

第 122 回 CIS パートナー会議事録(一般様用)

開催日時 2022 年 7 月 31 日(日) 13 時~16 時 30 分  
講師 西村 靖紀 様  
テーマ 「究極の可視化」の話題提供



会議風景

可視化

「究極に近い可視化」の話題の提供である。

可視化とは、人間が直接見ることのできない現象・事象・関連性を「見る」ことのできるもの(画像・映像・グラフ・図表など)にすることをいう。

視覚化・可視化情報化・視覚情報化ということもある。

可視化技術例

画像診断 X 線、CT、MRI、超音波エコー、内視鏡、PET、血管造影

イメージサイエンス 高速画像処理

コンピュータ シミュレーション

イラストレーション、インフォグラフィクス

サーモグラフィ

スローモーション 超高速撮影

観察・観測・測定 巨大望遠鏡、宇宙望遠鏡、衛星画像、気象衛星、ミュオグラフィ\*、データ可視化

ここでは究極に近い可視化として

**ブラックホールの撮影**

**光の伝播を捉える超高速撮影**

**陽子の可視化**

\* ミュオンという素粒子を利用して巨大物体を透視する最先端技術  
宇宙から降り注ぐ宇宙線の一種で透過力の強いミュオンの飛跡を元に透過した物体の密度分布を再構成する  
これまで、火山マグマ、溶鉱炉、ピラミッドの内部構造の調査や福島原発の炉心現状を調査するためにも使用された

1) 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 4. 2019

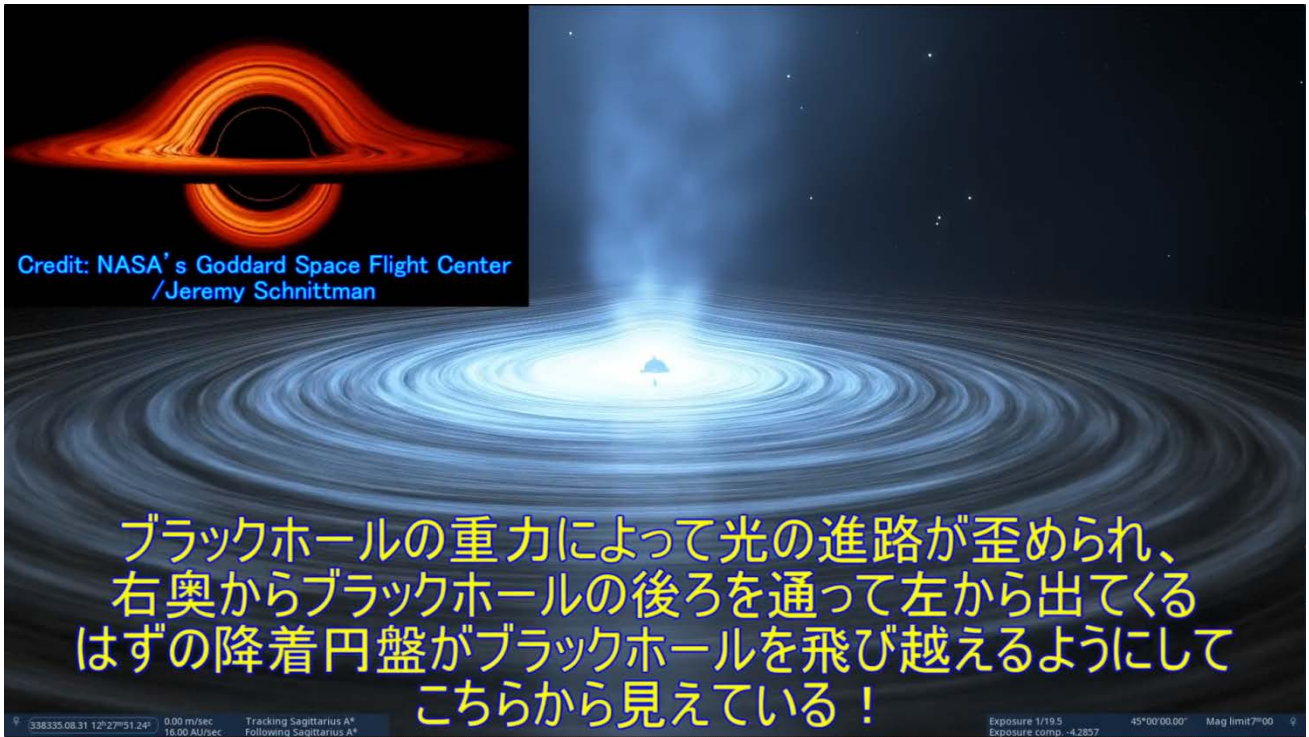


イベント・ホライズン・テレスコープで撮影された、銀河 M87 中心の巨大ブラックホールシャドウ。リング状の明るい部分の大きさはおよそ 42 マイクロ秒角であり、月面に置いた野球のボールを地球から見た時の大きさに相当する。(Credit: EHT Collaboration)



この映像で分かったこと:

- 地球から 5500 万光年離れた M87 銀河系の中心にあるブラックホールは太陽の 65 億倍。
- 降着円盤の温度 50 億度 $^{\circ}\text{C}$  …… ブラックホールに吸い込まれる物質が高速近くまで加速されその物質同士の衝突によると説明されている。今まで知られている温度 太陽の  $5500^{\circ}\text{C}$  をはるかに超える高温。太陽系で一番熱い恒星の温度  $21万^{\circ}\text{C}$  をはるかに超す。



NASA によるブラックホールで光が曲げられたシミュレーション

2019 年 4 月 10 日、イベント・ホライズン・テレスコープ 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。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 億倍にも及ぶ。

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ある。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。

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あるが、我々はこれまでそれを直接見たことはない。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る。

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る。また、ブラックホールの質量を測定することもできる。

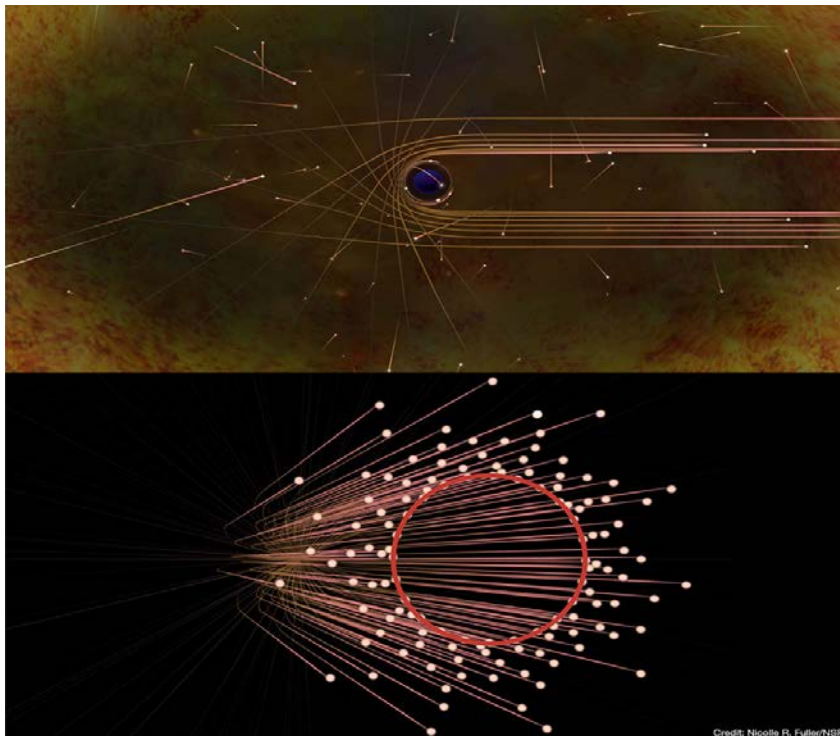
#### イベント・ホライズン・テレスコープ

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。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(ブラックホール)を探る新しい手段を研究者たちに提供する。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る。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する。

