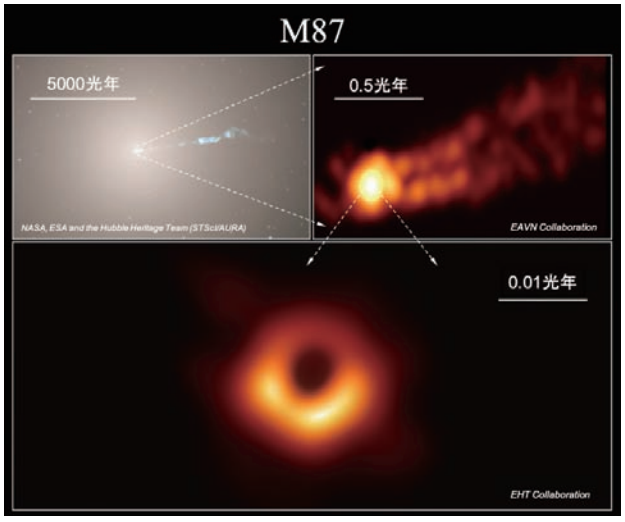
ブラックホール「シャドウ」電波撮像を実現したVLBI観測とは

自然科学研究機構・国立天文台　天文情報センター・周波数資源保護室
周波数資源保護室長・特任教授 国際天文学連合－国際電気通信連合公式リエゾン
国際天文学連合アストロバイオロジー委員会プレジデント
大石（おおいし）　雅寿（まさとし）

1. ブラックホール撮影に成功？いやいや、それは原理的に不可能。

2019年4月10日午後10時、M87星雲の中心部にあるブラックホールに関する研究成果について世界7か所で同時発表が行われた。ブラックホールが文字通り「黒い穴」として見えた、とするイベント・ホライズン・テレスコープ（Event Horizon Telescope（EHT）＝事象の地平線*1望遠鏡）のプレス発表である。事前に情報を知らされていたメディアは、解禁時刻を過ぎるのを待って一斉に報道した。「ブラックホール初撮影」など、と（図1）。その後の1週間程度の間、国立天文台内の関係者はメディア取材やテレビ出演に対応するためにてんやわんやの様子であった（中心人物の一人であった秦君は、女子アナに会えるからと嬉しそうだった）。

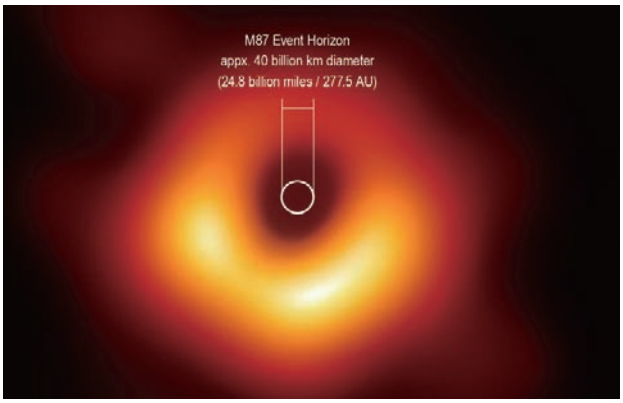
一方私は、報道の仕方に違和感を覚えていた。ブラックホールは「原理的に何も見えない」のだからブラックホールが撮影できたとするのは矛盾するからである。正しくは、ブラックホールシャドウを撮影できた、と言うべきだった。ブラックホールは、全ての電磁波領域で一切の放射をしない。従って、何もないぽっかりと空いた領域があたかも「影」のように認識される。これがブラックホールシャドウである。各社の報道内容をつぶさに見たところ、見出しでは「ブラックホールの撮影成功」としていても本文ではきちんとブラックホールシャドウと記載していた社が複数あったのが救いであった。このことを国立天文台内の広報部門に尋ねてみたところ、プレスリリース資料でも「ブラックホールの撮影成功」となっていた*2。これではやむを得ない。



■図1.　おとめ座にある楕円銀河M87、中心から伸びるジェットと今回撮像されたブラックホールシャドウ。（credit：STScI/AURA, 東アジアVLBI collaboration, EHT collaboration）

