

Event Horizon Telescopeによる 超大質量ブラックホールの 事象の地平面スケールの観測



秋山



本間

秋山和徳¹⁻⁵

〈¹National Radio Astronomy Observatory, 520 Edgemont Rd, Charlottesville, VA 22903, USA〉

〈²Massachusetts Institute of Technology, Haystack Observatory, 99 Millstone Rd, Westford, MA 01886, USA〉

〈³Black Hole Initiative, Harvard University, 20 Garden Street, Cambridge, MA 02138, USA〉

〈⁴国立天文台水沢 VLBI 観測所 〒023-0861 岩手県奥州市水沢区星ガ丘町 2-12〉

〈⁵アメリカ国立電波天文台ジャンスキーフェロー〉

e-mail: kakiyama@mit.edu

本間希樹

〈国立天文台水沢 VLBI 観測所 〒023-0861 岩手県奥州市水沢区星ガ丘町 2-12〉

e-mail: mareki.honma@nao.ac.jp

ブラックホール。アインシュタインの一般相対性理論が予言するこの究極の天体の写真を撮ると本当に文字どおり「黒い穴」のように見えるのか、これは天文学者に限らず誰もが一度は思う素朴な疑問でしょう。一般相対性理論とブラックホールの理論的発見から1世紀経った今、Event Horizon Telescope (EHT) と呼ばれる地球規模の波長1.3 mm (周波数230 GHz) の電波観測網によって、いよいよこの疑問に迫れると期待されています。本稿ではEHTが狙うブラックホールの影、これまでの観測成果、そして現状と将来展望を紹介します。

1. はじめに

ブラックホールは今や一般の人にも幅広く知られている宇宙で最も高密度な天体です。一般相対性理論によれば、ブラックホールは自らの強い重力によって光も含めた情報伝達が不可能になる事象の地平面 (event horizon) と呼ばれる時空の特異面を形成します。それゆえに、ブラックホールはこれまで光すらも脱出できない漆黒の天体として描写されてきました。もしこのブラックホールの写真を撮ることができたとする、どのように見えるのでしょうか？

一般相対性理論から導き出される一つの興味深

い予言は、事象の地平面の近傍に形成される光子球 (photon sphere) と呼ばれる領域の存在です。光子球の内側に入射した光子の軌道は必ずブラックホールの強い重力の影響で事象の地平面と交差します。光の伝播方向を逆向きにしてブラックホール近傍からの光がどう見えるか考えてみましょう。もし光子球の周囲に光源となる物質があれば、ブラックホールの周りには光子球の形をした影が作られると考えることができます。これはブラックホールが作る影、ブラックホールシャドウと呼ばれています。

このシャドウが遠方にいる私たち観測者からどのように見えるか、例を図1に示しました。光子球

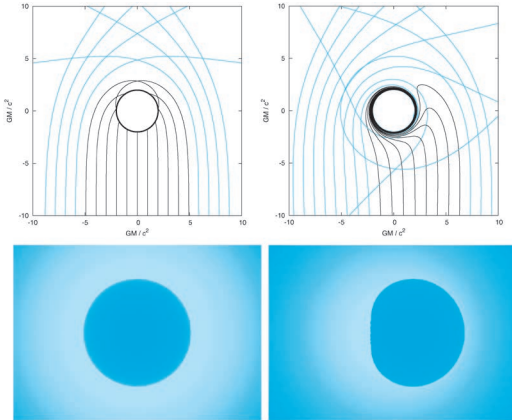


図1 ブラックホールの赤道面における光の測地線(上段)と赤道面方向から見たシャドウの形(下段)をシュバルツシルト・ブラックホール(左)およびカー・ブラックホール(右)に対して示したもの¹⁾。上図では黒線部分がシャドウとして現れるブラックホールの光子球に入射する光の軌道を表す。下図において光源となっているのは光学的に薄く、球対称にブラックホールへ自由落下するプラズマである。ブラックホールが回転すればシャドウの形は真円からずれるものの大きさはそれほど変わらないことがわかる。

はブラックホールの近傍に存在していますから、光子球も遠く離れた観測者から見れば、強い重力レンズの効果を受けます。今から約1世紀前の1916年にKarl Schwarzschildが回転しないブラックホール(シュバルツシルト・ブラックホール)を理論的に発見しました。この発見の同年にDavid Hilbertの講義録²⁾の中でそのシャドウの形は視直径が $\sim 5.2 R_s$ (R_s はシュバルツシルト半径)の真円になることが示されました。一方、回転するカー・ブラックホールのシャドウの形は遅れること約60年の1973年にJames M. Bardeenによって特定の場合に対して示され³⁾、21世紀に入った後も高橋 勇太さんの研究^{4), 5)}をはじめとして精力的に取り組まれてきました⁶⁾。シャドウの視直径が最も小さくなるのは、最大限回転するカー・ブラックホールを回転軸に平行な向きから見た場合で $\sim 4.84 R_s$ となります。Tim Johannsen, Dimitrios Psaltisら

