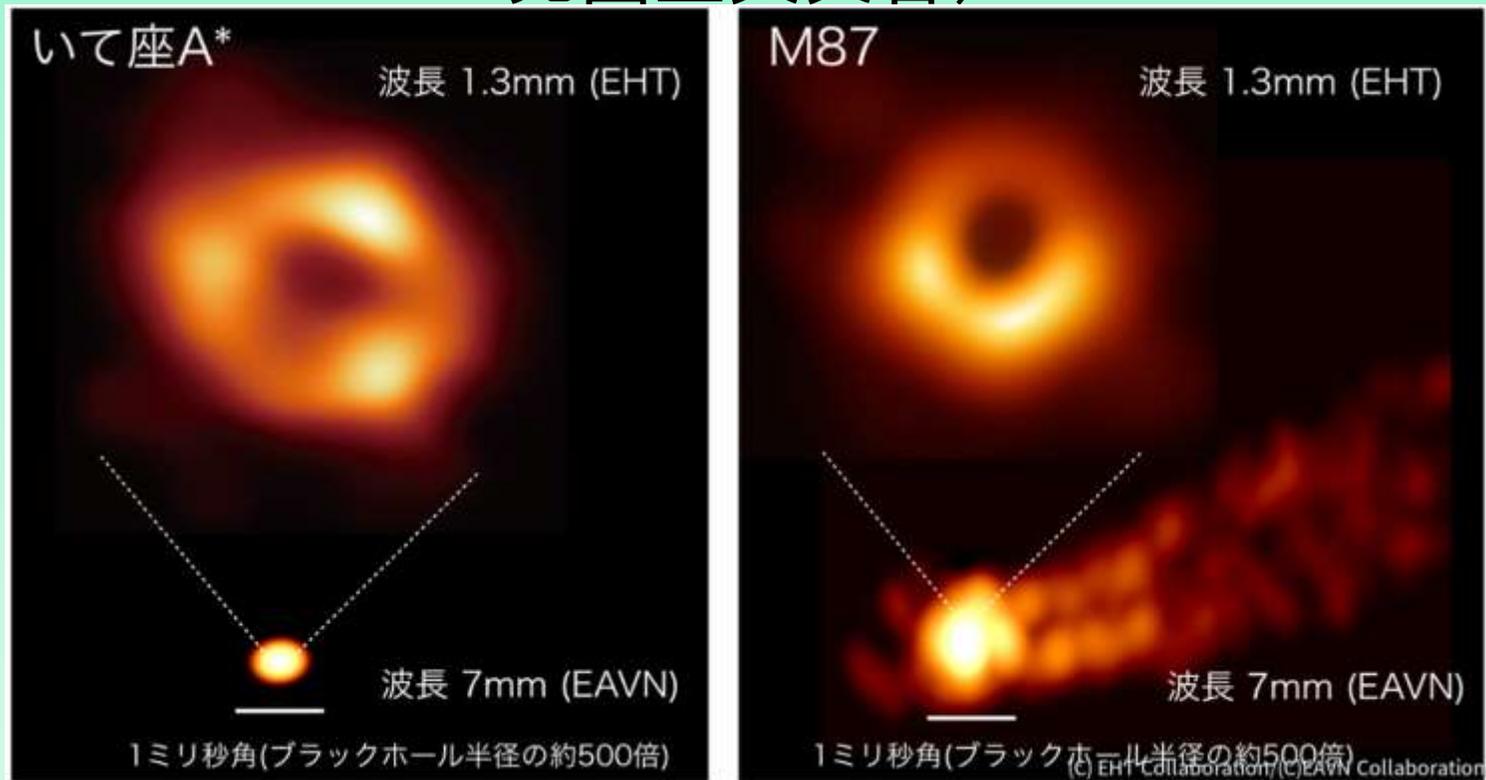


ブラックホールの不思議に触れ、 模型を作ろう

亀谷 收 (YAC水沢Z分団分団長、奥州宇宙遊学館館長、
元国立天文台)



