

## Section 8.

# ブラックホール

### 8.1 ブラックホール

### 8.2 ブラックホール天体

# 前半のまとめ (1)

- 宇宙のスケール
  - 長さ、質量
- 太陽系
  - ニュートン力学で理解できる
- 系外惑星
  - 直接写真を撮る、ドップラー効果を使う、食を使う
  - 重心周りの運動 => ドップラー効果の程度

力学

力学

## 前半のまとめ (2)

- 太陽のエネルギー源は？

原子核物理

=> 原子核反応が必要 (化学反応や重力エネルギーでは足りない)

- 太陽の内部構造は？

=> 太陽の中心温度は $10^7$  K程度

=> トンネル効果が必要

流体力学、力学

熱力学

量子力学

- 恒星の性質と一生

- エネルギー源がなくなると、収縮して、熱くなる

- より重い原子核の核融合反応 => 星は「進化」する

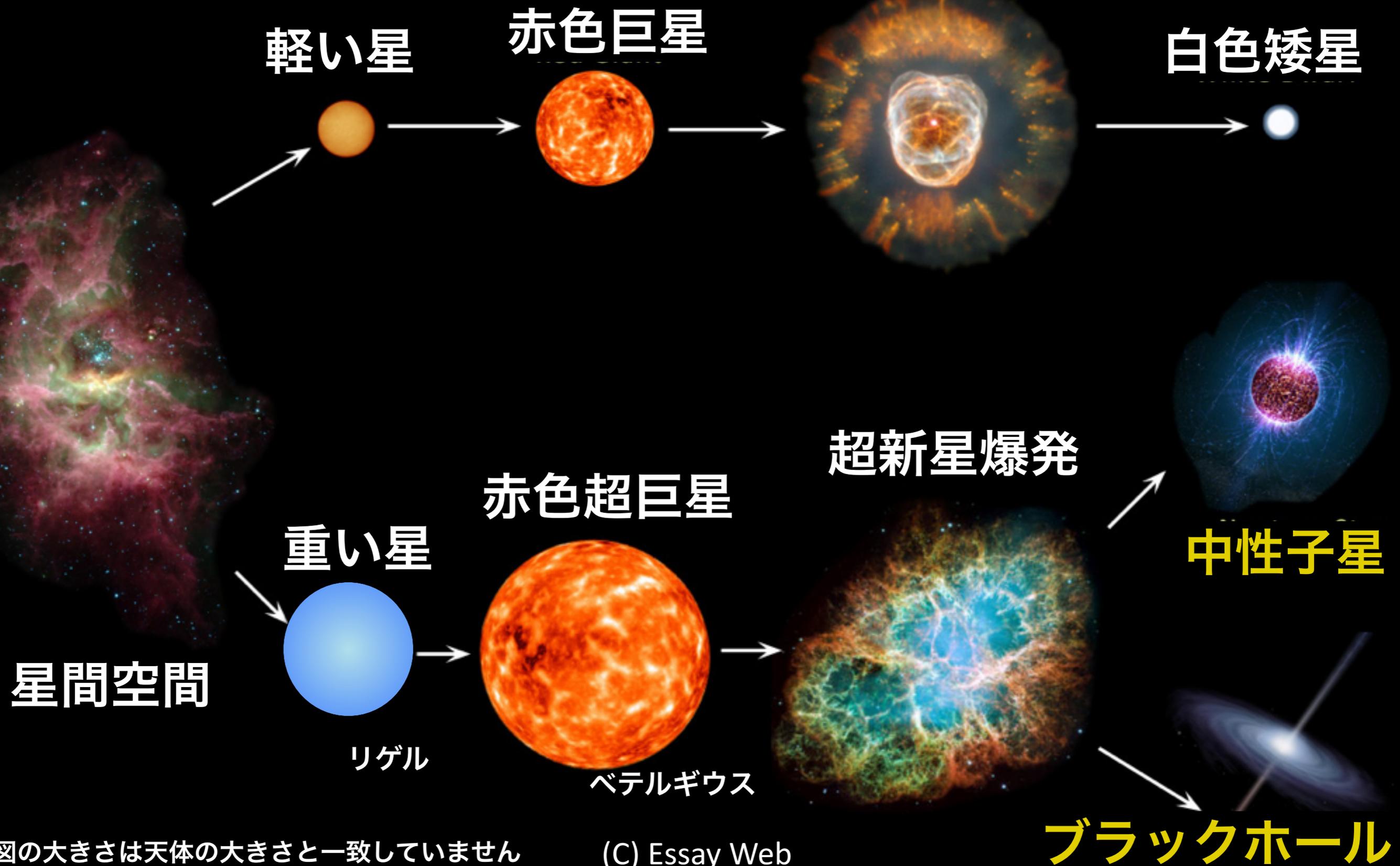
- 軽い星 => 縮退圧で支えられた白色矮星

統計力学

- 重い星 => 超新星爆発 => 中性子星やブラックホール

素粒子物理学

# 星の一生

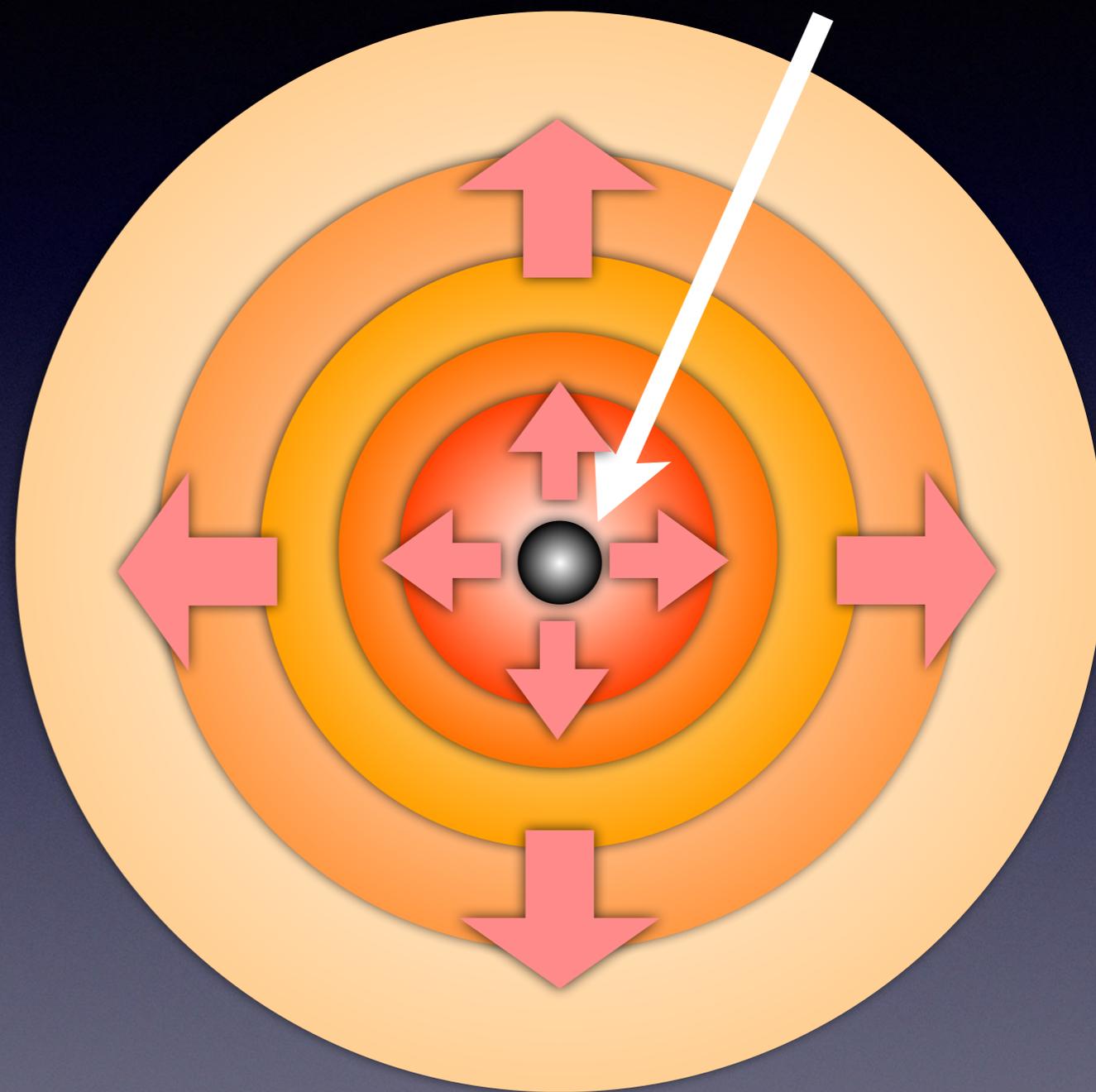
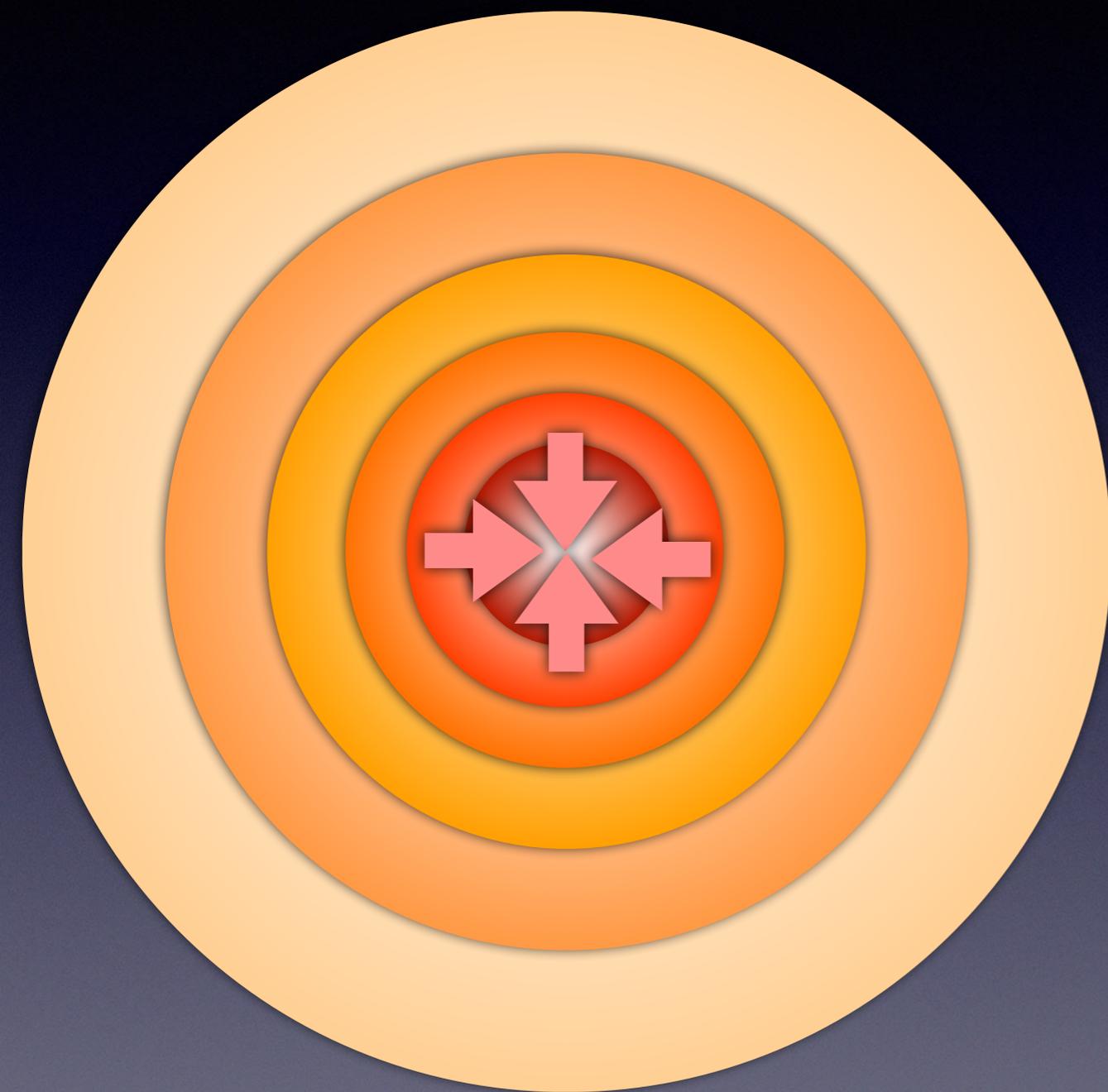


