

# イベント・ホライズン・テレスコープ よくある質問

## 目次

1. いて座A\*について
2. いて座A\*の観測結果からわかったことと、M87との違い
3. 2020年ノーベル賞と今回の結果の関係は？
4. 2017年の観測からいて座A\*の画像を得るまでについて
5. イベント・ホライズン・テレスコープ(EHT)プロジェクトについて
6. ブラックホールそのものについて
7. 望遠鏡について
8. EHTにおける日本の役割について
9. EHTの今後について

## 1. いて座A\*について

### 1.1 いて座A\*とはどんな天体なのか？距離は？どこにあるのか？

いて座A\*は天の川銀河中心にある天体です。電波からX線にわたる全ての波長帯で明るく輝く天体です。太陽系からいて座A\*までは約2万7000光年の距離です。天の川銀河全体の直径は約10万6000光年です。

### 1.2 予想されていたブラックホールの質量

いて座A\*の周囲の星の運動から、いて座A\*には非常に重くコンパクトな天体の質量があることが示唆されていました。天の川銀河中心に関するカリフォルニア大学ロサンゼルス校(UCLA)とマックス・プランク地球外物理学研究所(MPE)のごく最近の観測結果によれば、いて座A\*にある非常に重くコンパクトな天体の質量は太陽のおよそ400万倍と見積もられていました(詳しくは「よくある質問」3章もご参照ください)。

今回のEHT観測によって得られたいて座A\*の明るいリング状の構造とそれに縁取られた中心の暗いシャドウの画像から分かった巨大ブラックホールの質量も太陽の400万倍でした。ちなみにM87楕円銀河中心の巨大ブラックホールはこの約1500倍(太陽の65億倍)です。

### 1.3 いて座A\*のブラックホールの大きさはどのくらいですか？

今回のいて座A\*の観測結果から、ブラックホールが無回転の時の事象の地平面の半径(シュバルツシルト半径と呼ばれます)は、見た目の角度で9.6マイクロ秒角(1秒角は3600分の1度で1マイクロ秒角はさらにその100万分の1)と分かりました。地球からいて座A\*のブラックホールまでの距離は約2万7000光年離れていることと合わせると、いて座A\*のブラックホールのシュバルツシルト半径は約1200万kmであることが分かります。1200万kmは太陽の直径の約8.5倍、あるいは地球と月の距離の約31倍です。光速で40秒かかる距離です。

### 1.4 観測されたリングのサイズは事象の地平面とどういう関係にありますか？

ブラックホールシャドウを囲むように観測されたリングの直径は、シュバルツシルト半径(ブラックホールが無回転時の事象の地平線の半径)の約5倍(より正確には $3\sqrt{3} \approx 5.2$ 倍)になっています。地球から観測される天球上でのリングの角直径(視直径)はおおよそ $10 \text{ GM}/(c^2 D)$ となります。ただし、ここでGは重力定数cは光速、Mはブラックホールの質量、Dは地球からの距離です。いて座A\*のブラックホール質量は太陽の400万倍なので、シュバルツシルト角半径は約10マイクロ秒角となります。

### 1.5 これらの観測と一般相対性理論との間に矛盾はありましたか？

いいえ。いて座A\*の画像から得られた事象の地平面の視半径は、ほぼケプラーの法則にしたがって楕円軌道を描いている星たち(事象の地平面の半径の1000倍から10万倍の距離に観測されたもの)から予想されたものと矛盾しませんでした。リングの中央は最も明るいピークから30%暗く、事象の地平面の性質から示される特徴と合致していて、事象の地平面の存在が支持されています。この結果、ブラックホール以外の天体として考えられる天体のいくつかは排除されました。例えば、裸の特異点やボゾン星として提案されているいくつかの理論モデルです。それでもいくつかの天体の理論モデルにはブラックホールと同様、中央の暗い画像と似た特徴をもつものがあります。

### 1.6 観測された画像への星間散乱の影響は？

太陽系もいて座A\*も、同じ天の川銀河の面内にあるため、地球といて座A\*の間には、天の川銀河中の様々な物質が存在します。特に、天の川銀河中にある星間プラズマは、電波の波面を揺らがせる性質があるため、いて座A\*からやってくる電波は地球に到達するまでに揺らぎを受けます。「かげろう」のような現象に似ています。この星間散乱の影響によって、いて座A\*の像がぼやける困難が知られています。EHTの研究者たちはこの困難を克服するための事前準備研究で、星間散乱の影響度合いを観測的に調査してきました。これらの研究では東アジアVLBI観測網によるいて座A\*観測データも重要な役割を果たしています。星間散乱の影響度合いは、ピンボケを補正したいいて座A\*本来の姿を得るために欠かせない情報です。今回観測を行った波長1.3mmの電波では、星間散乱の影響はあまり大きくないことが、この事前準備研究で分かりました。実際に観測データを解析してみると、EHTのいて座A\*観測データからの画像化では星間散乱によるピンボケの補正なしでも大多数の画像からリング構造が得られました。またピンボケの補正込みで得られた画像からも補正の仕方によらず、同様のリング構造が得られました。したがって、観測された画像への星間散乱の影響は少ないと研究チームは結論づけました。