© EHT collaboration

2023年12月17日 宇宙教育指導者セミナー

1. ブラックホールの不思議に触れよう



国立天文台水沢
VLBI観測所
本間希樹所長

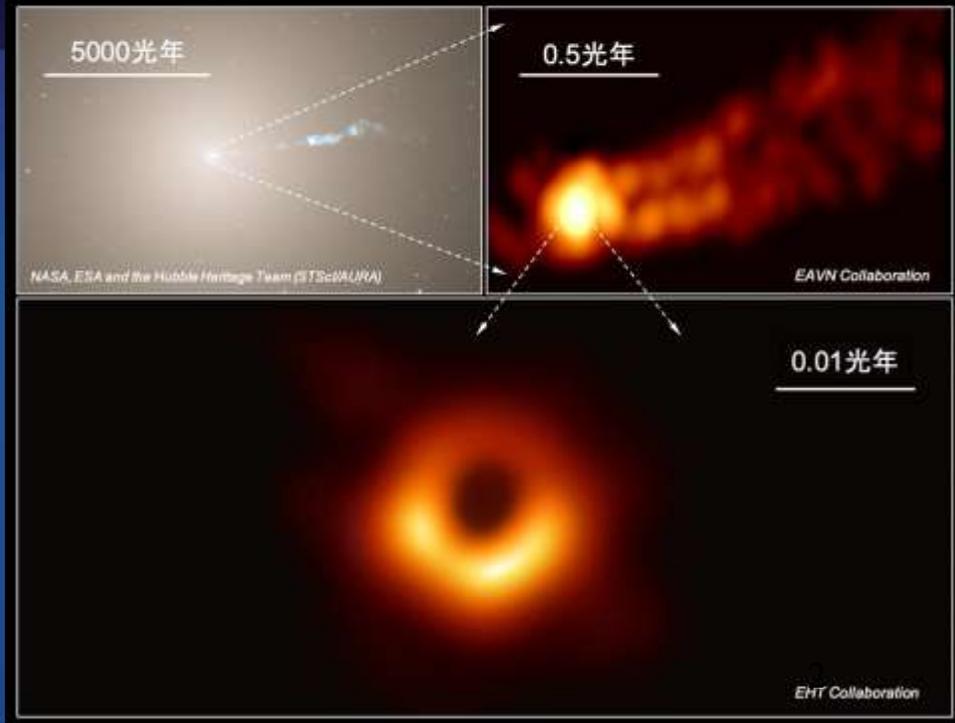
毎日新聞HPより 国立天文台EHT
HPより

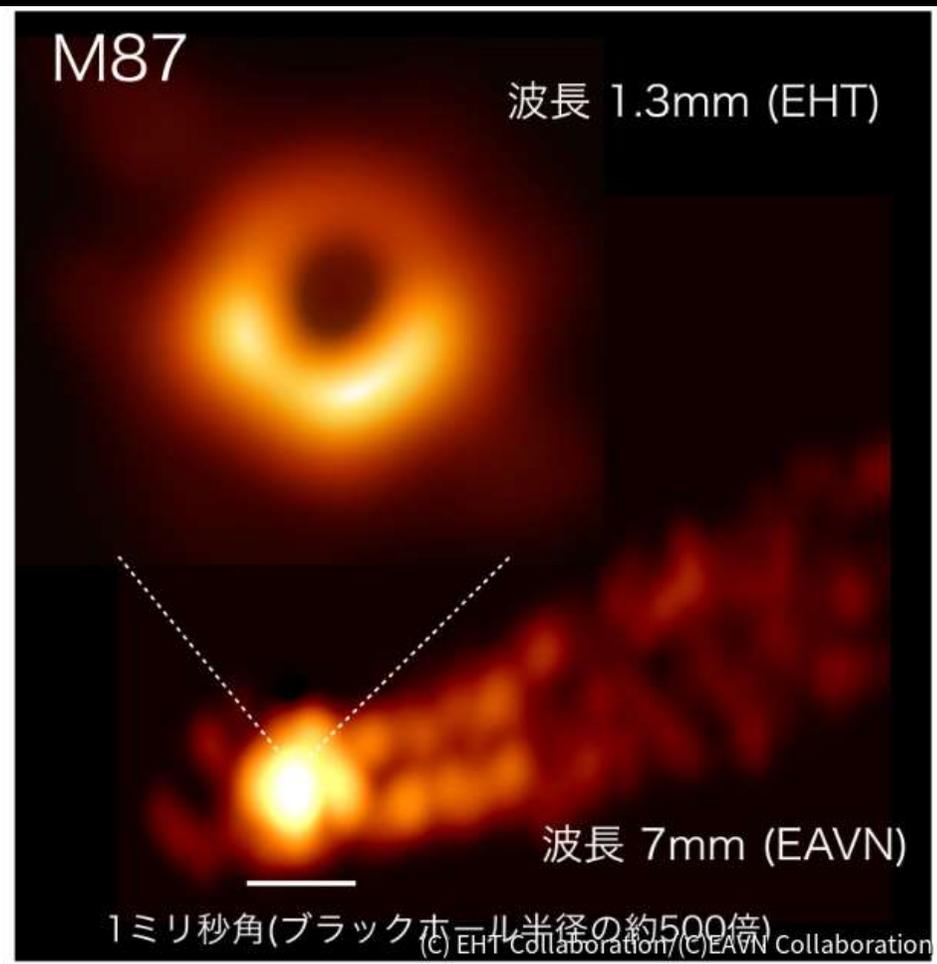
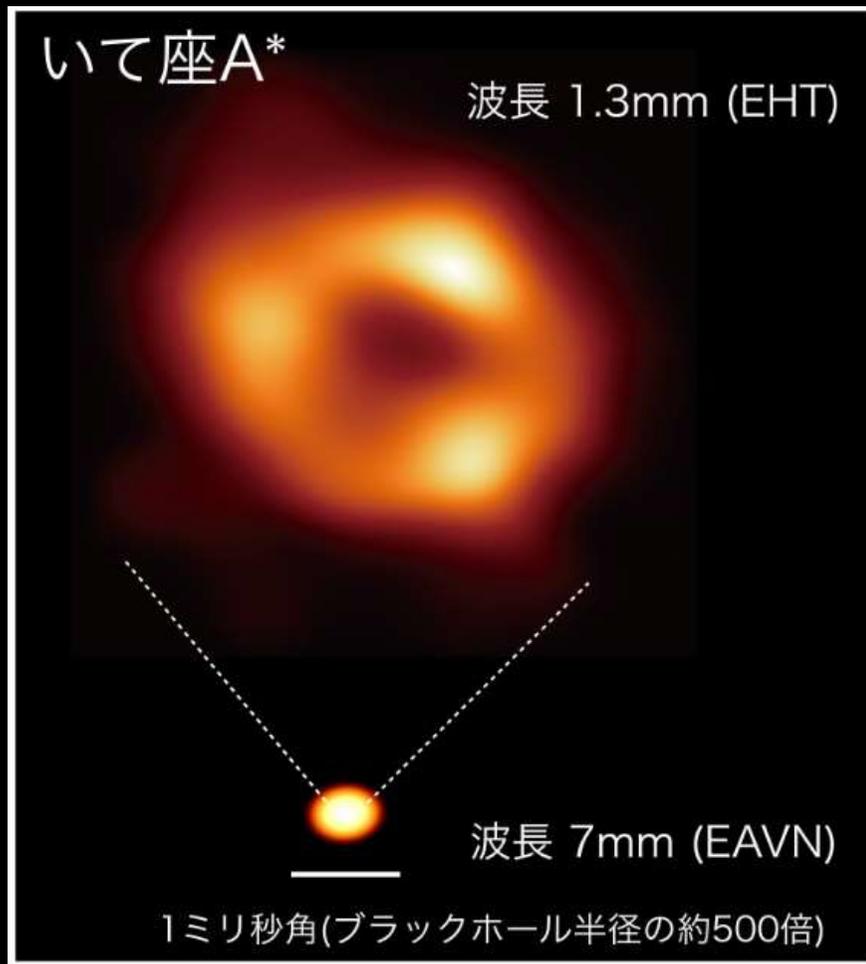
イベント・ホライズン・テレスコープ (EHT)

— 各地の電波望遠鏡をつなぎ、地球サイズの仮想望遠鏡を構成 —



M87





半径 $R_s(m) = 2GM / C^2$ という式で計算できる。

例: 太陽質量 ($2 \times 10^{30} \text{kg}$) では 3km、

天の川銀河中心のブラックホール (太陽質量の400万倍) では 1200万km、

M87中心のブラックホール (太陽質量の70億倍) では 200億km

ブラックホールについての説明 その1

ブラックホールとは:

- 1915年にA.アインシュタインによって提唱された重力と時空の関係についての一般相対性理論によって予言された天体。
- 同じ年にK.シュヴァルツシルトによって、一般相対性理論の一つの解として求められた。
- 非常に重い質量を持つ天体では、光さえも外に出られない領域ができ、ブラックホールと呼ぶ。その領域の境を事象の地平線と呼ぶ。球形の場合、中心から事象の地平線までの距離(シュヴァルツシルト半径 R_s)は、天体の質量 M (kg)、光速 C (2.9979×10^8 m/s)、重力定数 G (6.6743×10^{-11} m³/kg/s²)として、

