◆◇◆◇◆◇

◆◇◆◇◆ シリーズ：2040年代のスペース天文学へ ◇◆◇◆◇◆

以前の本誌記事 [6] で解説されている通り，ブラックホールの事象の地平面に交差する，いわばブラックホールへと落ちていく光の軌道がEHTの画像（図1）の中心にある暗いブラックホールシャドウを形成し，その外側の光の軌道がシャドウ周囲の放射構造を形成する．EHTのブラックホール撮影成功がきっかけとなり，過去数年シャドウ周囲の放射構造の理論的研究が大きく進展した．

図2に光学的に薄いブラックホール天体のシャドウ周囲の放射構造の例として一般相対論的磁気流体（GRMHD）シミュレーションによるM87の画像を示す．図2の左辺に示されている放射構造の写真は，右辺のようにブラックホールの周りを光が何半周して届いたかで展開することができる [5]．右辺の第一項目の画像は直接放射と呼ばれ，ブラックホールの裏側を一度も横切らずに直接観測者へと届いた光が作る放射だ．2項目以降はブラックホールの裏側を横切って周回してきた光が作る放射で，半回転（2項目),一回転（3項目），と半回転ごとに大きさと幅，そして輝度が異なる離散的なリング構造が形成される．回転数が増えるごとに輝度と幅が指数関数的に減少し，その形状はシャドウに単調に漸近していく．

直接放射はブラックホールの近傍では重力レンズの効果を受けるものの周囲の降着流やジェットの根本のプラズマの構造を反映し，相対的に輝度が低く広がった放射構造をしている．一方でブラックホールを周回してきた光は，直接放射とは対照的に輝度の高い，まさにシャドウを縁取るような細いリング構造を形成する．これが光子リングである．ちなみにEHTのブラックホール撮影成功がなされた2019年前後やそれ以前では光子リングという言葉が何を指すかは文献によってまちまちで，筆者の過去の本誌記事 [7] を含め直接放射を含む重力レンズの効果を受けたすべてのリング状の光を指すこともあった．これらの研究の進展を受けて分野内で言葉の定義づけが進み，このブラックホールを周回した光が作る薄く輝度の高い放射構造が光子リングと呼ばれるようになった [5, 8]．

この光子リングはミリ波VLBIをスペースに展開すれば直接観測可能であることがJohnson, Lupsascaらによって示された [5]．図3にM87の一般相対論的磁気流体モデルから得られる1.3 mm帯の電波干渉計の信号強度を示した．光子リングの放射は全体の放射のおよそ20–30%とされ，現在EHTがカバーしている地球直径（およそ10 Gλ）程度では直接放射が卓越し，明確に光子リングを直接放射から分離することはできない．しかし直接放射による信号は基線長に対して急速に減少し，地球直径の2倍（およそ20 Gλ）

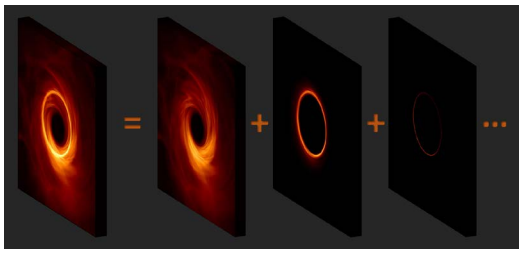

図2　ブラックホール近傍の多重リング構造．Credit: George Wong and Michael Johnson.

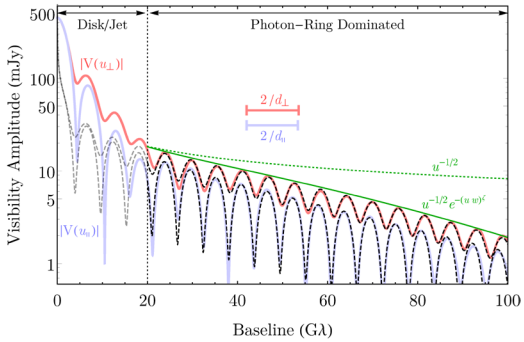

図3　光子リングによって普遍的に作られる電波干渉計の信号 [5]．縦軸は信号の相関フラックス密度，横軸は観測波長で規格化した基線長である．実線は波長1.3 mm帯でM87の一般相対論的磁気流体モデルの平均画像からスピンの軸に並行，垂直な向きに得られる信号の強度，点線はそのうち光子リングによるものである．