## 2. いて座A\*の観測結果からわかったことと、M87との違い

### 2.1 ブラックホール質量

今回のEHTのいて座A\*の観測から見積もられたブラックホールの質量は約400万太陽質量です(太陽に比べて約400万倍の重さです)。今までの星の運動の観測で得られていた値と一致しています。

## 2.2 M87と比べて光の環の見え方に違いがあるのか？その原因は？

いて座A\*もM87のどちらも光の環が確認できるという点で見え方はとてもよく似ています。いて座A\*とM87では、ブラックホールの質量は1500倍も異なりますが、どんな質量のブラックホールでも光の環が観測されるというのが相対性理論の予言であり、今回の観測結果はその予言通りになりました。また、いて座A\*、M87のどちらも我々から見てブラックホールの回転軸付近から見えています。そのため、共にきれいな光の環が見えました。

一方で、環に沿った光の明るさ分布には、いて座A\*とM87では多少の違いが見られました。しかしいて座A\*の環に沿った光の明るさ分布は時間変動による不定性が大きいため本当に違いがあるのかははっきりとしません。環に沿った光の明るさ分布に違いがあるのか？その確証を得るためにはさらなる研究が必要です。

## 2.3 M87と比べてなぜ短い時間で見え方が変化するのか？

ブラックホール近くのガスが安定的に軌道運動できる半径を最終安定軌道と呼びます。最終安定軌道の半径は、ブラックホールの質量に比例します。つまり、ガスの塊が最終安定軌道を一周するのに要する時間は、ブラックホールの質量に比例します。400万太陽質量のいて座A\*の場合、この時間は30分程度です。ブラックホールがもし回転していた場合、さらに短くなり、約4分です。M87の場合、ブラックホール質量はいて座A\*よりも1500倍重いので、最終安定軌道を一周するのに要する時間は5日から1か月程度です。ブラックホール周辺のガスの分布が一樣でなかった場合、ガスの軌道運動に伴って、リンク構造の見え方も変化します。上記の見積もりから、M87では1回の観測(一晚)では見え方は変化しませんが、いて座A\*では1回の観測の間に見え方が変化し得ます。今回報告されたEHTの観測データからも、いて座A\*の見え方が短い時間で変化している証拠が捉えられました。

## 2.4 天の川銀河の中心からはM87楕円銀河のようにプラズマジェットがでていのでしょうか？

いて座A\*は1974年に見つかりましたが、発見されて以来ははっきりしたジェットは見えていません。これは、数千光年にも渡って力強いジェットを出しているM87楕円銀河の巨大ブラックホールとは明らかに対照的です。いて座A\*がジェットを出しているのかは科学者の間でも結論が出ていませんが、仮に出ているとしてもM87に比べて弱く、かすかなものだと思われています。2017年のEHTの観測は、そのような弱いジェットからの電波の放射を検出できるほどの感度はありませんでした。今後EHTの観測によっていて座A\*のより良い画像が得られれば、この疑問に迫れるでしょう。

## 3. 2020年ノーベル物理学賞と今回の結果の関係は？

2020年のノーベル物理学賞はペンローズ氏、ゲンツェル氏、ゲズ氏に与えられました。ペンローズ氏は「ブラックホール形成が一般相対論の確固たる予言であることの(理論的)発見」、ゲンツェル氏、ゲズ氏は「天の川銀河中心の超大質量コンパクト天体の(観測的)発見」により受賞しています。このノーベル賞研究は、今回のEHT観測と極めて密接かつ相補的な関係にあります。

ゲンツェル氏とゲズ氏は、VLT(Very Large Telescope)やケック望遠鏡による天の川中心領域の赤外線観測を実施し、S2と呼ばれる天の川中心を公転運動する恒星を発見しました。その結果、太陽の約400万倍もの質量の天体が125天文単位もの狭い領域に存在していることが明らかになりました。1天文単位とは地球と太陽までの距離で、125天文単位は太陽系のサイズよりも小さいです。このようなコンパクトかつ大質量な天体の筆頭としてブラックホールが考えられていましたが、他の種類の天体である可能性も考えられていました。そこでこれらの候補天体で予想される放射イメージ・サイズ(およそ0.4天文単位)の観測を初めて実施したのがEHTであり、一般相対論で予想されていた自転を伴うブラックホールがもっともらしいという結論が得られました。巨大ブラックホールの確固たる証拠が得られるとともに、S2で観測されたスケールの100分の1以下ものスケールでの観測でも矛盾のない強固な答えが得られました。

ペンローズ氏の理論研究との関係も含むより詳細な説明はメインページの「本研究のインパクト(リンク)」をご覧ください。

## 4. 2017年の観測からいて座A\*の画像を得るまでについて

### 4.1 電波干渉計による撮像はどのように行うのですか？

写真を撮るような方法でブラックホールの画像を撮るのに十分な解像度を得ようとする、非常に大きな口径の望遠鏡が必要となり、いまの技術では実現不可能です。現在の技術で2019年に発表したようなブ