図の大きさは天体の大きさと一致していません

(C) Essay Web

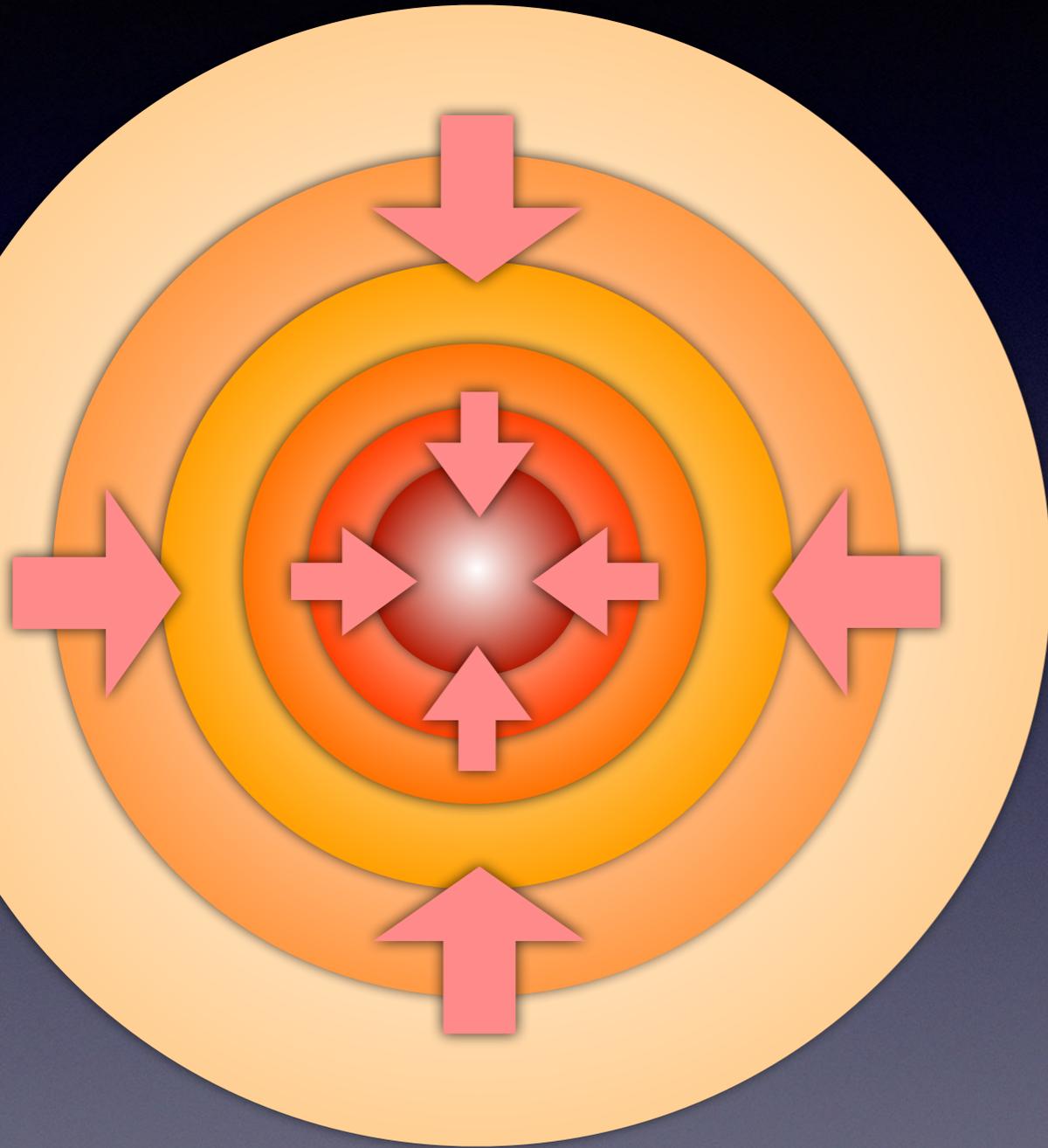
星の「崩壊」  
( < 1秒 )

