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

力学

- 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

前半のまとめ (2)

- 太陽のエネルギー源は？
  => 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）

原子核物理

- 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 => 縮退圧で支えらえた白色矮星

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

星間空間

軽い星

赤色巨星

惑星状星雲

白色矮星

重い星

リゲル

赤色超巨星

ベテルギウス

超新星爆発

中性子星

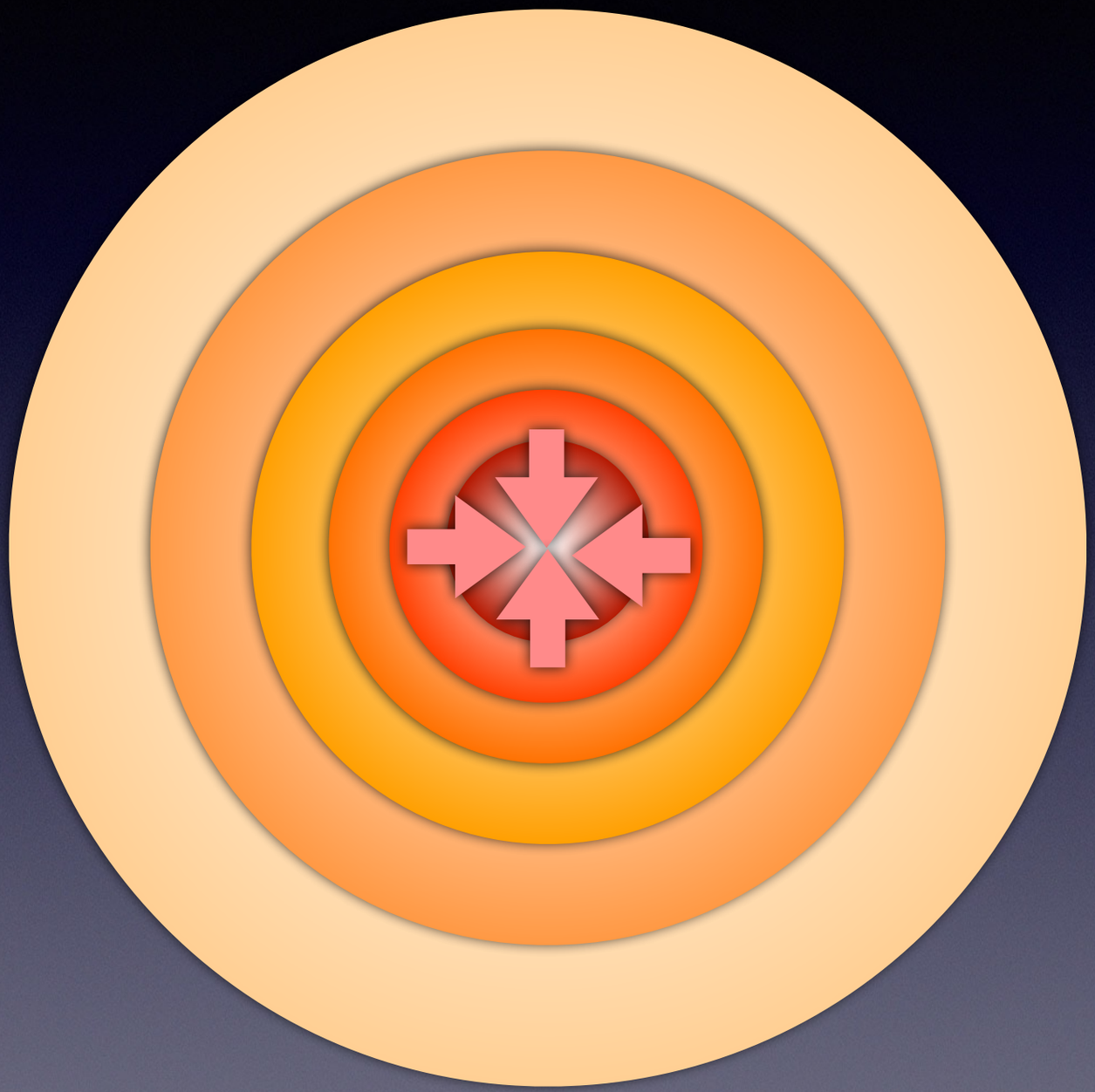
ブラックホール

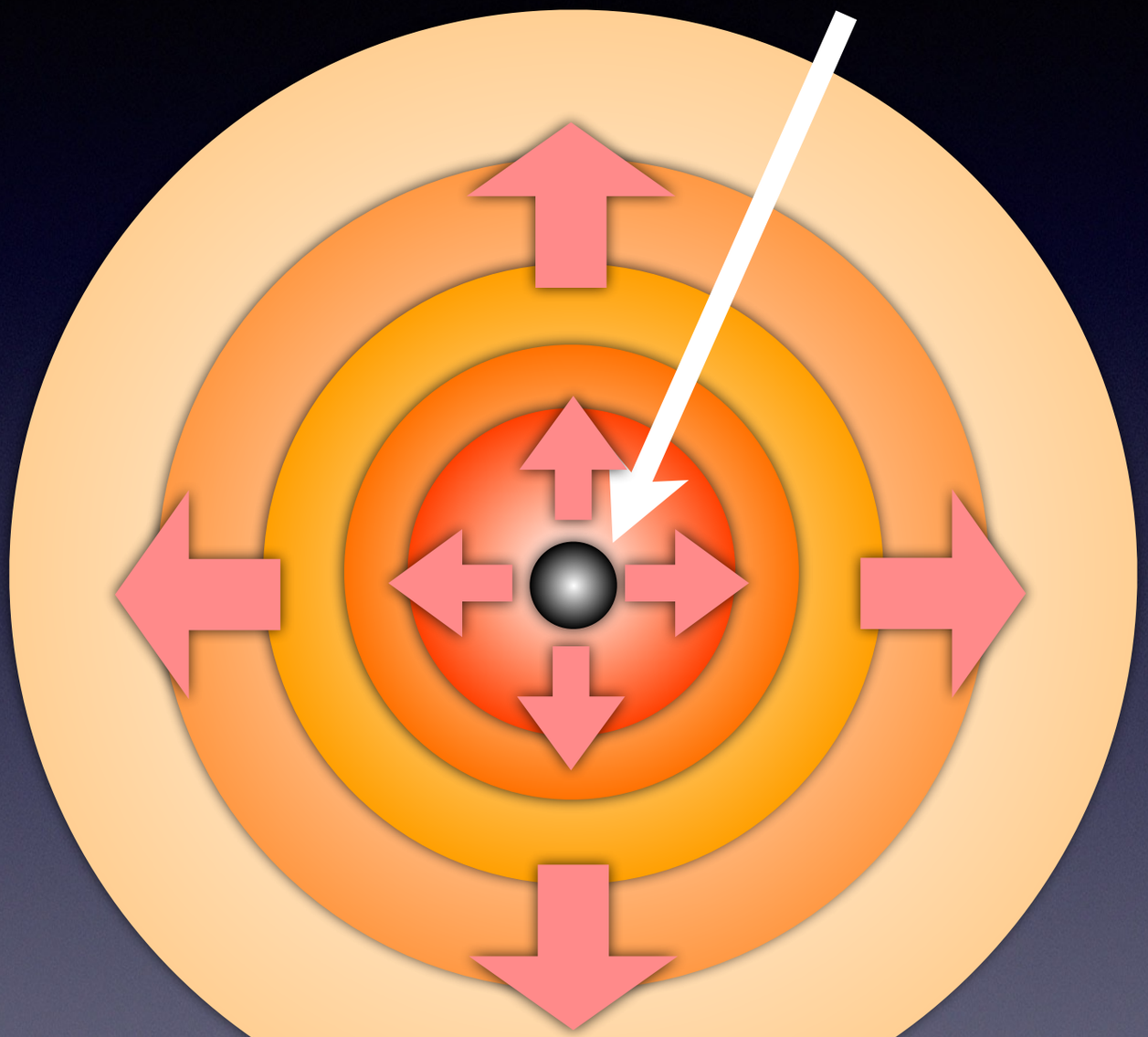
図の大きさは天体の大きさと一致していません

(C) Essay Web

星の「崩壊」
（< 1秒）

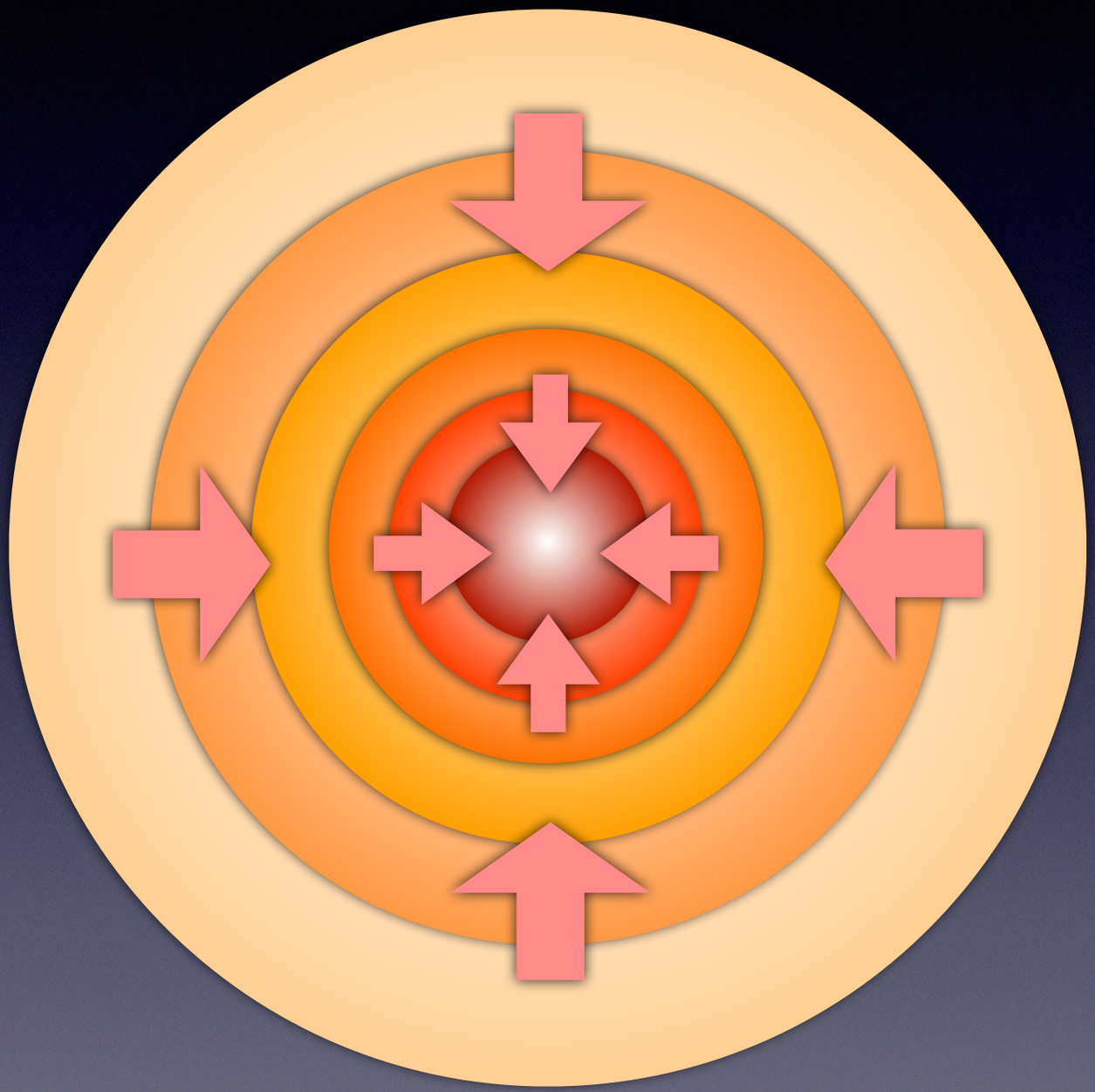
中性子星





