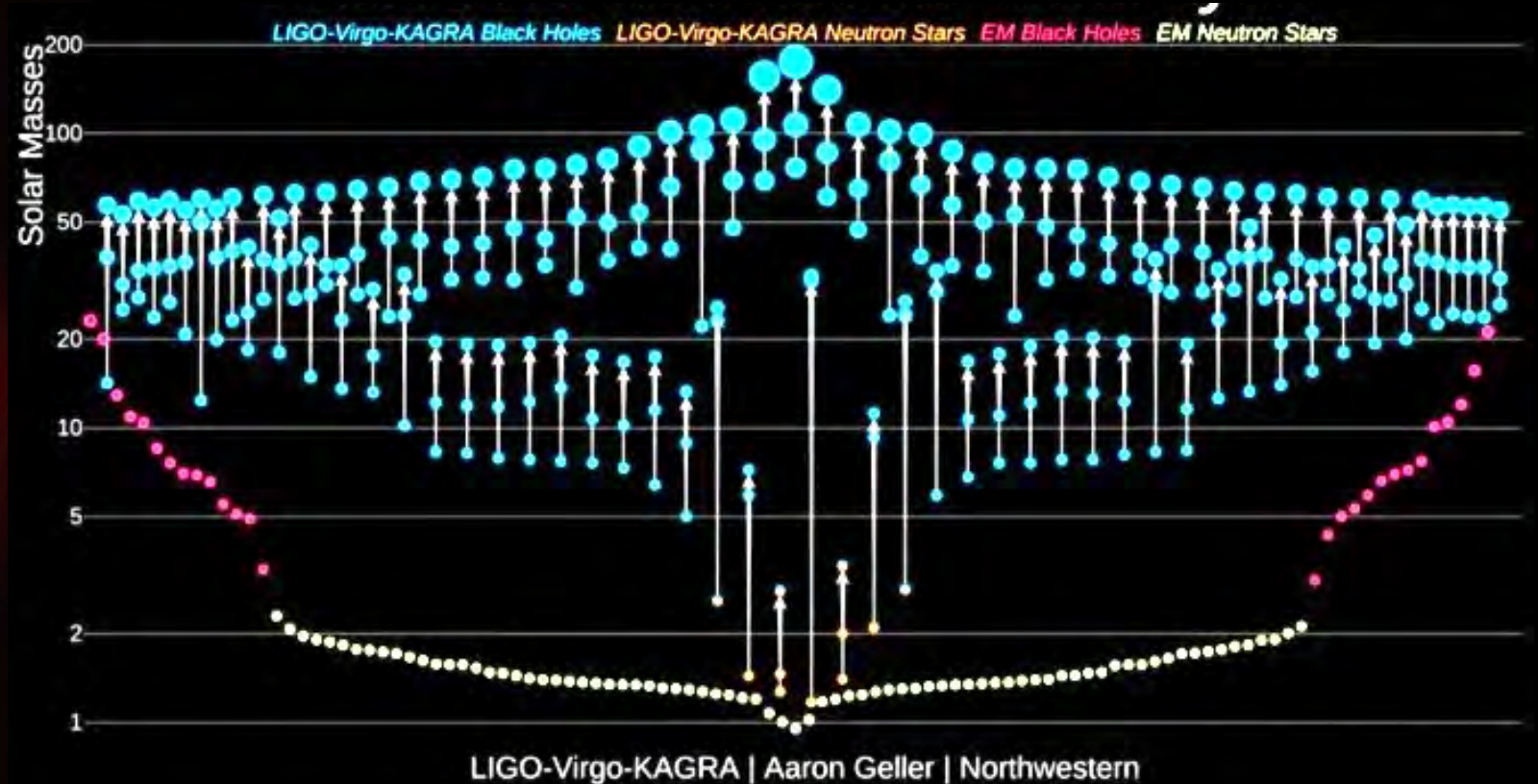


見えないはずのブラックホールを見る



東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖

理工学のフロンティア 2022年度第4回 (オンライン)