中性子星



超新星爆発！

失敗すると、、、



ブラックホール



# 「ブラックホール」



光さえ抜け出せない天体  
= 直接は「見え」ない



秒速 約10km



光の速度

秒速 約300,000km



C: NASA

半径 約6,000 km

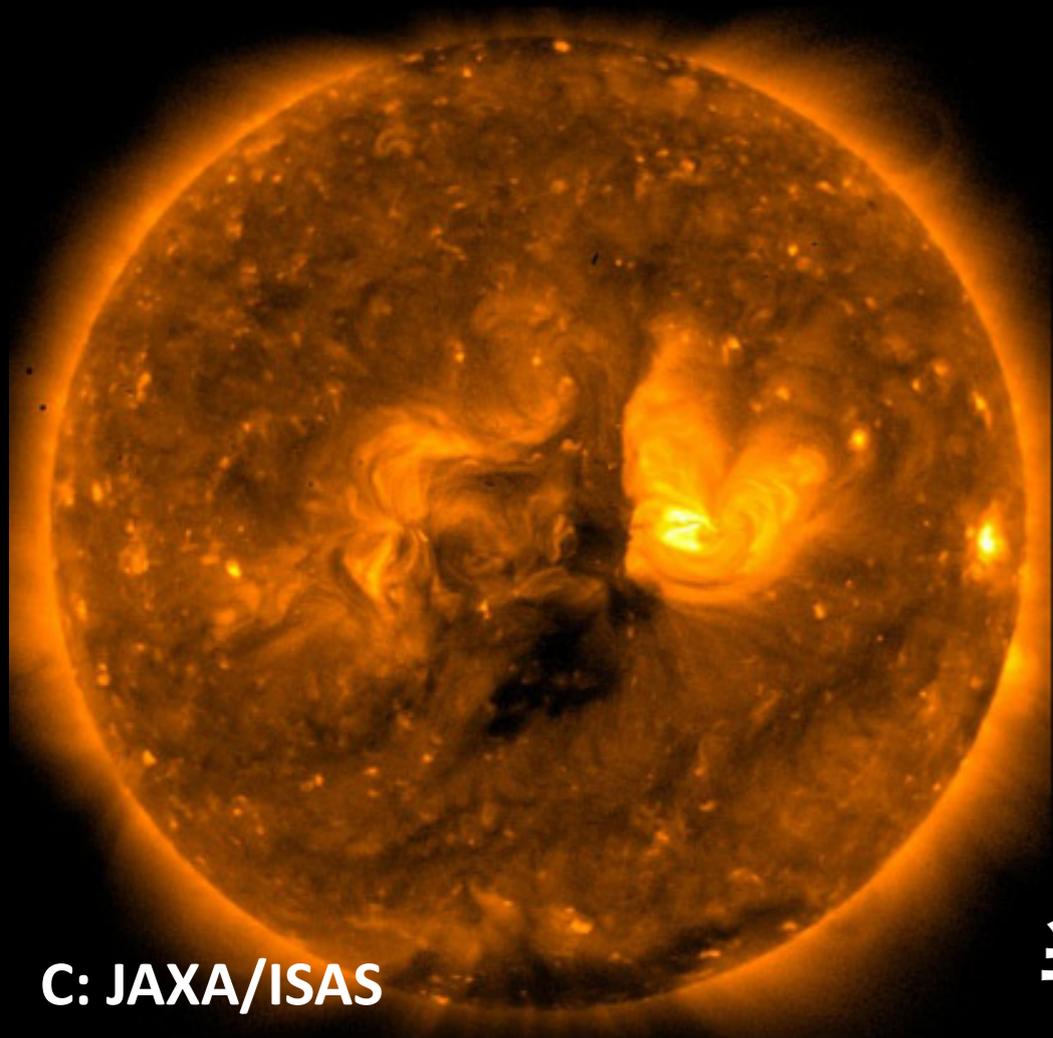
地球は「見える」

↑ 秒速 約600km <<

光の速度  
秒速 約300,000km

太陽も「見える」

半径 約700,000 km





太陽を小さくつぶすと、、、

↑ 抜け出すのに  
必要な速度 >

光の速度  
秒速 約300,000km

光が抜け出せなくなる  
ブラックホール！

●  
半径 約3 km

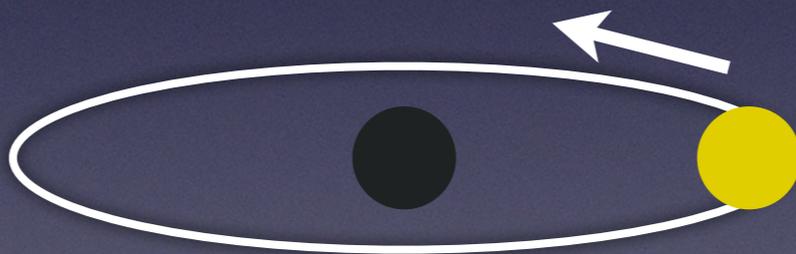
ブラックホールは見えないのに、  