はこのようにブラックホールシャドウの見かけの直径はおよそ $5 R_s$ となり、スピンと見込み角によって僅か4%しか変わらないことを示しました⁷⁾。このシャドウを観測するためには明るいガスの存在が必要ですが、ブラックホールの近辺では落ち込むガスが降着流を形成し、その重力エネルギーが効率よく熱エネルギーに転換されることで極めて明るく輝くことが知られています。実際にガス降着流中にシャドウが浮かび上がり得ることは1970-80年代にJean-Pierre Luminet⁸⁾や福江純さんら⁹⁾によって理論的に示されました。

このように半世紀近く前に理論的に予言されたシャドウが、Event Horizon Telescope (EHT)¹⁰⁾と呼ばれる地球規模の波長1.3 mm (周波数230 GHz)の電波観測網によってついに今後数年の間に撮像されるのではないかと期待されています。本稿ではEHTの主要ターゲット、これまでの観測結果、そして現状と将来展望を筆者らの研究成果も交えながら紹介します。

2. 地球から最も大きく見えるブラックホール: いて座A*とおとめ座A

Luminet, 福江さんらの理論的予言から半世紀近く経ちましたが、人類はまだシャドウの撮像には成功していません。それを阻んでいるのはブラックホールが高密度であるために地球から見たときのその視直径が非常に小さいことです。まず恒星質量ブラックホールのケースを考えてみましょう。太陽質量のブラックホールの場合は $1 R_s \sim 3 \text{ km}$ です。これを例えば、最寄りの恒星が存在する地球から $\sim 1 \text{ pc}$ 程度の距離に置くと $1 R_s \sim 0.02 \mu\text{as}$ となります。質量を10太陽質量としても $1 R_s \sim 0.2 \mu\text{as}$ となり、たとえ最寄りの恒星と同程度の位置にあったとしても人類が現在到達できる分解能($\sim 10\text{--}20 \mu\text{as}$; 後述)よりも10-100倍細かい視直径になります。したがって、恒星質量ブラックホールは残念ながらシャドウの撮像には適しておらず、選択肢は視直径が大きくなるかもしれない超大質

量ブラックホールに絞られます。幸い人類はなんとか手の届きそうな超大質量ブラックホールをこれまでに二つだけ見つけることができました。

最も大きく見えるとされるブラックホールは私たちの住む銀河系の中心に存在するいて座A*です。いて座A*は銀河系中心領域に存在するコンパクトで明るい電波源として1970年代に発見されました¹¹⁾。1990年代以降、アメリカ・ヨーロッパの複数のグループによる近赤外線帯におけるいて座A*周囲の星の運動の観測^{12), 13)}から、いて座A*には400万太陽質量のブラックホールが付随していることが明らかになりました。いて座A*は地球から最も近い(8.3 kpc^{12), 13)}超大質量ブラックホールであり、その事象の地平面の視半径 $1 R_s \sim 10 \mu\text{as}$ は知られているブラックホール天体の中では最大となります。

もう一つの天体はおとめ座銀河団の中心に存在する巨大楕円銀河おとめ座A (M87)の中心核です。おとめ座Aは今から100年ほど前に相対論的ジェットが初めて発見された¹⁴⁾活動銀河核の中でも非常に有名な天体です。おとめ座Aは中心核近辺の星団やガスの運動から、およそ30-60億太陽質量のブラックホールが存在することが明らかになりました^{15), 16)}。いて座A*と比較しておよそ1,000倍重い質量、2,000倍近く遠い距離(16.7 Mpc¹⁷⁾)に存在するため、その視半径を求めると重い質量と距離が相殺して、いて座A*に肉薄する $1 R_s \sim 3.6-7.3 \mu\text{as}$ となります。

前章で紹介したとおり、シャドウの直径はおよそ $5 R_s$ ですから、いて座A*やおとめ座Aの場合、それぞれ $\sim 50, \sim 20-40 \mu\text{as}$ ほどの視直径になることが予想されます。この数十 μas という角度は地球から見える月面上のオレンジの視直径に相当するとてつもなく細かいスケールですが、この空間分解能を達成できる望遠鏡があればシャドウが撮像できるかもしれません。空間分解能に加えてもう一つ重要な要素は、どの波長(あるいは周波数)の光で観測をするかです。幸いなことに、こ