2022年6月21日16:50-18:20@高知工科大学

http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2022j.html

本日の話の内容

- 1 主役はダーク
- 2 ブラックホールと蟻地獄
- 3 ブラックホールを“見る”
- 4 ブラックホール3体系をさがす
- 5 まとめ 世界の闇を白日のもとにさらす天文学

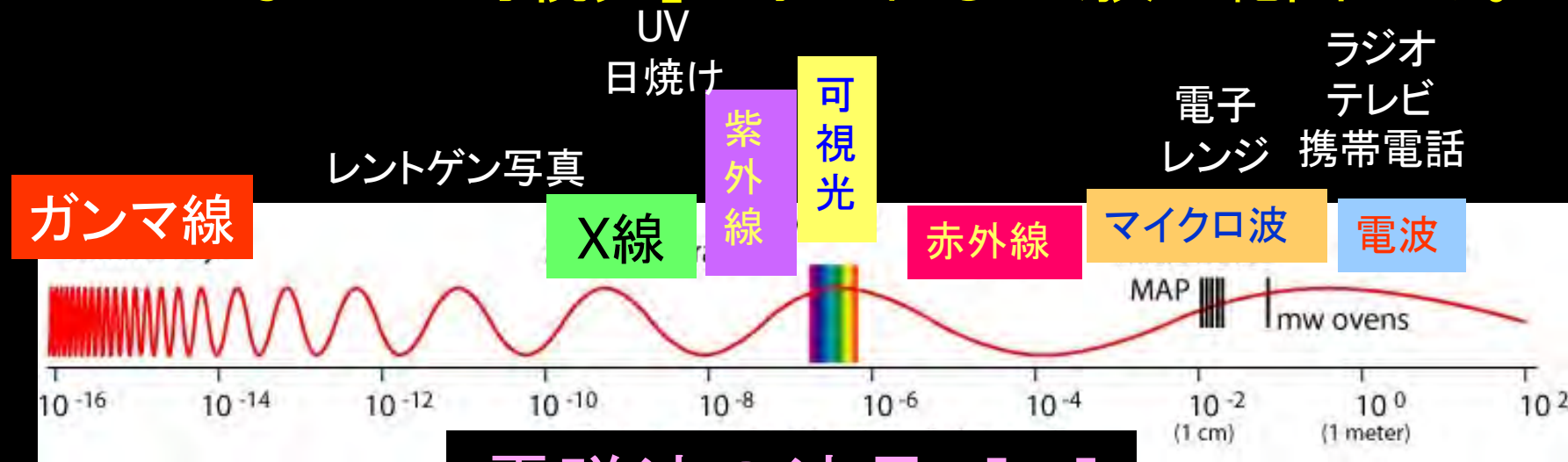
1 主役はダーク



毎日新聞社 2013年

目に見える世界はほんの一部だけ

「光」は電磁波と呼ばれる波の一種。これらは波長に応じて異なる名前をもつ。現代天文学はこれらすべての波長を(さらには光以外の宇宙線、ニュートリノ、重力波も)駆使した観測を行っている。人間の「目に見える」のは、そのなかの「可視光」と呼ばれるごく狭い範囲のみ。



電磁波の波長 [m]