なぜいると信じられているのか？

# ブラックホールの見つけ方

1. 吸い込まれる  
ガスを見る



2. 相手の星の  
軌道を測る

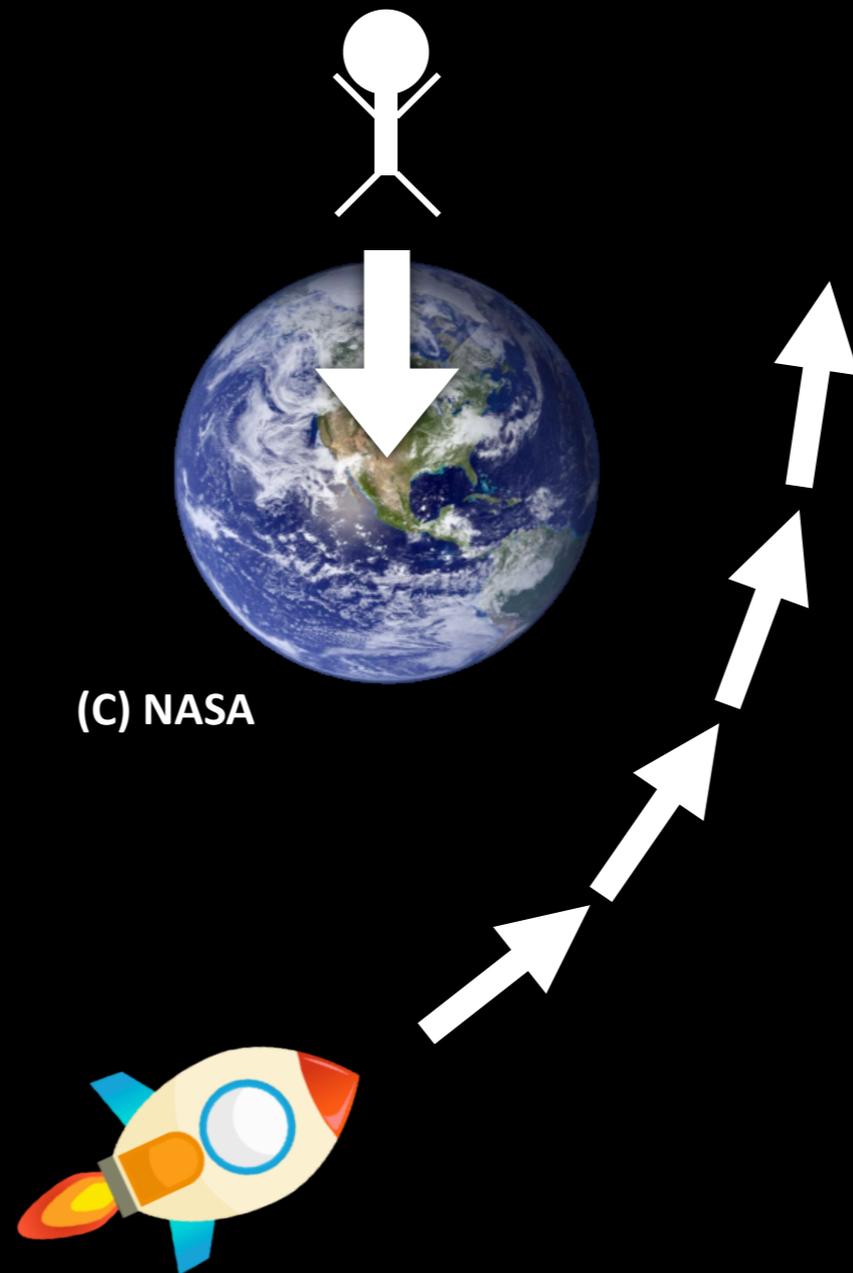


3. 重力波

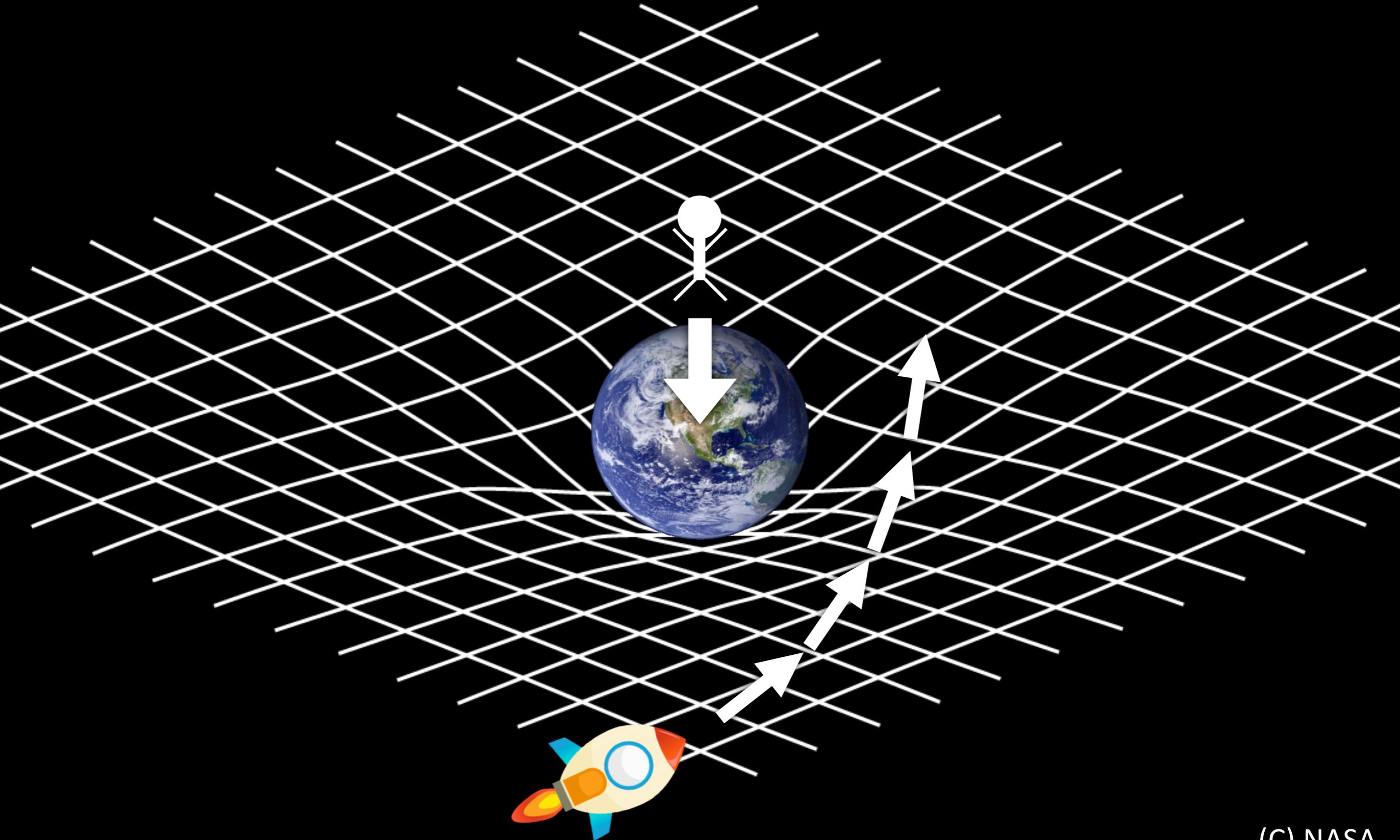


# 脱線：重力波の話題

# 重力



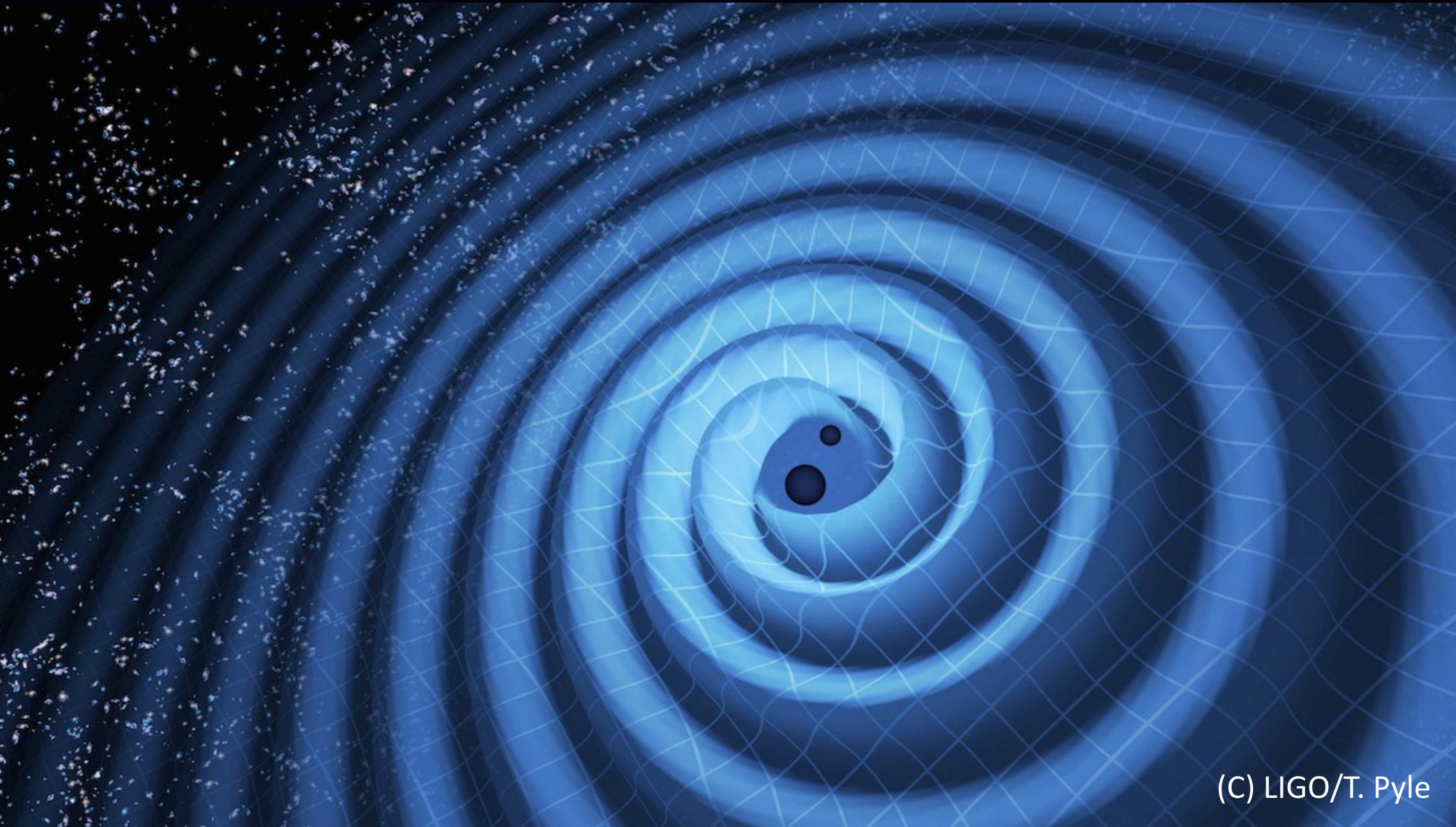
# 重力：時空のゆがみ



# 重力波：時空のゆがみの伝播

相対論  
(一般相対性理論)

「**強重力天体**」が動き回ると、強い重力波が発生



# 重力波望遠鏡

Advanced Virgo  
(ヨーロッパ, 2017-)

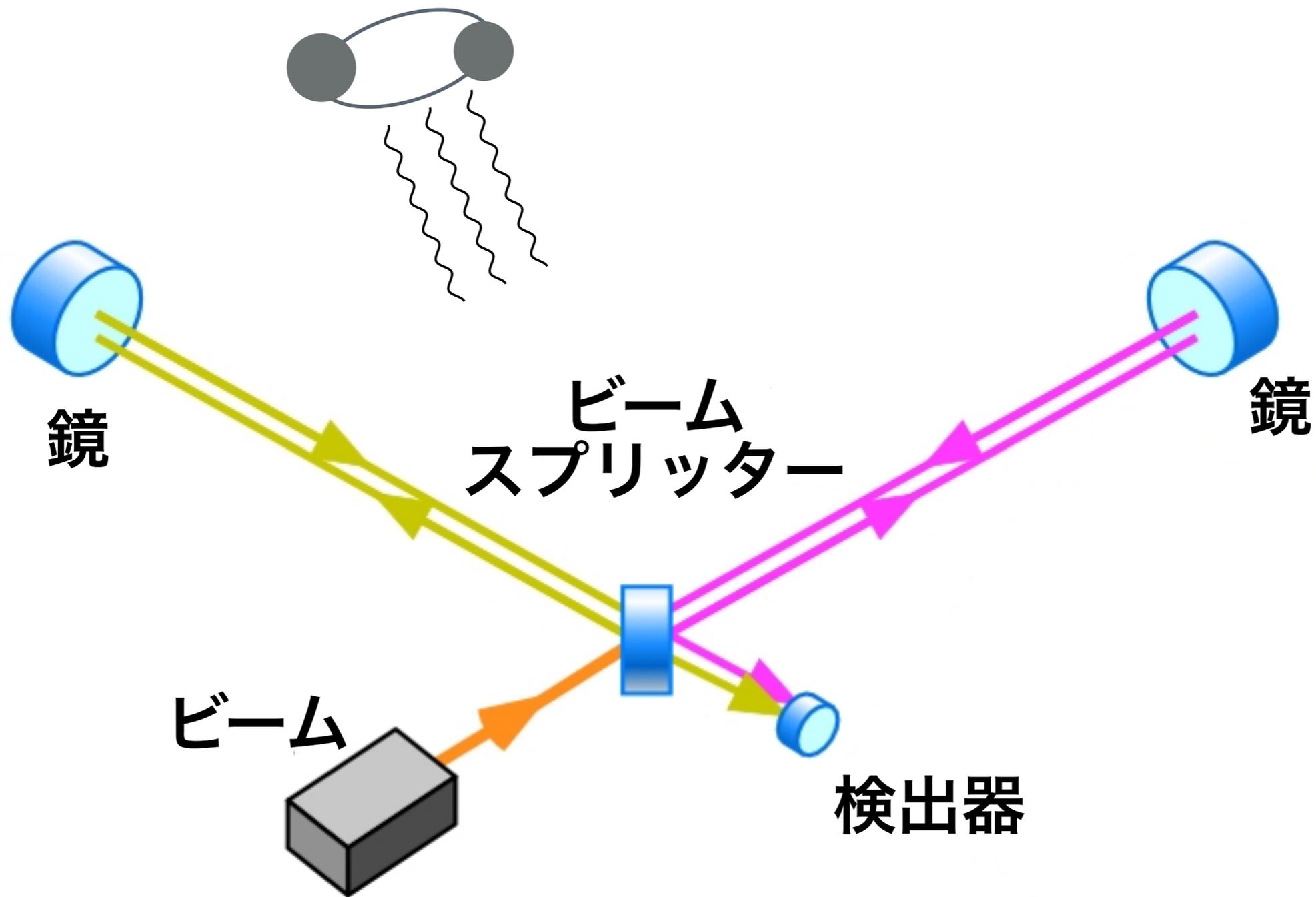


Advanced LIGO  
(アメリカ, 2015-)