◆◇◆◇◆ シリーズ：2040年代のスペース天文学へ ◇◆◇◆◇◆

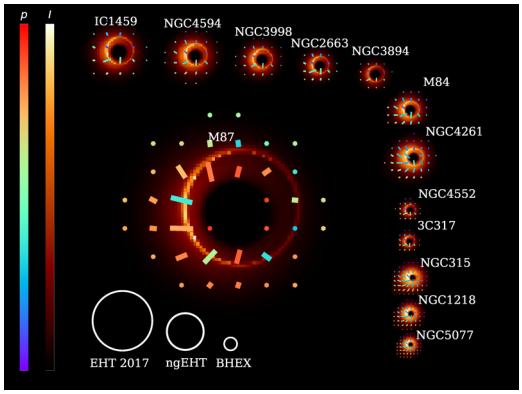

図4　スペースVLBIによってシャドウの撮影が期待される天体の一例 [15]．画像は各天体の一般相対論的磁気流体モデル，3つの円はそれぞれ2017年のEHT，2030年代に想定される地上の次世代EHT（ngEHT），そして中軌道のスペースミリ波VLBI（BHEX）による空間分解能を示す．新たなシャドウ天体は2030年代の地上アレイでも空間分解が困難で，スペースVLBIが必要である．

ている．

2.3　活動銀河核ジェットの物理

EHTの発展と合わせて，VLBIの観測によって過去10年ほど理解が大きく進展したのが活動銀河核ジェットの物理である．活動銀河核ジェットはブラックホール近傍から噴出するプラズマ流で，細く絞られた形状でしかも相対論的速度（光速の99%を超えることもある）で数千から数万光年にもわたって宇宙空間を突き進む宇宙最大級の高エネルギー現象である．活動銀河核ジェットは電波から高エネルギーγ線まですべての波長帯で輝き，銀河系外からのγ線の大半を占める．さらに地球に降り注ぐ超高エネルギー宇宙線の起源の一つと考えられており，南極のIceCubeニュートリノ観測所で実際に活動銀河核ジェットからの高エネルギーニュートリノ放射が観測されている．ジェットがどのようにして駆動され，収束・加速し，そしてその内部で高エネルギー放射・宇宙線を生成しているのか，これらは天文学の中で広く認知されるようになった1970年代から続く謎だ．

M87では浅田・中村の先駆的研究 [16] や秦らの成果 [17] により，ブラックホール近傍から10^5シュバルツシルト半径付近にあるブラックホールの重力圏の境界にいたるまで広範囲にわたってジェットが収束し，加速していく様子が捉えられた．これは相対論的磁気流体モデルで予言されていたものである [18]．M87を皮切りに多くの近傍の低光度活動銀河核ジェット天体で同様の広範囲の収束・加速領域が確かめられた．また質量降着率が遥かに高いクエーサー天体においても沖野らによって確かめられる [19] など，普遍的な描像として徐々に確立しつつある．またFermi衛星や地上のチェレンコフ望遠鏡との多波長観測では，γ線フレア後によって生じた高温・高密度のプラズマがVLBIの観測で検出され，その運動からγ線が生成された領域の同定などが進んだ [20]．

一方で空間分解能の制約からジェットの収束・加速領域が特定された天体の近傍の活動性が比較的弱い低光度活動銀河やFanaroff Riley（FR）1型電波銀河にほぼ限られている．また高エネルギー放射領域に関しては，センチ波では光学的な厚みによってγ線フレア時に放射領域を捉えることは困難であり，光学的に薄く放射領域を見通せる可能性のあるミリ波・サブミリ波の観測網でもEHTのような地上の観測網だけでは放射領域を空間分解することはほぼすべての天体で難しい．