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。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ある。



ブラックホールの周囲の光の軌跡の模式図。



(上) 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う。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る。

(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る。

これが、ブラックホールシャドウである。(Credit: Nicolle R. Fuller/NSF)

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た。これこそが、ブラックホールシャドウ。

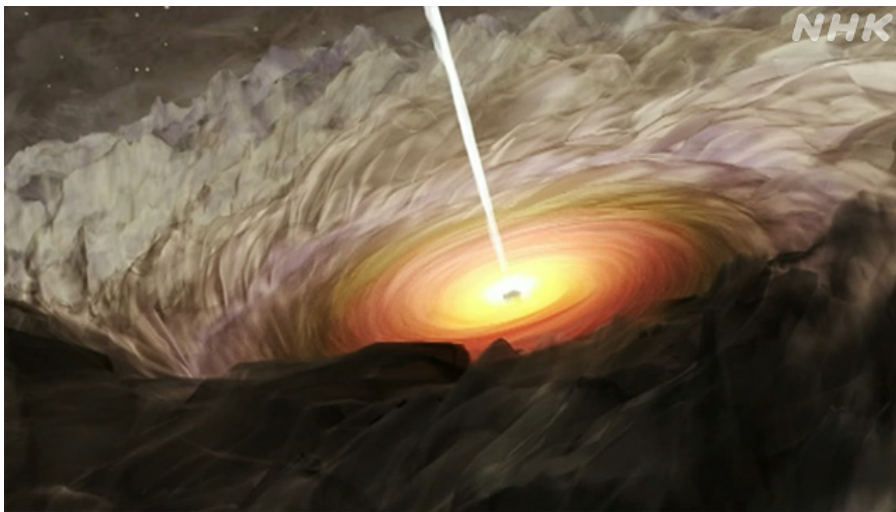
イベント・ホライズン・テレスコープで繰り返し観測を行っても、このシャドウの存在は揺らがなかった。

「ブラックホールシャドウを写し出せたと確信した後、我々はシミュレーション結果とこの画像を比較した。

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る。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た。

これによって、ブラックホール質量推定や我々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た。」と、東アジア天文台長であるポール・ホー氏は語っている。

国立天文台ニュース <https://www.nao.ac.jp/news/science/2019/20190410-eht.html>

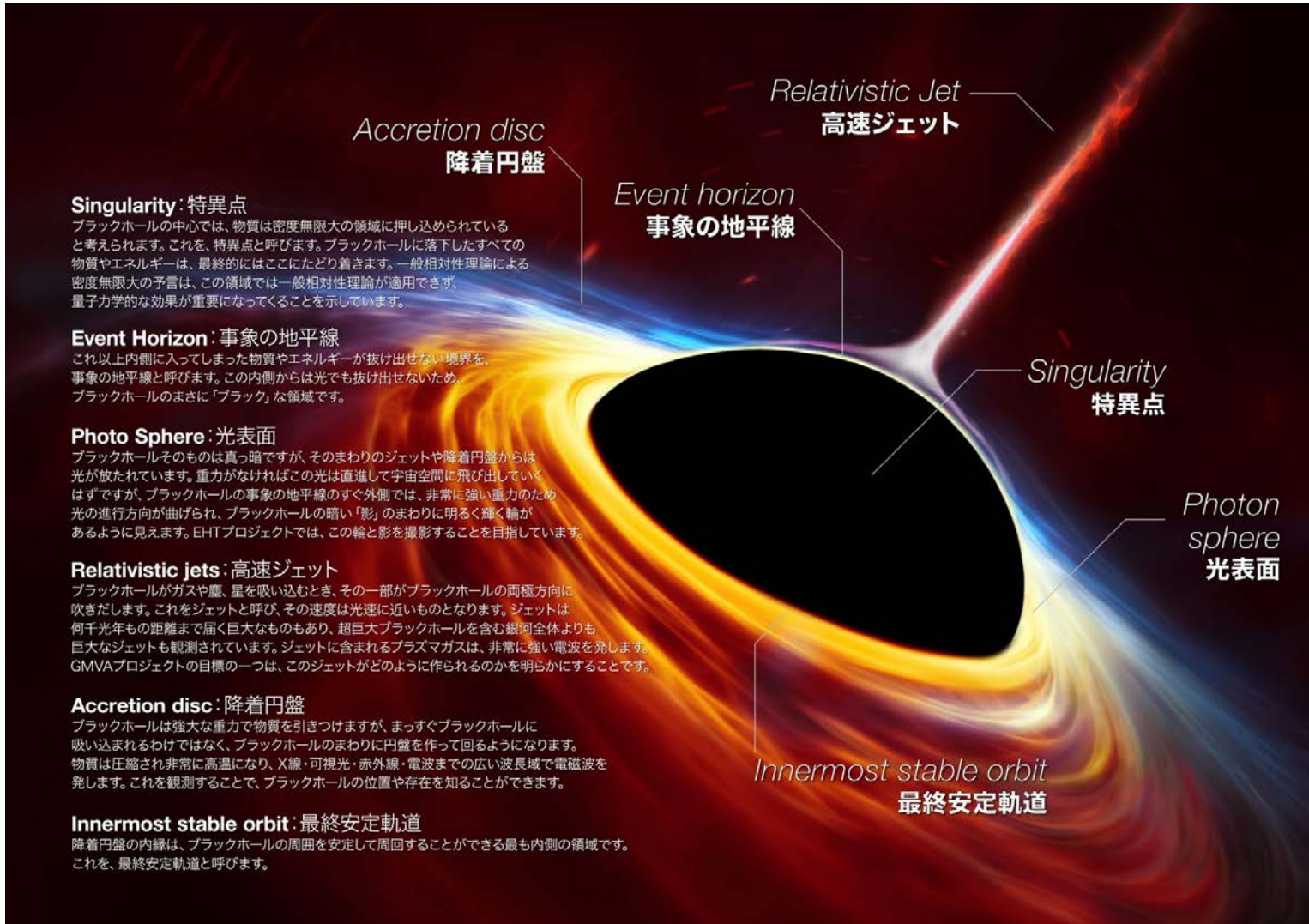


降着円盤とは、中心にある重い天体の周囲を公転しながら落下する物質によって形成される円盤状の構造のことである]。中心の天体は典型的には恒星であり、この場合は星周円盤とも呼ばれる。円盤の中を公転している物質は摩擦によって中心の天体に向かってらせん状に落下していく。重力と摩擦力によって物質は圧縮され温度が上昇し、円盤からの電磁放射が引き起こされる。この電磁放射の周波数の範囲は中心天体の質量に依存する。若い恒星や原始星まわりの降着円盤は赤外線を放射し中性子星やブラックホールまわりの場合は電磁スペクトルのうち X 線の放射を行う