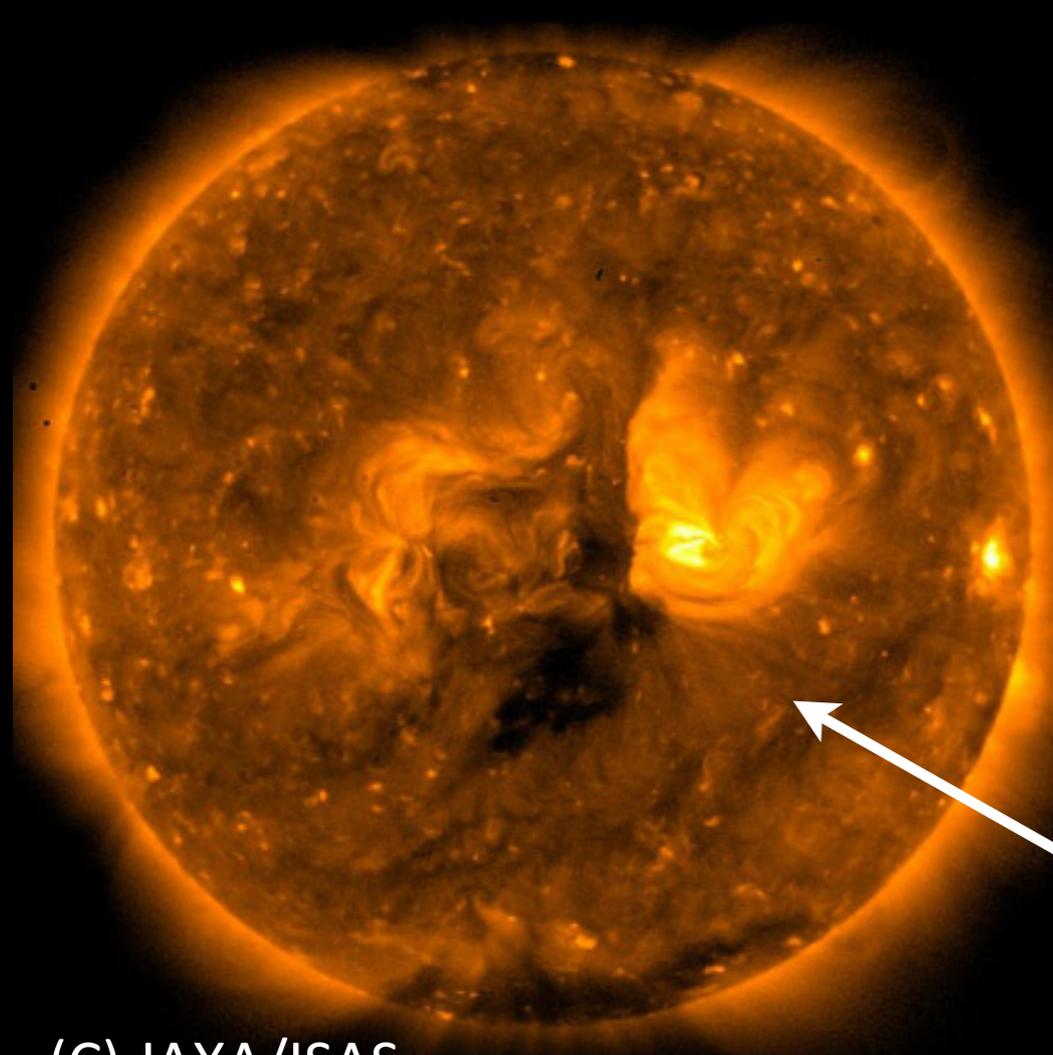


KAGRA (日本)









(C) JAXA/ISAS

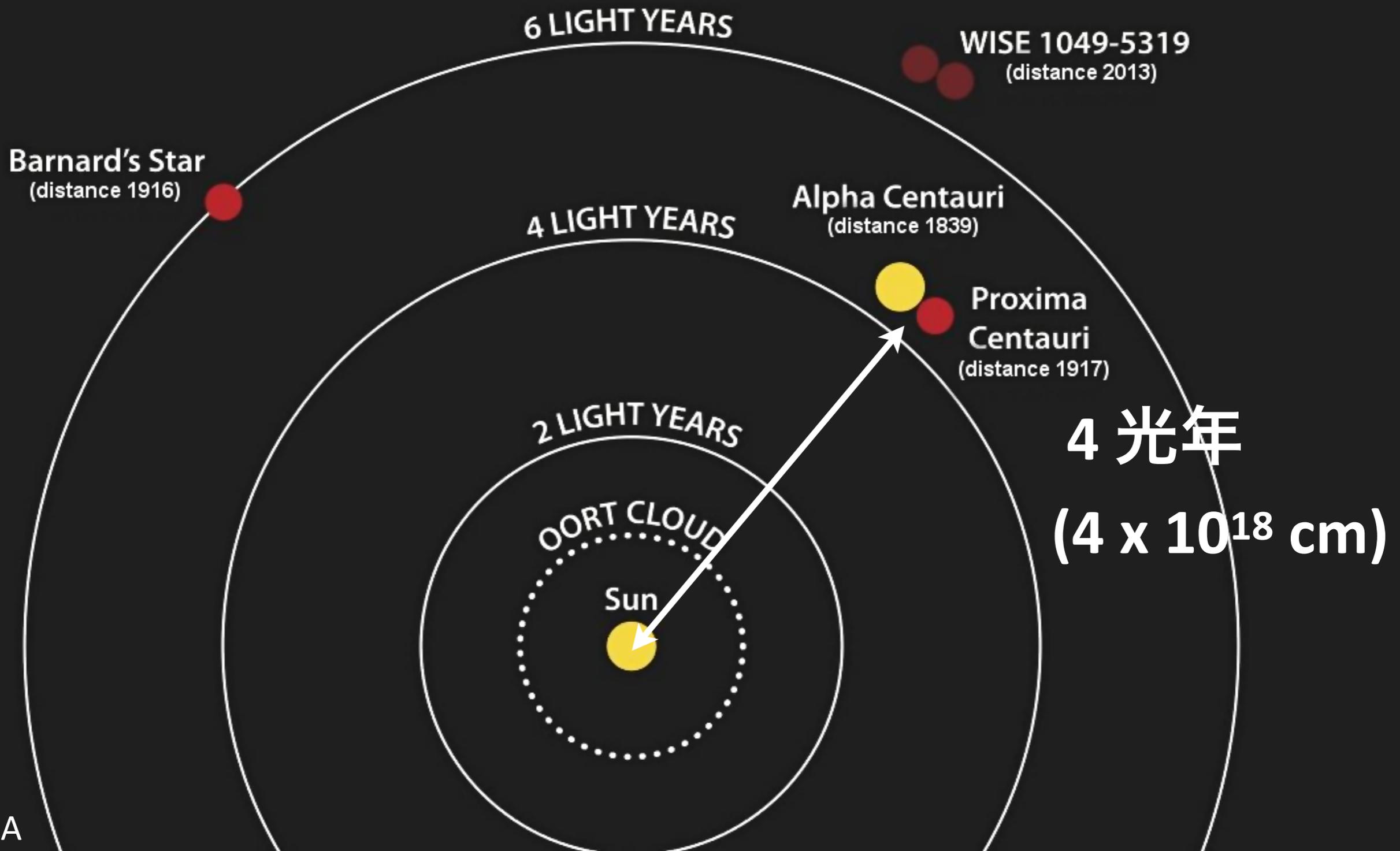
1億5000万km  
( $1.5 \times 10^{13}$  cm)

太陽と地球のあいだの距離が  
水素原子1個分だけ変わる程度！

( $1\text{\AA} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-8} \text{ cm}$ )