人類がなぜ可視光しか見えないのか(逆に可視光だけ見えるのか)は、興味ある疑問だが、仮に我々が目をつぶったとしても、そこにある世界はなににも変わらない

天文学・宇宙物理学の研究対象と方法論

■ 対象別：「XX」の起源と進化

- 「XX」 = 惑星、太陽、恒星、星間物質、超新星、コンパクト天体、銀河系(天の川)、(系外)銀河、活動銀河核、銀河団、宇宙、時空、生命・文明

■ 波長別：「YY」天文学

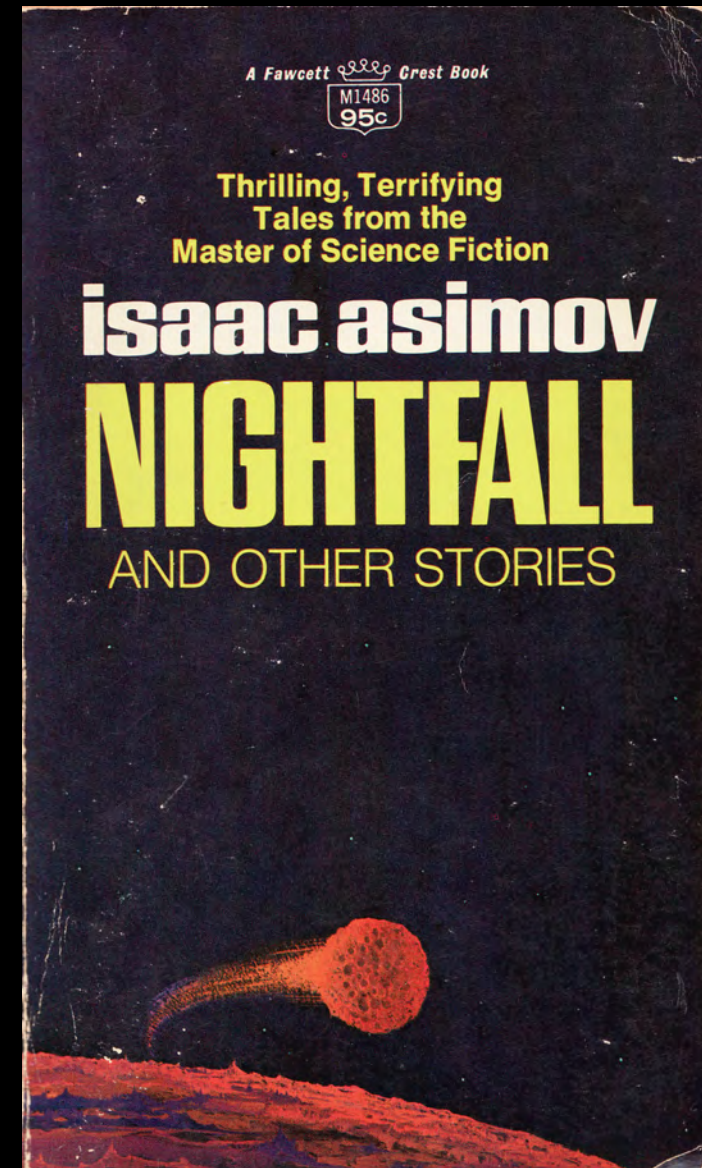
- 「YY」 = 電波、赤外線、可視光、紫外線、X線、ガンマ線、宇宙線、ニュートリノ、重力波

■ 手法別：

- 理論、観測(地上、気球、ロケット、衛星、地下)、実験、数値シミュレーション

アイザック・アシモフの短編SF小説 Nightfall (夜来たる)

- 6つの太陽を持ち「夜」のない惑星ラガッシュ
 - 空に複数の太陽が昇っているためいつも「昼」
- 古来からの伝説によると、約2000年に一度だけラガッシュに「夜」が訪れるという
 - これは、たまたま空に一つしか太陽が昇っていない時にラガッシュの内側の惑星が起こす皆既日食
 - 物語はこれから数時間で「夜」が訪れる時から始まる
 - 初めて「夜」を見た瞬間、ラガッシュの住民は何を知ったのか