ジェットの放射が光学的に薄くなり，より根本まで見通せるミリ波帯でのスペースVLBI観測では，想定されている放射領域を空間分解することが可能になるほか，クエーサー天体やFR2型電波銀河などの活動性の高い活動銀河などの重力圏内のジェットの形状を測定できることが期待されている．これにより様々な活動銀河核でのジェットの収束・加速領域の探査や高エネルギー放射領域を直接撮影などが可能になる．ミリ波スペースVLBIは活動銀河核ジェット生成の統一的描像の確立に重要なピースとなる．

◆◇◆◇◆ シリーズ：2040年代のスペース天文学へ ◇◆◇◆◇◆

成するのではなく，衛星を複数打ち上げて宇宙空間上で電波干渉計を形成する計画も様々な波長帯で検討が進んでいる．ミリ波スペースVLBIではヨーロッパで概念検討が進むEvent Horizon Imager計画 [25]，THEZA計画 [26] や韓国で概念検討が進むCappella計画 [27] などがある．衛星のみで形成する電波干渉計は地球大気の影響を強く受けるミリ波・サブミリ波帯の地上局を用いずに観測が可能なため，天候や季節に関係なく通年で観測し，また周回軌道により地上の観測網よりもフーリエ空間上で密度の高いサンプリングができる可能性がある．一方でこのようなミッションは宇宙空間上で信号を相関させ干渉計の信号を生成する高性能計算機を搭載した衛星ないし，地上での相関処理のために複数の衛星から大量のデータをレーザー通信などで地上で受信する技術と設備が必要になる．いずれもまだ技術成熟度が浅く，2030年代の実現は困難かもしれない．

3.3　2040年代の展望

2020年代の地上・宇宙双方での技術革新により，前説で述べた革新的なサイエンスを行うBHEXのようなミッションが2030年代に可能となった．最新のブラックホールシャドウの統計モデルでは，BHEXよりもさらに一桁感度ないし，空間分解能が向上すればとらえられるシャドウ天体の数は100天体を超えることが予想されており，ブラックホールの事象の地平面スケールの観測からブラックホールの宇宙における進化や役割を統計的に探れる新たな時代の到来が予言されている．2030年代には実際にスペースミリ波VLBI観測の感度を向上させ，さらには宇宙望遠鏡のみを用いたVLBI観測を可能にするような技術の成熟が期待されている．以下に例をあげたい．

ペイロードの大型化　高い鏡面精度が必要なミリ波サブミリ波帯の宇宙電波望遠鏡でははるか衛星で用いられたような展開式アンテナを用いることは難しく，望遠鏡の口径はペイロードの大きさにより数m程度に制約されてきた．スペースVLBIにおいてはこれが本質的に感度を大きく制約する要因になっていたが，スペースXのスターシップをはじめとした超大型ロケットの登場により，2040年代にはより大型のアンテナを低コストで打ち上げることが可能になる．

光通信技術の発展　ミリ波スペースVLBIの技術的なハードルの一つは取得された電波信号を地上ないし宇宙空間上のデータ処理施設に送信することであった．例えばEHTは現在各観測局で64 Gbps（8ギガバイト毎秒）という速度で電波信号を記録している．宇宙上にある観測局もこの記録速度に近い，あるいは上回る速度でデータを処理施設に送信しなければならない．このような宇宙空間での高速度のデータ通信はここ数年NASA/MITのTBIRDミッションによる200 Gbpsのレーザー通信の技術実証成功などを機に可能になり，2020年代後半のアルテミス計画や2030年代のミッションとして検討されているBHEXなど様々なミッションで用いられる予定だ．2040年代にはレーザー通信技術は帯域幅・コスト面双方で大幅に発展し，より普及しているだろう．

宇宙空間上での高性能計算機（HPC）技術の発展　EHTをはじめとした広帯域VLBIのデータ処理は専用のスーパーコンピュータで行われており，宇宙空間上での電波干渉計の形成のためにはこれを宇宙で実現させる必要があるだろう．宇宙空間上でのHPC技術は今年国際宇宙ステーションへと打ち上げられたヒューレットパッカード社の3世代目のSpaceborne Computerなど，戦略的に投資が行われ技術革新が見込まれる領域だ．2040年代にはスペースVLBIミッションに利用できる技術成熟度に達している可能性は十分にある．