(C) NASA

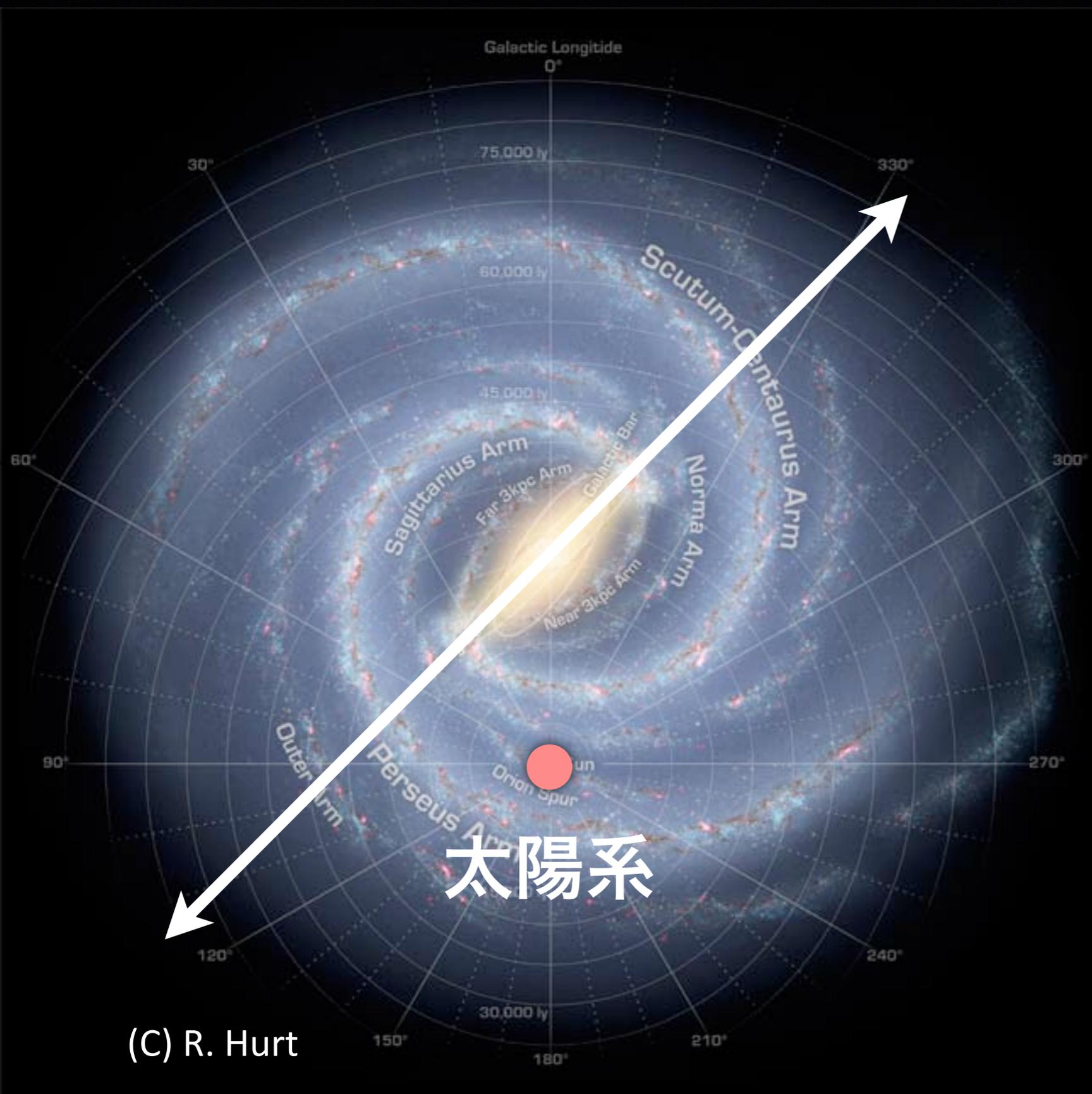


(C) NASA

髪の毛の幅  $40 \text{ } \mu\text{m}$  ( $4 \times 10^{-3} \text{ cm}$ )

$$10^{-21} = \frac{\text{髪の毛の幅 } (4 \times 10^{-3} \text{ cm})}{\text{アルファセンタウリまでの距離 } (4 \times 10^{18} \text{ cm})}$$

# 私たちの住む銀河系



銀河の大きさ  
約100,000光年

$$10^{23} \text{ cm} = 10^{21} \text{ m}$$

銀河系の大きさが  
わずか1m変わる程度！

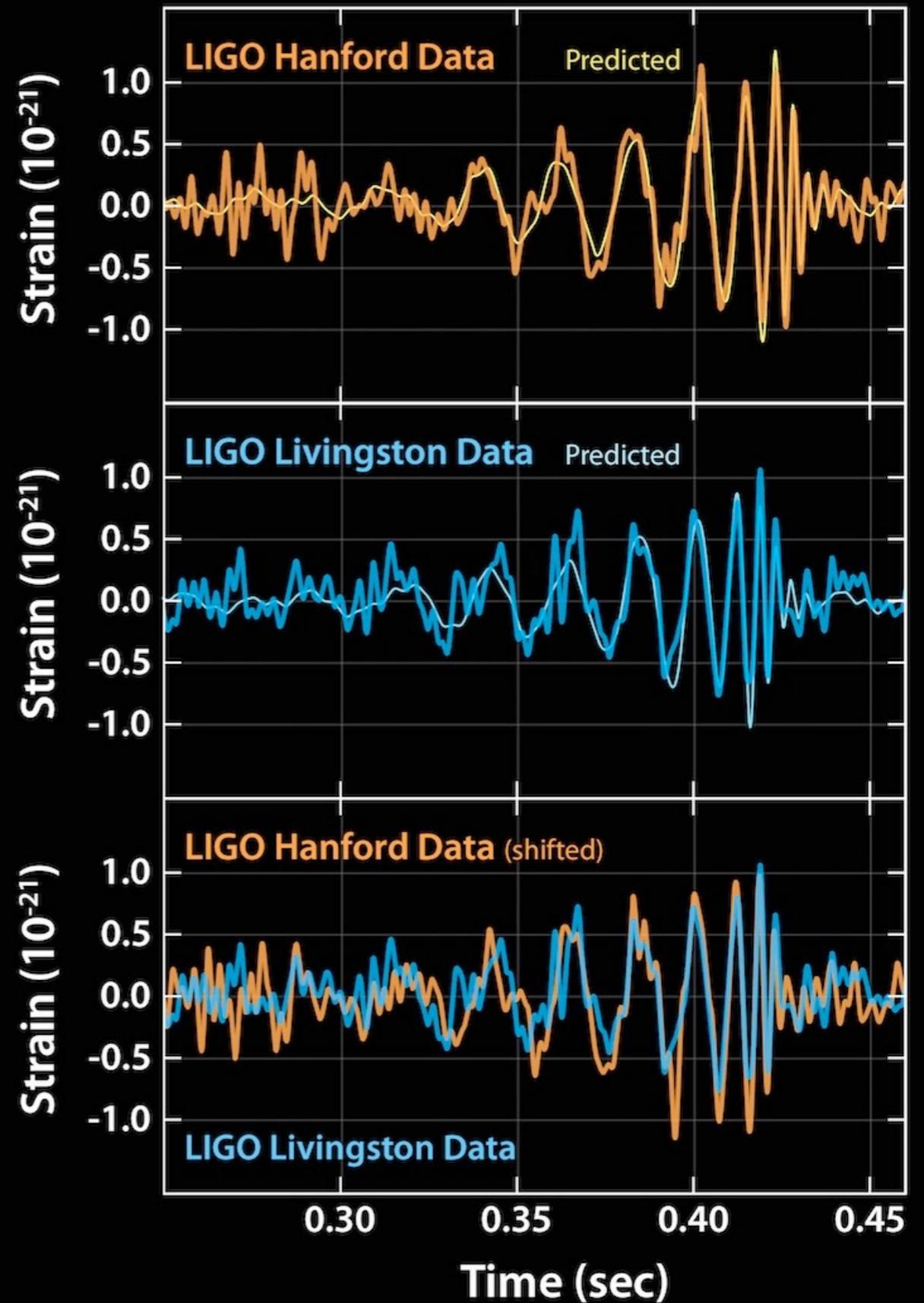
太陽系

2015年9月14日

重力波 初の直接観測

ブラックホールの合体

LIGO Scientific Collaboration  
and Virgo Collaboration, 2016, PRL, 061102



2017年10月



The Nobel Prize in Physics 2017

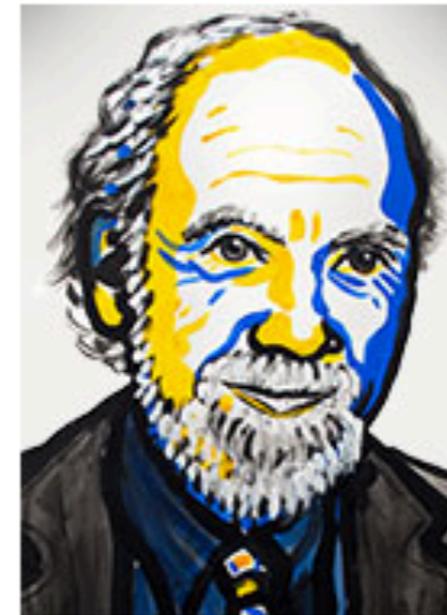
Rainer Weiss, Barry C. Barish, Kip S. Thorne

Share this: 991

# The Nobel Prize in Physics 2017



© Nobel Media. Ill. N. Elmehed  
**Rainer Weiss**  
Prize share: 1/2



© Nobel Media. Ill. N. Elmehed  
**Barry C. Barish**  
Prize share: 1/4



© Nobel Media. Ill. N. Elmehed  
**Kip S. Thorne**  
Prize share: 1/4

The Nobel Prize in Physics 2017 was divided, one half awarded to Rainer Weiss, the other half jointly to Barry C. Barish and Kip S. Thorne *"for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves"*.