「我々は何も知らなかった」



イラスト：羽馬有紗

- その瞬間に彼らの世界観が一変した
- 見えないものを見ることで「真の世界」を知る=天文学の方法論

この青空はこの世界の果てなのか？
その先にも、(見えない)別の世界が
広がっているのか？



この星空の先には
別の世界が広がっているのか？



L'essentiel est invisible pour les yeux

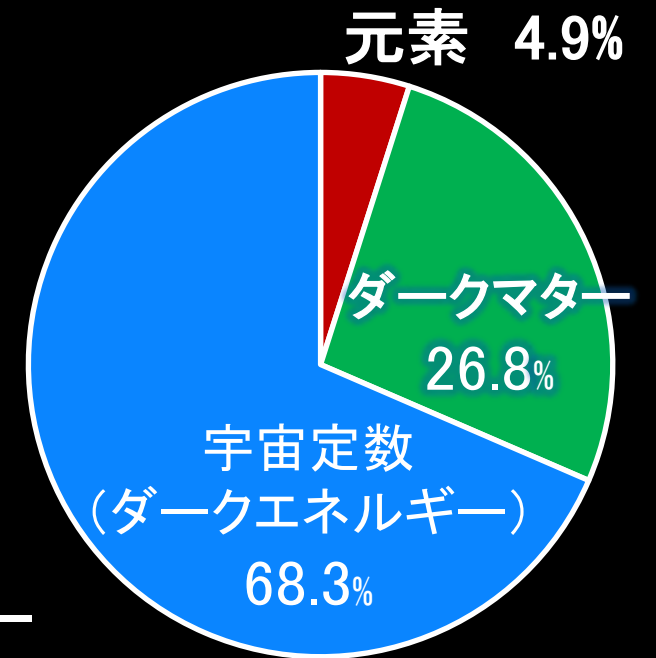
本当のことは心でしか見えないんだ
大切なことは目には見えないんだよ

「星の王子様」のなかのキツネの言葉



■ 宇宙の主演

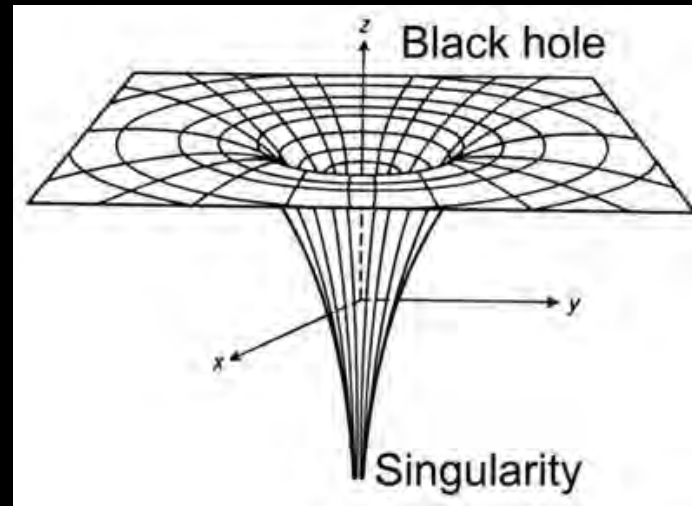
- ダークマター
- ダークエネルギー
- ブラックホール
- 太陽系外惑星
- 地球外知的文明



2 ブラックホールと蟻地獄



安部公房 (新潮社 1962年)



勅使河原宏 監督 1964年
岸田今日子 岡田英次

シュワルツシルト ブラックホール

■ アインシュタイン方程式の球対称真空解

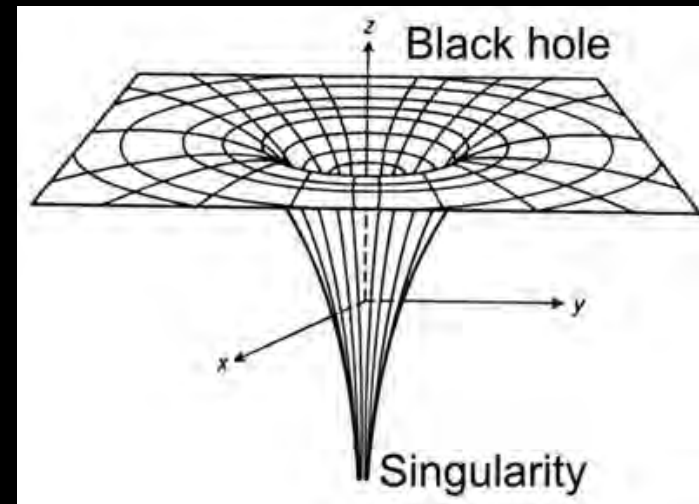
$$ds^2 = - \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) dt^2 + \frac{dr^2}{1 - \frac{r_s}{r}} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)$$