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



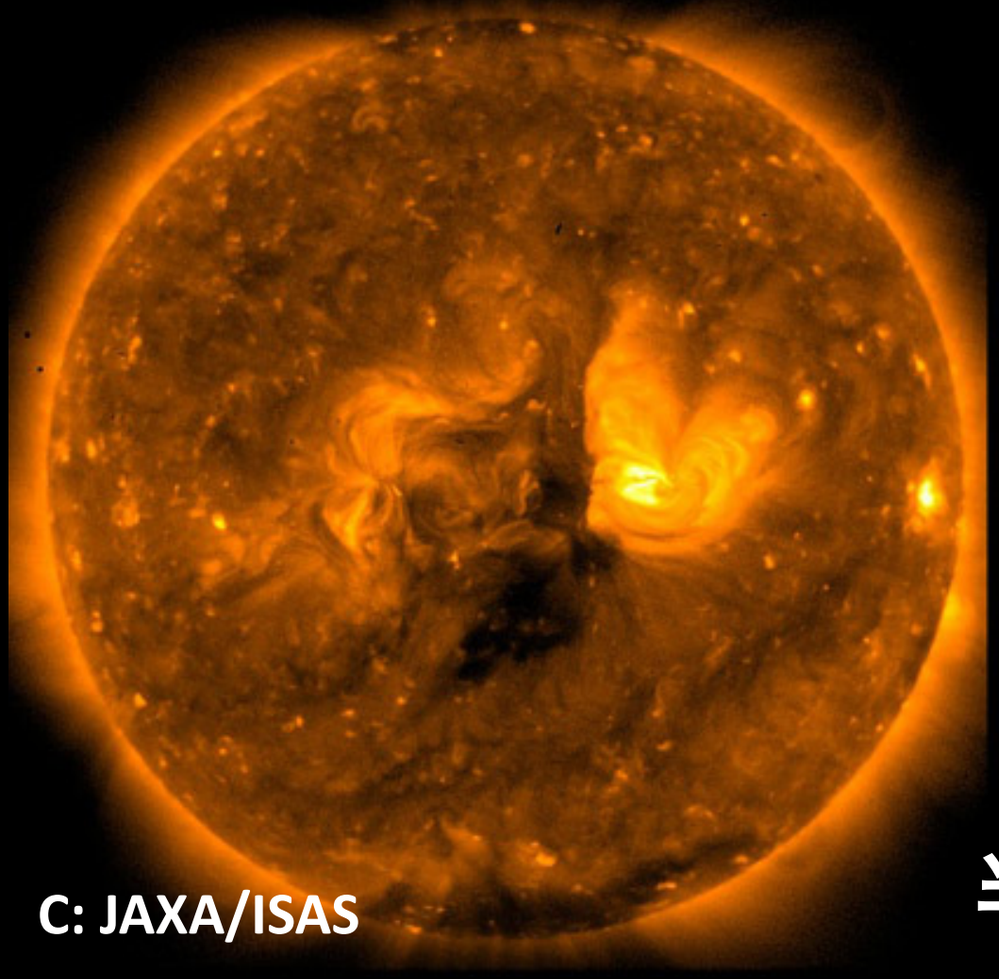
C: NASA

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



C: JAXA/ISAS

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

半径 約3 km

光が抜け出せなくなる
ブラックホール！

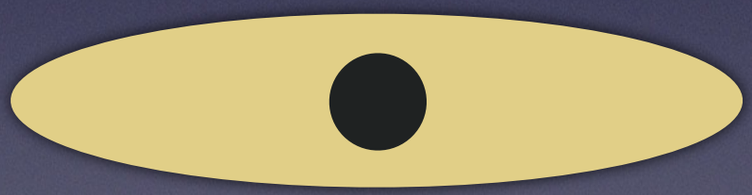
ブラックホールは見えないのに、
なぜいると信じられているのか？