ブラックホールの画像を撮るには、電波望遠鏡を組み合わせることで電波干渉計を構成して観測データを得ることが必要となります。そうして得られた干渉計データから写真のような画像へ画像化するには、各望遠鏡のデータを組み合わせる相関処理を行い、さらに画像化が必要です。この一連のデータ処理を注意深く進めるには高度な技術が必要となります。

#### 4.2 どうしてデータ解析に時間がかかったのですか？

画像化までには一連のデータ処理が必要です。そのいくつかの段階では、非常に多くの計算処理が必要です。計算量だけを考えれば、全ての計算は最新のスーパーコンピュータを使えば数ヶ月ですみますが、一度処理をすればそれで科学的な成果を得られる、というわけにはいきません。データの較正、そして問題のあるデータの特定のため、ソフトウェアを改良して再度データ解析を行う、といった手続きを何度も繰り返し行う必要があります。このため、長い時間がかかります。

他の最先端の科学実験でも同様ですが、この際に必要となる計算ツールの開発もEHTのプロジェクトの一部です。既成のツールを使っても、EHTの観測データに対しては必ずしも期待通りの処理結果にならないからです。

#### 4.3 時間のかかる相関処理はどのように行われましたか？

まず、EHTで使用する望遠鏡の中には、ALMAやSMAのように、それ自体が小型の望遠鏡網となっているものがあります。これらは他の望遠鏡と組み合わせる前に、小型望遠鏡網の複数のアンテナからの信号を局所相関器と呼ばれるスーパーコンピュータでひとつに合成し、感度を上げます。この処理には数週間の計算時間を要し、データ総量は個々の小型望遠鏡網のデータを合成することで約1000分の1にまで減少します。これと似てはいるものの、より長く、より複雑な処理となるのが、VLBI相関器と呼ばれるスーパーコンピュータの処理です。ここでは、すべてのEHTの観測局のデータを結合します。観測時の地球の自転や公転など、電波干渉計に影響を与える既知の効果を考慮しながら、EHTの電波干渉計網の任意の2つの望遠鏡間で同時に観測した天体信号の「相関」(同時検出)を短い観測時間幅と電波の周波数幅で計算していきます。全てのデータを処理するには数ヶ月もかかります。いったんデータの処理が完了しても、さらに画像化への処理を続けていく中でデータの問題が発覚したり、相関処理のソフトウェアが大幅に更新されたりすれば、処理をやり直さなければなりません。相関処理はマサチューセッツ工科大学ヘイスタック観測所(米国)とマックスプランク電波天文学研究所(ドイツ)で独立して行われました。相関処理の後、データは数テラバイトまで圧縮され、研究者はそのデータを妥当な時間で詳細に調べられるようになります。

#### 4.4 干渉計データからどのように画像化するのですか？

電波干渉計観測で得られるデータは写真のような画像そのものではなく、天体画像をフーリエ変換したものです。そのためブラックホールシャドウの画像を得るには、取得したデータに逆フーリエ変換をほどこして画像化する必要があります。ただし、フーリエ変換として得られるデータは全体の一部のみであるため、そのままでは逆フーリエ変換が一意に定まらず、画像を得ることができません。そこで、画像に関する何らかの仮定のもとで画像を再構成します。この操作が画像化です。

#### 4.5 いて座A\*の画像化に用いられた手法はどのようなものですか？

2017年4月のいて座A\*の観測では一晩の観測中に天体の明るさ・構造が変化していることが強く示唆されました。しかし、干渉計のデータから画像化を行う既存手法ではこのような観測中に起きる天体の構造の変化をうまく取り扱うことができません。EHTでは観測時間中のいて座A\*の平均的な構造を画像化するために、天体の構造の変化にも対応できる新しい画像化技術の開発に取り組みました。M87の画像化の際に用いられた従来法(DIFMAP)、米国提案法(eht-imaging)、日本提案法(SMILI)はこの変動の影響を補正するための改良が加えられました。さらに、新たにベイズ統計に基づくカナダ提案法(THEMIS)が加わり、4つの画像化の方法が用意されました。

#### 4.6 最終的な画像はどのように得られましたか？

観測から得られた干渉計のデータは天体画像のフーリエ変換の一部しかないため、画像を一意に復元するには不十分です。4つの画像化手法はそれぞれ異なる仮定によって画像を求めますが、データと十分に適合する画像はそれぞれの手法で複数求められます。今回は4つの手法を用いて何千もの画像が得られました。

得られた画像はさまざまでしたが、この画像群を画像の特徴に基づいて4つのグループに分けると、大多数の画像ではリング構造を持つことを突き止めました。取得された画像群や用いられた手法のさらなる精査ののち、これらの画像群はいて座A\*にリング構造があることを強く示していることがわかりました。最終画像は得られた何千もの画像を平均することで得られました。