- 2次元で考えると右のような幾何学に対応

■ シュワルツシルト半径

$$r_s \equiv \frac{2GM}{c^2} \approx 3 \left(\frac{M}{M_\odot}\right) \text{ km}$$

- もっと複雑な解も知られているが、とりあえずこれをブラックホールだと考えておいて良い



シュワルツシルト半径の内側からは何ものも外部に出られない(事象の地平線)

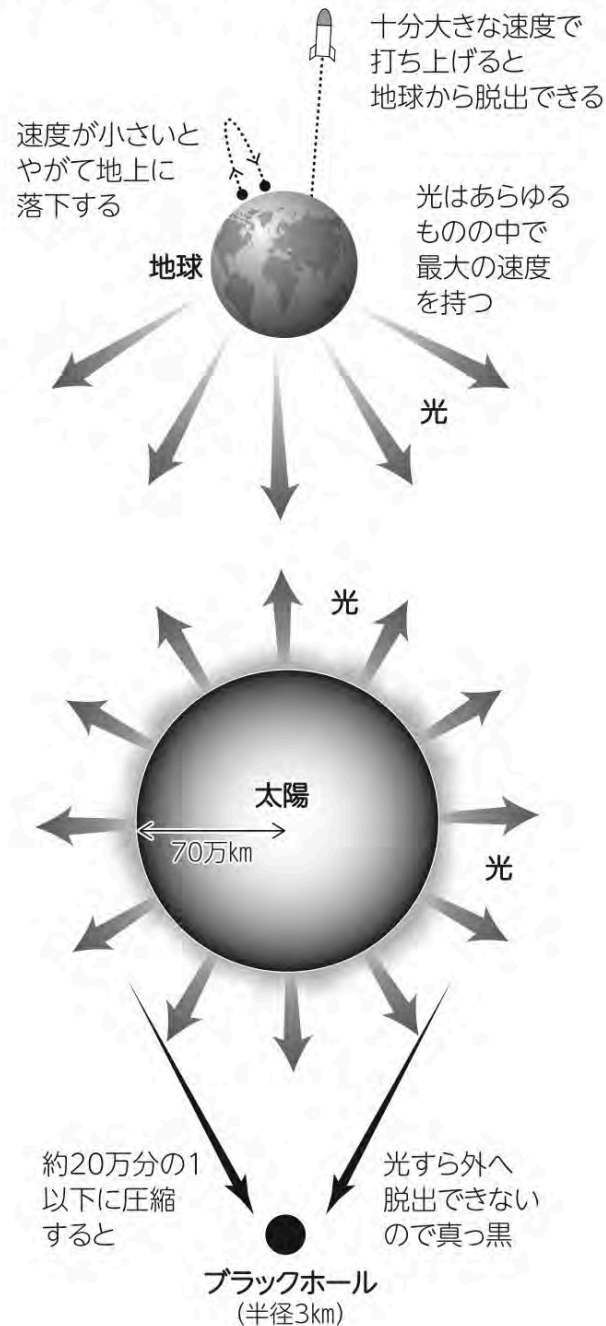
■ 黒い穴(ブラックホール)

- シュワルツシルト半径の内側からは光すら脱出できないため、真っ黒なはず
- 原点($r=0$)に特異点がある以外は物質は何もない(真空解)ので、**黒い球(ブラックボール)**ではない