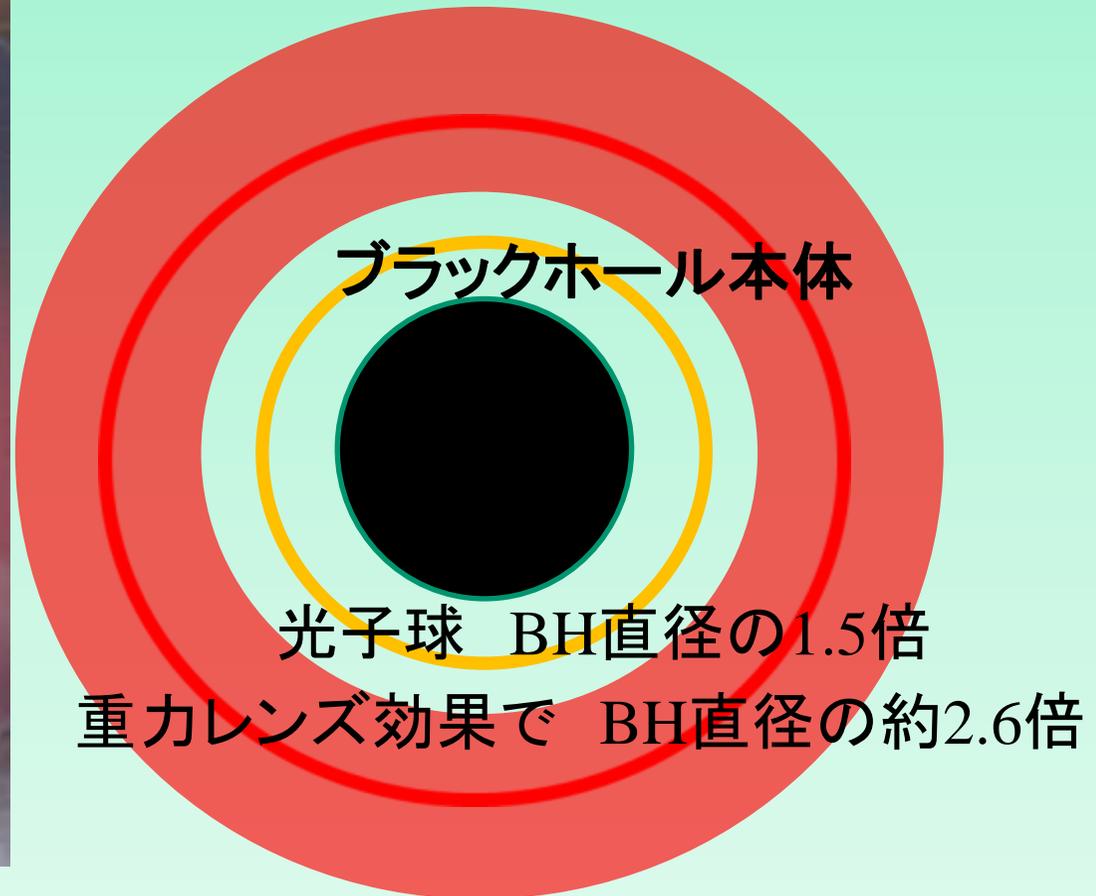
$$R_s(\text{km}) = 2GM / C^2 \quad \text{という式で計算できる。}$$

例: 太陽質量(2×10^{30} kg)では3km、地球質量(6×10^{24} kg)では、9mm

天の川銀河中心のブラックホール(太陽質量の400万倍)では 1200万km、

M87中心のブラックホール(太陽質量の70億倍)では 200億km

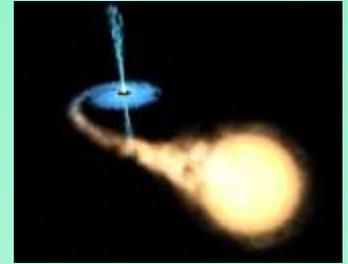
ブラックホールの見え方：
光子球の中にシルエットとして見える。



ブラックホールについての説明 その2

- ブラックホールの不思議:
- ブラックホールに入った物は出ることができない。
- ブラックホール自体は光を出さないなので、見えないが、後ろに光を出すものがあれば、シルエットとして見える。
- ブラックホールの周囲では、事象の地平線に近くなればなるほど時間がゆっくりと進むようにみえる。
- 1963年にR.カーによって、回転するブラックホールの厳密解が求められた。カー・ブラックホールでは、ブラックホールの周りにエルゴ領域と呼ばれる空間自体が回転する領域がある。
- 多くの研究者は、実際に存在するブラックホールは、カー・ブラックホールであろうと考えている。

ブラックホールについての説明 その3



BHウィキペディアより

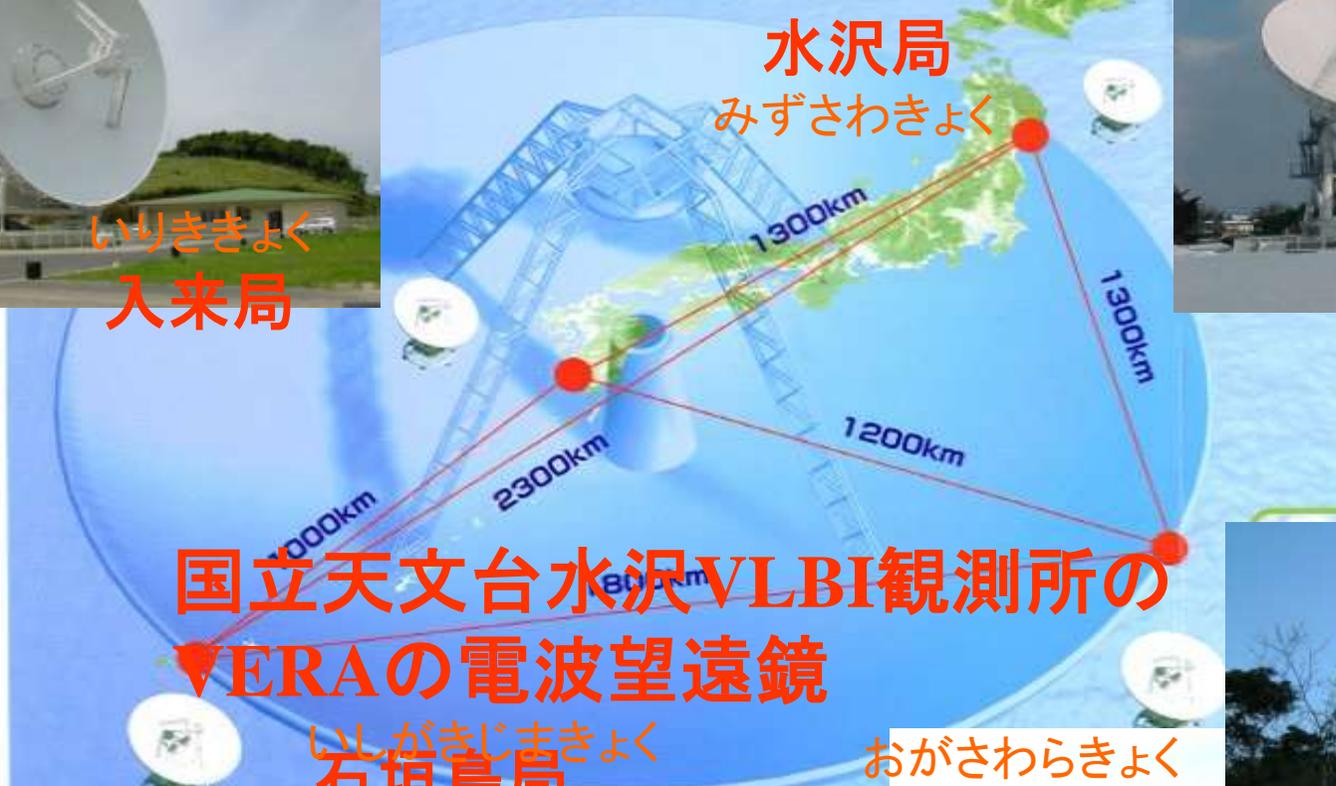
- ブラックホールの不思議:
- ブラックホールは、大きく分けて2種類ある。
 1. 重い恒星の一生が終わった後にできる。太陽の質量程度から数十倍の質量のブラックホール
 2. 銀河の中心にある、太陽の100万倍以上の質量の超巨大ブラックホール

* 現在、特に2. の 超巨大ブラックホールがどのようにできるのかは、研究の大きなテーマになっている。

* 現在、イベントホライズンテレスコープ (EHT) などの電波観測研究に加え、X線、重力波などの観測研究とスーパーコンピュータを使った理論・シミュレーション研究などにより、ブラックホールの研究が急速に進んでいる。