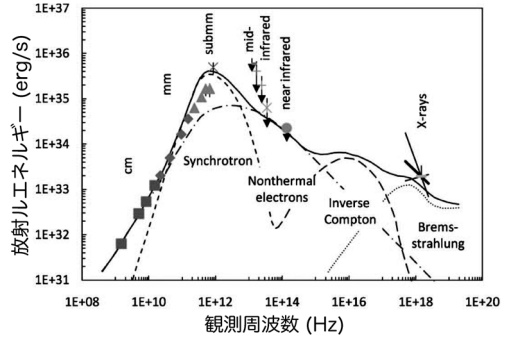


図2 いて座A*のスペクトルエネルギー分布¹⁸⁾。実線は移流優勢降着流モデル、そのほかの線は降着流から出るさまざまな放射のスペクトルを示す。

ちらに關しても、いて座A*とおとめ座Aは波長約1 mmの短ミリ波という全く同様の最適解をもっていることが知られています。

図2にいて座A*のスペクトルを示しました。いて座A*からの光は電波帯が最も明るく、波長1 mm付近(周波数で200-300 GHz付近)でピークを迎えます。この電波放射はブラックホール近傍の高温プラズマ中の電子からのシンクロトロン放射だと考えられています。ピークの低周波側ではプラズマは光学的に厚くなり、いわば不透明な状態になり、シャドウは隠されます。一方、このピーク付近ではプラズマは光学的に薄くなり、透明になるため、シャドウが見えることが期待されます(図3)。さらに高周波数にいくと透明度は上がるものの放射が暗くなっていきます(図2)。したがって、プラズマの透明度を考えれば、1 mm前後が最適だといえます。また、いて座A*からの電波放射は銀河系内の星間プラズマによって散乱され、画像がぼやけることが知られています²⁰⁾。この効果は波長が短くなるにつれて弱くなり、シャドウが露出し始める波長1 mm付近での散乱の効果は限定的でシャドウが見えることが期待されています²¹⁾。

おとめ座Aの場合は電波帯からX線に至るまで幅広い波長帯で相対論的ジェットが見られています。電波から可視光にかけて見えているジェット

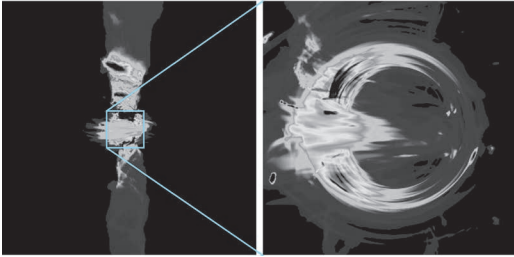


図3 いて座A*の一般相対論的磁気流体シミュレーションによる電波帯におけるプラズマ流の画像の予想図の例¹⁹⁾。左図は光学的に厚い7 mm帯、右はスペクトルのピーク付近の1 mm帯の画像である。

の放射はいて座A*と同様にシンクロトン放射です。ジェットが噴出しているブラックホール近傍を撮像するためにはジェットの根元がどの波長帯で透明になりブラックホール近傍を見通せるのが鍵になります。この答えは秦和弘さんらの観測によって明らかになりました^{22), 23)}。秦さんらはさまざまな波長におけるジェットの根元の透明度を調べて、ジェットの噴出元であるブラックホール近傍がいて座A*と同様波長1 mm付近で見通せるようになることを明らかにしたのです。ちなみにおとめ座Aは天球面上では銀河面よりも離れた位置にあるため、現在の銀河モデルから星間散乱の影響は無視できることが予測され、実際に観測的に裏づけられています。

したがって、いて座A*、おとめ座A共に波長1 mm前後で空間分解能数10 μ asを達成できれば、シャドウを撮像できるかもしれません。これに挑戦しようとしているのが、まさに筆者らが中心メンバーとして参加する国際プロジェクトEvent Horizon Telescopeなのです。

3. Event Horizon Telescope

Event Horizon Telescope (EHT) は、図4に示した地球上にある短ミリ波・サブミリ波望遠鏡を結ぶ電波観測網を構築する国際プロジェクトです。EHTは超長基線電波干渉計 (VLBI) と呼ば

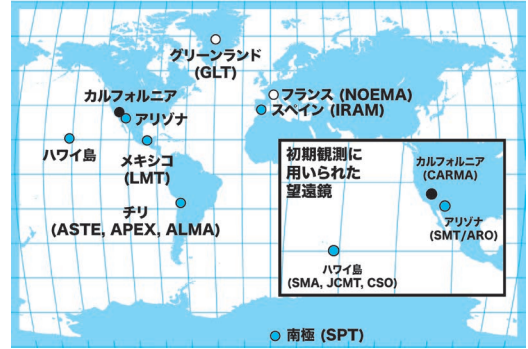


図4 EHTの参加望遠鏡の分布. 青円は2017年の観測に参加したサイト, 黒円は望遠鏡の閉鎖により現在は参加していないサイト, 白円は今後観測に参加する予定であるサイトである。

れる観測技術を用いた地球規模の電波干渉計観測を1.3 mm (230 GHz) 帯で行うことで、およそ10-20 μ asという圧倒的な空間分解能を実現します。その名を日本語に訳せば、「事象の地平面望遠鏡」ですが、これはもちろんいて座A*およびおとめ座Aを事象の地平面スケールで撮像することが目標であるためです。EHTにはASTE望遠鏡, ALMA望遠鏡をチリに保有する国立天文台を始めとした日本の研究機関のほか、米欧加台のさまざまな研究機関が参加しています。

EHTの前身となる1.3 mm帯におけるVLBIの実験的な観測が行われたのは2000年代に入ってからのことです。数年にわたる観測実験の後、米国のハワイのSMAとJCMT, カルフォルニアのCARMA, そしてアリゾナのSMTを用いた3サイトの観測が2007年に初めて成功しました(図4参照)。次の2章ではこの観測も含めたEHTの初期観測成果を紹介します。この3サイトでのVLBI観測では、まだシャドウを復元できるほどの情報は得られません。それでも前人未到の空間スケールでブラックホール周囲の放射構造を分解し、ブラックホール近傍の環境の理解に大きく貢献するさまざまな成果が得られました。