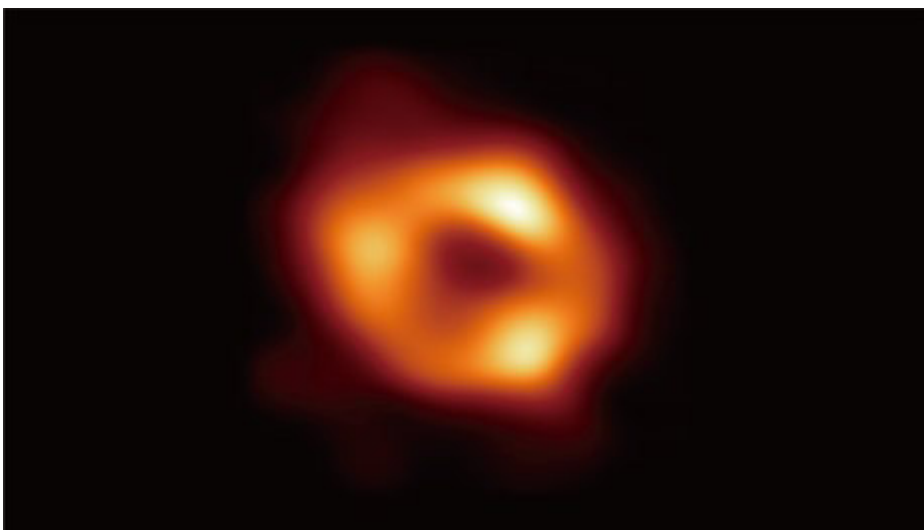


ZOOM 会議

## ブラックホールの構造



## 天の川銀河中心のブラックホール撮影に成功、存在を実証 国立天文台など

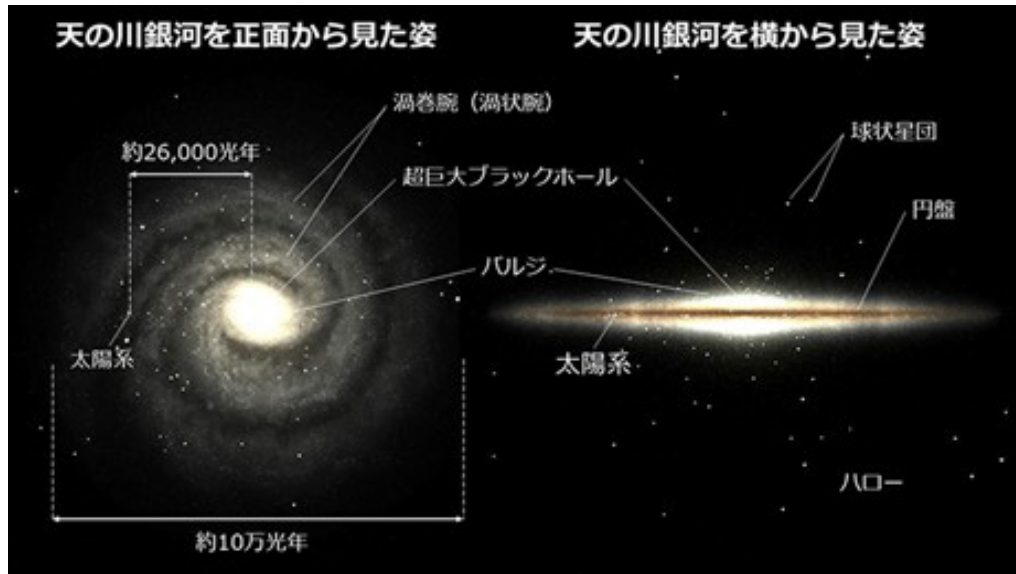


撮影に成功したブラックホール「いて座 A スター」(イベント・ホライズン望遠鏡・コラボレーション提供)

天の川銀河の中心にあるとされてきた巨大ブラックホールの撮影に成功し、存在を実証した、と国立天文台などの国際研究グループが発表した。

ブラックホールは強い重力で光をも飲み込むが、世界各地の電波望遠鏡を連携させ高性能を得る技術を活用。2019年に発表した別の銀河のものに続き、2例目の撮影となった。輝くガスのリングに縁取られた漆黒の穴が姿を見せた。

直径約 10 万光年に及ぶ天の川銀河の中心は、地球から見るといて座の方角にあり、強い電波やエックス線を放つ「いて座 A 星」が観測されていた。これが大質量の小さな天体であり、ブラックホールとみられることを示した 2 人の研究者が 2020 年にノーベル物理学賞を受賞した。ただ、撮影できておらずブラックホールであるとの確証はなかった。



天の川銀河の模式図。渦巻き構造を持ち、横から見ると、どら焼きのような形をしている。中心には巨大ブラックホールが考えられてきた（加藤恒彦氏、国立天文台 4 次元デジタル宇宙プロジェクト、国立天文台、アルマ計画提供）

そこで研究グループは、日本が主導する南米チリのアルマ望遠鏡など、世界 6 カ所にある計 8 つの電波望遠鏡を連携させ、仮想的に直径 1 万キロに匹敵する高性能の望遠鏡「イベント・ホライズン・テレスコープ」を構築。2017 年 4 月、いて座 A 星を観測した。5 年間の解析作業を経て、輝くガスのリング状の構造と、その中の光を放たず暗い領域の画像が得られた。この暗い領域がブラックホールの本体で、いて座 A 星の正体を視覚的に実証した。

質量は、周囲の星の運動から求められていた値と同じ、太陽の約 400 万倍と判明。直径は 6000 万キロほどで、アインシュタインの一般相対性理論から予測された値と一致した。