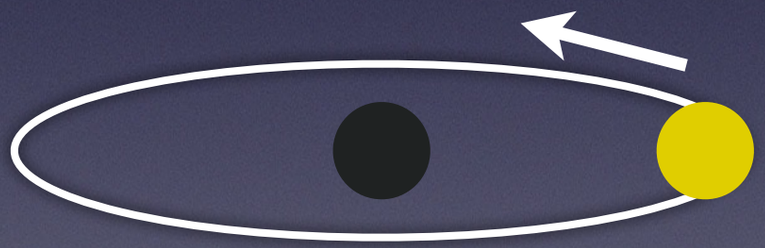
ブラックホールの見つけ方

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

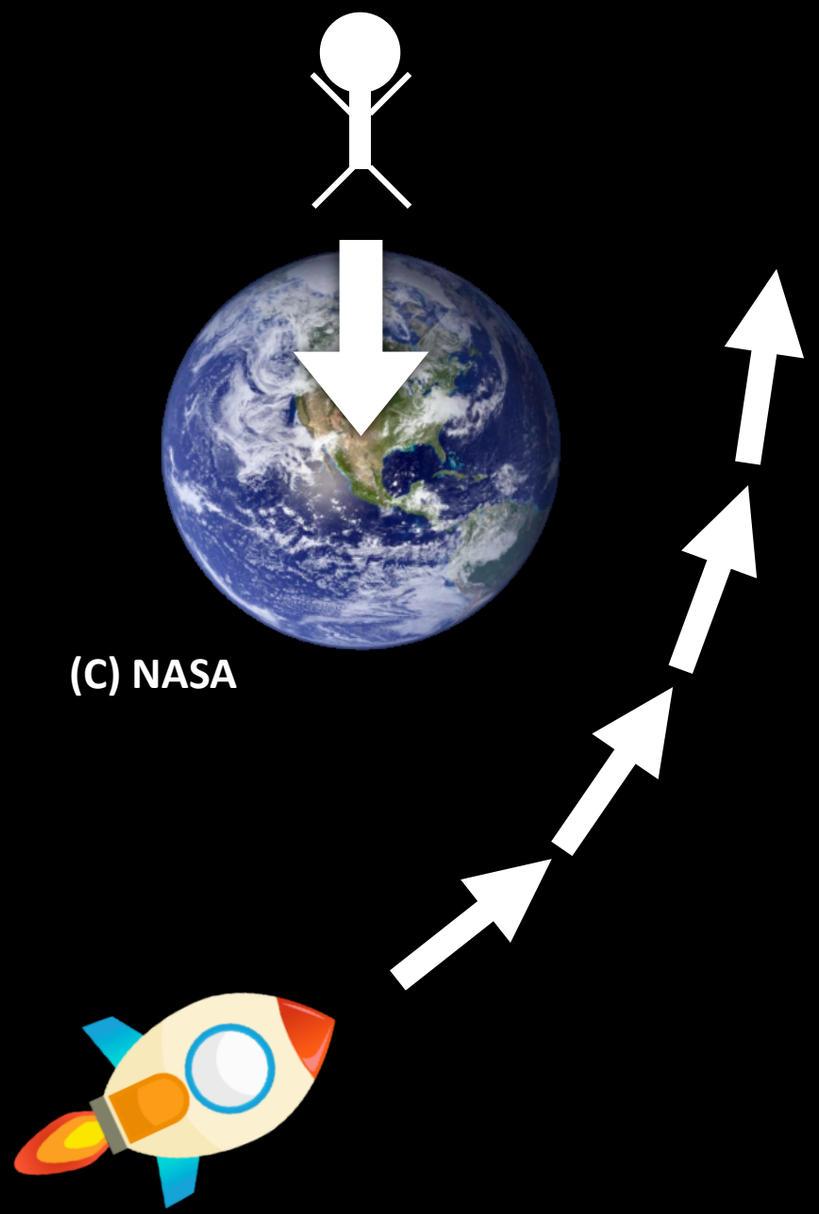






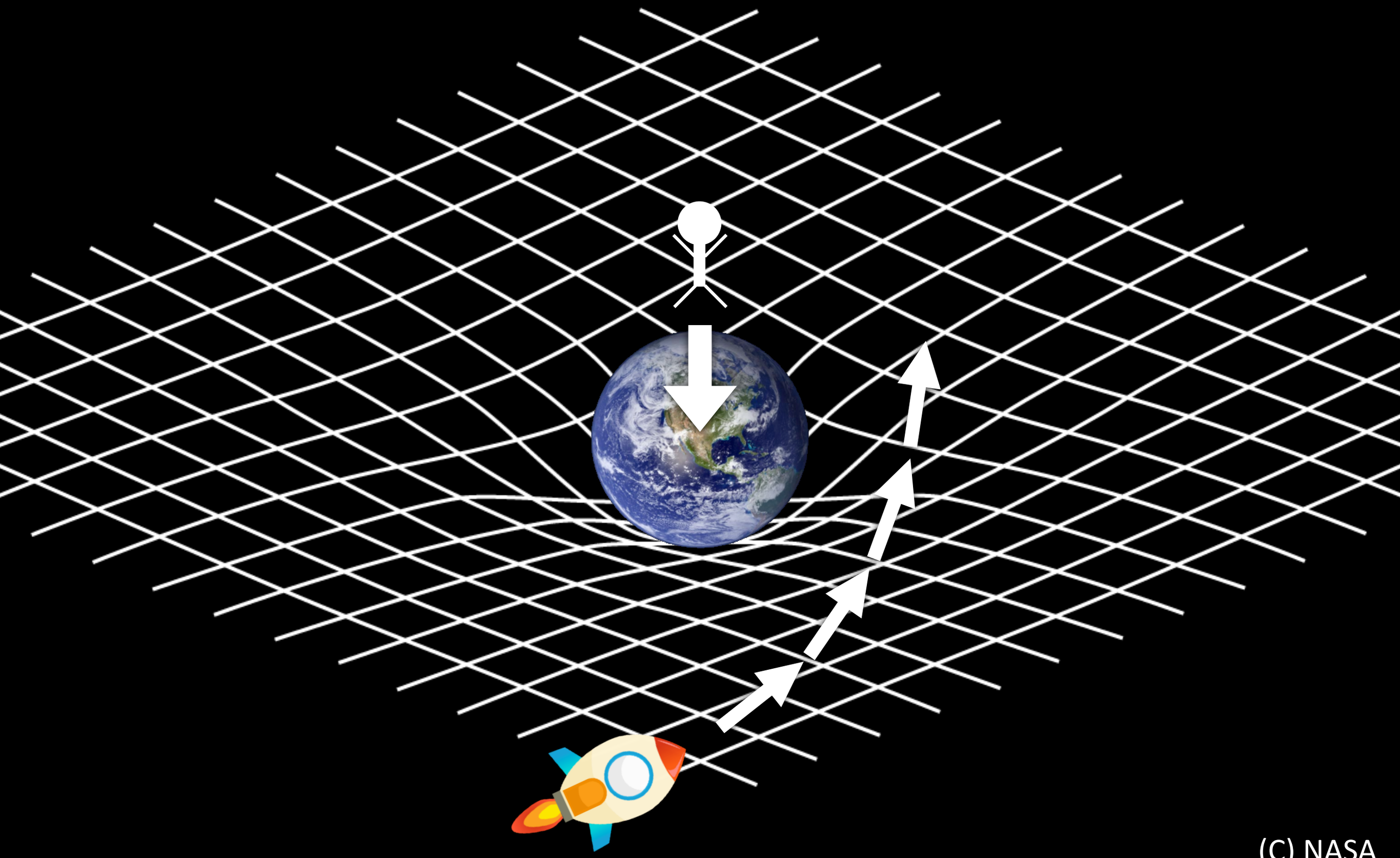
脱線：重力波の話題

重力



(C) NASA

重力：時空のゆがみ

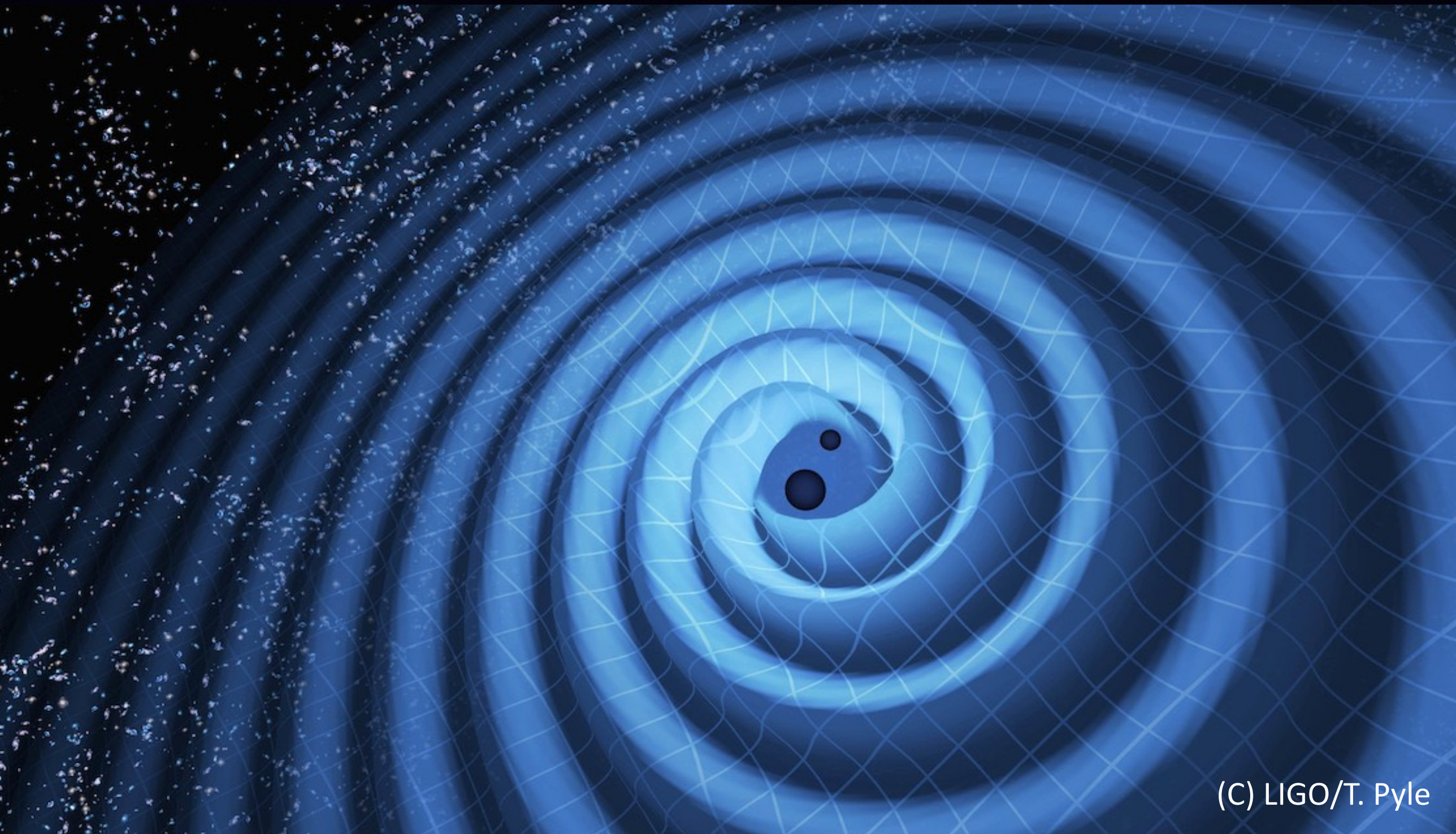


(C) NASA

重力波：時空のゆがみの伝播

相対論
(一般相対性理論)