さて、それではブラックホールの本当の大きさはあの画像のうちどの程度なのだろうか？明るいリングの直径はおよそ42マイクロ秒*3で、事象の地平線の直径に対応する重力半径（あるいはシュヴァルツシルト半径）は、およそ3.8マイクロ秒である。シャドウの直径は、その約5倍（20マイクロ秒）である（図2）。重力半径をkmで表すと約400億kmとなる。これは、太陽系の惑星で最も外側にある海王星の公転軌道の大きさの約4.4倍ある。これほど事象の地平線が大きいのは、中心にあるブラックホールの質量が太陽の約65億倍もあるからである。

ブラックホールの莫大な質量のためにその周辺の空間は大きく歪む。このため、そこに分布する物質が激しく加熱される。そこから放射された電磁波の進行方向が大きく曲



■図2.　ブラックホール「画像」でのブラックホール（事象の地平線）の大きさ。直径は約400億km。（credit：EHT collaboration & Jason Major）

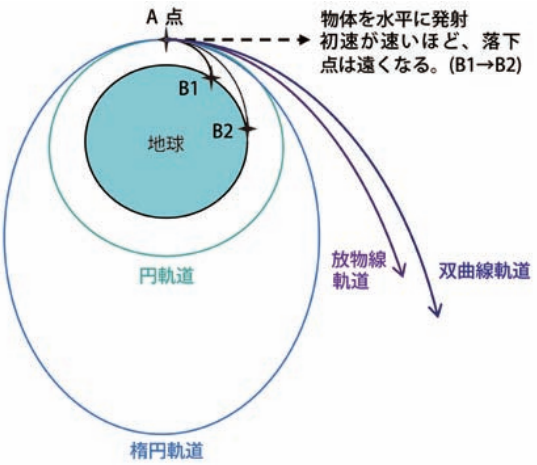
*1　事象の地平線については後述する。
*2　https://www.nao.ac.jp/news/sp/20190410-eht/
*3　1マイクロ秒（角度の）＝百万分の1秒

げられるといったことが起き、電磁波がリング上に分布して見えることになる。実際のブラックホールは、画像の中で明るく見えている部分の中心付近、何もない部分（ドーナツの穴）に存在するのである。

2. ブラックホールとは何か？

私は度々一般向け講演や学校での出前授業を行う。その時の定番の質問がブラックホールに関するものである。たくさん質問を受けるが、ブラックホールが何であるのかについては、あまり知られていないと感ずる。いったいブラックホールとは何なのであろうか？

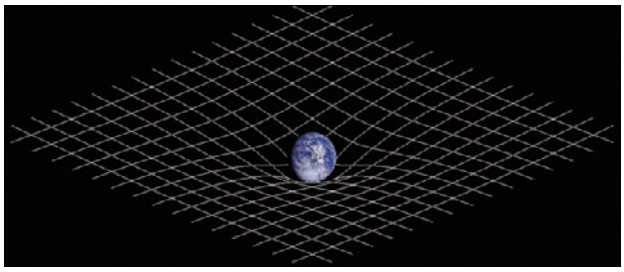
本稿を読まれる方の多くは高校時代に物理を履修し、力学の授業で**図3**のようなものを見たことがあるだろう。**図3**のA点から物体を水平方向に投げることを考える。初速がそれほど速くなければ、物体は近くの点B1に落下する。より大きな初速を物体に与えれば、より遠くの点B2に落下する。さらに大きな初速を与えれば、物体は地球の周囲の円軌道を周回するようになる（第1宇宙速度）。地球の質量及び半径をそれぞれM、R、重力加速度をGとすると、第1宇宙速度は、$v_1 = \sqrt{\frac{GM}{R}}$と書ける。さらに初速度を上げていくと、物体は楕円軌道を周回するようになり、さらに速度を上げるとついに地球から無限遠に至る放物線軌道を取るようになる。この時の速度を第2宇宙速度(脱出速度)と呼び、$v_2 = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$と書ける。ここで、質量$M$を大きくするか半径Rを小さくすると第2宇宙速度がどんどん大きくなることが分かる。半径Rを小さくして第2宇宙速度が光速cに等しくなったと考えると、その半径は$R_g = \frac{2GM}{c^2}$と求められる。これは、ある質量Mの物体を半径R_g以下に圧縮すると、そこからは何も脱出できないことを意味する。これが古典的な意味でのブラックホールである。