3.1 いて座A*の初期観測成果

まず最初に紹介するのはSheperd S. Doeleman

らによる記念すべき最初の観測結果²⁴⁾です。図5左に示したのは、電波干渉計の信号強度を基線長の関数として書いたものです。干渉計の信号強度は、ビジビリティと呼ばれる天体画像の複素フーリエ成分の振幅に相当し、基線長はフーリエ空間上の空間周波数に相当します。もし、天体の構造が点源（デルタ関数）で空間分解されていなければ、信号強度は基線長によらず一定になります。しかしこの観測結果では、長基線の信号が短基線に比べると弱く、天体の構造が分解されたことがわかりました。この構造の視直径を見積もってみるとおよそ $40 \mu\text{as}$ ($\sim 4 R_s$) と事象の地平面の直径に肉薄する大きさであることがわかりました。

ここで興味深いのは放射体の構造がシャドウの視直径である $\sim 5 R_s$ よりも有意に小さいことが示されたことです。もしブラックホールの周りを放射体が見かけ上球対称に囲んでいるような場合は、その放射体が見かけの大きさはブラックホールの光子球の視直径である $\sim 5 R_s$ よりも大きくなるはずですが。しかし実際に観測された構造の視直径はそれよりもコンパクトであったため、図3のシミュレーション画像のようにブラックホール近傍の電波輝度の分布が見かけ上、ブラックホールに対して非対称に分布しているということを強く示唆し

ています。このような輝度分布はブラックホール降着流の場合、降着流を横から見ている場合に得られます。この観測のあと、さまざまな理論家のグループがこのデータを使ってモデリングを試みましたが、筆者らの知る限りほぼすべての理論モデルで降着流を上から見たケースは棄却されており、見込み角に大きな制約がつけられました²⁵⁾⁻²⁷⁾。

Fishらが報告した2009年の観測では、複数日の観測から事象の地平面スケールで電波の強度変動が観測されました²⁸⁾。いて座A*ではさまざまな波長で光度変動が起きることが知られており、その起源がブラックホール近傍のプラズマ流にあると考えられてきました。この観測によって、初めてそのような変動が実際にブラックホール近傍で起きていることが突き止められました。

Michael D. Johnson, Vincent L. Fishらが報告した2013年の観測では、いて座A*の構造がガウス分布的な輝度分布では説明ができないことが示されました²⁹⁾。図5右に示す2013年の観測結果はまだまだ構造を断定するには情報が少なすぎるものの、シャドウがあれば予測される信号強度の分布と一致しており³⁰⁾、筆者らもたいへん興奮したことを覚えています。またクロージャー位相という構造の対称性を反映した観測量の測定によ

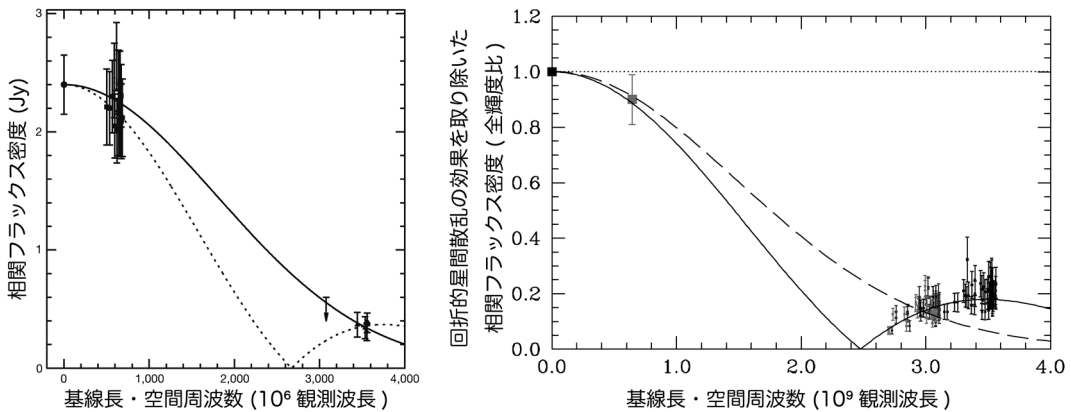


図5 EHTによるいて座A*の初期観測結果。左図は初めて観測に成功した2007年²⁴⁾、右図は2013年の結果²⁹⁾。横軸は観測波長を単位とした基線長、縦軸は干渉計の信号（ビジビリティ）の強度である。左図で実線・破線、右図の破線・実線は円ガウスモデルおよびリングモデルのベストフィットを表す。

り、これまで観測された数 R_s の構造が非対称性をもつことが明らかになりました³¹⁾。そして測定されたクロージャー位相から、放射構造がブラックホールに対してどの向きに偏っているのかにも強い制約がつけました^{27), 31)}。

2013年の観測結果のもう一つのハイライトは、いて座A*の直線偏光を事象の地平面スケールの構造から検出したことです²⁹⁾ (図6)。いて座A*の直線偏光は長基線(高い空間周波数)においてこれまでにいて座A*では観測されたことのないような非常に高い偏光度を示しました。これは複雑な直線偏光の分布、そして直線偏光の向きを決める磁場の構造が空間分解されたことを示します。さらに観測された直線偏光は完全にランダムではなく、局所的には整列していないと説明できないことがわかりました。これはブラックホール近辺の磁場が事象の地平面のスケールでは整列していることを示す非常に興味深い結果です。このようにブラックホール近傍の磁場の構造に関する情報も得られてきました。