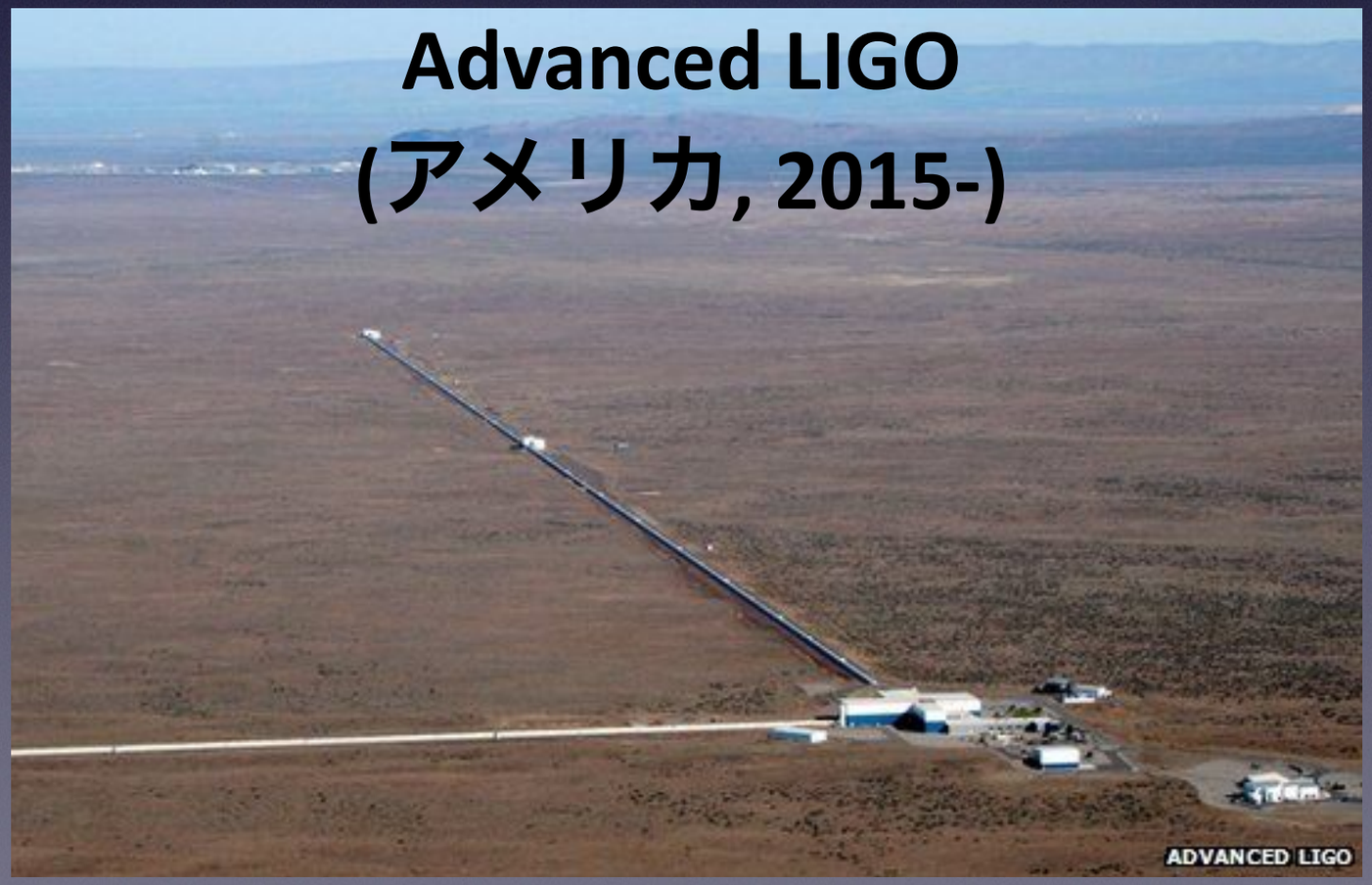
「**強重力天体**」が動き回ると、強い重力波が発生



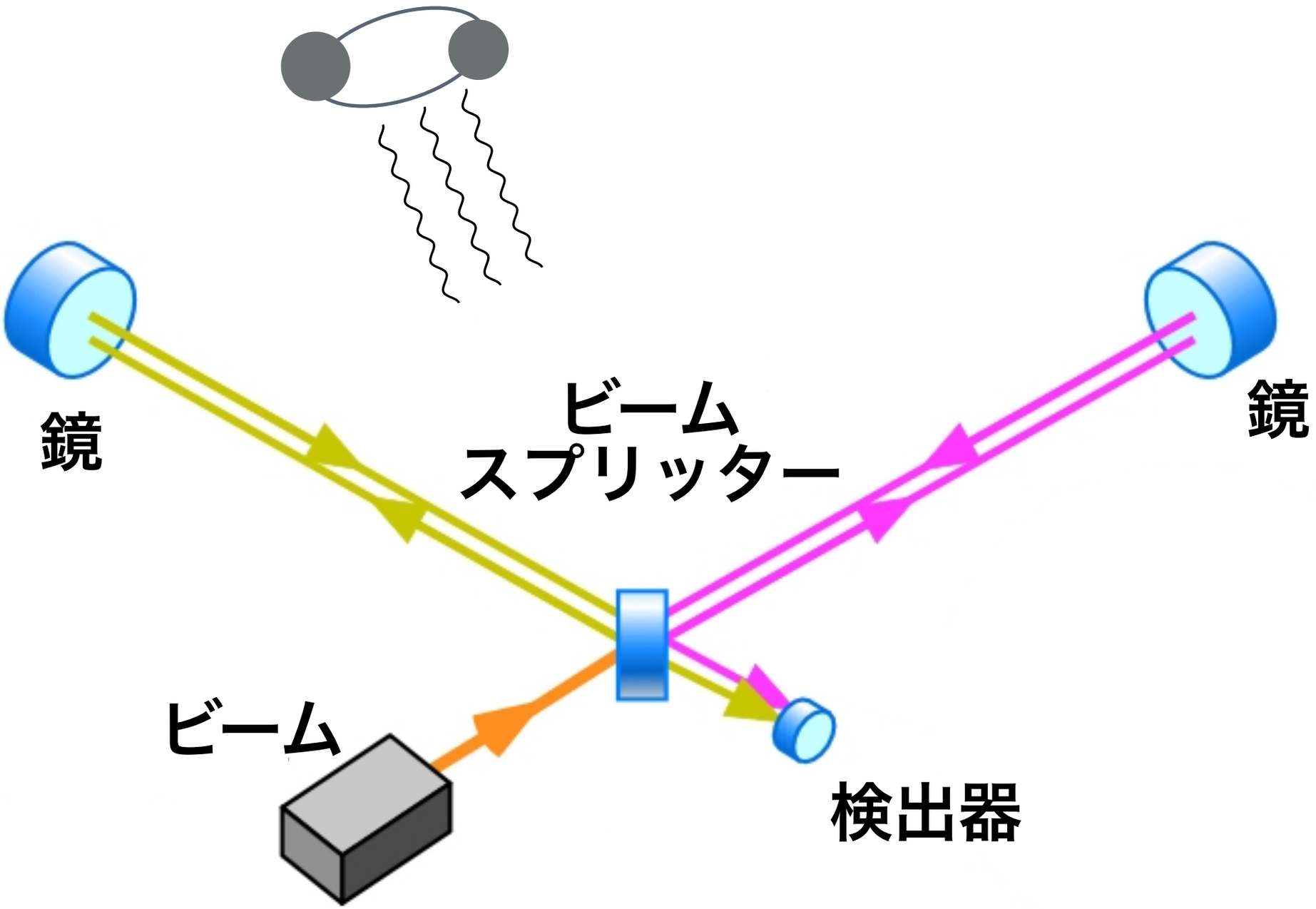
(C) LIGO/T. Pyle

重力波望遠鏡


Advanced Virgo
(ヨーロッパ, 2017-)


Advanced LIGO
(アメリカ, 2015-)
ADVANCED LIGO

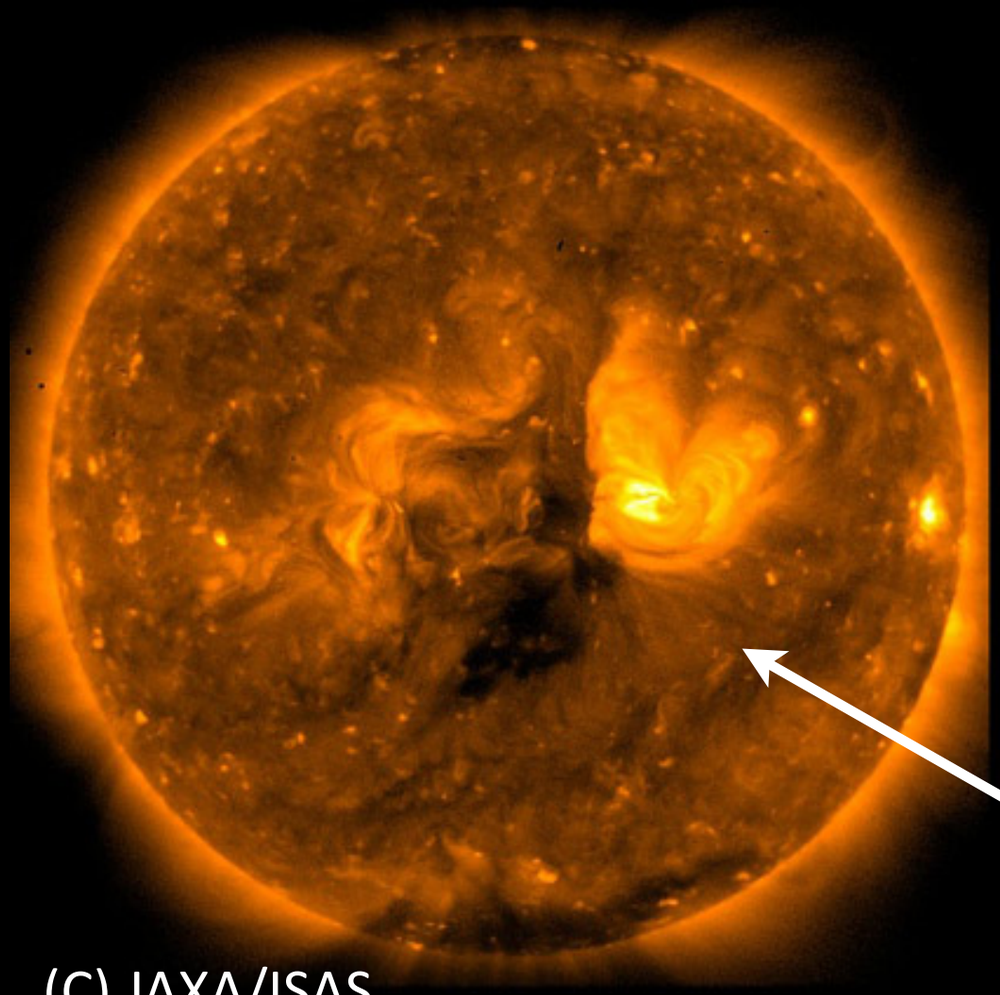

KAGRA (日本)
Gifu Pre.
Hida-city
Kamioka
Ikenoyama mt.
XMASS
Kamiland
CLIO
SG
Super Kamiokande
3km
KAGRA
Image