今回の画像化に用いたデータは今後EHTのwebページから公開されます。

## 5 イベント・ホライズン・テレスコープ(EHT)プロジェクトについて

### 5.1 EHT・プロジェクトとは何ですか？

世界中にある電波望遠鏡を結合し、「ブラックホールシャドウ」を撮影するための国際協力プロジェクトです。

### 5.2 EHT・プロジェクトには、何人の研究者が参加していますか？ そのうち日本の機関に所属する研究者は何人ですか？

EHT・プロジェクトには、世界中から300名を超える研究者が参加しています。そのうち日本の機関に所属する研究者は14名(但し、今回の論文に参加している研究者は13名)、海外の研究機関に所属する日本人研究者は8名です。

### 5.3 EHT・プロジェクトに参加している機関は、どこですか？

EHTは以下13の出資機関が構成する理事会(EHT Board)を中心に多くの研究者達の国際協力で運用されています。

- ・中央研究院天文及天文物理学研究所(台湾)
- ・東アジア天文台
- ・ゲーテ(フランクフルト)大学(ドイツ)
- ・マサチューセッツ工科大学ヘイスタック天文台(米国)
- ・ミリ波電波天文学研究所(フランス・スペイン)
- ・アルフォンソ・セラノ大型ミリ波望遠鏡(メキシコ)
- ・マックスプランク電波天文学研究所(ドイツ)
- ・自然科学研究機構国立天文台(日本)
- ・ペリメーター研究所(カナダ)
- ・ラドバウド大学(オランダ)
- ・スミソニアン天体物理学観測所(米国)
- ・アリゾナ大学(米国)
- ・シカゴ大学(米国)

EHTに研究者個人として参加しているメンバーの所属機関は21ヶ国/地域の120機関にのぼります。

### 5.4 EHT・プロジェクトはどのようにして発足したのですか？

遠く離れた電波望遠鏡を結合して仮想的な巨大電波望遠鏡を構成する技術(超長基線電波干渉計: Very Long Baseline Interferometer: VLBI)は、1967年にカナダで初めて実現しました。その後、米国と欧州の望遠鏡、米国と欧州と日本の望遠鏡をつないだVLBI観測が1980年代に成功し、地球サイズの望遠鏡を実現するための技術的な素地が整って行きました。

EHTに関する初めての会合が持たれたのは、2009年のアメリカ天文学会においてでした。その後の2012年、EHTプロジェクトを構成するパートナー機関が集った最初の会合がアリゾナで開催され、趣意書に署名が行われました。これと前後して、現在EHTに参加している各望遠鏡において、VLBI観測を実現するための装置開発が実行されました。

ブラックホールシャドウを現実的に撮影できる能力を備えた観測が実行できるようになったのは、2017年です。

### 5.5 EHTプロジェクトにはどれくらいのお金がかかっていますか？

EHTでは、既存の望遠鏡を一部改良してネットワークに組み込んでいます。このため、EHTのためだけにかかった望遠鏡運用費用を見積もるのは困難です。

## 6 ブラックホールそのものについて

### 6.1 ブラックホールとは何ですか？

ブラックホールとは、非常に大量の物質が極限まで狭い領域に押し込められた天体です。このためたいへん重力が強く、光さえも抜け出すことができません。光も一切出てこられないことから「真っ黒(ブラック)」で、あらゆるものを吸い込む「穴(ホール)」なので、「ブラックホール」と呼ばれています。

ブラックホールとその外側を分ける境界面(ブラックホールの表面)を、「事象の地平面(イベント・ホライズン:event horizon)」と呼びます。事象の地平面に達した場合は、光を含むあらゆるものがそこから抜け出すことができません。事象の地平面の外側の領域は、重力の影響が非常に強く時空間は大きくゆがんでいますが、光や物質がそこから逃げ出すことは可能です。このようなブラックホールのすぐ近くの領域からやってきた光や電波を捉えることで、ブラックホールそのものやブラックホール周囲の強重力環境についての情報を得ることができます。

EHTは、この「事象の地平面」のスケールまで見分けられる画像を撮影することを目指しているため、この名がつけられました。

## 6.2 ブラックホールはどのようにしてできたのですか？

太陽の数倍の質量を持つブラックホールは、太陽のおよそ20倍より重い恒星が核融合反応を終えて自重を支えきれなくなり、潰れて一点に収縮することでできると考えられています。このようなブラックホールは、私たちが住む天の川銀河の中にも多く存在すると考えられています。

一方、多くの銀河の中心には、太陽の数百万倍から数十億倍もの質量を持つ巨大ブラックホールが存在しています。巨大ブラックホールの成因は、未だによくわかっていません。宇宙の進化の中でブラックホールが周囲の物質を吸い込み続けて巨大になったのか、あるいは多くのブラックホールが合体することで巨大になったのか、いくつかの説があり、論争と研究が続けられています。