3.2 おとめ座Aの初期観測結果

いて座A*に遅れること2年、2009年におとめ座Aに関して、観測実験に成功しました³²⁾ (図7)。非常に興味深いことに、おとめ座Aに関して5.5 R_s というシャドウの大きさに肉薄する視直径の構造が検出されました。この視直径は、浅田圭一さん・中村雅徳さん、そして秦和弘さんらによって精密測定されてきたおとめ座Aのジェット形状³³⁾⁻³⁶⁾ から予測されるものともよく一致しており、おとめ座Aのブラックホール近傍のジェット根元の領域が空間分解されたことを強く示唆しています。またこの視直径と明るさからジェットの根元における磁場の強さに制限を加えることができ、磁気流体モデルの予測どおりにブラックホール近傍のプラズマではジェットを加速させる元となる磁気エネルギーが支配的であることが紀基樹さんらによって示されました³⁷⁾。

この観測結果はブラックホールのスピんに大きな示唆を与えています。もしジェットが降着流によって駆動されている場合は、ジェットの根元の

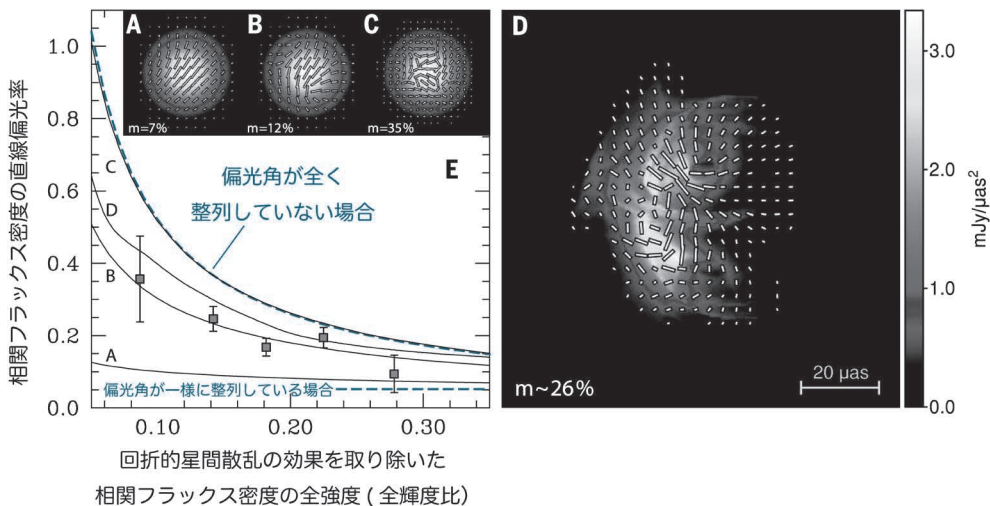


図6 EHTによって空間分解された事象の地平面近傍の放射の直線偏光²⁹⁾。左図パネルEは横軸がビジビリティの全強度、縦軸がビジビリティの直線偏光度を表す。両者の関係から検出された直線偏光の向きがどれだけ整列しているかを調べることができる。完全に整列しているケース(一番下の破線)と全く整列していないケース(一番上の破線)は本観測では棄却され、直線偏光が局所的に整列していることを示している。ここでは整列度の異なる直線偏光の放射(パネルA, B, C), そして一般相対論的磁気流体シミュレーション(パネルD)に対応する線も比較のため示されている。

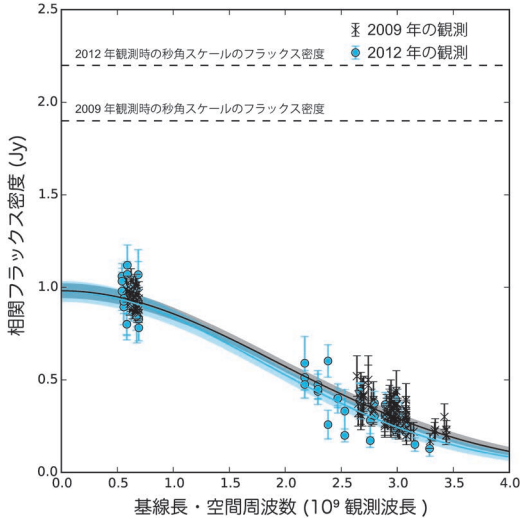


図7 EHTによるおどめ座Aの2009年(黒点), 2012年(青点)の観測結果^{32), 38)}. 2本の実線とそれに付随する灰色・薄青色の領域は円ガウスモデルのベストフィットおよび 3σ の不定性を示す. おどめ座Aは2009年の観測時は静穏期, 2012年の観測時には電波・TeVγ線で増光が見られていたが, 事象の地平面スケールにおける構造の変化は有意には見られず, その大きさはおよそ $5.5 R_s$ であった.