重力波検出装置および、パルサーの高安定パルスを使った重力波研究も期待される。

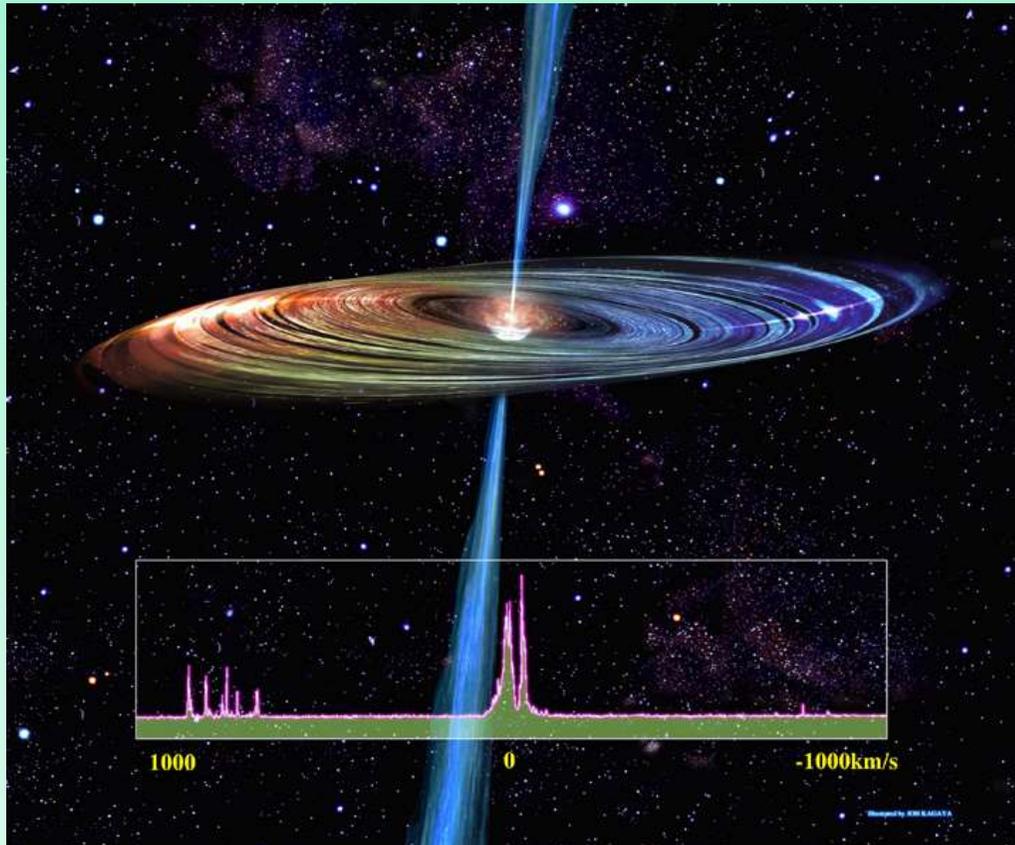
ブラックホールの研究に使われる電波望遠鏡: VLBI 超長基線電波干渉計 (Very Long Baseline Interferometer)





EAVN: 東アジアVLBI網

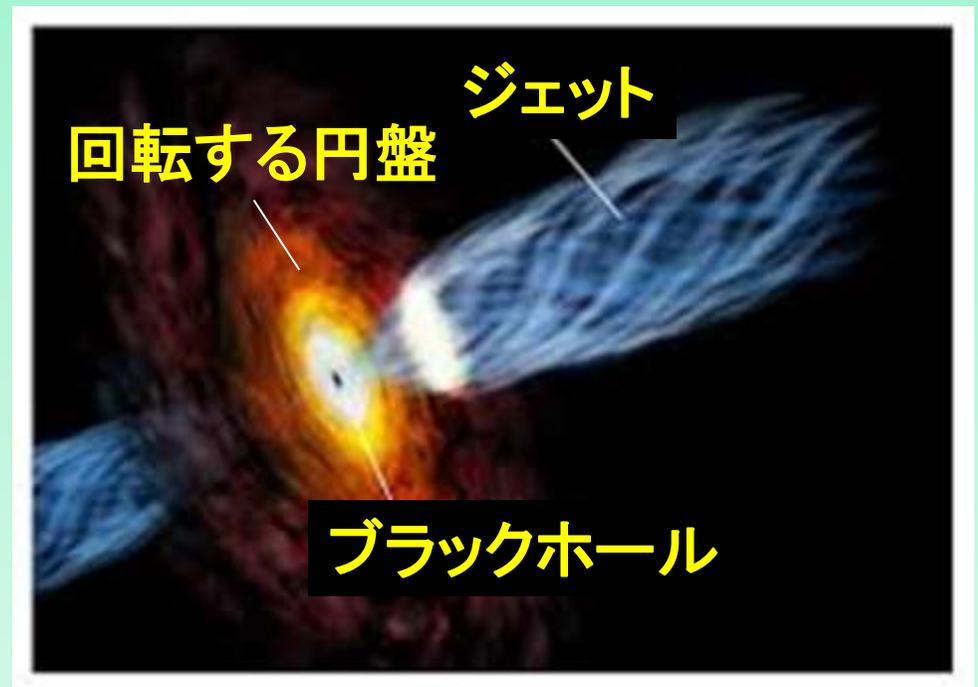
NGC4258銀河中心にブラックホール発見 1995年 三好他 野辺山45m電波望遠鏡、 KNIFE, VLBA



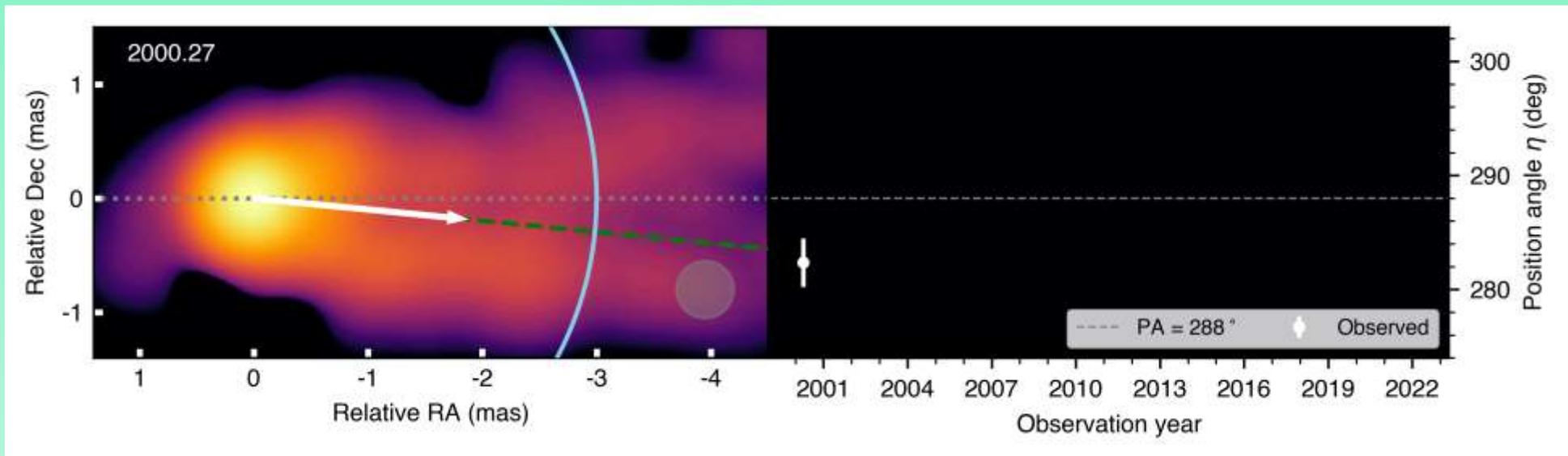
NGC4258銀河中心部の
分子ガス円盤からの
水分子が出すレーザーの
観測から、0.3光年の範囲に
1000km/sを超える非常に速い
回転を発見：
太陽の約4千万倍の
ブラックホールがあると推定