## 6.3 光を出さないブラックホールを、どのように観測するのですか？

ブラックホールは光も発しませんので、真っ暗な宇宙にブラックホールが単独で浮かんでいると、その姿をとらえるのは困難です。これまでに行われてきたブラックホールに関する観測は、いずれもブラックホールの周囲に存在するガスや星が放つ光や電波・X線などをとらえることで、間接的にブラックホールについての知見を得ようとするものでした。

例えば、ブラックホールに吸い込まれていく物質は、ブラックホールの周囲に円盤(降着円盤)を作ります。ブラックホールの強い重力に引かれて円盤に落下してきた物質は、そのエネルギーを熱に変えることから、円盤は非常に高温になります。高温の円盤からはエックス線や可視光、電波などさまざまな電磁波が発せられます。これを観測することで、ブラックホールに関する研究を行うことができます。例えば、円盤に含まれるガスが放つ特定の波長の光を観測すると、光のドップラー効果からその回転速度を導き出すことができます。速く回転している物体には遠心力が強く働きますので、猛烈な速度で回転する円盤が飛び散ってしまわないということは、遠心力に負けないほどの重力で円盤を強く引き付ける非常に質量の大きな天体が中心に位置していると考えられます。ブラックホールが存在するという間接的な証明は、このような観測によってもたらされました。EHTでは、ブラックホールのごく近傍に存在するガスが放つ電波を観測し、ブラックホールのごく近傍のようすを非常に高い解像度で画像化することによって、ブラックホールが存在することを視覚的に証明することが可能になりました。

最近では、ブラックホール同士が合体するときに発生する重力波をとらえることが可能になり、ブラックホールの新しい研究手段として注目を集めています。

## 6.4 ブラックホールはこの宇宙にいくつくらいあるのですか？

6.2で述べたように、ブラックホールには恒星質量ブラックホールと巨大ブラックホールの2種類があります。恒星質量ブラックホールの候補は、天の川銀河の中で35天体程度発見されていて、そのうち15天体ほどがブラックホールである可能性が非常に高いと考えられています。恒星質量ブラックホールは重い恒星の死によって作られることを考えると、天の川銀河の誕生から現在までの間(おそらく100億年以上の期間)に生まれて死んだ重い恒星の数だけブラックホールがあると考えられます。その総数は、およそ1億個という研究もあります。また天の川銀河の外でも恒星質量ブラックホールが発見されています。2022年現在、重力波検出器LIGO/Virgoによって恒星質量ブラックホールを含む連星合体からの重力波信号が88イベント検出されており、多数のブラックホールの存在が証明されています。

一方、巨大ブラックホールは現在の宇宙に存在するほぼすべての大きな銀河の中心にあると考えられています。銀河は宇宙の中に何百億個、何千億個もあるとされているため、巨大ブラックホールの総数も莫大なものになります。

## 6.5 EHTで画像が撮影できる可能性のあるブラックホールはいくつありますか？たくさんあるブラックホールのうち、一部しか観測できないのはなぜですか？

ブラックホールは宇宙に数多くありますが、現在のEHTでブラックホールシャドウの写真を撮影することが可能なものは、天の川銀河の中心にある「いて座A\*」と楕円銀河M87の中心にある巨大ブラックホールのふたつです。

まず、天の川銀河の中にもたくさんある恒星質量ブラックホールは、質量が小さいため、シャドウも極めて小さくなります。地球からの距離が比較的近いものでも、そのシャドウの地球から観測した時の見かけの大きさは大変小さく、EHTで画像を撮影することはできません。

銀河の中心にある巨大ブラックホールは、質量が大きいためシャドウも大きくなります。シャドウの見かけの大きさは、ブラックホールの質量と地球からの距離に依存します。いて座A\*とM87中心の巨大ブラックホール以外は、距離が遠かったり質量が小さかったりするためにシャドウはやはり小さくなり、現在のEHTでそれらを画像化することはできません。

## 6.6 ブラックホールの中はどうなっているのですか？

いろいろな理論的研究がありますが、事象の地平面の内側の情報は一切出て来ないので、観測でそれを確かめることはできません。仮に内側に入って、状態を調べたとしても、そのことを外に出て誰かに伝えることはできません。一般相対性理論に基づいて想像すれば、これまでに事象の地平面内に吸い込まれた物質や光が中心の特異点(回転ブラックホールではリング状の特異点)に向かって運動し続けていることとなります。

## 6.7 もし私がブラックホールに吸い込まれたら、何が起きますか？

アインシュタインの一般相対性理論によれば、事象の地平面は、何か物質的な壁のようなものではありません。巨大なブラックホールの場合には、その面を通過してもほとんど何も変わったことは起きません。ただ、振り返ってその外側にいられなくなるだけです。太陽程度の質量のブラックホールの場合は、人の頭と足にかかる重力が非常に大きく違うので、その力の差(潮汐力)で人が引き伸ばされてしまうこととなります。

## 6.8 もし物体がブラックホールに吸い込まれるのを外から見たら、どのように見えますか？

事象の地平面に近づいていくと、そこからの光はどんどん外側に伝わるのが遅くなり、同時に弱くなっていきます。事象の地平面の内側に入ってしまうと、そこからの光はついに届かなくなってしまいます。したがって、物体が事象の地平面を通過する瞬間を外から観測することはできません。