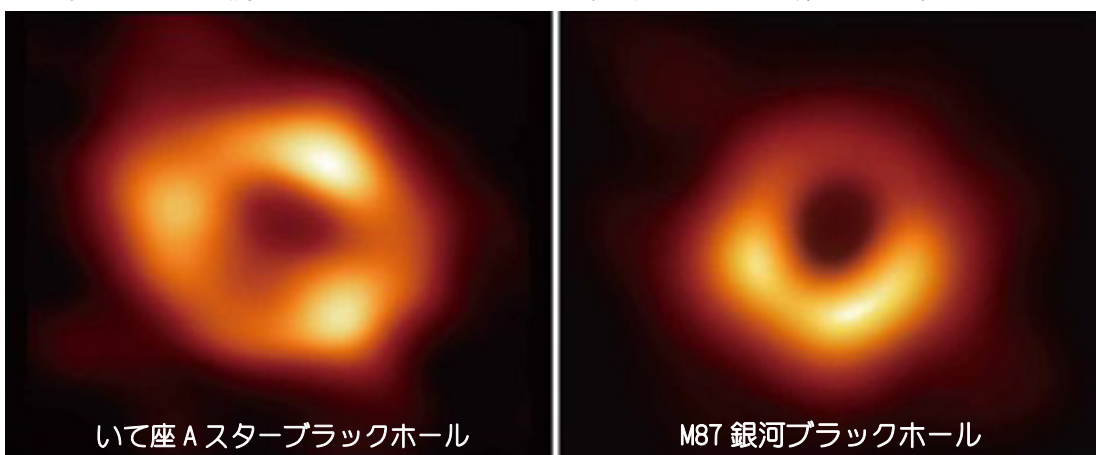
研究グループは同じ 2017 年に、地球から 5500 万光年離れたおとめ座の M87 銀河の中心にある巨大ブラックホールも撮影しており、先に解析して 2019 年に発表した。

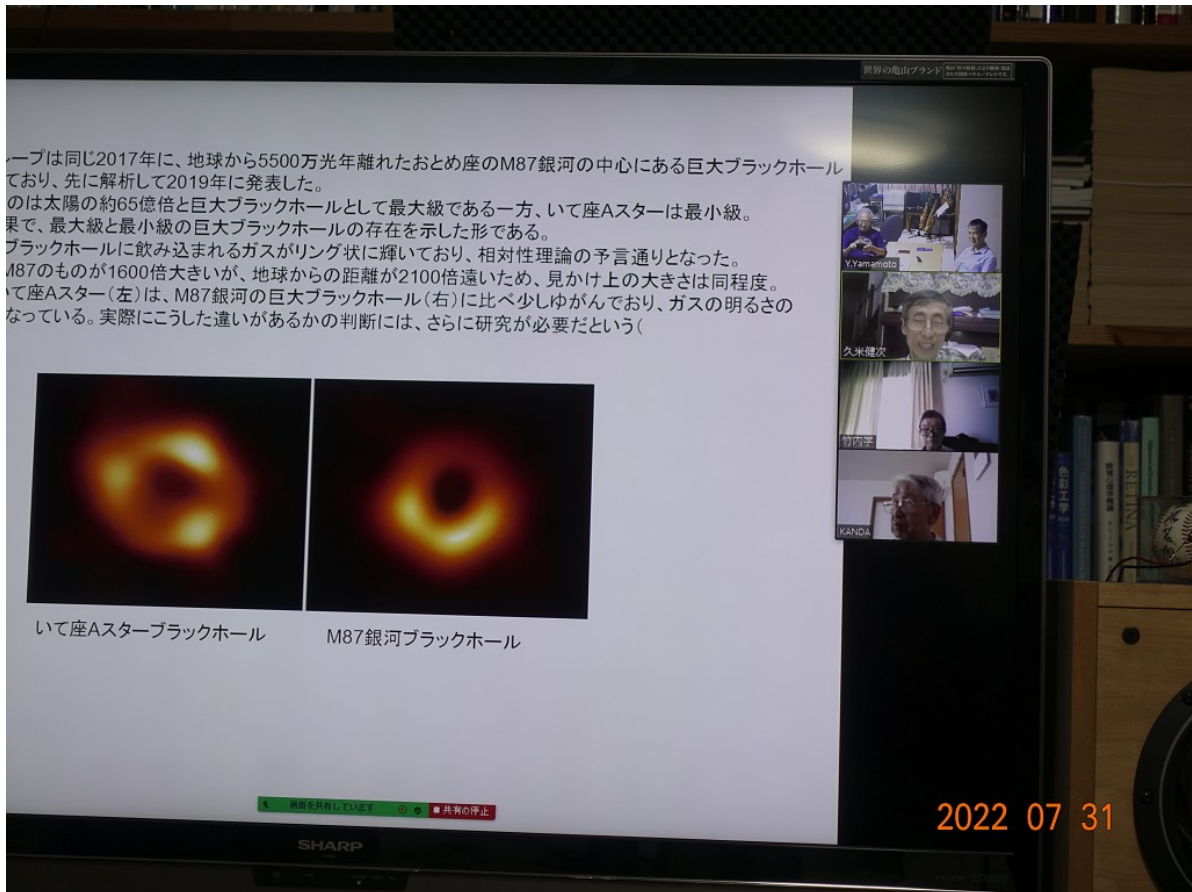
M87 のものは太陽の約 65 億倍と巨大ブラックホールとして最大級である一方、いて座 A 星は最小級。2 回の成果で、最大級と最小級の巨大ブラックホールの存在を示した形である。

いずれもブラックホールに飲み込まれるガスがリング状に輝いており、相対性理論の予言通りとなった。

大きさは M87 のものが 1600 倍大きい、地球からの距離が 2100 倍遠いため、見かけ上の大きさは同程度。

画像のいて座 A 星（左）は、M87 銀河の巨大ブラックホール（右）に比べ少しゆがんでおり、ガスの明るさの分布が異なっている。実際にこうした違いがあるかの判断には、さらに研究が必要だという



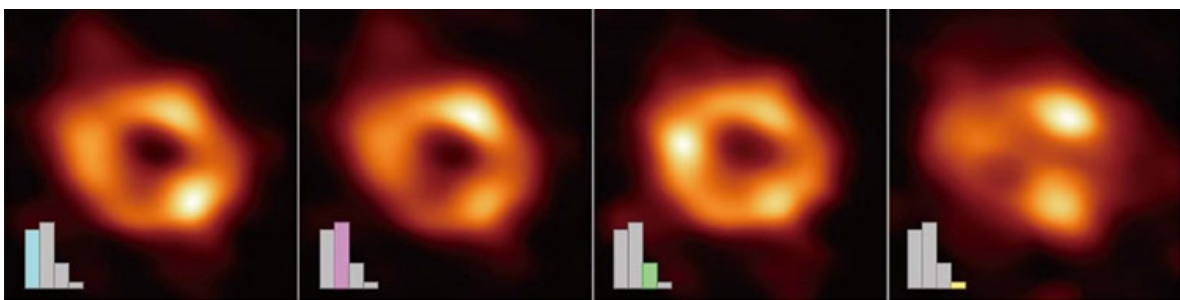


ZOOM 会議風景

M87のブラックホールは姿がゆっくり変化するのに対し、はるかに小さいいて座Aスターはわずか数分で劇的に変動するため、画像化が難航した。20万通り以上の画像化手法から、最適な組み合わせを選んだ。多数の画像を特徴により4つのグループに分類し、これらを平均化して最終的に1枚の画像にまとめた。

