院大学
情報・システム研究機構 統計数理研究所
総合研究大学院大学
東京大学大学院理学系研究科
東北大学
広島大学

史上初、ブラックホールの撮影に成功
— 地球サイズの電波望遠鏡で、楕円銀河 M87 に潜む
巨大ブラックホールに迫る —

イベント・ホライズン・テレスコープは、地球上の8つの電波望遠鏡を結合させた国際協力プロジェクトであり、ブラックホールの画像を撮影することを目標としています。2019年4月10日、研究チームは世界6か所で同時に行われた記者会見において、巨大ブラックホールとその影の存在を初めて画像で直接証明することに成功したことを発表しました。

この成果は、アメリカの天文学専門誌『アストロフィジカル・ジャーナル・レターズ』特集号に6本の論文として掲載されました。今回撮影されたのは、おとめ座銀河団の楕円銀河 M87 の中心に位置する巨大ブラックホールです[1]。このブラックホールは、地球から5500万光年の距離にあり、その質量は太陽の65億倍にも及びます[2]。

イベント・ホライズン・テレスコープは、世界中の電波望遠鏡をつなぎ合わせて、圧倒的な感度と解像度を持つ地球サイズの仮想的な望遠鏡を作り上げるプロジェクトです[3]。イベント・ホライズン・テレスコープは長年にわたる国際協力の結果であり、アインシュタインの一般相対性理論で予言された宇宙のもっとも極限的な天体を探る新しい手段を研究者たちに提供します。なお今年、一般相対性理論が歴史的な実験によって初めて実証されてから100年の節目の年に当たります[4]。

「私たちは、ついにブラックホールの姿を初めてとらえました。200人以上の研究者がチーム一丸となって成し遂げた偉大な科学的業績といえるでしょう」と、イベント・ホライズン・テレスコープの代表を務めるシェパード・ドールマン氏（ハーバード・スミソニアン天体物理学センター）は語っています。

ブラックホールは、莫大な質量を持つにもかかわらず非常にコンパクトな、宇宙でも特異な天体です。ブラックホールがあることで、その周辺の時空間がゆがみ、周囲の物質は激しく加熱されます。

「もしブラックホールのまわりに輝くガスのような明るいものがあれば、ブラックホールは『影』のように暗く見えるはずですが、これはアインシュタインの一般相対性理論から導き出せることですが、私たちはこれまでそれを直接見たことはありませんでした。」と、オランダ・ラドバウド大学のハイノー・ファルケ氏はコメントしています。「ブラックホールの重力によって光が曲げられたり捕まえられたりすることで、ブラックホールシャドウが生まれます。それを調べれば、ブラックホールという魅力的な天体の性質についていろいろなことがわかりますし、ブラックホールの質量を測定することもできます。」

複数のデータ較正や画像化手法を用いることによって、明るいリングの中に暗い部分が写し出されました。これこそが、ブラックホールシャドウです。イベント・ホライズン・テレスコープで繰り返し観測を行っても、このシャドウの存在は揺らぎませんでした。

「ブラックホールシャドウを写し出せたと確信した後、私たちはシミュレーション結果とこの画像を比較しました。シミュレーションには、ブラックホールのまわりのゆがんだ時空や超高温になったガス、磁場などさまざまな効果を取り入れています。観測で得られた画像は、理論的予測と驚くほどよく一致していました。これによって、ブラックホール質量推定や私たちが写し出した画像そのものの意味についても、確信を持つことができました。」と、東アジア天文台長であるポール・ホー氏は語っています[5]。

イベント・ホライズン・テレスコープを実現するためには、既存の8つの望遠鏡をアップグレードして結合する必要があり、これ自体が挑戦でした。望遠鏡はハワイやメキシコの火山、アリゾナやスペイン・シエラネバダ山脈の山々、チリのアタカマ砂漠、そして南極に設置されています。それぞれ観測条件は良い場所ですが、人間にとっては厳しい環境です。

イベント・ホライズン・テレスコープは、超長基線電波干渉計（Very Long Baseline Interferometry: VLBI）という仕組みを用いています。世界中に散らばる望遠鏡を同期させ、地球の自転を利用することで、地球サイズの望遠鏡を構成します。今回イベント・ホライズン・テレスコープが観測したのは、波長 1.3mm の電波でした。VLBIにより、イベント・ホライズン・テレスコープは解像度 20 マイクロ秒角という極めて高い解像度を実現できました。これは、人間の視力 300 万に相当し、月面に置いたゴルフボールが見えるほどです。