大きさが降着流の最内縁安定軌道の直径と同等, あるいはより大きくなるのが期待されます. 観測された視直径はブラックホールの回転がない, あるいは降着流と逆回転する場合の視直径よりも小さいため, 本観測はブラックホールが降着流の回転方向に順回転していることを示唆しています. 一方, ジェットの駆動源がより内側に位置するブラックホールである場合は, ブラックホールのスピンの駆動源として必要です. したがって, いずれのケースにせよ本観測結果はおどめ座Aのブラックホールが回転していることを示唆しています.

筆者らが報告した2012年の観測では, この観測の前後で起きたブラックホール近傍におけるTeVγ線および電波の同時増光イベントのフォローアップに初めて成功しています³⁸⁾. このイベントでは事象の地平面スケールでは構造の変化が起らず, フレア領域がジェットのより下流に存在

することが強く示唆されました(図7). この結果と国立天文台のVERAとの観測結果³⁹⁾から, フレア放射領域の視直径はおよそ $20-60 R_s$ と制限され, おどめ座Aで最もよく提案されている数 R_s 程度のコンパクトな領域からのγ線の増光メカニズムでは説明できないことがわかりました. この観測からEHTの観測が, 高エネルギー帯で起きる光度変動を理解するうえでも非常に有用であることが示されました.

3.3 Collaborationの発足と拡大

EHTは観測を始めた2007年にはまだ名前もなく, 筆頭著者が現在在籍するMIT Haystack Observatoryを中心とした小規模なプロジェクトでした. 初めて観測に成功して以降, 10年間にわたり観測装置の改善や新たな望遠鏡を加えながら, 前節で紹介したように試験観測を重ねてきました.

2012年にはブラックホールの事象の地平面スケールの撮像を実現することを目指して, Event Horizon Telescopeという名前が決まりました. この年にアリゾナ州ツーソンでEHT Collaborationのキックオフとなる最初の国際会議が開かれました. Collaborationの国際会議はその後, 2年おきに開催されています. 図8に各会議の集合写真を示します. 図8が示すとおり, 2年ごとのタイムスケールでこの国際プロジェクトの規模が倍に拡大していく様子がわかります. これに合わせて新たな望遠鏡の参加が加速化し, チリのALMA望遠鏡, APEX望遠鏡, 南極のSPT望遠鏡, メキシコのLMT望遠鏡, スペインのIRAM 30 m望遠鏡など新たな望遠鏡において信号の検出に成功し, アレイの拡張が進みました.

そしてついに2017年には念願のALMA望遠鏡が参加する初の本格観測がスタートしました. この観測に合わせて2017年にはついに200人規模のEHT Consortium (EHTC)が発足し, 国際協力のもとデータ解析が進められています. 特筆したいのはEHTCにおける日本人の活躍で, イメージング作業班や多波長観測の作業班などのリー



図8 EHTの国際会議の集合写真. 上からEHT Collaborationが発足した2012, 2014, 2016年のもの. 一番上の写真では筆者らを見つけるのはそれほど難しくないが, 年を経るごとに難しくなり, 2016年の会議では個人を識別するのが難しいほどの規模になっている.

ダーには筆者ら日本人が名前を連ねており, またほかの作業班でも中心的な役割を担っています. 200人を超すEHTCのなかで, 日本人の割合は決して大きくありませんが, 重要な部分で科学的にも技術的にも大きな貢献をしています. その一つが観測データから天体画像を復元するイメージング技術です. 次の節で簡単に紹介します.

3.4 イメージング技術の進展

EHTにおけるソフト面における最も大きな技術的挑戦は検出した信号から天体の画像を正確に復元する手法です. EHTは超長基線電波干渉計(VLBI)と呼ばれる地球規模の電波干渉計です. 電波干渉計の観測量は, 観測している天体画像を二次元フーリエ変換したビジビリティと呼ばれる複素数です. ビジビリティが取得される空間周波数は, 干渉計の二つのアンテナ間の基線ベクトルを天体の方位ベクトルに垂直な面に射影したもの(端的に言えば, 天体から見た基線ベクトル)に相当します. 電波干渉計は複数の望遠鏡で観測することで多くの基線を獲得し, また地球回転によって天体から見た基線ベクトルが回転することで同じ基線から多くのビジビリティを取得します. VLBIに限らず電波干渉計の観測結果でよく見られる天体画像は, このビジビリティから天体

画像を再構成したものです.

EHTにおけるイメージングの困難は大きく分けて三つあります. 1点目は期待されている事象の地平面付近の構造が, 空間分解能と同程度のスケールで複雑な構造をもっていることです. このような天体の画像の再構成は電波干渉計で従来使われているCLEANなどの手法ではたとえ理想的なノイズしか乗っていない場合でも難しいことが知られており, EHTの場合もCLEANを用いた再構成が難しいことが示されています⁴⁰⁾⁻⁴³⁾. これに関しては, 筆者らが研究を進めているスパースモデリング^{40), 42), 43)}をはじめとする新たな電波干渉計の超解像イメージング手法の登場により, 克服できることが近年示されてきました.