ノーベル物理学賞

重力波観測への貢献に対して

## Section 8.

# ブラックホール

## 8.1 ブラックホール

## 8.2 ブラックホール天体

# 想像図

普通の星

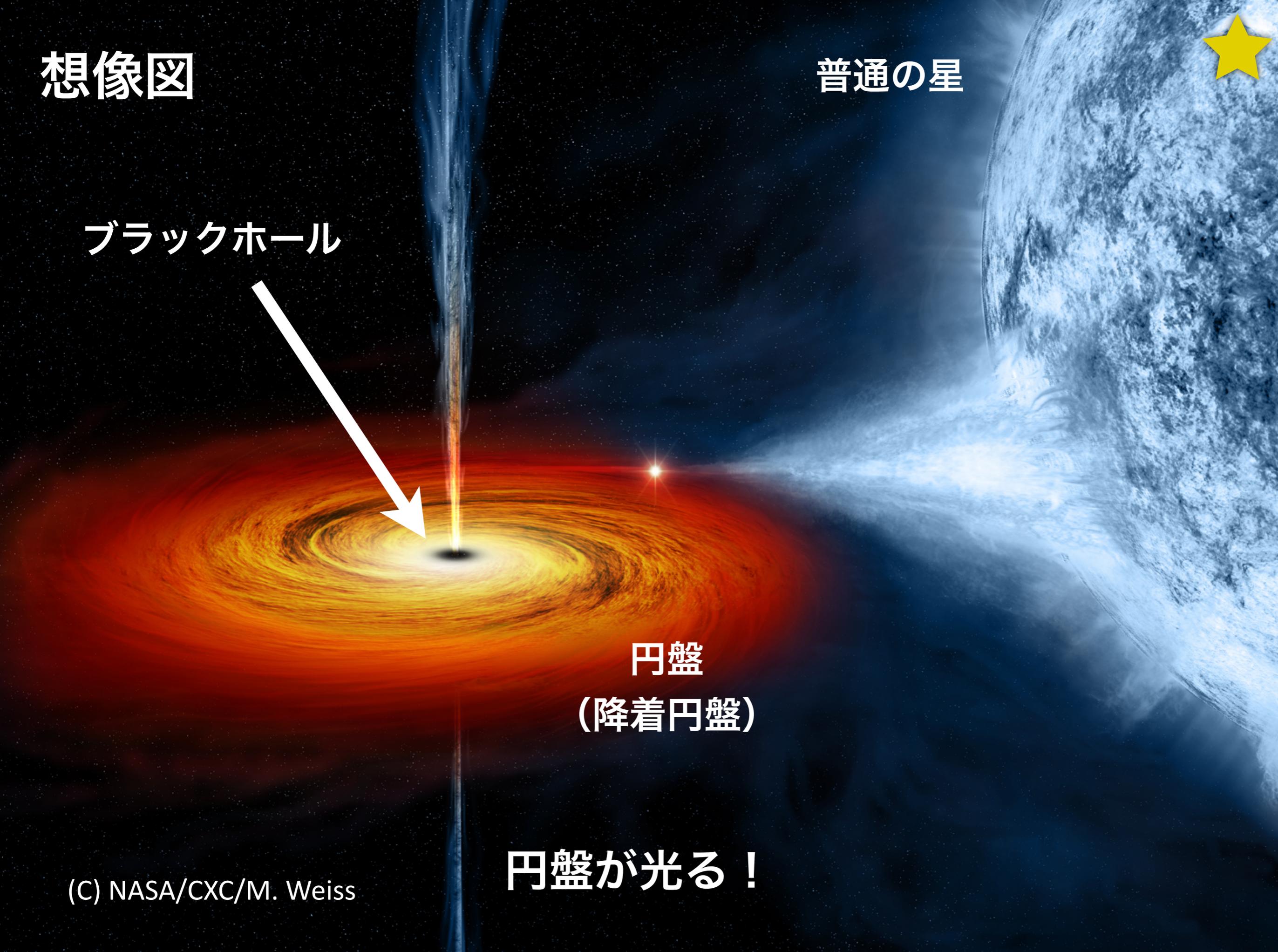


ブラックホール



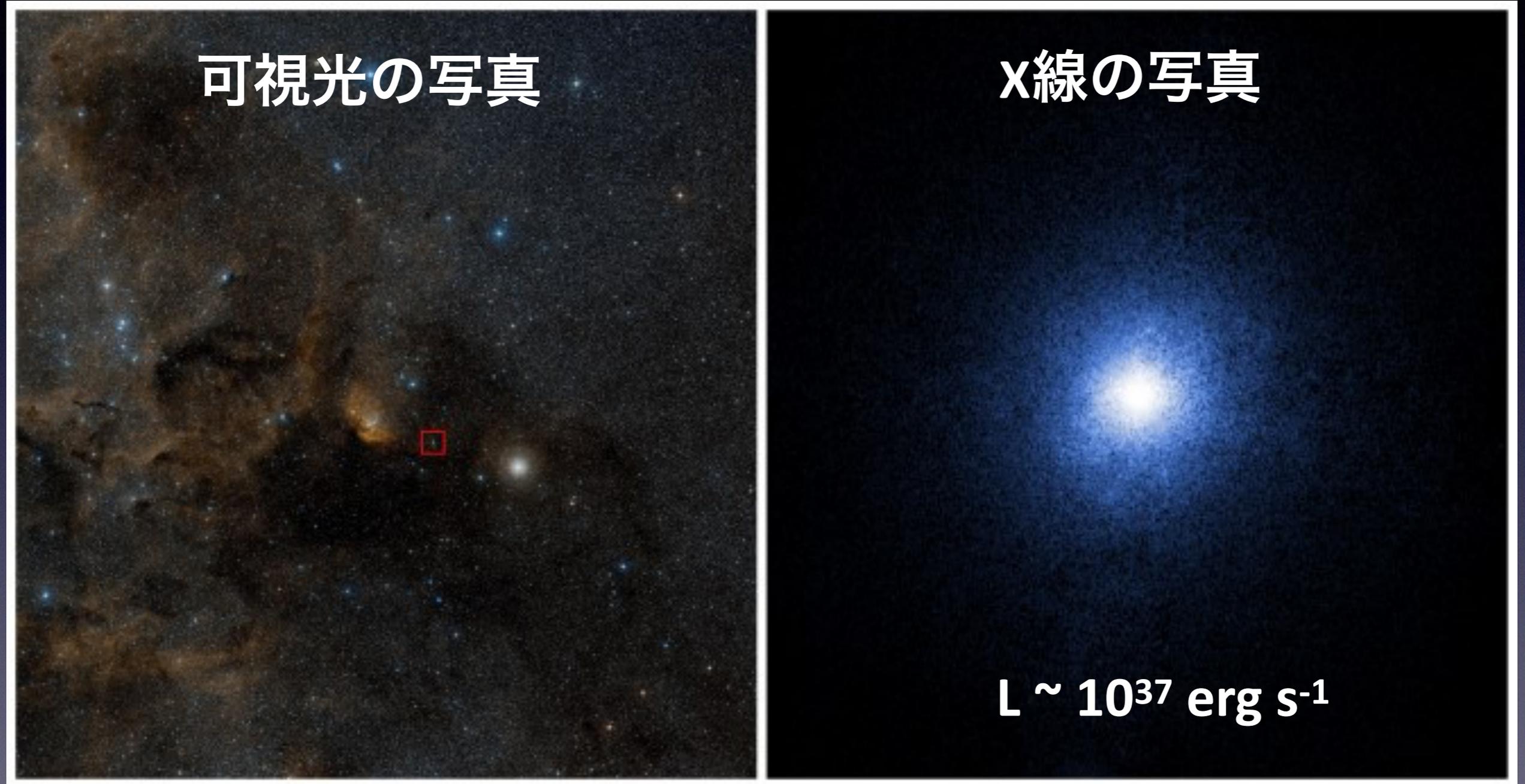
円盤  
(降着円盤)