今回観測に使用された望遠鏡は、APEX（チリ）、アルマ望遠鏡（チリ）、IRAM30m 望遠鏡（スペイン）、ジェームズ・クラーク・マクスウェル望遠鏡（米国ハワイ）、アルフォンソ・セラノ大型ミリ波望遠鏡（メキシコ）、サブミリ波干渉計（米国ハワイ）、サブミリ波望遠鏡（米国アリゾナ）、南極点望遠鏡（南極）です[6][7]。得られた生データの合計は数ペタバイトにもなり、これらはドイツのマックスプランク電波天文学研究所とアメリカのマサチューセッツ工科大学ヘイスタック観測所に設置された専用のスーパーコンピュータで処理されました。

イベント・ホライズン・テレスコープの建設と今日発表された観測成果は、何十年にもわたる観測的・技術的・理論的取り組みの賜物です。さらに、世界中から集まった研究者たちの緊密な連携の結果でもあります。イベント・ホライズン・テレスコープを実現するために13のパートナー機関が力を合わせ、既存の観測装置を活用するとともにさまざまな機関からの支援も受けて活動してきました。主要な資金援助は、アメリカ国立科学財団と欧州連合の欧州研究会議、そして東アジア地域の資金配分機関

からのものです。

日本の研究者も、さまざまな面でこの研究に貢献しました。まず、日本と台湾・韓国、北米、欧州が共同で運用するアルマ望遠鏡は、観測に参加した望遠鏡の中でもっと感度が高く、イベント・ホライズン・テレスコープ全体の感度の向上に大きな貢献をしました。また、アルマ望遠鏡をイベント・ホライズン・テレスコープの一員とするために、山頂のアンテナ群から山麓施設にデータを伝送する装置は国立天文台が開発しました。さらに、日本はアジアのパートナーと共に東アジア天文台を設立しており、東アジア天文台がハワイのジェームズ・クラーク・マクスウェル望遠鏡の運用を担っています。

「日本の研究者は、ソフトウェアや研究においても貢献をしています。私たちは、『スパース・モデリング』と呼ばれる新しい手法をデータ処理に取り入れました。これにより、限られたデータから信頼性の高い画像を得ることができました。最終的には、4つの独立した内部チームが3つの手法でデータの画像化を行い、いずれもブラックホールシャドウが現れることを確認しました。」と、イベント・ホライズン・テレスコープ日本チームの代表である本間希樹 国立天文台教授・水沢 VLBI 観測所長は語ります。研究チームの一員で、2019年3月まで国立天文台に在籍し現在はマサチューセッツ工科大学ハイスタック観測所に移った森山小太郎研究員は「さらに私たちは、具体的な方法を変えながらおよそ5万通りもの画像化を行い、得られたブラックホールシャドウの画像の特徴が本当に信頼できるものであるかを入念に確かめました。」と語っています。

同じく研究チームの一員である田崎文得 国立天文台水沢 VLBI 観測所特任研究員は、「日本独自の手法でデータを解析し、ブラックホールシャドウの画像化に成功した時は、本当に興奮しました。さらに画像化の成功を世界中の仲間と共有できたことは、これまでで最も幸せな瞬間の一つです。」とその喜びを語っています。

また、台湾中央研究院天文及天文物理研究所の小山翔子 博士研究員は「画像化の前段階でも、独立に開発された3つの手法で解析を行い、解析結果が十分に一致することを検証しました。こうした途中経過にスポットライトが当たることはあまりありませんが、研究の一ステップごとにチームメンバーが緻密な努力を積み重ねてきたことが、今回の成果につながったのだと思います。」と語っています。

ドールマン氏は、「私たちは、一世代前ならまったく不可能であったことを成し遂げたのです。技術的なブレイクスルー、世界中の最高の望遠鏡たちをつなぐこと、革新的なデータ処理アルゴリズムなど、すべてがあわさって初めてブラックホールと事象の地平面に対するまったく新しい窓を開くことができたのです。」と結論しています。