ブラックホールの不思議

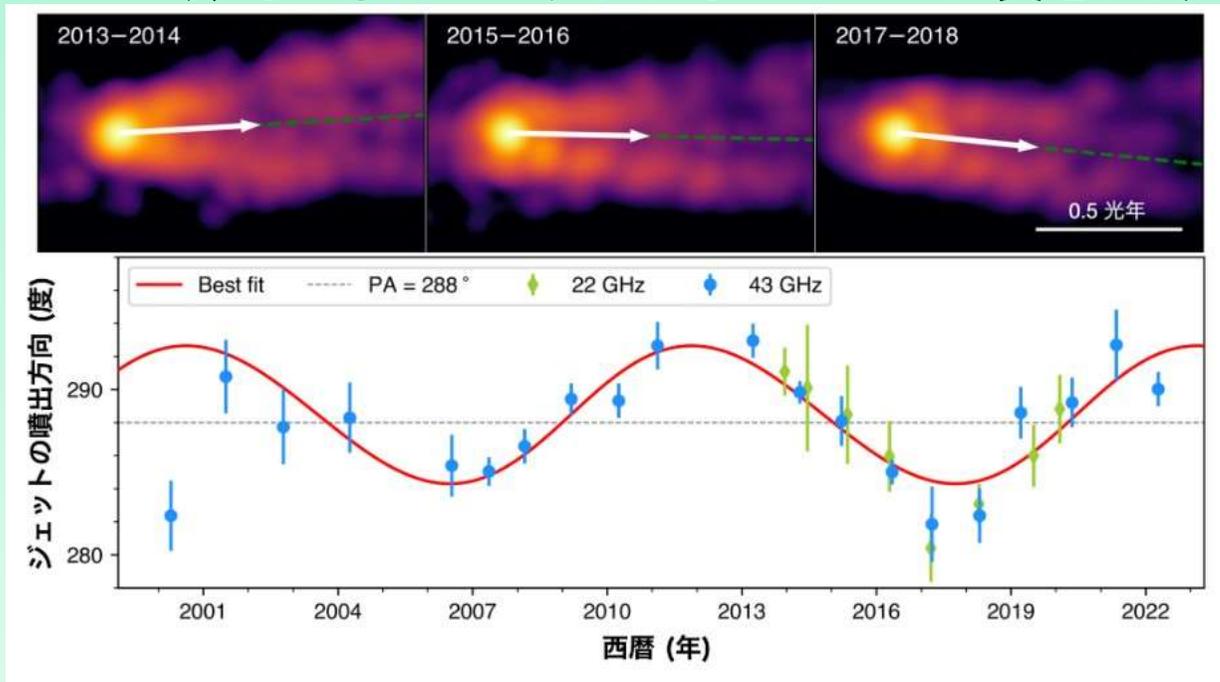
多くのブラックホールでは、物を吸い込む時に、周りに回転する円盤ができる(降着円盤)。高温になり、VLBIやX線でも観測できる。また、その円盤に垂直にジェットと呼ばれる超高速の物質の流れが見つまっている。どのようにジェットができるのかが、現在、最大の研究のテーマである。



東アジアVLBIネットワークの電波観測結果による想像図



M87銀河の巨大ブラックホールから噴き出すジェット: 歳差運動



クレジット: Cui et al.(2023)

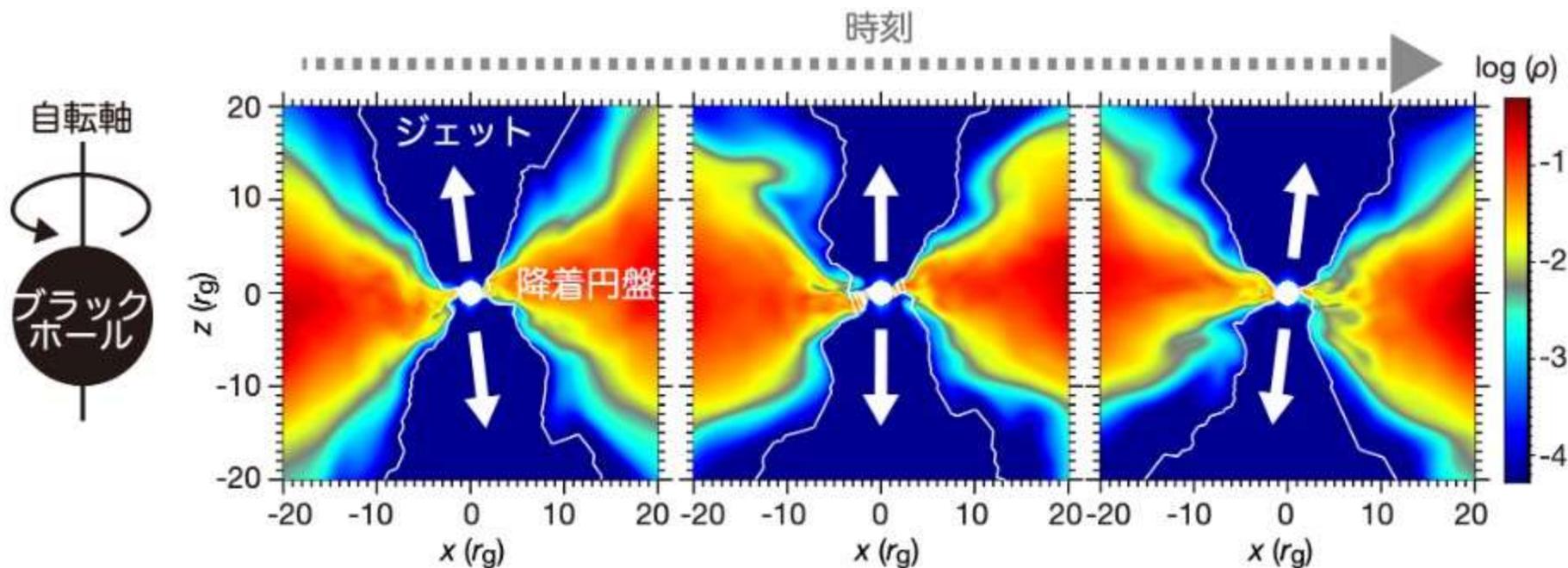
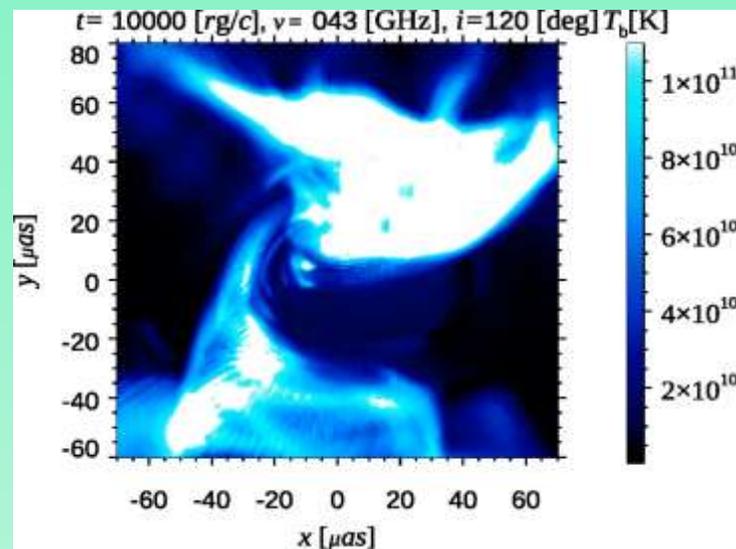
BH自体の自転の証拠