研究グループのドイツ・ゲテ大学の森山小太郎博士(理論天文学)は12日の会見で「技術の発展とデータの綿密な解析により、5年がかりでようやく自信を持って画像を紹介できた。」と述べた。画像化の過程で、撮影された多数の画像を特徴ごとに4グループに分類した。リングの明るさの分布が異なるもの(左から3つ)が大半だが、リング状ではないもの(右端)もあった

(イベント・ホライズン・テレスコープ・コラボレーション提供)



今後は望遠鏡の増加や解析手法の改善などにより、ブラックホールが変動する様子を動画で捉えることや、いて座Aスターにガスが高速で噴き出すジェットがあるかどうかの検証、観測を通じた一般相対性理論の検証などが研究課題となるという。



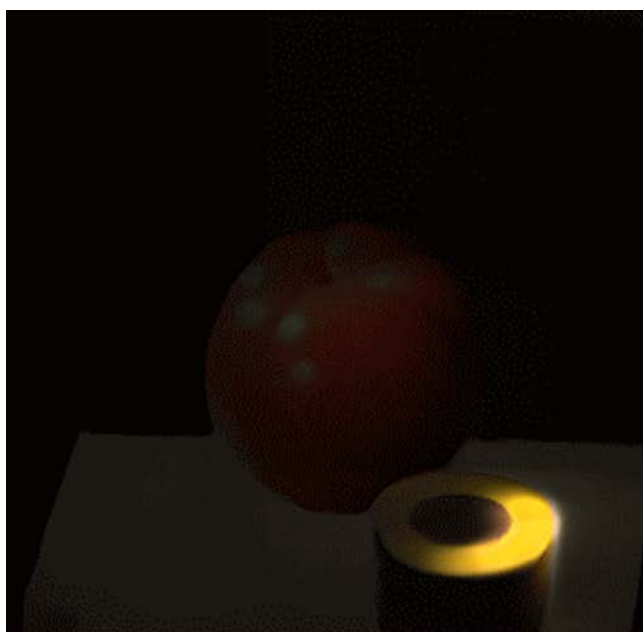
## 2) 光の伝播を捉える超高速撮影

1,000,000,000,000fps の高速度撮影で光の進行をとらえるカメラ MIT が開発 2011.12.14

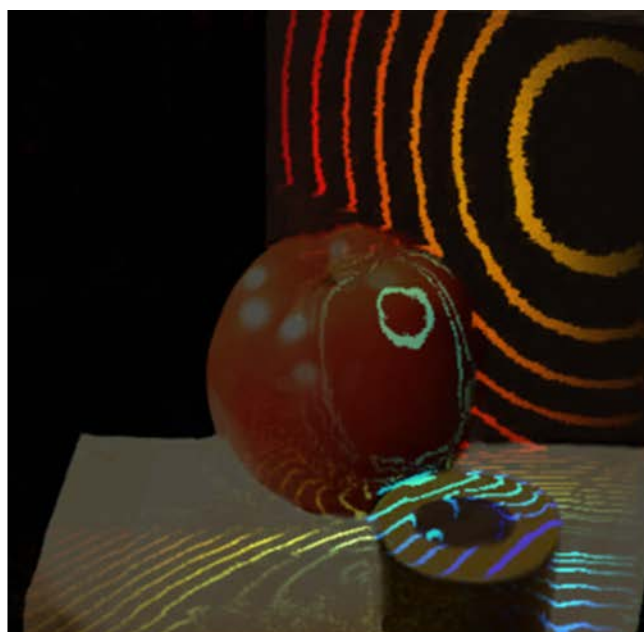
### 1兆フレーム/秒で光の進行をとらえるカメラ

MIT、Media Lab の研究者チームが開発したカメラは、1秒あたり1兆フレームという驚異的な高速度撮影が可能で、光の波が進む様子をとらえることができた。

MIT の撮影装置(設計はラメシユ・ラスカー博士とそのチームが行っている)は、「フェムト秒(千兆分の1秒)のレーザー照明と、ピコ秒(1兆分の1秒)精度の検出器、いくつかの数学的再構成技術」を使い、場面に照明を当て、レーザー光のパルスをとらえることだ。2D にするために、複数の鏡が使われている。カメラの視野を動かすため、露光時間は1.71ピコ秒で、動画の長さは480フレームである。結果として得られるのは、光の波が進む様子を示す動画だ。個々のフレームを色分けすることで、波面を虹で表すこともできる。



Light in Motion: Combination of modern imaging hardware and a reconstruction technique to visualize light propagation via repeated periodic sampling.



Ripples of Waves: A time-lapse visualization of the spherical fronts of advancing light reflected by surfaces in the scene.

### 1兆FPS 高速度撮影の概略

光の伝播を可視化するイメージングソリューションを構築しました。各フレームの有効露光時間は2兆分の1秒で、光の動きを1秒間に約0.5兆フレームで可視化することができます。

可視化することができます。このようなフレームレートで反射光や散乱光を十分な明るさで直接記録することは、ほぼ不可能です。

私たちは、時間と視点を注意深くスキャンして、何百万回もの測定を繰り返す間接的な「ストロボスコープ」方式を採用しています。

間接的な「ストロボ方式」を採用しています。この装置は、MIT メディアラボのカメラ文化グループが、MIT 化学部のパウエンディ研究室と共同で開発したものです。

1兆分の1秒以下のレーザーパルスをフラッシュとして使用し、その場から戻ってくる光をカメラで収集します。1秒間に約0.5兆コマに相当する光をカメラで集めます。

しかし、露光時間が非常に短く(約2兆分の1秒)、カメラの視野が狭いため。

フェムトフォトグラフィーと呼ぶ新しい技術は、フェムト秒レーザーの照射、ピコ秒精度の検出器、数学的再構成技術で構成されています。

光源はチタンサファイアレーザーで、約13ナノ秒の間隔でパルスを照射します。

これらのパルスはシーンを照らし、またピコ秒精度のストリーク管をトリガーとして、シーンから戻ってきた光を捕捉します。ストリークカメラは、水平方向にはそれなりの視野を持ちますが、垂直方向には非常に狭い(縦方向は 1 本の走査線に相当します)。

この狭い視野を 1 回の撮影で記録できるのは「10 ムービー」だけです。この動画には、およそ 480 フレームを記録し、各フレームの露光時間は約 1.71 ピコ秒である。鏡のシステムを通して、カメラの視野をさまざまな部分に向けることができます。