脚注

1) ブラックホールは、光さえも抜け出すことができない完全に真っ暗な天体です。ブラックホールシャドウは、そのブラックホールにもっとも近くまで視覚的に迫れる理論的な限界といえます。ブラックホールの表面は「事象の地平面 (Event Horizon)」と呼ばれ、シャドウより2.5倍小さいサイズになります。M87の中心にある巨大ブラックホールの場合、事象の地平面の大きさはおよそ400億kmになります。

2) 巨大ブラックホールは、その名に反して非常にコンパクトな天体です。そのため、これまで直接観測することは不可能でした。ブラックホールのサイズはその質量に比例し、ブラックホールの質量が大きいほどシャドウも大きくなります。M87の

中心にある巨大ブラックホールは非常に大質量でありながら宇宙全体から見れば地球に場所にあるため、地球からの見かけの大きさが最も大きなブラックホールになります。このため、イベント・ホライズン・テレスコープの絶好の観測対象でした。

- 3) イベント・ホライズン・テレスコープを構成する各望遠鏡は、物理的に直接つながっているわけではありませんが、非常に精密な原子時計によってデータが正確に同期されています。今回の観測は 2017 年 4 月に行われ、波長 1.3mm の電波が観測されました。イベント・ホライズン・テレスコープの各望遠鏡は 1 日 350 テラバイトという膨大なデータを生み出し、ヘリウムガスが充填された高性能なハードディスクに蓄積されました。これらのデータは、マックスプランク電波天文学研究所とマサチューセッツ工科大学ハイスタック観測所にある専用の高性能スーパーコンピュータ（相関器）に運ばれ、処理されました。処理されたデータをもとに、研究者たちは苦心して自分たちで作ったソフトウェアを使って画像化を行いました。
- 4) 今からちょうど 100 年前の 1919 年、アフリカ沿岸のプリンシペ島とブラジルのソブラルで、皆既日食観測が行われました。この観測は、アインシュタインの一般相対性理論で予言される、太陽の重力による星の光の曲がりをとらえることを目的としていました。この時の観測と呼応するように、イベント・ホライズン・テレスコープの観測では研究者たちが世界各地の電波観測施設に散って観測を行い、重力に対する私たちの理解をふたたび検証しました。
- 5) 東アジア天文台（East Asian Observatory: EAO）は、イベント・ホライズン・テレスコープのパートナー機関であり、中国、日本、韓国、台湾、ベトナム、タイ、マレーシア、インド、インドネシアの協力で運用されています。
- 6) イベント・ホライズン・テレスコープでは、今後フランスの IRAM NOEMA 観測所、グリーンランド望遠鏡、キットピーク望遠鏡の参加により、感度がさらに向上する予定です。
- 7) アルマ望遠鏡は、欧州南天天文台、アメリカ国立科学財団、日本の自然科学研究機構が、カナダ国立研究機関、台湾科学技術省、中央研究院天文及天文物理学研究所、韓国天文宇宙科学研究所とチリ共和国の協力で運用しています。APEX は欧州南天天文台が運用しています。IRAM 30m 望遠鏡は、ドイツ・マックスプランク協会とフランス国立科学研究センター、スペイン国立地理研究所が共同で運用しています。ジェームズ・クラーク・マクスウェル望遠鏡は東アジア天文台が運用しています。アルフォンソ・セラノ大型ミリ波望遠鏡はメキシコ INAOE とマサチューセッツ大学が運用しています。サブミリ波干渉計は、スミソニアン天文台と台湾中央研究院天文及天文物理学研究所が共同で運用しています。サブミリ波望遠鏡は、アリゾナ電波天文台が運用しています。南極点望遠鏡はシカゴ大学が運用しており、イベント・ホライズン・テレスコープのための装置はアリゾナ大学から提供されました。
M87 は北天にあるため南極点望遠鏡から観測することはできませんが、データを較正するための参照天体の観測に参加しました。

この研究成果は、以下の 6 本の論文として、米国の天文学専門誌『アストロフィジカル・ジャーナル・レターズ』特別号に 2019 年 4 月 10 日付で掲載されました。

- First M87 Event Horizon Telescope Results I: The Shadow of the Supermassive Black Hole

(DOI: <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab0ec7>)