http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/plan/aboutu-gw

$$0.000000000000000000001$$

$$= 10^{-21}$$



(C) JAXA/ISAS

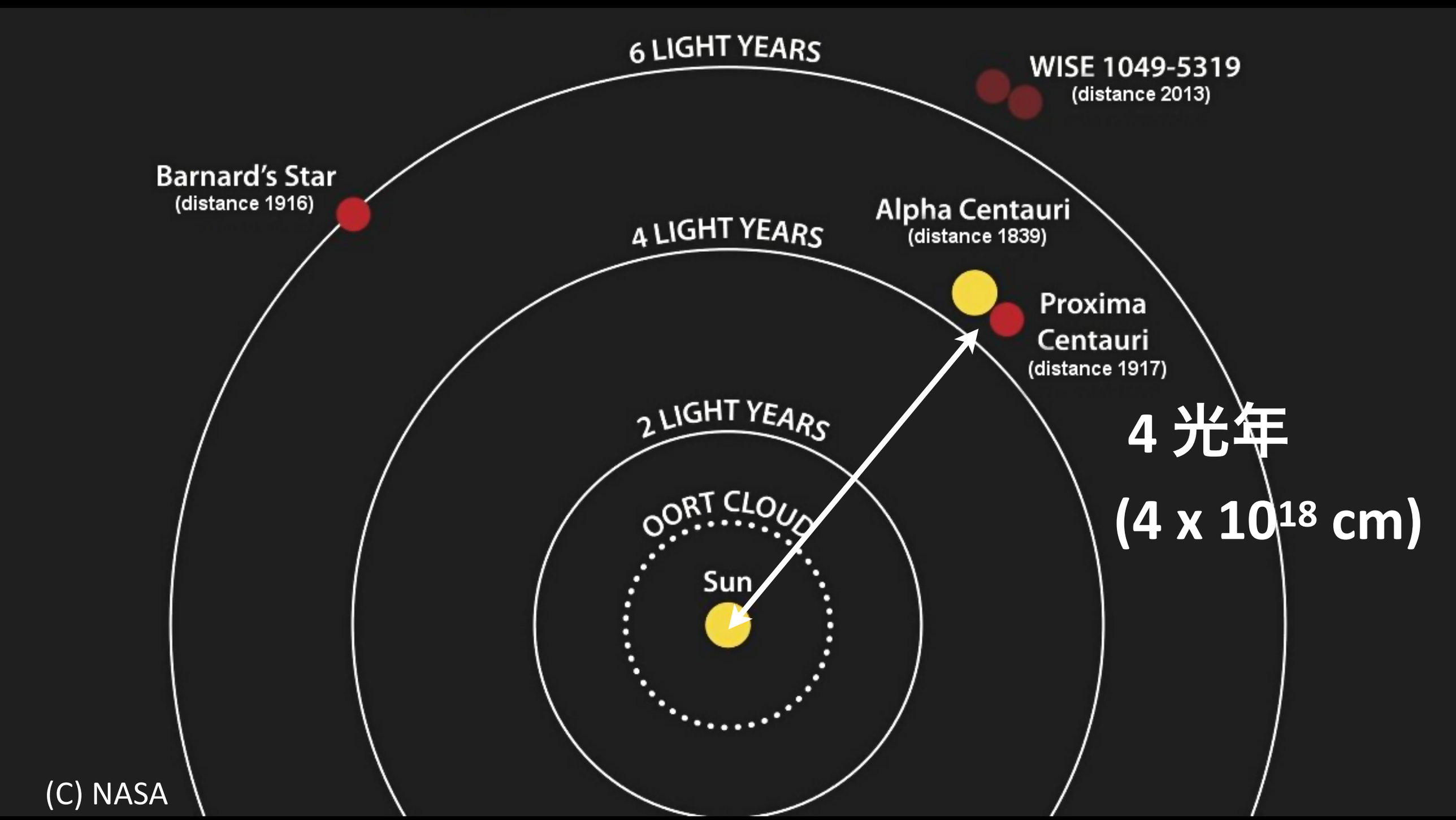
1億5000万km
(1.5 x 10^{11} m = 1.5 x 10^{13} cm)



(C) NASA

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！

(1A = 0.1 nm = 10^{-10} m = 10^{-8} cm)