## 6.9 ブラックホールを観測する意義は何ですか？

アインシュタインの一般相対性理論は、これまで弱い重力場についてのみ正しいことが確認されてきました。強い重力場で本当に正しいかどうかは、現代物理学の大問題の一つです。最近、重力波が初めて検出され、数十太陽質量のブラックホールが存在することが証明されましたが、それでもまだ事象の地平面のごく近くの時空が一般相対性理論と一致しているかどうかは確認できていません。EHTの観測は、重力波研究と相補的であり、巨大ブラックホールの事象の地平面のごく近傍の時空を光の伝播を通して調べ、それが一般相対性理論と一致しているかどうかを確認することができます。

今回のいて座A\*の観測から、一般相対性理論における回転ブラックホールのシャドウの大きさとのずれは10%以内であることが示されました。前回のM87の観測と合わせて、一般相対性理論が3桁の異なる重さのブラックホールにおいて正しいことがEHTによる強い重力場の観測で検証されました。

強い重力場の理論は、宇宙の始まりを理解するためにも必要です。そこでは強い重力場の理論と量子力学の正しい融合が必要であり、それは未だに成されてはいません。

巨大ブラックホールは銀河の中心にあり、ブラックホールによる物質の加速、加熱、電磁場の増幅、それによるエネルギー放出が銀河全体の進化に多大な影響を与えます。実は宇宙で最も効率の良いエネルギー放出の場所は、恒星ではなく、ブラックホール近傍です。そのような場所でのプラズマの物理もまだ未解明な点が多く、銀河の進化の理解を妨げています。銀河中心の活動の中で最も顕著なものが、細く絞られたプラズマ噴出(ブラックホールジェット)です。これまでのEHTの観測で、M87のジェットはブラックホールのエネルギー自体を引き抜いて駆動するという理論と整合的であることがわかっています。一方で、いて座A\*には強いジェット噴出が観測されていません。M87といて座A\*におけるジェットの規模の違いが、ブラックホールの性質の違いによるものなのか、今後のEHTの研究で明らかにできるかもしれません。

## 7 望遠鏡について

### 7.1 超長基線電波干渉計(Very Long Baseline Interferometer: VLBI)とは何ですか？

VLBIとは、電波干渉計の一種です。望遠鏡の解像度(細かいものを見分ける能力)は、望遠鏡の鏡(電波望遠鏡の場合、アンテナの口径)の大きさに比例して良くなります。一つの巨大な望遠鏡を用意することができなくても、小さな望遠鏡を複数用意し、同時に同じ天体を観測して、それぞれの望遠鏡で取得されたデータをうまく(電波の位相を合わせて)結合することによって、望遠鏡間の距離に相当する仮想的な巨大な望遠鏡を形成することが可能です。これが電波干渉計で、ケンブリッジ大学のマーティン・ライル等によ

て考案・実証されました(マーティン・ライルは1974年にノーベル賞を受賞)。電波干渉計の多くは、望遠鏡同士をケーブルで結んで、ケーブルを通じて取得されたデータを一か所に集めています。集まったデータを相関器と呼ばれる計算機を使って合成することで、アンテナ群全体をひとつの巨大な望遠鏡として機能させることができます。

VLBIの場合、望遠鏡同士は何千kmと離れた場所に設置されている場合が多く、個々の望遠鏡はケーブルで互いに結ばれていません。代わりに、各望遠鏡で記録媒体(例えばハードディスク)にデータを記録します。そして後日、全望遠鏡の記録媒体を一か所に集め、相関器でデータを合成するための処理を行います。各望遠鏡でデータを取得・記録する際、正確な時刻情報を持ち合わせていないとデータ合成ができないので、VLBIを構成する望遠鏡はそれぞれに高精度の時計(原子時計)を持っています。

**7.2 ブラックホールの画像を撮るのに、なぜ電波望遠鏡が必要なのですか？可視光望遠鏡やエクソ線望遠鏡では撮影できないのはなぜですか？**

いて座A\*のリングの差し渡しのおおよそ52マイクロ秒角(1秒角は3600分の1度で1マイクロ秒角はさらにその100万分の1)と極めて小さく、これだけ小さなものを解像することができるのは、現在のところ電波望遠鏡をつなぎ合わせるVLBI技術しかありません。したがって、電波望遠鏡が必要となったのです。