■図3. 脱出速度（宇宙速度）の説明。脱出速度が光速に等しいと仮定すると、中心に古典的なブラックホール相当の物体があることになる。（「宇宙航空研究開発機構（JAXA）提供」）

ここまでの説明は、ニュートン力学の世界でのものであった。現代的な意味でのブラックホールの存在は、アインシュタインが構築した一般相対性理論に基づく重力場方程式（アインシュタイン方程式）の解として予測されたものである（一般相対性理論と聞いて頭が痛くなった方には申し訳なく思いますが）。一般相対性理論では、質量が存在するとその周囲の時空が歪む、と考える（**図4**）。より大きな質量の周囲の時空はより大きく歪む。**図4**で、地球から遠方では歪んだ平面の傾きは緩く、物体が感じる重力は弱い。一方、地球の近くでは歪みが大きくて傾きが大きく、物体が感じる重力は強い。このように一般相対性理論では、重力を時空の歪みとして説明する。時空が歪むと、時間がゆっくり進む。このためGNSSシステムでは、搭載している時計の時間がごく僅かだがゆっくり進むことを補正した上で信号を地上に向けて送出している。GPSの場合、1日当たり8.6×10^{-6}秒ずれる。これに光速（299792.458kms^{-1}）を掛け算すると距離では2.6kmもずれ、補正なしでは使い物にならないことが分かる。

ここで、**図4**の地球の質量を大きくしていくことを考えよう。質量が大きくなると時空の歪みが大きくなり、時間の進みが遅くなる。さらに質量を大きくするとさらに時空の歪みが大きくなり、さらに時間の進みが遅くなる。電磁波の周波数は1秒間の振動数であるから、時間の進みが遅くなると、私たちから見て電磁波の振動数が減り波長が引き伸ばされて見えることになる。つまり時空の歪みにより赤方偏移（重力赤方偏移）が起こる。やがてついに、私たちから見て時間が進まないほど時空の歪みが大きくなると、電磁波の波長が無限大に伸び、大きく歪んだ領域からの電磁波は私達に向けて伝搬することがなくなる。言い換えると、この



■図4. 時空のひずみの概念図。時空をゴム膜のように表現している。地球の周囲の時空も歪んでいるため、GPS等からの信号を補正しないと正しい位置や時刻が得られない。https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spacetime_curvature.png より。

ような領域の内側からは電磁波によって伝わる一切の情報が届かなくなる。この境界が「事象の地平線」であり、そのような領域は「真っ黒な穴」— ブラックホール — として認識される。事象の地平線の半径は $R_g = \frac{2GM}{c^2}$ となることが分かっており、これをシュヴァルツシルト半径と呼ぶ。

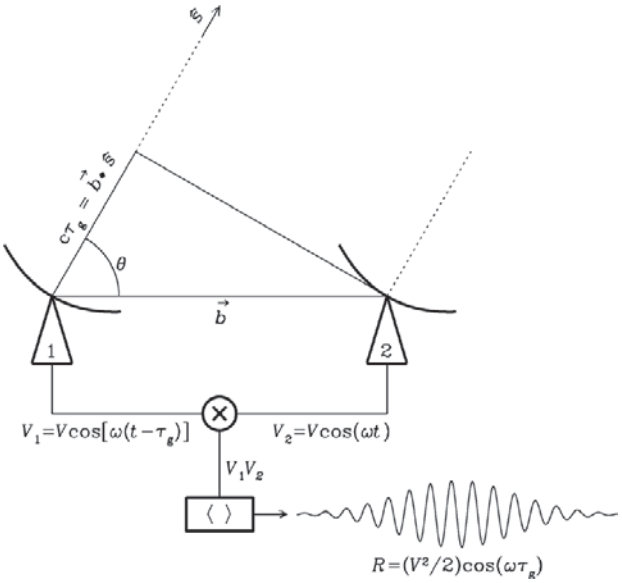
面白いことに、一般相対性理論に基づいて求めたシュヴァルツシルト半径は、ニュートン力学によって求めたものと合致する。ここまで読んだ方は、なぜ私が冒頭で記述したような違和感を持ったのかをご理解いただけるだろう。

3. ブラックホールシャドウを撮像できたVLBI観測とは?