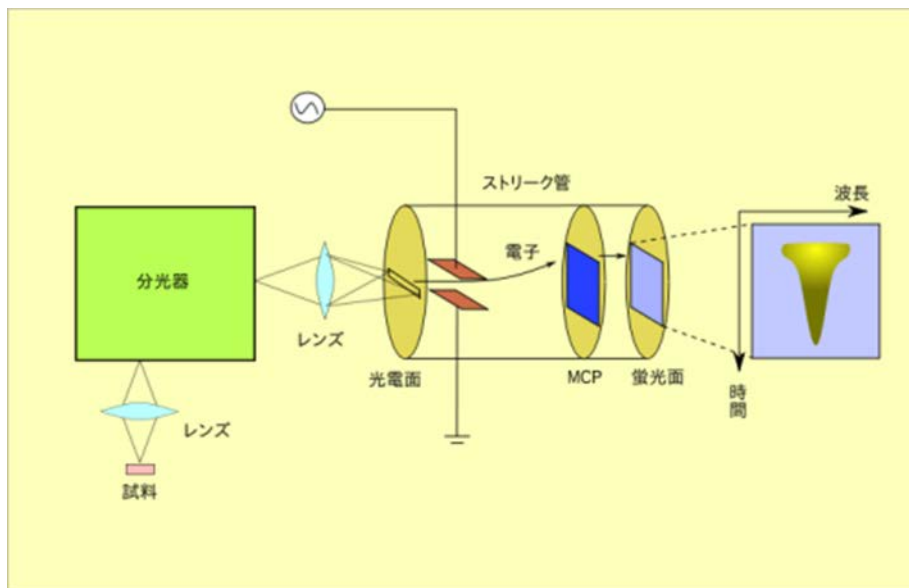
鏡のシステムを通して、カメラの視野を対象物の様々な部分に向け、それぞれの視野の動画を撮影する。

レーザーパルスと動画の開始時間には一定の遅延があります。最後に、我々のアルゴリズムは、このキャプチャデータを使用して、芸術的、教育的な視覚化の可能性だけでなく、欠陥や材料特性を分析する産業用イメージング、超高速プロセスを理解するための科学的イメージング、表面下の要素、すなわち「光による超音波診断」のような応用も期待されています。また、光路解析により、コンピュータグラフィックス技術を用いた写真のレンダリングや再照明など、新しい形の計算機写真も可能になる。

## ストリークカメラ

ストリークカメラは物質の発する一瞬の発光を、10 ピコ秒(1000 億分の 1 秒)の分解能で観測することのできる装置。

その仕組みは以下の図に示す。物質から発せられた光はレンズ系を通して分光器に入射する。スペクトル分解された光はストリーク管の光電面にあたり、光電効果によって電子に変換される。電子は高電場によって加速され、MCP(マルチチャンネルプレート)へ向かうが、この途中に非常に速い速度で振動する電場を印可しておく、電場が上向き的时候は電子は下へ曲げられ、電場が下向き的时候は上へ曲げられるので、時間によって MCP 上で電子の到達する場所が異なることになる。この電場の振動と、入射してくる光のタイミングをうまく合わせることによって、スペクトルの時間分解が可能となります。



ストリークカメラは、光が受光部を幅方向に横切る時間差をもとに、光の点滅の時間的な側面を受光部上の空間的な表示に変換することで、動作している。まず、光のパルスが細いスリットを通過する。そして、最初に受光部に到着した光子があたった位置と後から到着した光子の位置とのスリット垂直方向の偏差を得る。結果として生じるイメージは光のストリーク(線条)を形成し、そこから光パルスの持続時間やその他の時間的特性が観測できる。

通常、ストリークカメラは、周期的な現象を記録するために、トリガーで動作する必要がある。

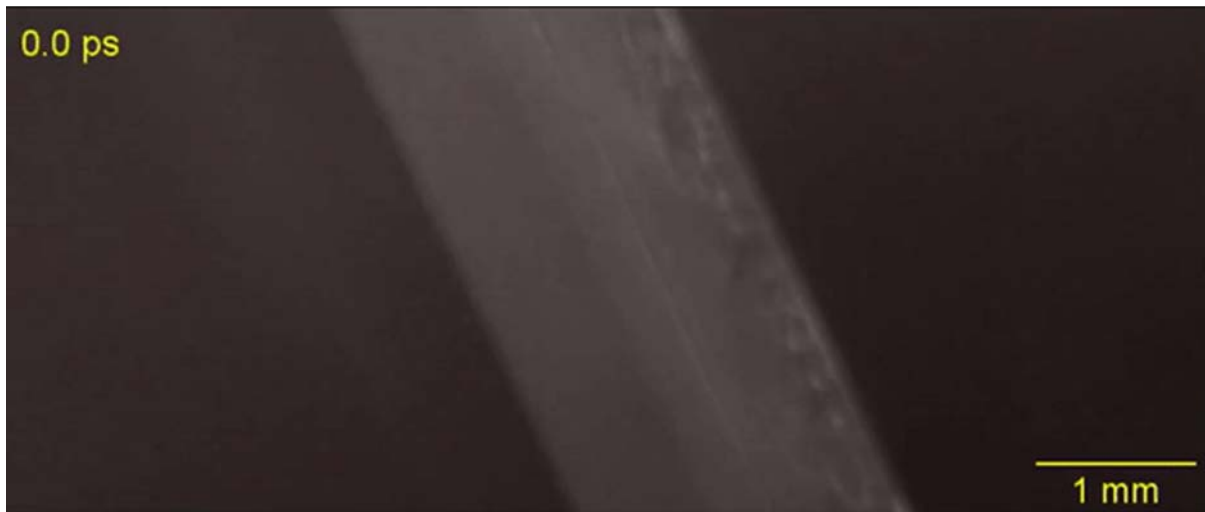
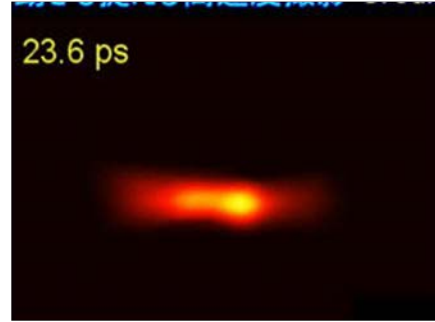
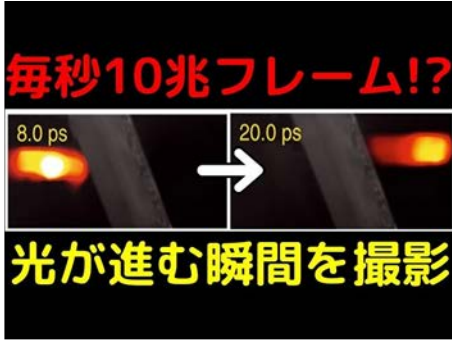
At 10 trillion frames per second, this camera captures light in slow motion

[Devin Coldewey@techcrunch](mailto:Devin.Coldewey@techcrunch)

October 13, 2018

Caltech

カルフォルニア工科大学科学者たちが、光の移動をスローモーションで撮影できるカメラを開発した  
10兆フレーム/秒のフレームレートで25フレーム撮影した。この超高速カメラは、Ultra Fast Photography  
(CUP)の技術が開発により達成できた