**7.3 アルマ望遠鏡自体も電波干渉計ですが、具体的にどういう仕組みで、アルマ望遠鏡がイベント・ホライズン・テレスコープの観測に参加するのでしょうか？**

EHTの観測には、約40台のアルマ望遠鏡アンテナが参加しています。これらのアンテナが個別にVLBI観測の1局として参加しているわけではなく、フェーズアップと呼ばれる操作を行い、あらかじめ40台のアンテナで取られた信号を(電波の位相を調節して足しあげることで)あたかも1台の大型望遠鏡で観測したかのように合成します。そして合成したアルマ望遠鏡全体の信号を、他の観測局の信号と相関させることで地球規模の大きな望遠鏡を仮想的に構成する手順になっています。アルマ望遠鏡のアンテナの口径は12mですが、フェーズアップにより、口径約70mのアンテナに相当する集光能力を発揮します。アルマは2つの直交する直線偏光(電磁波の偏りを偏光とよぶ)を受信(他局は円偏光を受信)する仕組みになっていますが、この直線偏光を記録した後、他の局との相関後に偏光成分を得ています。この処理にあたっては、アルマの2つの直線偏光を高精度に見分ける能力が求められます。そのための基本的な試験や性能検証は、永井が牽引しました。

アルマ望遠鏡以外にも、EHTにはハワイのSMAやNOEMAという電波干渉計が参加しており、同様の方法でフェーズアップを行なっています。

## 8 EHTにおける日本の役割について

**8.1 EHTの装置面で、日本はどのような貢献をしましたか？**

EHTに参加した望遠鏡の中では、まずアルマ望遠鏡の建設と運用に日本は貢献しています。また、ハワイ・マウナケアにあるジェームズ・クラーク・マクスウェル望遠鏡は、日本・韓国・台湾・中国・タイなどのアジア諸国が共同で設立した東アジア天文台によって運用されています。

EHTによる観測を実現するための装置開発としては、アルマ望遠鏡の40台のアンテナからの信号をフェーズアップ(合成)した信号(最大64Gbps)を、標高2900mの山麓施設にある記録装置に伝送するための光多重伝送装置の開発を行い、アルマ望遠鏡現地に設置しました。

**8.2 EHTのソフト面(研究内容)で、日本はどのような貢献をしましたか？**

観測で得られた複数の望遠鏡のデータは米国とドイツにある専用のスーパーコンピュータで処理され、仮想的な地球サイズの望遠鏡のデータとして合成されます(4.3参照)。その後、各望遠鏡の感度をもとに合成されたデータの信号強度を天体の輝度に変換する、アンテナ間の信号の遅延を校正し、仮想的な望遠鏡の焦点を合わせるといったデータ校正と呼ばれる処理が行われました。このデータ校正の後に、観測データが画像化されました。いて座A\*のデータ校正は秋山が主導しました。

電波干渉計では、地球上のいろいろな場所にある限られた数の望遠鏡を使って観測を行っています。このため、電波干渉計が仮想的に構成する望遠鏡の最大展開範囲は地球サイズであったとしても、実際にはほとんどの場所ではデータを取れない(望遠鏡が存在しない)ということになり、「歯抜け」のデータしか得られません。こうした限られたデータをもとに画像化するために、これまでいくつかの方法が開発されてきましたし、イベント・ホライズン・テレスコープの実現に向けて新たな画像化手法の開発も行われてきました。こうした複数の画像化法を用いて結果を比較し、画像の客観性や信頼性を高めています。

日本のグループはブラックホールの画像の復元に用いられた3つのソフトウェアの一つであるSMILIと呼

ばれるソフトウェアを開発しました。SMILIはスパースモデリングを応用した画像化手法を実装しています。秋山、池田、沖野、崔、笹田、田崎、本間、森山(五十音順、以下同様)らが開発したソフトウェアはM87のイメージングで初めて用いられ、その後秋山を中心として、森山らが開発を続けました。スパースモデリングのアイデアは他の画像復元チームにも採用され、ハーバード大学が開発したeht-imaging libraryと呼ばれるソフトウェアにおいてもスパースモデリングが取り入れられています。

また、実際に画像化の一連のプロセスにも日本人が主導的な役割を果たしました。秋山は約70人が参加する画像化の作業班全体の世話人を務め、画像化の一連のプロセスを主導しました。森山は、画像化の検証のための人工データの作成、そして日本が中心となって開発したSMILIを用いて座A\*や人工データの画像化を主導しました。小藤もSMILIを用いた画像化に関して秋山、森山らと中心的な役割を務め、小藤、本間は画像の解析を通してブラックホールの物理的理解に結びつける作業を主導しました。

EHT観測によって得られたい座A\*の観測結果を物理的に解釈するためには、さまざまな理論・シミュレーションが必要となります。EHT-Japanの理論メンバーも、多彩な観点からユニークな貢献を果たしています。

水野(陽)らを中心とするEHT理論作業班は、いて座A\*の観測結果に物理解釈を与える主要な役割を担いました。同班では、一般相対論的磁気流体力学及び一般相対論的輻射輸送シミュレーションによる理論モデルライブラリ(全180万以上のスナップショット)とEHTのいて座A\*観測の詳細な比較を行い、いて座A\*ブラックホール周辺の物理状態に制限をつけました。また、水野(陽)は理論モデルライブラリの標準モデルのひとつを担う一般相対論的電磁流体力学コードBHACの主要開発メンバーの一人です。川島は、国立天文台が運用する天文学専用スーパーコンピュータ「アテルイII」を用いて、様々な波長の光の伝搬を計算する一般相対論的輻射輸送コードRAIKOUおよび一般相対論的電磁流体力学コードUWABAMIを用いたシミュレーションを行い、前述の比較作業に貢献しました。森山は、時間変動に注目した新たな理論モデルを考案し、いて座A\*のブラックホールの回転速度について制限をする新しい手法を提案しています。紀は、いて座A\*理論モデルとEAVN観測の整合性について検討し、今回の論文では踏み込まなかったEAVN 22/43GHzと理論モデルの詳細比較を、次の重要課題として提案しています。EHT-Japanからは、川島、紀、當真、中村、水野(陽)が、EHT理論・シミュレーション班にメンバーとして参加しています。