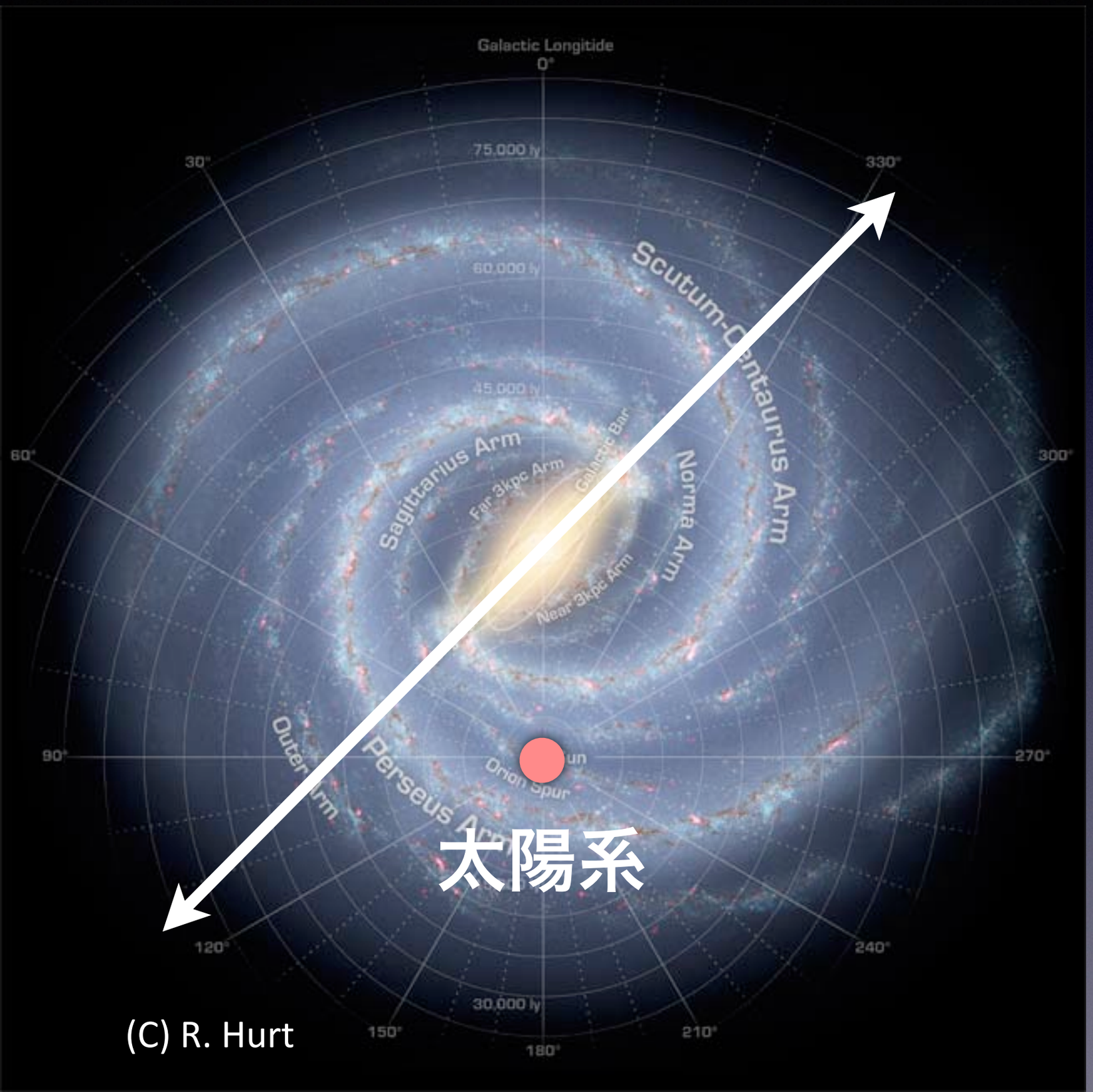


4 光年

(4 x 10^{18} cm)

$$10^{-21} = \frac{\text{髪の毛の幅 40 um } (4 \times 10^{-5} \text{ m} = 4 \times 10^{-3} \text{ cm})}{\text{アルファセンタウリまでの距離 } (4 \times 10^{16} \text{ m} = 4 \times 10^{18} \text{ cm})}$$

私たちの住む銀河系



太陽系

銀河の大きさ
約100,000光年

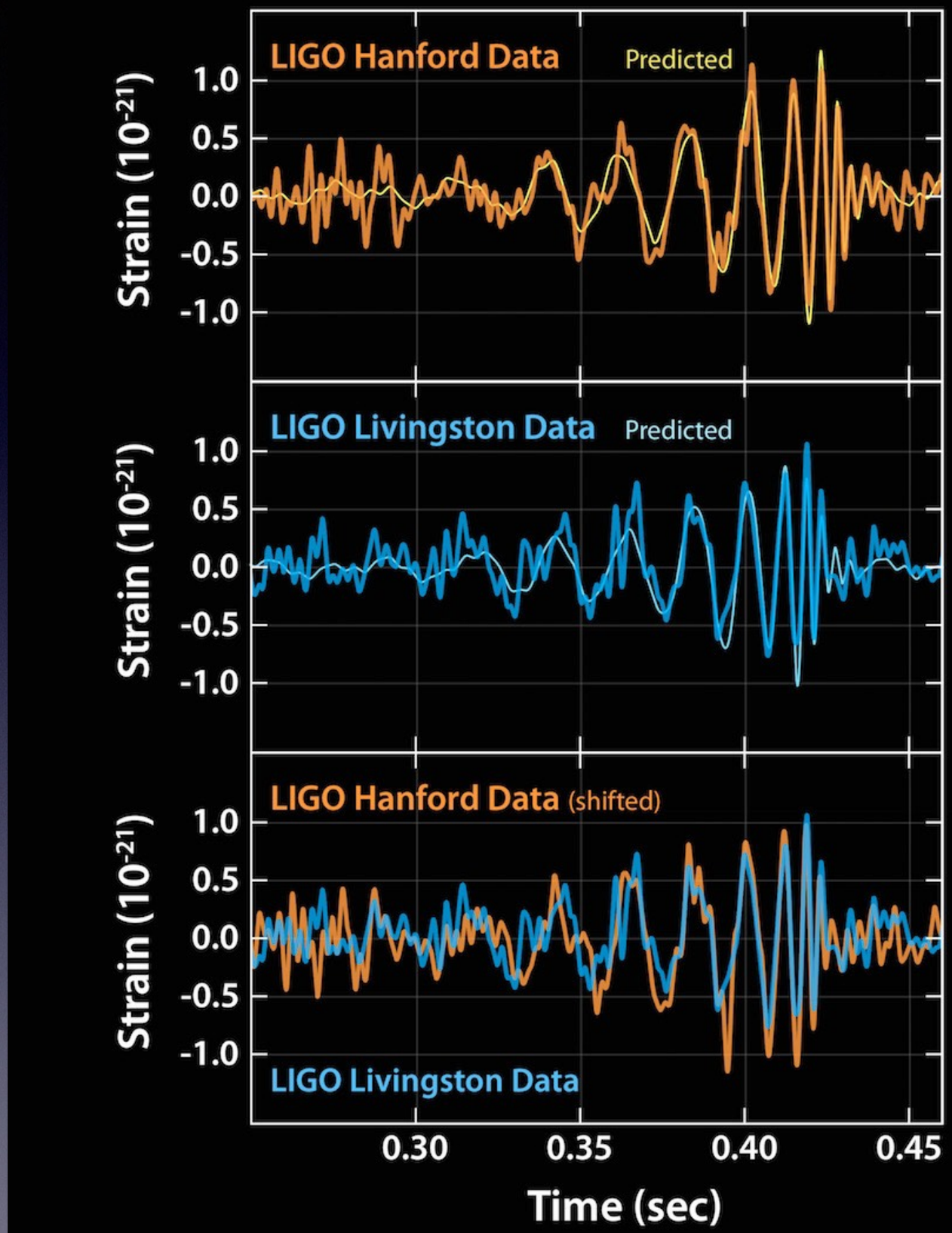
10^{21} m = 10^{23} cm

銀河系の大きさが
わずか1m変わる程度！

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

ノーベル物理学賞

重力波観測への貢献に対して

The Nobel Prize in Physics 2017

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

Share this: 991

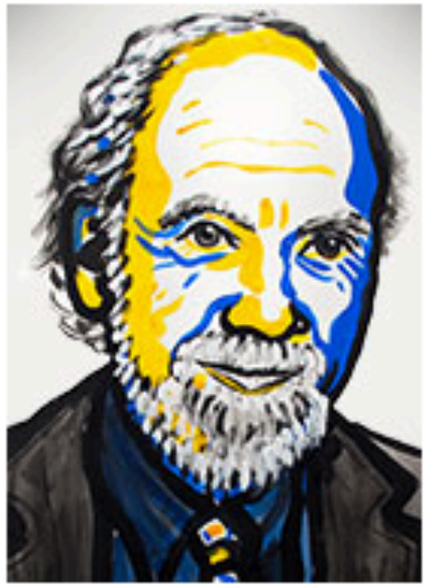
The Nobel Prize in Physics 2017



© 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"*.