1秒間に 10 兆個の動画を作ることができる世界最速のカメラが開発された。

拡散する光もスローモーションで映し出すことができるほど高感度です。

カリフォルニア工科大学とカナダの科学研究所 (INRS) は、世界最速のカメラを開発しました。

今回、カリフォルニア工科大学とカナダ科学研究所は、光と被写体の間のナノスケールにも反応することができる、非常に敏感で強力な最速のカメラを発明しました。

専門家は、このカメラのこの超高速写真 (CUP) プロセスを命名しました。この能力にもかかわらず。

このプロセスはフェムト秒レベルで発生するため、それは高速レーザーランプを見ることができません。

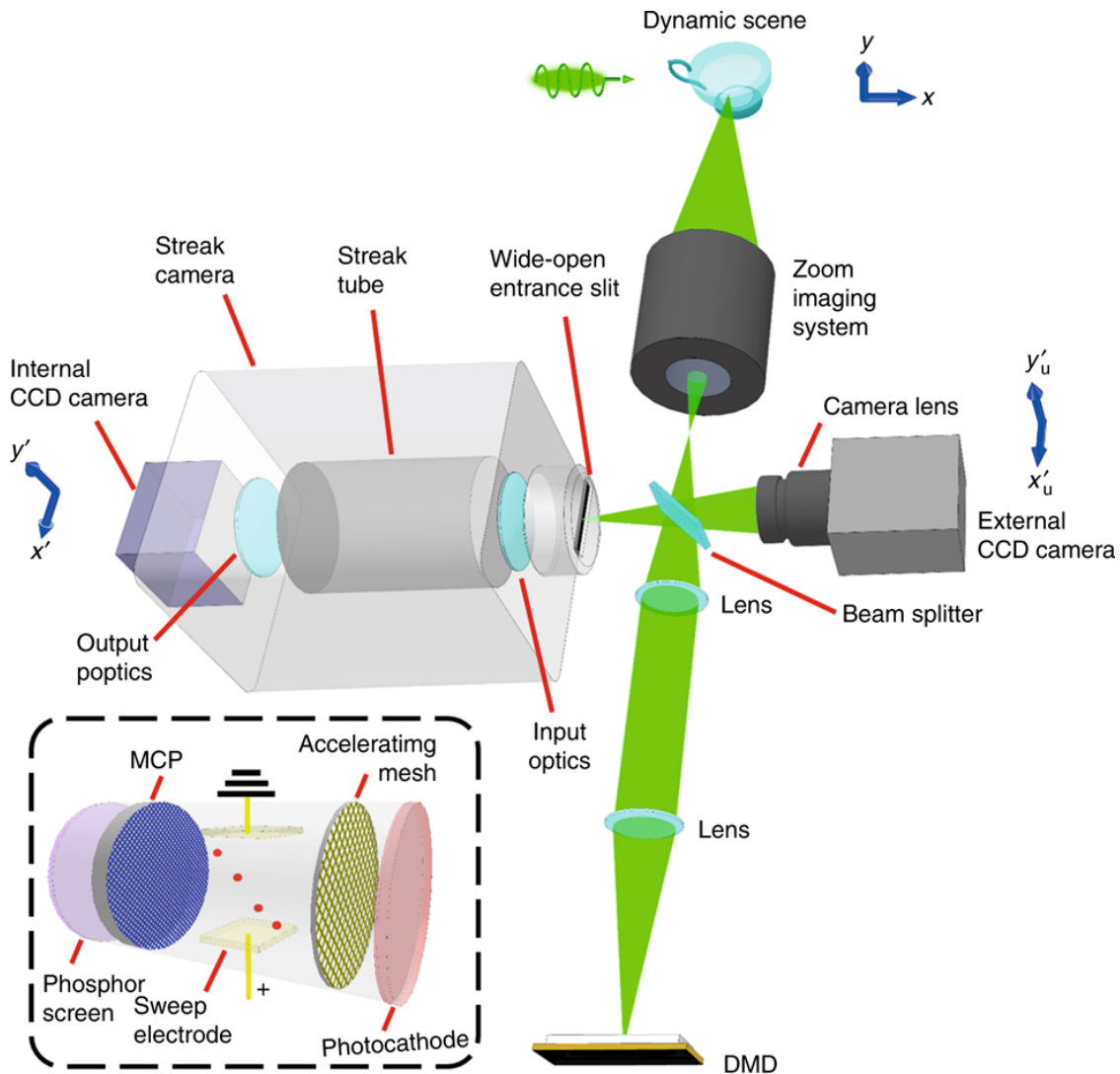
そこで、フェムト秒のストリークカメラとスチルカメラを使って、ラドンと呼ばれるデータレンダリング処理を試みました。

ラドン変換と呼ばれるデータレンダリングを試みました。フェムト秒ストリークカメラは画質に差がありましたがフェムト秒ストリークカメラは画質に差がありましたが、もう一台のスチルカメラでは画像の行列が改善されました。このようにして、何兆フレームもの最高画質が

このようにして、1秒間に何兆フレームもの最高の画像が受信されるようになったのです。

### Schematic of the T-CUP system

挿入図(黒破線枠):ストリークチューブの詳細図。CCD charge-coupled device、DMD digital micromirror device、MCP マイクロチャンネルプレート



The New 'World's Fastest Camera' Can Shoot 70 Trillion Frames Per Second MAY 07, 2020

1秒間に 70 兆フレームを撮影できる「世界最速カメラ」が登場

カリフォルニア工科大学の研究チームは、毎秒 1 兆枚以上の画像を撮影できるカメラを開発しました。従来の「世界最速カメラ」は毎秒 10 兆枚の撮影が可能でしたが、この新しいカメラでは毎秒 70 兆枚まで撮影することができ、これまでの記録を塗り替えました。

この最新のブレークスルーは、カリフォルニア工科大学のこれまでの「1 兆 + fps」カメラを進化させたもので、いずれも何らかの形の「圧縮超高速写真」です。

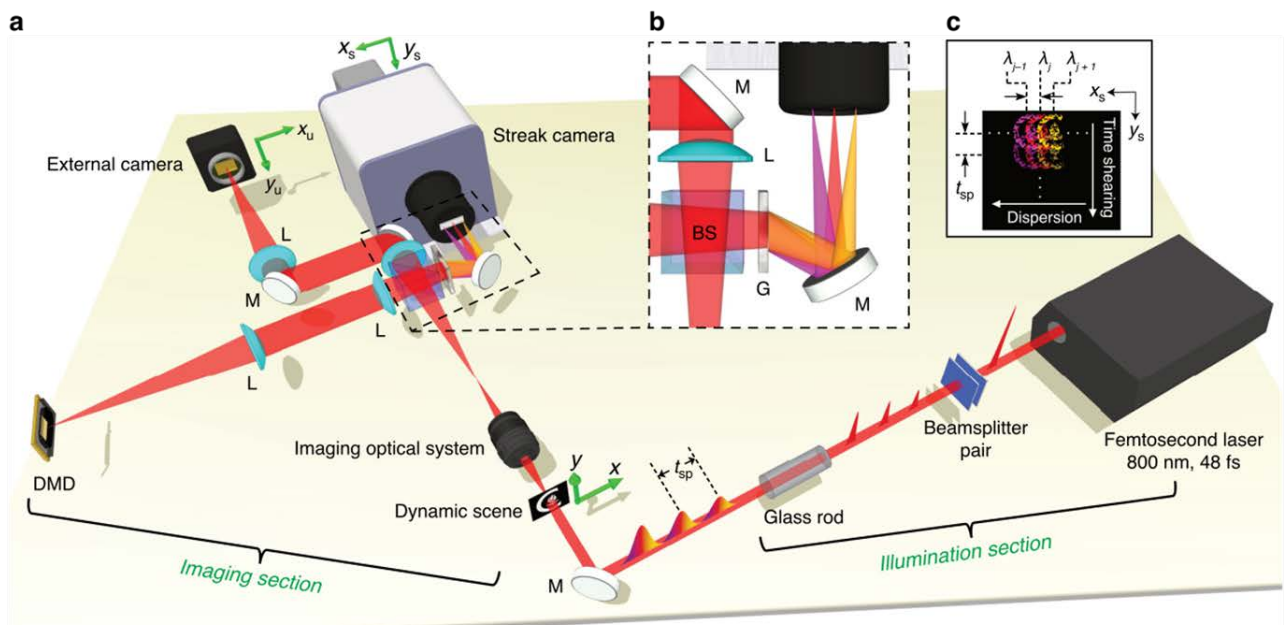
「圧縮超高速写真」または (CUP)。最新のものは CUSP と呼ばれ、Compressed Ultrafast Spectral Photography の頭文字をとったものです。