### 8.3 そのほか、EHTプロジェクトで、日本はどのような貢献をしましたか？

今回の論文に関して、秋山はいて座A\*に関する6編の主要論文のうちの3編目の画像化に関する論文執筆に関してとりまとめの一人としてまとめあげました。この他、多くの日本人がEHTのグループの運営に関わっています。本間、松下(理事会)、浅田、小山(翔)、秦(科学諮問委員)、森山、雀(若手科学者委員)、秋山(画像化作業班世話人、講演委員会座長)、池田、田崎、秦、水野(陽)(各作業班世話人)、浅田(オプズ委員)などです。

## 9 EHTの今後について

### 9.1 今後、EHTはどのような展開を予定していますか？それによって、何がわかりますか？

2019年に発表されたM87のブラックホールの画像に加え、今回、いて座A\*のブラックホールの様子が明らかになりました。今後は、すでに観測が行われた2018年、2021年、2022年のデータの画像化に取り組み、過去数年間にわたって、M87といて座A\*の事象の地平面近傍からの光の様子を調べることが可能です。一般相対性理論の予言が正しければ、ブラックホールシャドウの大きさはブラックホールの質量と自転のみで決まっています、時間変化しません。長期にわたる観測を実行することで、それを検証することができます。偏光や他の波長の電磁波などの情報も使って、一般相対性理論と異なる重力理論やブラックホール擬似天体の可能性をさらに厳しく精査できます。

また、M87では、偏光情報の観測から事象の地平面近くの磁場構造を明らかにすることにすでに成功しています。いて座A\*でも同様の試みがこれから行われます。磁場構造は、ジェットの噴出に密接に関係していると考えられ、M87といて座A\*のジェットの規模の違いの原因に、何らかのヒントを与えるかもしれません。

イベント・ホライズン・テレスコープは今後も参加する望遠鏡の数を増やしていきます。2017年4月の観測に使用された望遠鏡は、アルマ望遠鏡(チリ)、APEX(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。2018年の観測ではグリーンランド望遠鏡(グリーンランド)が、2021、2022年の観測では、NOEMA観測所(フランス)、アリゾナ大学キットピーク12m望遠鏡(米国アリゾナ)がEHTの観測網に加わっています。2030年代には新たな望遠鏡が建設され、観測に加わる予定です。現存する望遠鏡にも改良が加えられます。

観測に参加する望遠鏡数の増加に伴い、画質の向上が期待されます。2017年の観測では明らかにならなかった、高速ジェットの本元と事象の地平面近傍のプラズマがどうつながるのかが、今後明らかになると期待されます。これによって、高速ジェットの起源(シミュレーションが示しているように、本当にブラックホールからエネルギーが抜かれているのか)を突き止めることが可能となります。東アジア理論班は独自の理論シミュレーション研究に基づいて、高速ジェットのデータと地平面近傍のデータをつなげる理論モデルを提案しています。

また観測波長を短くすることでできれば(たとえば波長0.85mm)、現在よりもさらに解像度が上がります。2017年の観測で得られたぼやけた画像の解像度をあげることで、コンピュータシミュレーションが示しているような詳細な構造(ブラックホールシャドウを縁取る「光子リング」とそれを取り巻くジェットや降着流などのプラズマ流)を検証できます。このことは今回の結論(見えているのがブラックホールシャドウであるということ)を裏付けるために決定的に重要です。早ければ2023年には波長0.85mmにおけるEHTの観測が実現する予定です。

EHTの次世代計画(next generation EHT: 略称 ngEHT)では、さらに北米、南米、アフリカなどに6~12m口径の望遠鏡を追加し、地球上における望遠鏡の数をおよそ2倍に増やすことを計画しています。ngEHTは、新しい受信機、高速データ記録装置、新しい画像作成アルゴリズムなどを開発し、これまでよりも100倍も高感度の観測を実現することによって、より詳細な光子リングの構造や、薄く広がった放射源であるジェット、そして時間発展の様子を捉え、ジェット形成機構の謎の解明やアインシュタインの一般相対性理論に対する更なる検証を目指しています。

そして究極的には、望遠鏡を宇宙に置くことで、究極的な解像度を得ることができます。これにより、いて座A\*やM87以外の巨大ブラックホールの撮像も可能になると期待されています。その実現のための技術開発は進んでいますが、資金は未だ確定していません。