クレジット: 国立天文台

スーパーコンピュータ「アテルイII」



クレジット:



【図3】アテルイIIで実施した一般相対論的磁気流体シミュレーションが示した降着円盤およびジェットの歳差運動の様子。初期にブラックホールの自転軸に対して回転軸の傾いた降着円盤を設置し、その時間変化の様子を追っている。カラー図は子午面における密度を表している。クレジット: 川島朋尚

2. ブラックホールのモデルを作ろう

ろう

©EHT collaboration



目的:

宇宙には、確かにブラックホールがあることが観測的に確かめられた(2019年4月)。

ここでは、M87中心のブラックホールの約1千兆分の一の大きさの模型を作ることで、ブラックホールの大きさと構造を知る。

用意するもの

材料:

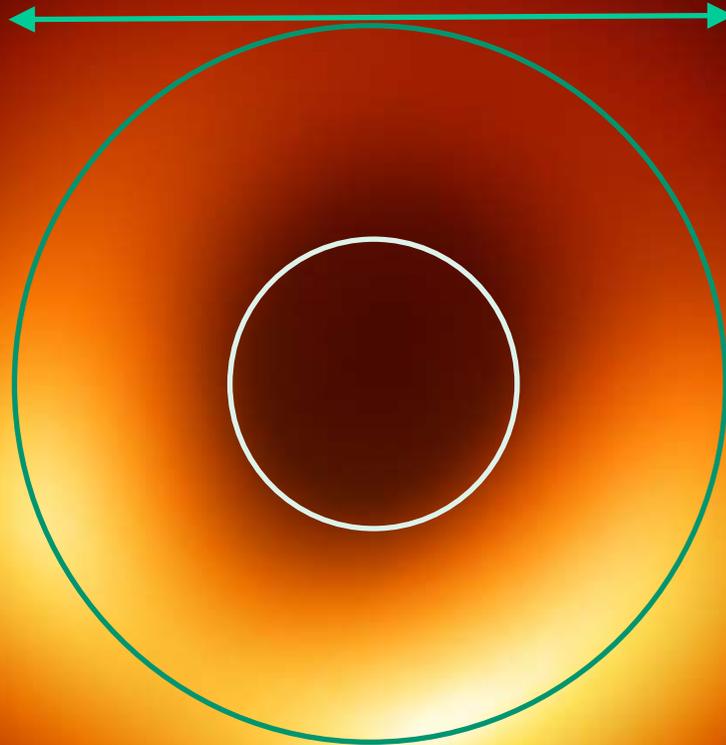
- 竹串か竹ひご 1本(太さは問いません。必要な長さは15cm程度のもの)
- ピンポン玉 1個 (黒く塗りつぶすので、色はどんな色でもかまいません。)
- 紙ボウル 1個(スープやどんぶりなどを入れるのに使用するような紙皿で、ペーパーボウル、紙ボウル、紙皿(深型)などの名前で売られています。直径13cm~16cm、深さ4~6cm程度のものがベストです。)
- A4サイズのボール紙もしくは工作用紙1枚(直径16cm程度の円盤を切り取りま
- す。)
- ブラックホールのイメージ図(表と裏用それぞれ1枚A4サイズ)と全体が黒い紙(ブラックホール内側面用A4サイズ) 次ページから3ページ分に図を表示。

その他使うもの:

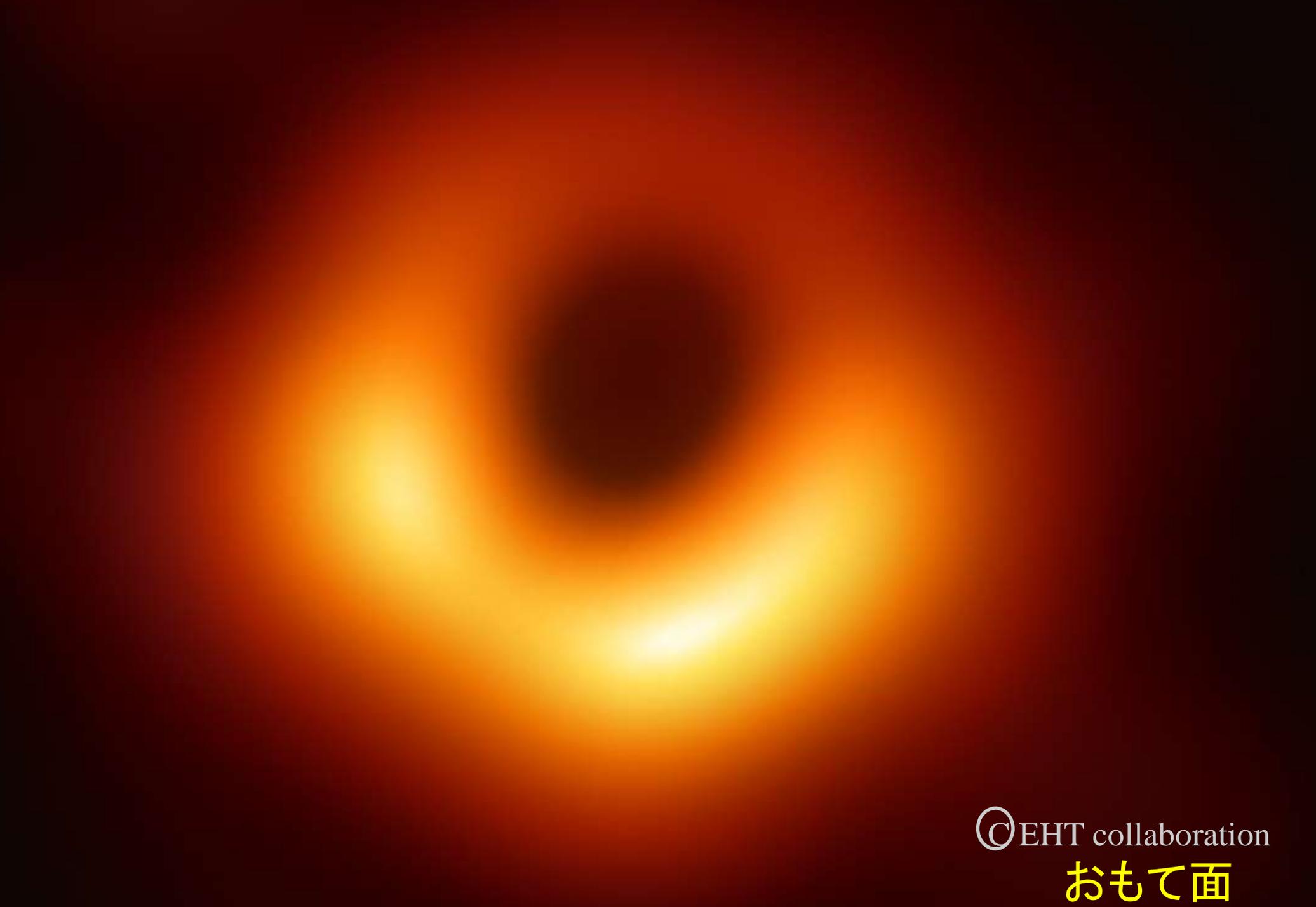
- 黒マジック (ピンポン玉や竹串、紙ボウルの端を塗りつぶすのに使用します)
- カッター
- はさみ
- のり
- セロテープ
- キリ (ピンポン玉の2か所に竹串が通る穴をあけます。)
- 下を汚さないための新聞紙など