https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2017/

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

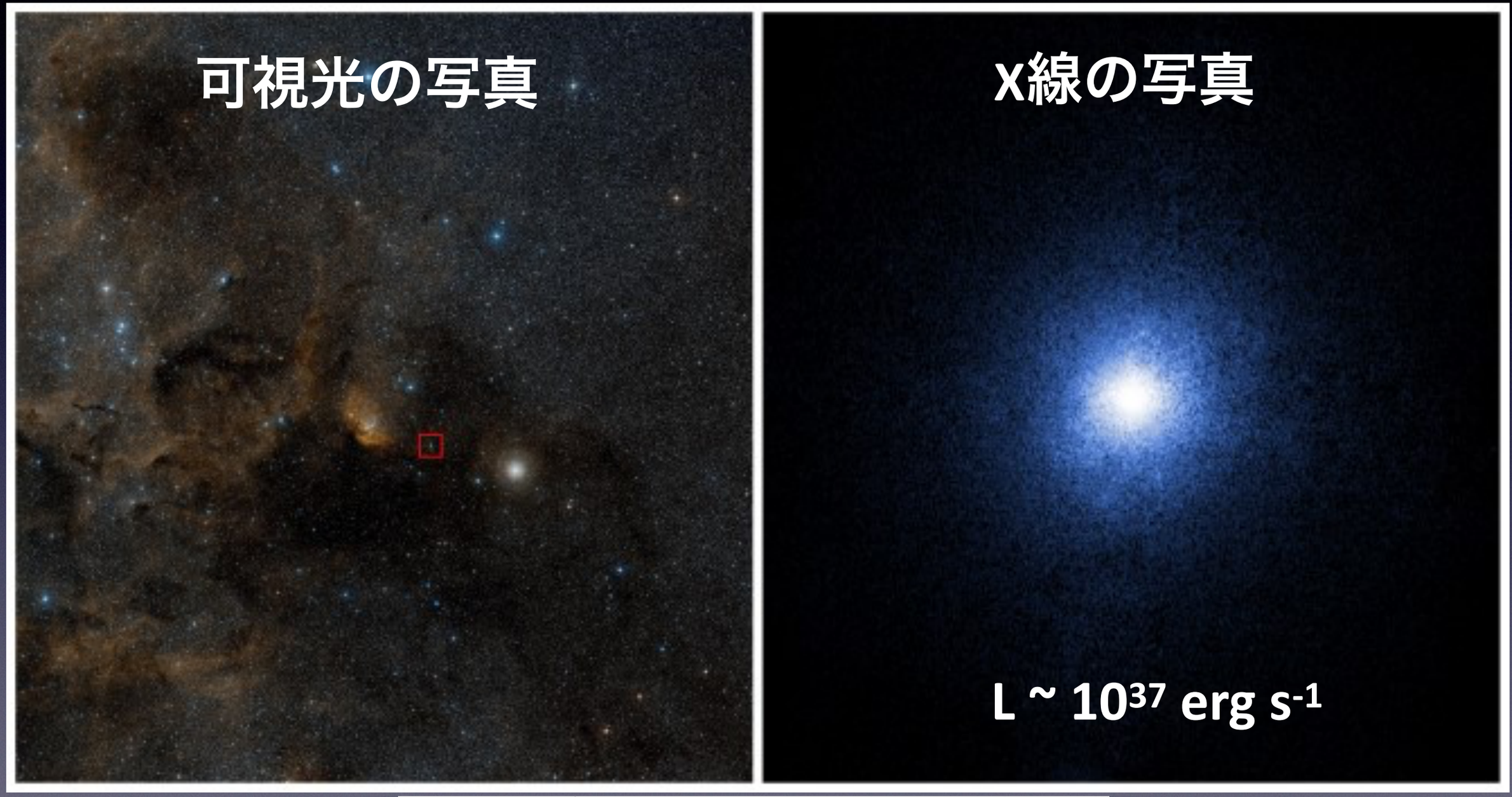
ブラックホール

円盤
（降着円盤）

円盤が光る！

(C) NASA/CXC/M. Weiss

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)

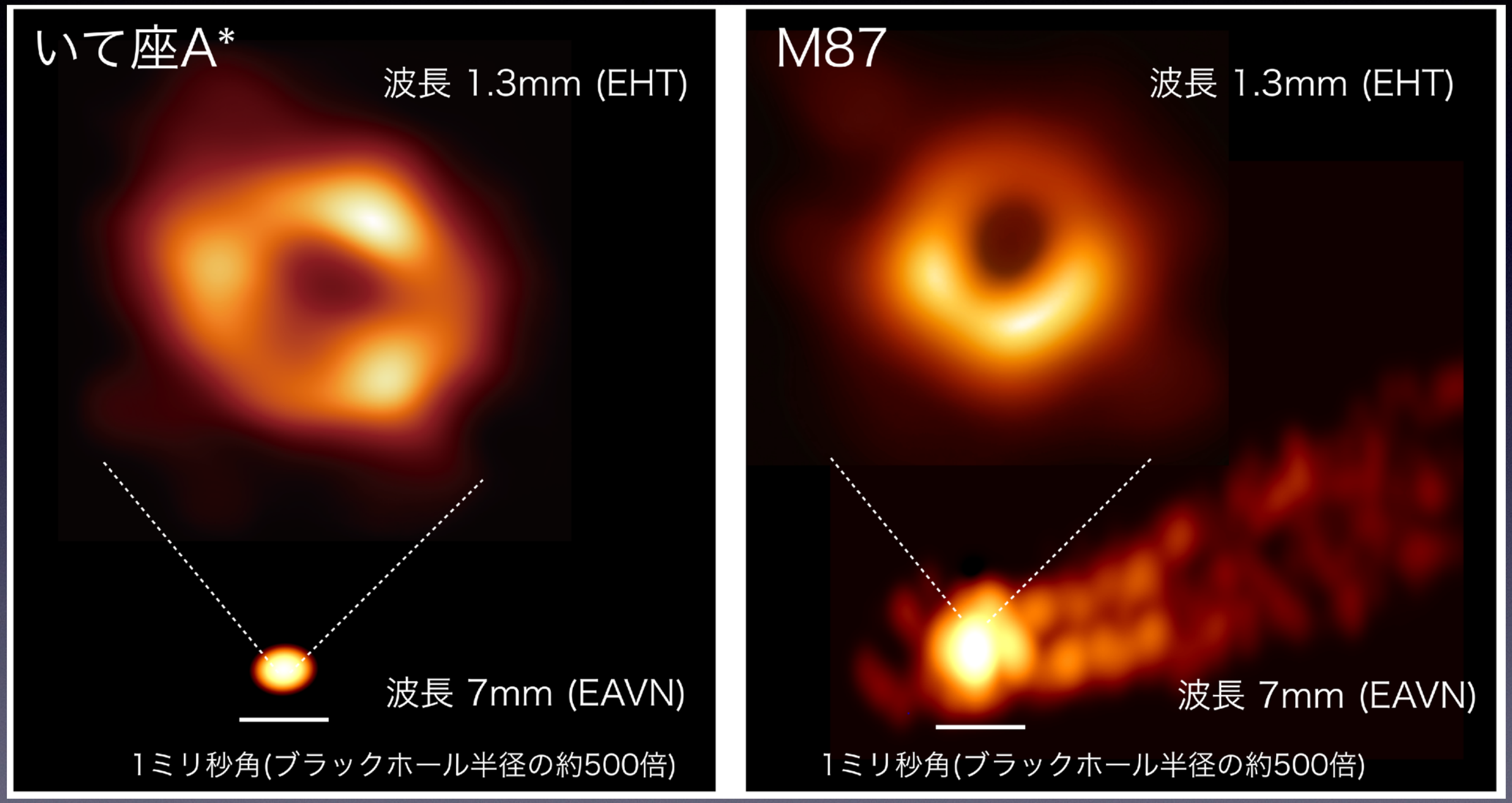
http://ecuip.lib.uchicago.edu/multiwavelength-astronomy/x-ray/history/12.html

レポート課題3　M87 ブラックホール (2019年)



https://www.miz.nao.ac.jp/eht-j/c/pr/pr20190410

銀河系中心 ブラックホール (2022年)



https://www.miz.nao.ac.jp/eht-j/c/pr/pr20220512

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 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 x 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*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で観測された。
  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