円盤が光る！



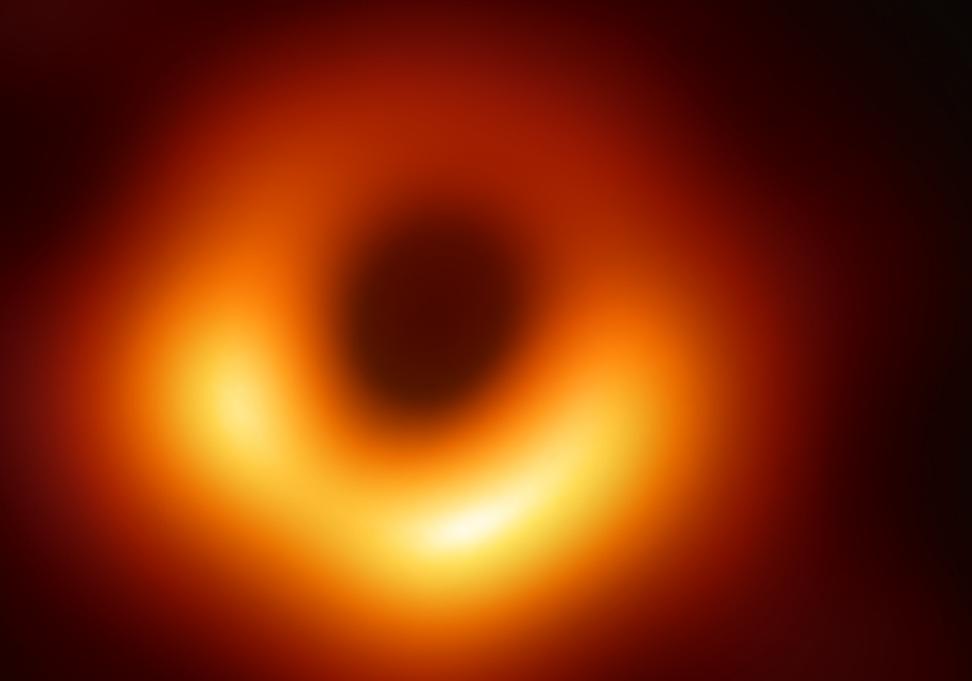
# はくちょう座X-1

## 最初に発見されたブラックホール天体

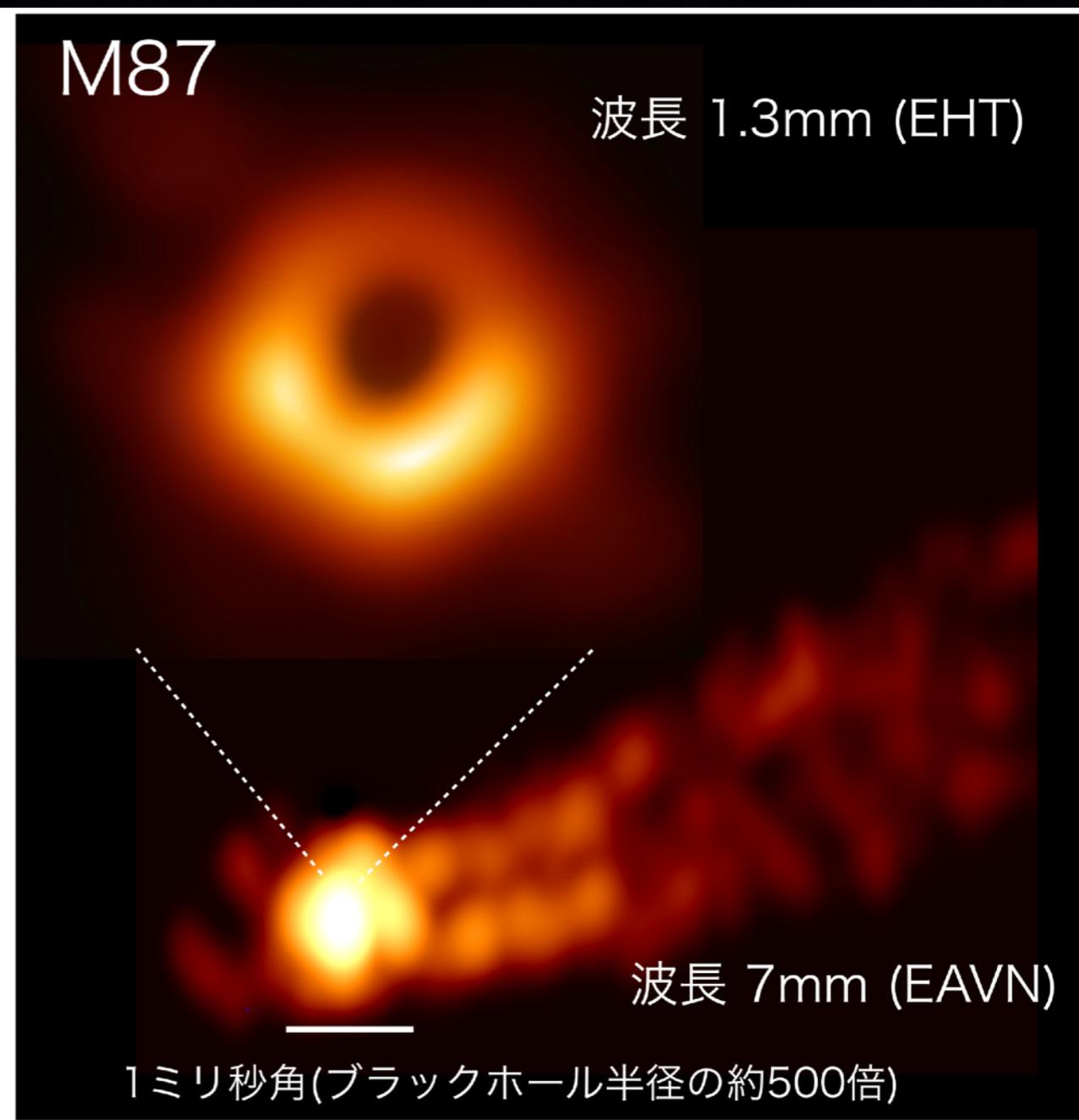
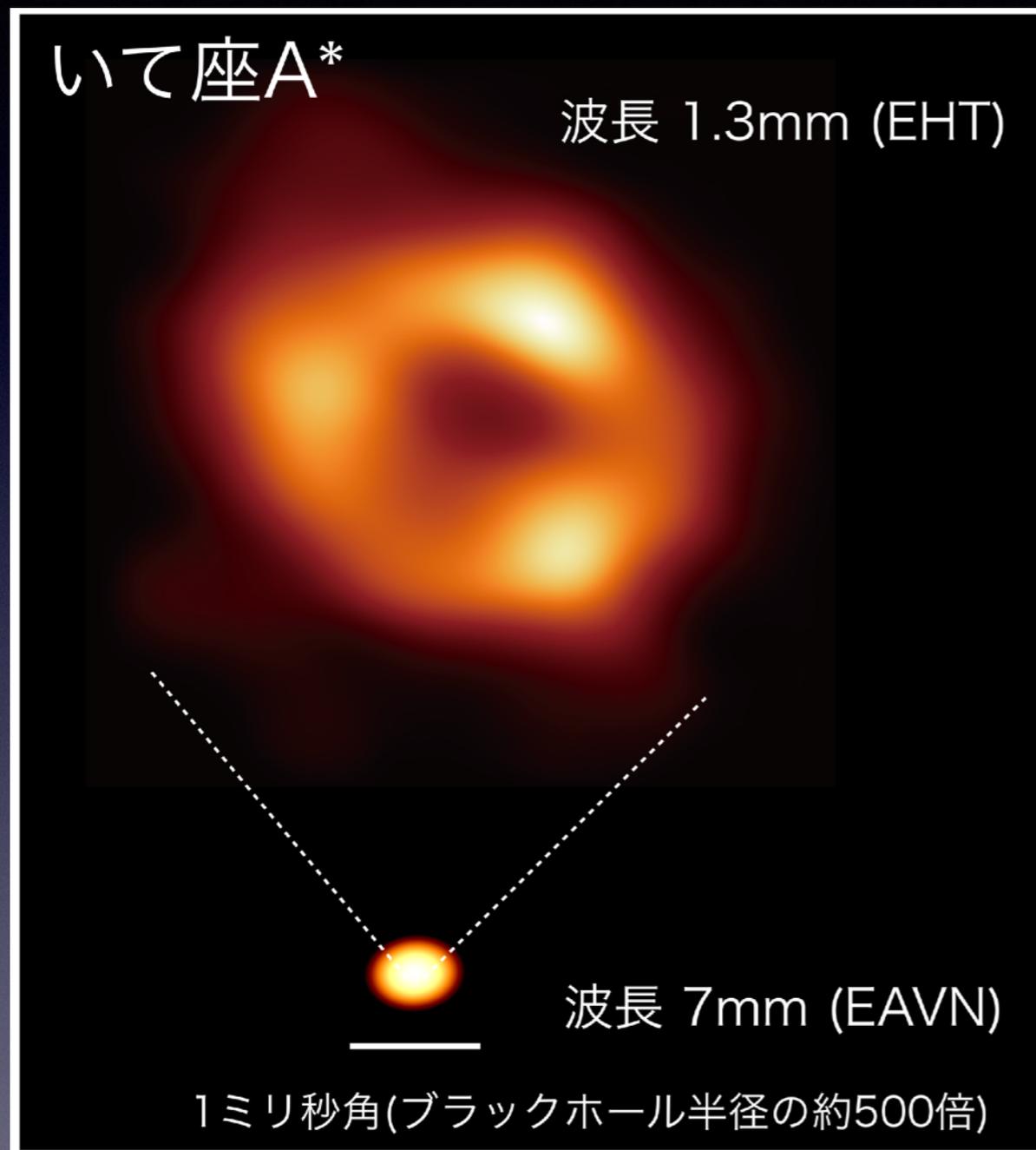


Credit: NASA/CXC (X-ray); Digitized Sky Survey (Optical)

# レポート課題3 M87 ブラックホール (2019年)



# 銀河系中心 ブラックホール (2022年)



# レポート課題3

- 2019年に初めてブラックホールの影の直接撮像の結果が報告された系外銀河M87は、距離 $d = 17 \text{ Mpc}$ に位置しており、リングの見かけの半径は20マイクロ秒角( $20 \times 10^{-6}$  秒角)だった。リングの半径がシュバルツシルト半径だとして(\*)、M87の中心にあるブラックホールの質量を太陽質量の単位で求めよ。

\*実際はシュバルツシルト半径の  
 $3 \cdot \sqrt{3}/2$ 倍になることが知られています。

- 2022年に報告された銀河系中心のブラックホールもほぼ同様の見かけの大きさを観測された。このことから、銀河系中心のブラックホールの質量を太陽質量の単位で求めよ。

# まとめ

- **ブラックホール**

- 脱出速度 > 光の速度  
=> 光が逃げられない (見えない)  
\*\*本当は相対性理論で扱う必要がある\*\*

- **ブラックホール天体**

- ブラックホールにガスが落ち込む => 降着円盤
- 重力エネルギーをエネルギー源にして光る
- 10太陽質量程度のブラックホールの場合  
主にX線で光る ( $T \sim 10^7$  K)
- 実際に多くのブラックホール天体が観測されている