2点目はデータに乗る系統的な誤差です. 電波干渉計の観測では電波は電気信号として測定されますが, 測定された信号強度(ビジビリティの振幅に相当)を望遠鏡の観測時の感度を用いて実際の電波強度に換算したり, 二つのアンテナ間の電波の受信時刻の遅延(ビジビリティの位相に相当)を正確に測らなければいけません. しかし前者は地球の大気の影響や放射の効果やアンテナの受信感度の時間変化, 後者は地球大気の影響などによる系統的な誤差の影響を受けます. この技術的困難もスパースモデリングなどの新手法によって, 解決できるようになってきました. スパースモデリングなどの新手法では, このような系統的な誤差の影響を受けないクロージャー量と呼ばれるロバストな観測量から直接画像を復元できるようになりました^{41), 42)}. 図9にスパースモデリングによるクロージャー量を使った画像復元の例を示します. クロージャー量はロバストである一方で天体の構造の情報をビジビリティほどはもっていません. このような観測量からでも, 高品質の画像が復元できるようになりました.

3点目はいて座A*特有の問題です. いて座A*は数十分程度で天体の構造が変動し, 動く被写体を観測するような状況になることが予測されてい

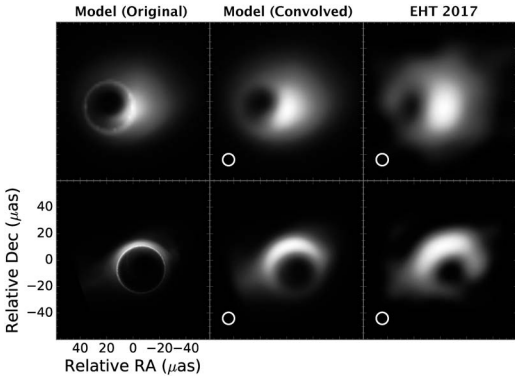


図9 おとめ座Aの二つの一般相対論的磁気流体モデル(上段, 下段)に基づくシミュレーションデータの画像再構成例. 左列がモデル画像, そして右列がスパースモデリングによるクロージャータ用量を用いた復元画像である. モデル画像との残差が最も小さくなるビームサイズ(図中の円で示した)は回折限界の30%程度となっており, 比較のために同じビームで畳み込んだモデル画像を中列に示した.

ます. これは観測中に天体構造が変わらないという電波干渉計の画像復元の根本的な仮定を揺るがします. しかし, この困難も克服できそうということが近年示されてきました. 一つのアプローチは天体の変動よりも十分長いタイムスケールで観測データを取得し平均することによって, 時間変動する輝度分布の平均画像を得るというものです⁴⁴⁾. これとは真逆のアプローチも, 筆頭筆者が参加する米の研究チームによって提案されました. 私たちが提案したのはスパースモデリングを時間軸に応用し, 復元の対象を2次元の画像から3次元の動画に拡張する手法です⁴⁵⁾. これによって, 従来問題となっていたいて座A*のブラックホール近傍における“厄介な”時間変動が, 逆に科学観測のターゲットとして実際に探れる可能性が出てきました. また散乱効果に関して, 散乱の光学を画像復元と一緒に解くことで抑える手法も開発されています²¹⁾.

このスパースモデリングなどをはじめとする最新の画像復元手法は筆者ら日米のグループが近年

勢力的に研究を進めてきました. それについては近日, 天文月報において別途寄稿させていただく予定ですが, このような新たな手法の開発とEHTのアレイとしての発展によって2017年以後の観測でいて座A*やおとめ座Aのイメージングができる可能性は飛躍的に高まったと筆者らは確信しています. またイメージング技術の向上は, ブラックホール近傍の物質や放射の特性から時空構造に極めて重要な制限をつけるという点において, 不可欠であると言えるでしょう.

4. おわりに

本寄稿では, EHTによるブラックホール直接撮像の実現へ向けたこれまでの歩みと展望を紹介しました. 一般相対性理論, そしてブラックホールの理論的発見から1世紀たった今, EHTの登場によって, 人類はいよいよブラックホール周囲の事象の地平面スケールのガス流の直接撮像に迫りつつあります.

今, 現在, 筆者らも含めてEHTCでは2017年4月に行われた観測データの解析に国際的に取り組んでいます. 近年の観測的・理論的研究, そして観測技術の進歩を総合すれば, いて座A*・おとめ座Aの両天体において事象の地平面スケールの天体画像をこの観測から取得できることは十分に期待できるというのが筆者らの見解です. しかし, 1.3 mm波帯のEHTによるVLBI観測は技術的にも実験的側面が多く, 今年どのような結果が得られるかは私たちもまだわかりません. EHTは2017年によりやくスタートラインにたったという段階で, これからも台湾のグループらが主導するGreenland Telescope (GLT) やArizonaのKit Peak望遠鏡など数年ずつアンテナを増やし, 観測装置の性能を向上させながら, 観測を続けていく予定です.