技術発展によって革新的なサイエンスが可能になることはEHTやBHEXを通して筆者らは身をもって経験している．実際ブラックホールの初撮影に成功した2019年時点ではTBIRDのような光通信技術は実証されておらず，筆者らにとっては

BHEXのようなEHTをそのまま宇宙に拡張するミッションは「夢物語」であった．これがたった数年で状況が一変してしまったのである．2040年代に期待されている重要な技術革新は上記にとどまらず，実現可能なスペースVLBIのサイエンスの魅力はさらに強まっているだろう．2040年代にどんなブレークスルーが技術的に可能になっているのか楽しみである．

4. 今後のスペースVLBIプロジェクトで期待される日本の貢献

日本のコミュニティは今後のスペースVLBIプロジェクトにおいて，サイエンス面はもちろんのこと，開発や運用でも主要な役割を果たすことが期待される．なぜならば，日本はこれまで野辺山，ALMAなどのミリ波帯の電波天文学，そしてVERA, EAVN, EHTなどのVLBIにおいて長年の実績があり，また，科学衛星計画でも宇宙科学研究所を中心に数多くの科学衛星ミッションを実現きたからである．そして，最も特筆すべきこととして，はるか衛星を中心とする世界初のスペースVLBIを日本が主導した実績もある．以下では，サイエンス面以外での将来のスペースVLBIへの日本からの貢献について，現在著者たちも参加して検討を進めているBHEXプロジェクトでの例も交えながら述べる．なお，BHEX以外のスペースVLBIプロジェクトでも共通する項目は多く，対象とする衛星計画を他のプロジェクトと置き換えてもほぼ同様の貢献可能性があると考えてよい．

4.1 衛星開発，特に受信機および冷凍機開発

日本の電波天文学コミュニティは野辺山宇宙電波観測所からALMAへという流れの中でミリ波帯の受信機開発で大きな実績があり，ミリ波のスペースVLBI衛星でも受信機開発で貢献が可能である．例えば，国立天文台先端技術センターでのSIS素子開発や受信機のコンポーネント作製は国際的にも高い評価を受けており，BHEXプロジェクトにおいても230 GHzおよび345 GHz帯のSIS素子開発において日本の貢献が強く期待されている．

また，SIS素子を搭載した超伝導受信機は4 Kという極低温まで冷却することが必要である．衛星搭載の冷凍機では，JAXA/宇宙科学研究所と住友重機械工業が開発してきたものが世界的に高い評価を得ている．例えば，SMILESプロジェクトにおいては，住友重機械工業製の冷凍機が使われ，SIS受信機による電波観測を国際宇宙ステーション上で実施することに成功している [28]．また最近ではX線天文衛星XRISMでも住友重機械工業の冷凍機が搭載され，軌道上で実運用に供されている．このような実績から，BHEXプロジェクトにおいては冷凍機の有力な選択肢として住友重機械工業の製品が挙がっており，その実現の可能性について調査が進められている．もちろんBHEX以外の衛星計画においても，日本の受信機素子や冷凍機は搭載品の有力候補となるであろう．

4.2 VLBI観測の地上支援

スペースVLBIプロジェクトにおいては，人工衛星局と地上局の間でVLBI観測を行うことが必須である．従って，地上のパートナー局の確保がプロジェクトの成功を左右する鍵となる．その意味で，地上のミリ波のVLBIアレイであるEHTプロジェクトの発展的継続は必須である．特に，この波長帯で最も高い感度を誇るALMAの観測時間の確保はその成功の重要なポイントである．衛星プロジェクトは運用期間が限られるため（例えばBHEXでは2年程度を予定），その期間内にどれだけの地上局の時間を確保できるかが極めて重要である．ALMAのVLBI観測をなるべくフレキシブルに行うために，現在開発中のALMAの次世代相関器にサブアレイの機能を持たせ，ALMAの通常運用中に一部の望遠鏡をVLBIの観測に供することが期待されている．また，複数バンドのVLBI観測を同時に実施できるようにする可能性も検討されている．これに加えて，日本が