- First M87 Event Horizon Telescope Results II: Array and Instrumentation
(DOI: <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab0c96>)

- First M87 Event Horizon Telescope Results III: Data Processing and Calibration

(DOI: <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab0c57>)

- First M87 Event Horizon Telescope Results IV: Imaging the Central Supermassive Black Hole

(DOI: <http://doi.org/10.3847/2041-8213/ab0e85>)

- First M87 Event Horizon Telescope Results V: Physical Origin of the Asymmetric Ring

(DOI: <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab0f43>)

- First M87 Event Horizon Telescope Results VI: The Shadow and Mass of the Central Black Hole

(DOI: <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab1141>)

この研究は、文部科学省/日本学術振興会科学研究費補助金 (No. 18K13594, 18K03656, 18H01245, 18H03721, 18KK0090, 25120007, 25120008)、大学共同利用機関法人自然科学研究機構「ネットワーク型研究加速事業」、文部科学省ポスト「京」重点課題 9「宇宙の基本法則と進化の解明」および計算基礎科学連携拠点 (JICFuS)、東レ科学振興会東レ科学技術研究助成、住友財団基礎科学研究助成 (170201) 他、国際的な支援を受けて行われたものです。

<観測画像>

20190410_EHT_M87BH.jpg 【写真 1】

イベント・ホライズン・テレスコープで撮影された、銀河 M87 中心の巨大ブラックホールシャドウ。リング状の明るい部分の大きさはおよそ 42 マイクロ秒角であり、月面に置いた野球のボールを地球から見た時の大きさに相当します。

Credit: EHT Collaboration

<EHT 観測局位置図> 【写真 2】 【写真 3】

20190410_EHT_location_2017J.jpg

2017 年 4 月に行われたイベント・ホライズン・テレスコープの観測に参加した望遠鏡の配置。

Credit: NRAO/AUI/NSF

<ブラックホールシャドウ説明図> 【写真 4】

20190410_EHT_BHshadow.jpg

(上) ブラックホールの周囲の光の軌跡の模式図。光がある距離以上にブラックホールに近づくと、光はブラックホールの重力にとらえられ、ブラックホールを周回しながらやがてブラックホールに吸い込まれてしまいます。その距離よりも遠い位置を通過する光は、進行方向が曲げられるため、本来は地球に届かない光も地球に届くようになります。