「宇宙はブラックホールの影を本当に見せてくれるのか?」, という筆者らが10年近くにわたって追い続けてきた命題にあともう少しで一つの答えが

得られるというところまでとり着けたことに感慨を覚えます。どんな答えが得られるのかは正直なところわかりませんが、EHTの国際色豊かな仲間たちと楽しみながら研究に励みたいと思います。

謝 辞

本記事の執筆にあたり、池田思朗さん、紀基樹さん、笹田真人さん、高橋真聡さん、高橋芳太さん、田崎文得さん、中村雅徳さんから貴重なコメントやアドバイスをいただきました。また岡部信広さんをはじめとする編集部の皆様には丁寧に記事をチェックしていただきました。最後にこの場をお借りして御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Asada, K., et al., 2017, arXiv:1705.04776
- 2) Hilbert, D., 1917, Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse., 53-76
- 3) Bardeen, J. M., 1973, Black Holes (Les Astres Occlus), 215
- 4) Takahashi, R., 2004, ApJ, 611, 996
- 5) 高橋芳太, 2006, 天文月報, 99, 26
- 6) 高橋真聡, 2015, 数理科学, 12月号, 15
- 7) Johannsen, T., & Psaltis, D., 2010, ApJ, 718, 446
- 8) Luminet, J.-P., 1979, A&A, 75, 228
- 9) Fukue, J., & Yokoyama, T., 1988, PASJ, 40, 15
- 10) <http://eventhorizontelescope.org/> (2018.6.1)
- 11) Balick, B., & Brown, R. L., 1974, ApJ, 194, 265
- 12) Ghez, A. M., et al., 2008, ApJ, 689, 1044
- 13) Chatzopoulos, S., et al., 2015, MNRAS, 447, 948
- 14) Curtis, H. D., 1918, Publications of Lick Observatory, 13, 9
- 15) Gebhardt, K., et al., 2011, ApJ, 729, 119
- 16) Walsh, J. L., et al., 2013, ApJ, 770, 86
- 17) Blakeslee, J. P., et al., 2009, ApJ, 694, 556
- 18) Genzel, R., et al., 2010, Reviews of Modern Physics, 82, 3121
- 19) Mościbrodzka, M., et al., 2014, A&A, 570, A7
- 20) Lo, K. Y., et al., 1999, The Central Parsecs of the Galaxy, 186, 72
- 21) Johnson, M. D., 2016, ApJ, 833, 74
- 22) Hada, K., et al., 2011, Nature, 477, 185
- 23) 秦和弘, 2012, 天文月報, 105, 695
- 24) Doeleman, S. S., et al., 2008, Nature, 455, 78
- 25) Dexter, J., et al., 2010, ApJ, 717, 1092
- 26) Psaltis, D., et al., 2015, ApJ, 798, 15
- 27) Broderick, A. E., et al., 2016, ApJ, 820, 137

- 28) Fish, V. L., et al., 2011, ApJ, 727, L36
- 29) Johnson, M. D., et al., 2015, Science, 350, 1242
- 30) Pu, H.-Y., et al., 2016, ApJ, 831, 4
- 31) Fish, V. L., et al., 2016, ApJ, 820, 90
- 32) Doeleman, S. S., et al., 2012, Science, 338, 355
- 33) Asada, K., & Nakamura, M., 2012, ApJ, 745, L28
- 34) Nakamura, M., & Asada, K., 2013, ApJ, 775, 118
- 35) Hada, K., et al., 2013, ApJ, 775, 70
- 36) 秦和弘, 2017, 天文月報, 110, 700
- 37) Kino, M., et al., 2015, ApJ, 803, 30
- 38) Akiyama, K., et al., 2015, ApJ, 807, 150
- 39) Hada, K., et al., 2014, ApJ, 788, 165
- 40) Honma, M., et al., 2014, PASJ, 66, 95
- 41) Chael, A. A., et al., 2016, ApJ, 829, 11
- 42) Akiyama, K., et al., 2017, ApJ, 838, 1
- 43) Akiyama, K., et al., 2017, AJ, 153, 159
- 44) Lu, R.-S., et al., 2016, ApJ, 817, 173
- 45) Johnson, M. D., et al., 2017, ApJ, 850, 172

Resolving the Event Horizon of Supermassive Black Holes with the Event Horizon Telescope

Kazunori AKIYAMA^{1,2,3,4,5} and Mareki HONMA⁴

¹*National Radio Astronomy Observatory, 520 Edgemont Rd, Charlottesville, VA 22903, USA*

²*Massachusetts Institute of Technology, Haystack Observatory, 99 Millstone Rd, Westford, MA 01886, USA*

³*Black Hole Initiative, Harvard University, 20 Garden Street, Cambridge, MA 02138, USA*

⁴*Mizusawa VLBI Observatory, National Astronomical Observatory of Japan, 2-12 Hoshigaoka-cho, Mizusawa-ku, Ohshu, Iwate 023-0861, Japan*

⁵*NRAO Jansky Fellow*

Abstract: Does the black hole literally appear as a dark object in the Universe if we can photograph this extreme object predicted by Einstein’s general relativity? This is an intriguing question that even non astronomers would have. After a century has passed since theoretical discoveries of general relativity and the black hole, we finally have an excellent opportunity to observationally address this opened question with an Earth-sized radio telescope observing at 1.3 mm (230 GHz), namely the Event Horizon Telescope (EHT). In this article, we present an overview of the EHT including its scientific objectives, early results, and future prospects.