CUSP は、Compressed Ultrafast Spectral Photography (圧縮超高速スペクトル写真) の略で、最近、透明体の画像を CUSP は、神経細胞のパルスや衝撃波のような透明な現象を 1 兆 fps で撮影することに成功したカリフォルニア工科大学の研究者によるものです。

CUSP は、Lihong Wang とそのチームによって開発され、1 兆分の 1 秒という短いパルス状のレーザー光を発するレーザーを組み合わせている。

CUSP は、1 兆分の 1 秒という短いパルス光を発するレーザーと、個々のパルスをさらに短いパルス光の列に分割する光学系を組み合わせたものである。

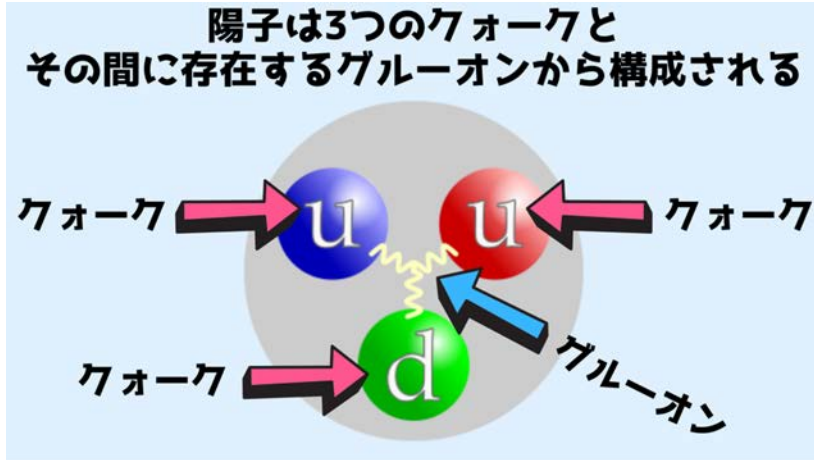
その光パルスの一つひとつが、カメラに画像を映し出すことができます。



70Tfps 撮影用アクティブ CUSP システムの概略図

3) 陽子の可視化 Visualizing the Proton Launch Event April 20, 2022

米国マサチューセッツ工科大学(MIT)とジェファーソン研究所(Jefferson Lab)の研究者たちはアーティストと組んで、これまでの研究成果をもとに物理学的な本質を維持したまま「陽子」を可視化したと発表。

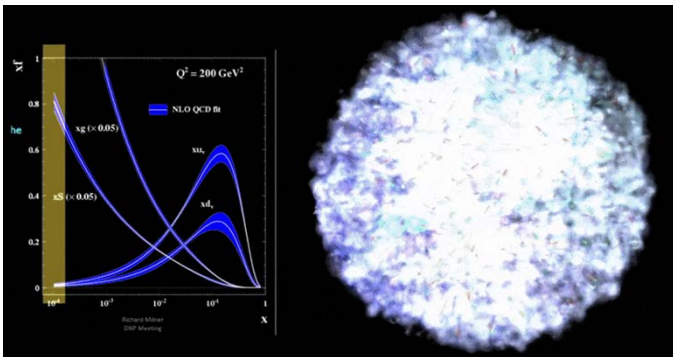


陽子の内部では光速に近い速度でクォークとグルーオン飛び回り、何も存在しない場所から素粒子が現れては消えていくという、極めて流動的な状態になっている。このような流動的な状態を紙面のモデル図や立体模型を使って表現することは極めて困難であった。

今回、MIT の研究者らは、アニメーションを使って陽子の実際の「感じ」を視覚化することにした。

視覚化にあたり最も重視されたのは、実際の観測方法の概念を取り入れることにした。

またアニメーションを表現する際には、生成と消滅を繰り返す粒子、量子色力学に対応する色表現、相対性理論など物理学の本質に忠実であるように努められました。



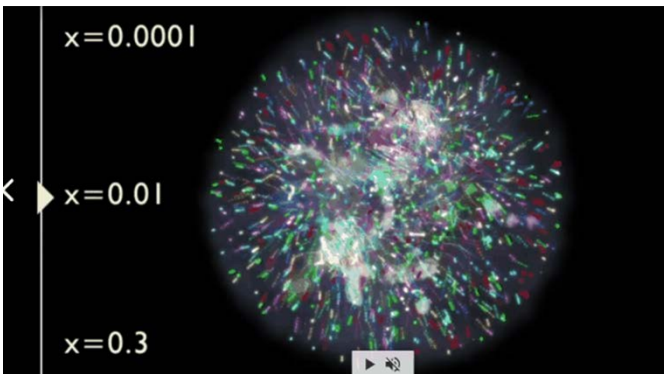
アニメーションでは左のグラフのバーが右側に移動するにつれて、陽子のモヤとした状態が 3 色のハッキリした粒子状態に変化していく様子が映されている。モヤとした部分が力を媒介する粒子「グルーオン」であり、3つの点にあたる部分が物質を構成する素粒子「クォーク」となっている。変化しているのは時間ではなく「撮影時間」の長さ。

陽子を構成するクォークやグルーオンは光速に近い速度で飛び回っているために、観測する時間の長さが変化すると観測結果も大きく変化する。

観測時間が短い場合) 陽子の様子はグルーオンのモヤによって支配されています。

観測時間が中くらいになると(バーが真ん中に来ると)グルーオンが 1つのクォークと 1つの反クォークを対生成する様子がみられはじめる陽子の中は非常にダイナミックな世界であり、粒子の対生成や対消滅が絶えることなく続いています。

そしてより観測時間が長くなると(バーが右端に来ると)グルーオンの雲が薄くなり、陽子の構造が 3つのクォークによって支配されている様子がみられます。 「究極の可視化」の話題提供 完



2022-8-2 文責 山本洋一