開発したACA（Atacama Compact Array）のうち12 mの望遠鏡4台からなるTPA（Total Power Array）についても，VLBI観測への参加に対する期待が高い．TPAのための次世代GPU分光器は，韓国と日本のALMAチームにより共同で開発される予定であり，TPAのVLBI化の実現は，将来のミリ波スペースVLBIの観測に対して重要な貢献となるであろう．

また，地上支援のもう一つの観点として，衛星からのデータを地上で受け取るダウンリンクも重要である．特に将来のスペースVLBI衛星では，データレートが極めて大きくなると予想される（例えば，BHEXプロジェクトでは最大で64 Gbpsを想定）．このようなデータレートでのダウンリンクを実現するためには，光レーザー通信が必須となる．その際，衛星の位置変化や地上局の天候に柔軟に対応するために地上のダウンリンク局の数を増やして十分な冗長性を持たせることがポイントとなる．そのため，日本に存在する光レーザー通信用の光学望遠鏡にもダウンリンク局としての貢献が期待される．実際，BHEXプロジェクトではNICTの小金井や鹿島など1 mから2 mクラスで補償光学装置を積んだ望遠鏡への期待が高まっており，予備検討を進めているところである．NICTでは2年後に工学試験衛星ETS-9を用いて宇宙と地上間で10 Gbpsのダウンリンク実験を実施予定で，それが実現すれば衛星–地上間通信の重要なパートナーとして日本の注目度が今後ますます高まっていくであろう．

5. まとめと将来展望

これまで見てきたように，2030年～40年代にかけてミリ波のスペースVLBI衛星による観測が進むと，巨大ブラックホールの観測的研究に新たな局面をもたらす可能性が高い．例えば，BHEXプロジェクトは，来年2025年に公募予定のNASAのSMEXミッションに提案する予定であり，その後の審査が順調に進めば，2030年代前半に打ち上げの可能性がある．その最重要ターゲットはM87といて座A*であり，ミリ波・サブミリ波帯での観測から光子リングの分離・検出が実現すれば，ブラックホールのスピン測定や，ジェットの駆動メカニズム解明等に大きなブレークスルーをもたらす可能性が高い．さらに，ブラックホールシャドウの検出可能な天体がこれまでの2天体から10個程度までに増えることで，ブラックホール最近傍の構造が複数の天体で観測可能になり，天体間の比較など新たな研究展開が可能になる．また，86 GHz帯の観測では，地球上の数多くの望遠鏡と組み合わせることで高精細なジェット画像を多数の天体で提供でき，ジェットの根元の構造をより詳しく調べたり，その磁場構造を精密に測定することでジェット駆動メカニズムの検証も進むであろう．

もちろんBHEX以外のスペースVLBI衛星プロジェクトも，実現すればBHEXと同様に大きなインパクトを残すことが期待される．そして，その後はさらに基線長を伸ばしたり，UV平面の埋まり具合を密にするために，2040年代には複数台のスペースVLBI衛星が必要となる時代がやってくるであろう．そうすると，世界で協力して複数の衛星を打ち上げるという，より大きな計画へと発展する可能性が高く，その際には日本でもJAXA/宇宙科学研究所が中心となって衛星の1台を分担するというシナリオも十分ありえる．世界で最初にスペースVLBIを実現した日本が，そのような時代に再びスペースVLBIの分野をリードすることにも大いに期待したい．

このように，今後のミリ波スペースVLBIの分野は，2030年代～2040年代の観測天文学を担う若手研究者にとって，衛星の開発から科学的成果の刈り取りに至るまでを実施可能な非常に魅力的な分野になる．是非多くの方にこの分野への興味をさらに強くしてもらい，その中からこの分野の将来の研究を牽引する人材が出てくること心から願っている．

◆◇◆◇◆ シリーズ：2040年代のスペース天文学へ ◇◆◇◆◇◆