© EHT collaboration 0.01 光年



うら面



©EHT collaboration

おもて面

内側面

ブラックホール模型の製作

1. 光子球を作る

A. 紙ボウルの底を直径5cmほどカッターで切り取る。

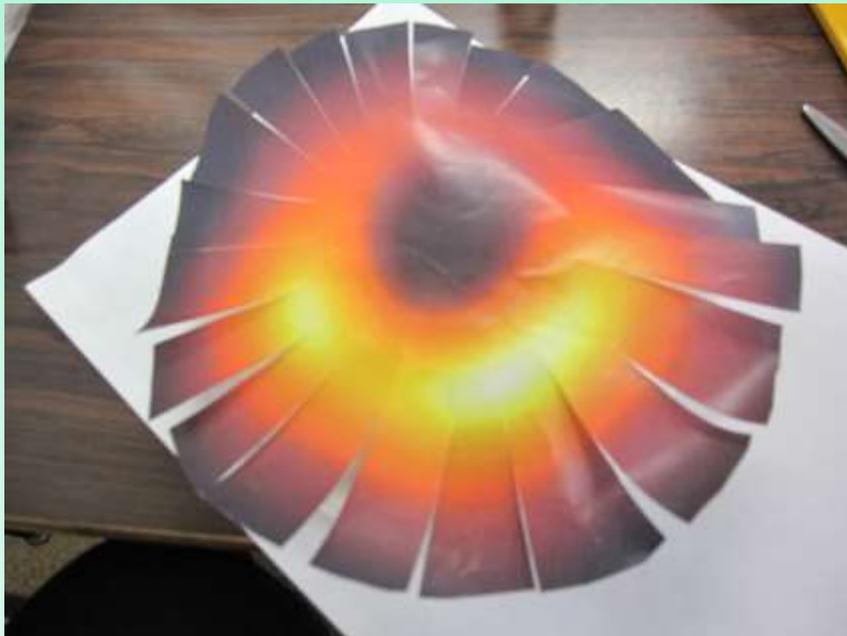


1. 光子球を作る

B. ブラックホール図(おもて面)を丸く切り出す。

外側から20か所ほどに切れ込みを入れる。

C. A.で穴をあけた紙ボウルにのりでB.の紙を立体的にはり付ける。



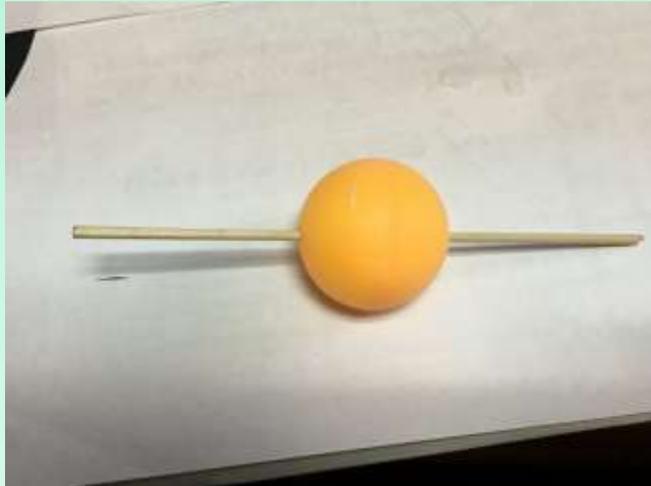
1. 光子球を作る

- D. 紙ボウルのうち、A.で穴をあけた部分の紙を
カッターで図のように切れ込みを作る。
- E. 切った紙を紙ボウルの裏側にはり付ける。



2. ブラックホールを作る

- A. ピンポン玉の両端2か所にキリで竹串(か竹ひご)がゆるく入るくらいの穴をあける。
- B. 竹串(か竹ひご)をピンポン玉に通す。ピンポン玉が簡単に回ることを確かめる。
- C. ピンポン玉全部と竹串(か竹ひご)の中央部を黒マジックでぬる。



3. ブラックホール裏面を作る

- A. A4サイズのボール紙もしくは工作用紙(以下、ボール紙)1枚を用意する。
- B. 1. で作った光子球のふちの大きさに合わせて鉛筆などで円を書き、ボール紙を切り取る。
- C. 真ん中に穴をあける。穴の大きさは、2. で作ったブラックホール模型(以下、ピンポン玉)が簡単に入って回る大きさ。直径4cm位)
- D. A4サイズの黒い紙1枚とブラックホールのイメージ図(裏用)1枚も同様に丸く切り取る。真ん中の穴もあける。



3. ブラックホール裏面を作る

- E. ボール紙の真ん中の穴にブラックホール模型を入れ、竹串(か竹ひご)をのりとセロテープで固定する。ピンポン玉が簡単に回ることを確かめる。
- F. 黒い紙を上からはる。ピンポン玉が簡単に回ることを確かめる。

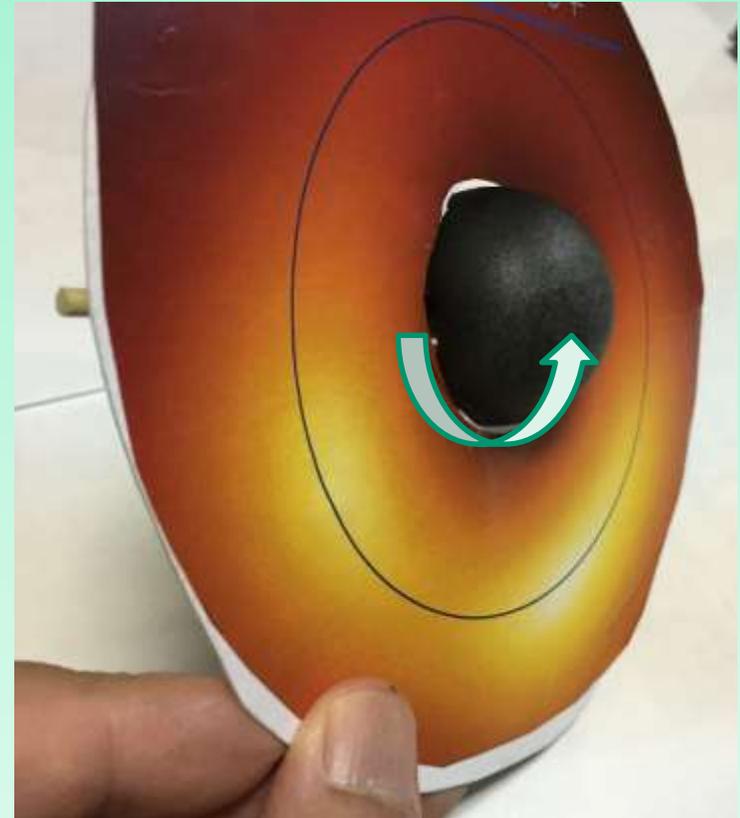


3. ブラックホール裏面を作る

G. ボール紙の黒い紙の裏の面に、ブラックホールのイメージ図(裏用)をはる。

注意:

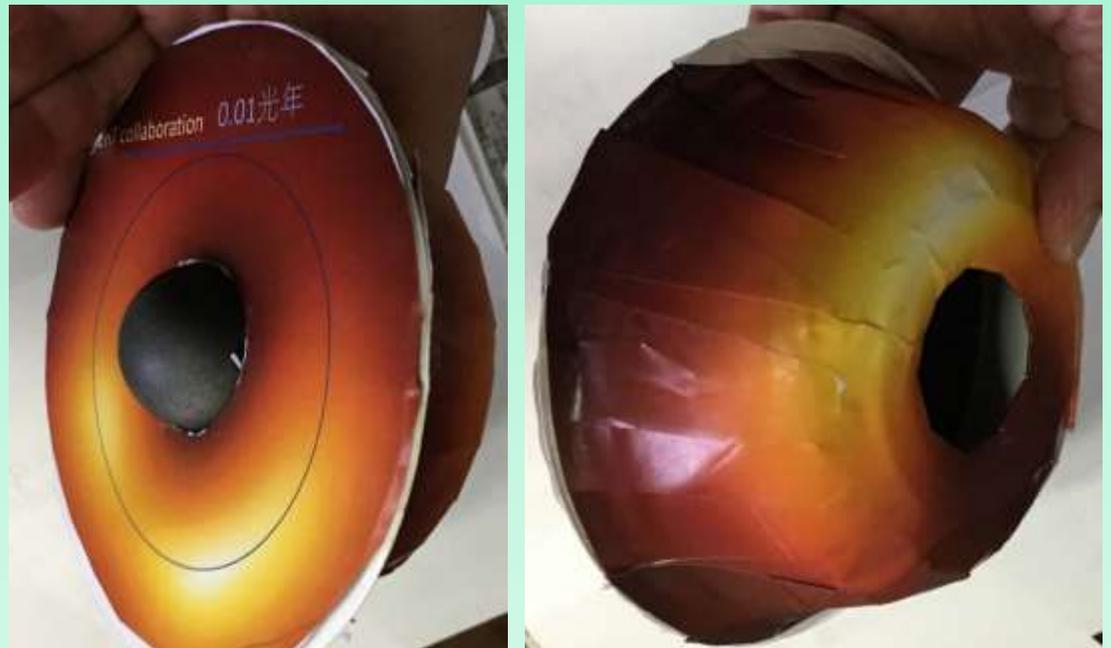
- ①ドーナツ状のイメージの中の明るい部分を下に向けた時にピンポン玉が上下に回るような向きに紙をはること。
- ②ピンポン玉が簡単に回ることを確かめる。



4. ブラックホール裏面と光子球の合体

- A. 1. で作った光子球の端にのりを付けて
3. で作ったブラックホール裏面のボール紙をはる。

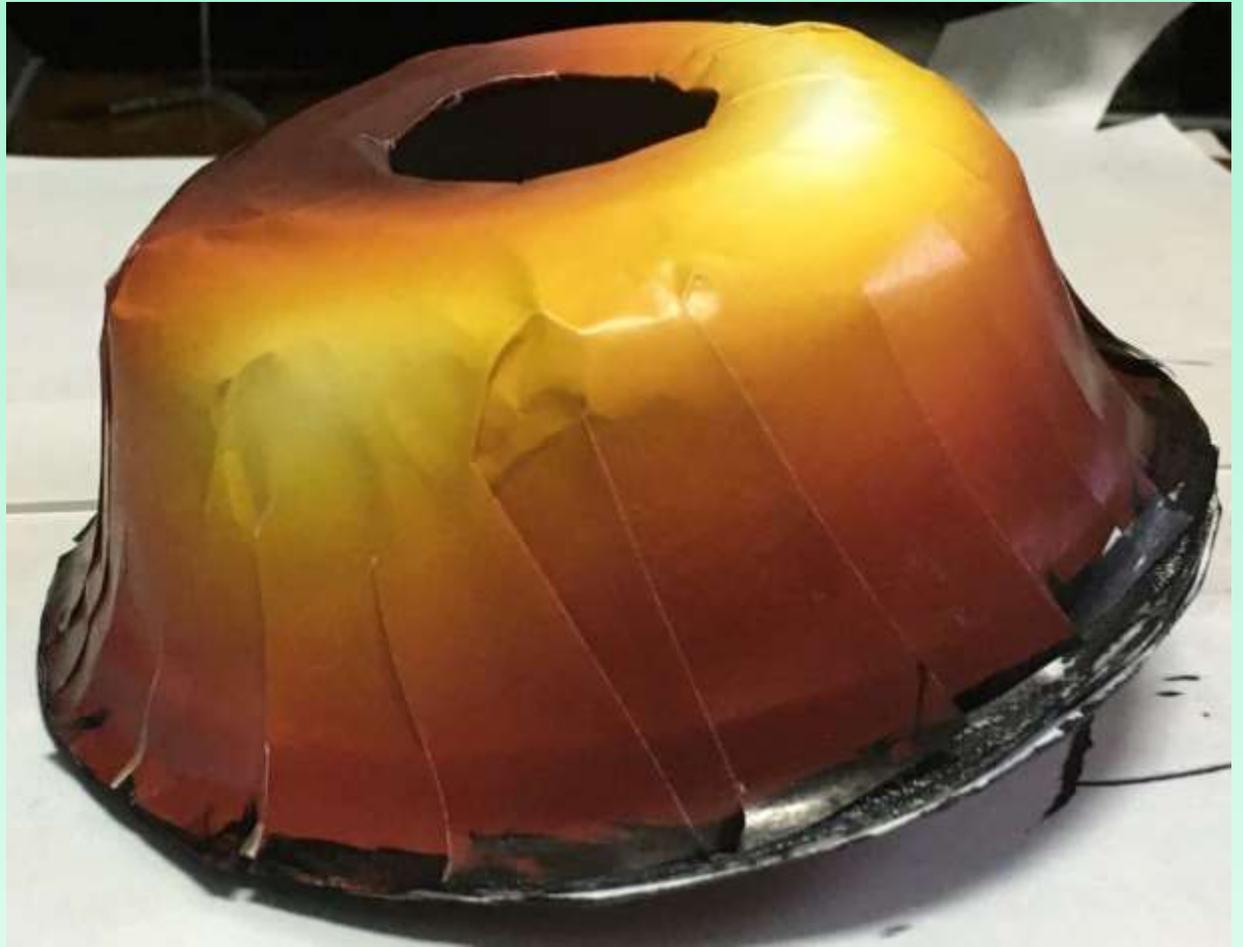
注意: 3. Gで作ったドーナツ状のイメージの中の明るい部分を下に向けて、左右に裏返した時に、1. で作った光子球のドーナツ状のイメージの中の明るい部分が上にくる向きにボール紙をはること。ブラックホール模型(ピンポン玉)は上下に回るはず。



裏面: 明るい部分が下 表面: 明るい部分が上

4. ブラックホール裏面と光子球 の合体

B. 最後に、黒マジックで紙の間などを黒く塗ったら
完成！



クイズ1

- このもけいは、本物の何分の一でしょうか？
 1. 約1万分の一
 2. 約10億分の一
 3. 約1千兆分の一

クイズ2

- このもけいのブラックホールの本物は太陽の重さの何倍でしょうか？
1. 約1倍
 2. 約400万倍
 3. 約70億倍

クイズ3

• この模型のブラックホールは、どこにあるでしょうか？

1. 太陽の中心

2. 天の川銀河の中心

3. M87銀河の中心



©HUBBLE SPACE TELESCOPE/NASA