(下) 地球に向かってくる光の経路を斜めから見た図。内側のある一定範囲では光がやってこないことがわかります。これが、ブラックホールシャドウです。

Credit: Nicolle R. Fuller/NSF

【お問い合わせ先】

広島大学宇宙科学センター 特任助教 笹田 真人

Tel : 082-424-6278

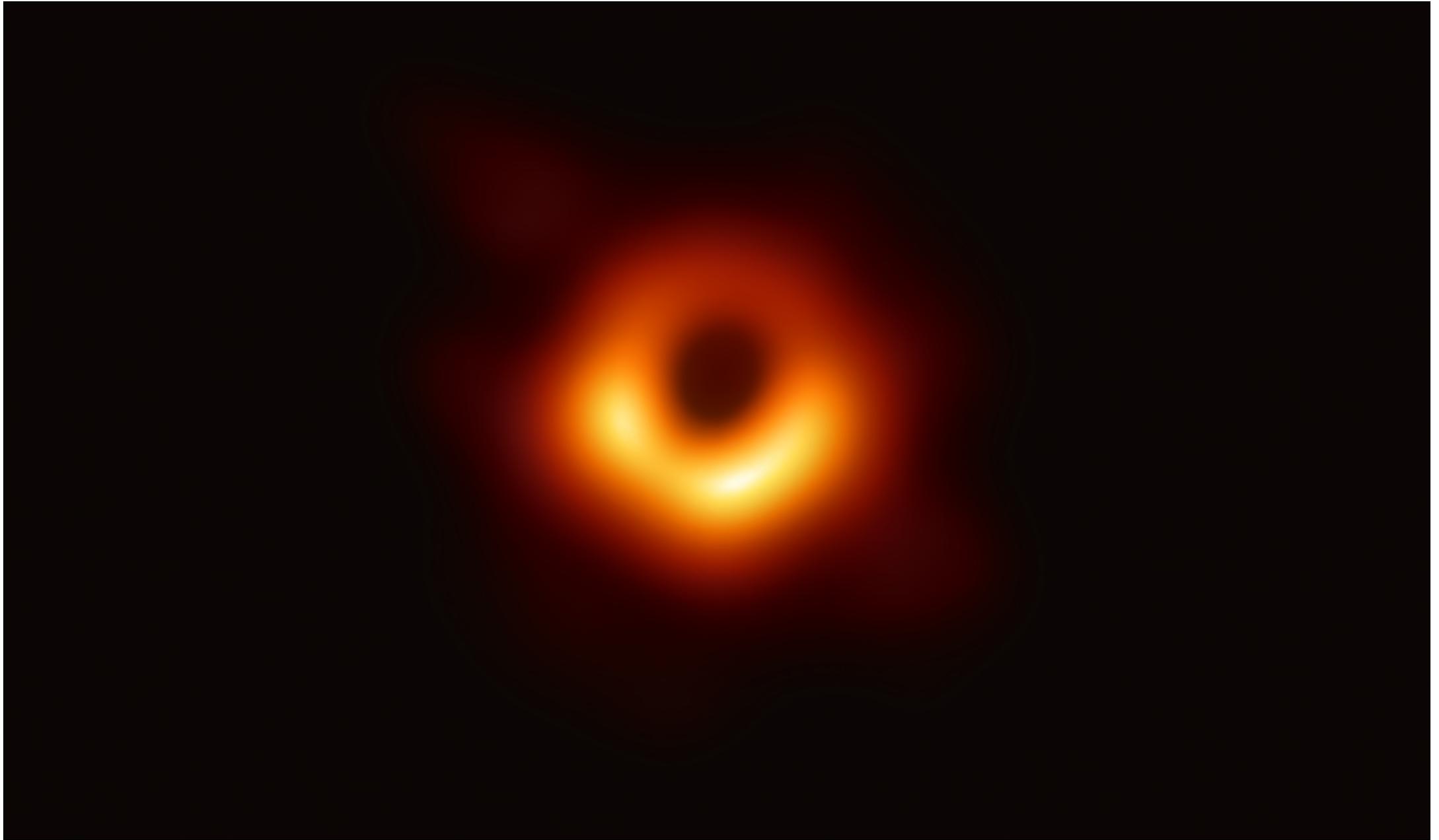
E-mail : sasadam@hiroshima-u.ac.jp

国立天文台 アルマプロジェクト 教育広報主任/助教 平松正顕

Tel : 0422-34-3630

E-mail : hiramatsu.masaaki@nao.ac.jp

発信枚数 : A4版 10枚 (本票含む)



イベント・ホライズン・テレスコープ (EHT)

— 各地の電波望遠鏡をつなぎ、地球サイズの仮想望遠鏡を構成 —

2017年の観測



- ALMA** アルマ望遠鏡
チリ・アタカマ砂漠
- APEX** APEX
チリ・アタカマ砂漠
- 30-M** IRAM 30m望遠鏡
スペイン・ピコベレタ
- JCMT** ジェームズ・クラーク・マクスウェル望遠鏡
ハワイ・マウナケア
- LMT** 大型ミリ波望遠鏡
メキシコ・シエラネグラ
- SMA** サブミリ波干渉計
ハワイ・マウナケア
- SMT** サブミリ波望遠鏡
アリゾナ・グラハム山
- SPT** 南極点望遠鏡
南極点基地



Event Horizon Telescope (EHT)

A Global Network of Radio Telescopes

2017 OBSERVATIONS



- ALMA**  Atacama Large Millimeter/submillimeter Array
CHAJNANTOR PLATEAU, CHILE
- APEX**  Atacama Pathfinder EXperiment
CHAJNANTOR PLATEAU, CHILE
- 30-M**  IRAM 30-M Telescope
PICO VELETA, SPAIN
- JCMT**  James Clerk Maxwell Telescope
MAUNAKEA, HAWAII
- LMT**  Large Millimeter Telescope
SIERRA NEGRA, MEXICO
- SMA**  Submillimeter Array
MAUNAKEA, HAWAII
- SMT**  Submillimeter Telescope
MOUNT GRAHAM, ARIZONA
- SPT**  South Pole Telescope
SOUTH POLE STATION