EHTプロジェクト*4は、ブラックホール周囲にある事象の地平線近傍の電波画像を取得し、その画像中心にぽっかりと穴が空いている様子を描き出すことを目的として2012年に始まった。事象の地平線の大きさ（角度）は大変小さいことが予想される。非常に小さい角度分解能の観測を実現する方法が、電波天文観測の一種である超長基線干渉計（Very Long Baseline Interferometer：VLBI）である。EHTプロジェクトは、世界の電波望遠鏡のいくつかをVLBIの手法を用いて連携し、初めて成り立つプロジェクトである。

さて、VLBIの説明の前に（電波）干渉計の説明をしよう。よく知られているように、直径Dのパラボラアンテナが波長 λ で送受信する場合の主ビーム幅FWHMは、$\frac{\lambda}{D}$ と表される。これから容易に分かるように、ビーム幅を小さくする、すなわち空間分解能を高めるためには、短い波長（高い周波数）を用いるかアンテナを大きくすれば良い。高周波数を受信するための高感度受信機は技術開発により利用可能となってきた。一方、アンテナの大きさをどんどん大きくすると、アンテナ自身の重量により変形してしまい送受信効率が悪化してしまう。

この難点を解消できる技術が干渉計である。これ以降は、信号を受信するケースに限定する。図5に干渉計の原理図（2素子の場合）を示す。干渉計では、複数のアンテナを配置して天体からの電波を受信する。天体は非常に遠方にあるため、天体からの電波は平面波としてアンテナに入射するが、図におけるアンテナ1（左側）とアンテナ2（右側）に電波が入射する時刻は、アンテナ間の距離と天体方向で決まる光路差（図では $c\tau_g$ と表記されている；cは光速）を電波が進む時間 τ_g だけずれる。2つのアンテナから



■図5. 電波干渉計の原理図。遠方にある天体から平面波として地球に到達する電波は、2つのパラボラに光路差$c\tau_g$をもって到達する。時間差τ_g（遅延）を補正しながら2つのパラボラからの信号V_1とV_2を干渉させることにより、天体の輝度分布に対応する相関出力を得る。
（credit：Essential Radio Astronomy, National Radio Astronomy Observatory
https://www.cv.nrao.edu/~sransom/web/xxx.html）

の出力電圧V_1とV_2を、遅延を補正しながら相関器に入力し、相互相関関数を計算する。相互相関関数が干渉計からの出力であり、時間の経過に伴って振動する（図5の右下）関数である。これをフリンジ（干渉縞）と呼ぶ。フリンジの振幅にV^2が入っていることからわかるように、フリンジの振幅は天体放射の強度Vに直接関係する量である。このようにして得られた相互相関関数をフーリエ変換するとクロスパワースペクトラムが得られる。クロスパワースペクトラムは振幅と位相を持つ複素量である。強度の相関を取り、フーリエ変換すると元の強度が得られることは、ウィーナー−ヒンチンの定理（Wiener-Khinchin theorem）としてよく知られている。

ここまでは、天体の位置がビーム中心に合致しているとの暗黙の仮定を置いていた。さて、天体の位置がビーム中心からΔlだけずれている場合を考えよう。アンテナ間の距離をD、受信波長をλとすると、位相のずれは $\Delta\phi = 2\pi\frac{D\cos\theta}{\lambda}\Delta l$ と与えられる。すなわち、位相差から位置の差を求められることが分かる。$D\cos\theta/\lambda$のことを空間周波数（Spatial Frequency）と呼ぶ。空間周波数は何を意

*4　https://eventhorizontelescope.org/

味するのであろうか？周波数は単位時間あたりの振動回数であり、振動の位相を時間で微分した量に比例する。同様に、空間周波数は、フリンジ（干渉縞）の位相を天球面上で空間方向に微分した量であり、1ラジアン当たりのフリンジの振動回数を表している。空間周波数が大きいと、僅かな天体位置の違いでも大きなフリンジ位相差として観測できる。つまり、非常に細かな空間構造を観測できることを意味する。通常、天体には構造があるが、これを点源の重なりとみなせばよく、空間周波数の重ね合わせとして表現できることが分かる。様々な空間周波数成分をできるだけ多く観測し、フーリエ変換すれば、天体の輝度分布が得られることになる。この場合の空間分解能（干渉計のビームの大きさ）は、単一アンテナと同様の式 $\frac{\lambda}{D}$ で表されるが、ここでのDは最大のアンテナ間距離に対応する。言い換えれば、干渉計観測では、アンテナ間距離（基線長という）を大きくすればするほど高い空間分解能が得られる。

より高い空間分解能を得るためにアンテナ間距離を究極まで拡げて観測する技術がVLBIである。VLBIでは、各アンテナからの出力信号に精密な時刻信号を付与する形で記録する。通常の干渉計であれば各アンテナで受信した信号をケーブルで相関器に入力することが可能なので、アンテナ間で共通の時刻信号を用いることができる。しかし、VLBI観測に用いるアンテナは100km以上離れている場合が通常であるので、共通の時刻信号を利用することができない。時刻信号は、通常、水素メーザーを基準とした時計が生成したものを使う。時刻信号付きのアンテナ出力信号は、相関処理を行う所に何らかの手段を用いて物理的に移送された後に相関処理される。地上アンテナをVLBIで用いる場合、最大の基線長は地球の直径である約13,000kmになる。衛星に搭載したアンテナと地上のアンテナを組み合わせれば、軌道長半径が基線長となる観測が可能となる。EHTは、**図6**に示すように、ほぼ地球直径を基線長とするVLBI観測により実施された。観測周波数は230GHz（波長1.3mm）であるので、空間分解能はおよそ20×10^{-6}秒＝20マイクロ秒を達成できた。これは視力300万に相当し、月面に置いたゴルフボールが見えるほどの高分解能である。

■図6. M87の中心にあるブラックホール周辺の撮像に使われた電波望遠鏡の分布。グリーンランドから南極までカバーしている。（Credit：NRAO/AUI/NSF）

4. ブラックホールを研究する社会的意味とITU

私たちが非専門家の方向けの講演を行うときによく聞かれる質問に、「宇宙の研究が何の役に立つのですか？」がある。天文学の研究成果が役立つ製品として応用されるわけではないのは明らかなので「（経済的にという意味で）役に立ちませんよ」と答える。

しかし、本記事の執筆を依頼されたことからも想像されるように、経済的には役立たなくても、天文学は人々の知的好奇心を大いにかき立てた。ブラックホールというパワーワード（バズワード？）が伴ったという背景はあるだろうが、EHTによる研究成果発表後、マスメディアでは連日ブラックホールシャドウ関連の報道が続いた。人間には誰にでも「知りたい」という基本的な気持ちがある。天文学に限らず、人類の限りない好奇心を満たそうという活動がサイエンスである。面白いと感じれば誰でももっと知りたくなるものである。小さな子供は好奇心が服を着て歩いているようなものである。大人になる過程で好奇心を忘れてしまう場合があるかもしれないが、時には子供の頃を思い出して広い宇宙に心を寄せてみるのも良いだろう。

国立天文台の野辺山宇宙電波観測所の建設予算は約100億円、すばる望遠鏡の場合は約400億円である。確かに巨額の予算である。しかし、日本の人口で割り算すれば、一人当たり、それぞれ100円、400円である。おにぎり1個やコーヒー1杯のお金で宇宙をよく知ることができると考えてみるのはいかがであろうか。

ITUは、有限な電波資源を公平に活用するための国際機関である。電波天文業務は厳しい要求を行ってしまうが、能動業務の皆さんにその要求に応えていただくことで、人類の好奇心に「共に」大いに貢献できるのである。