■ ホーキング放射

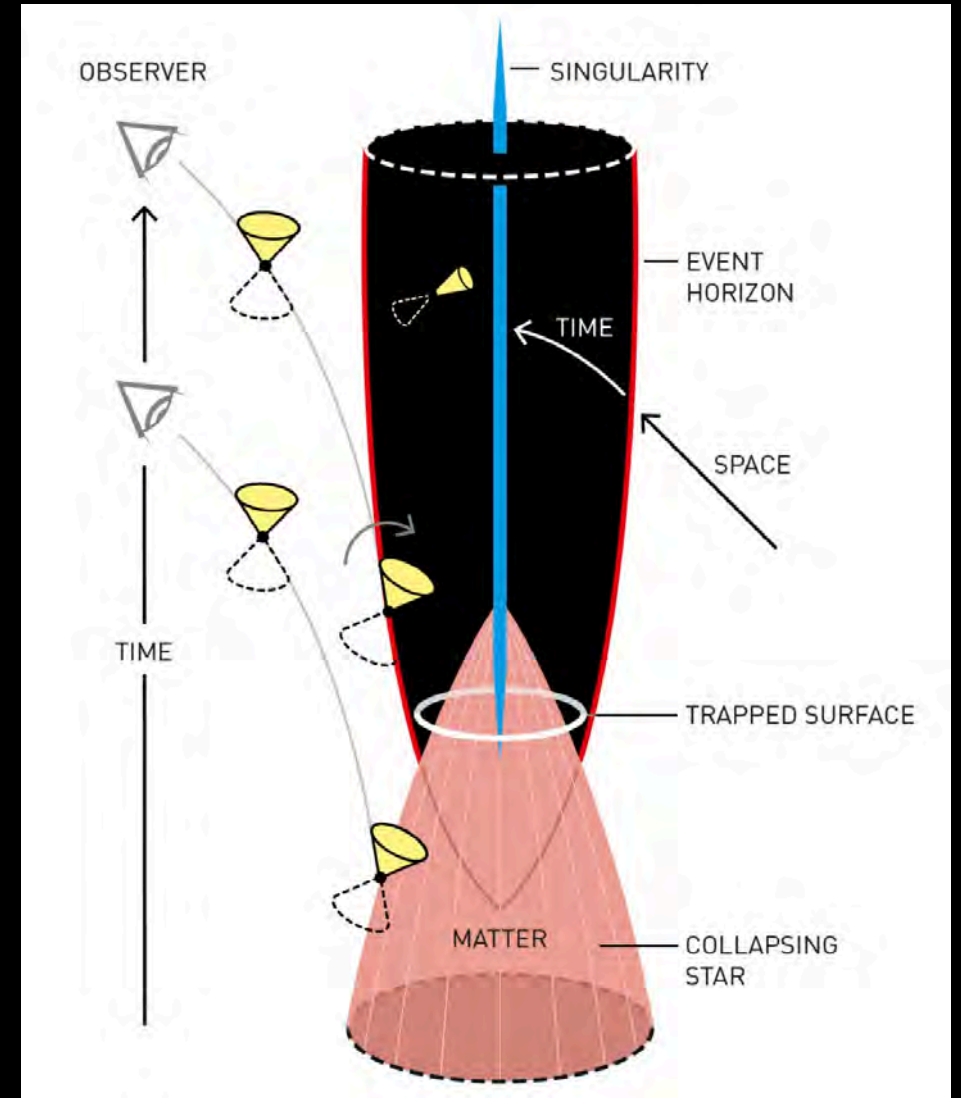
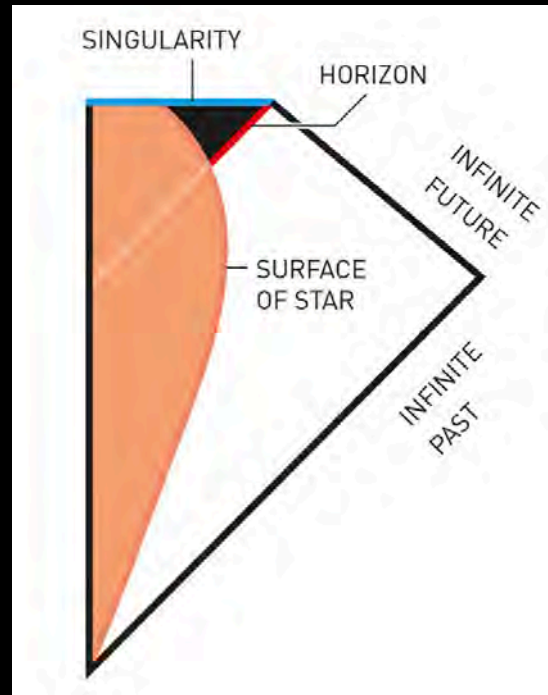
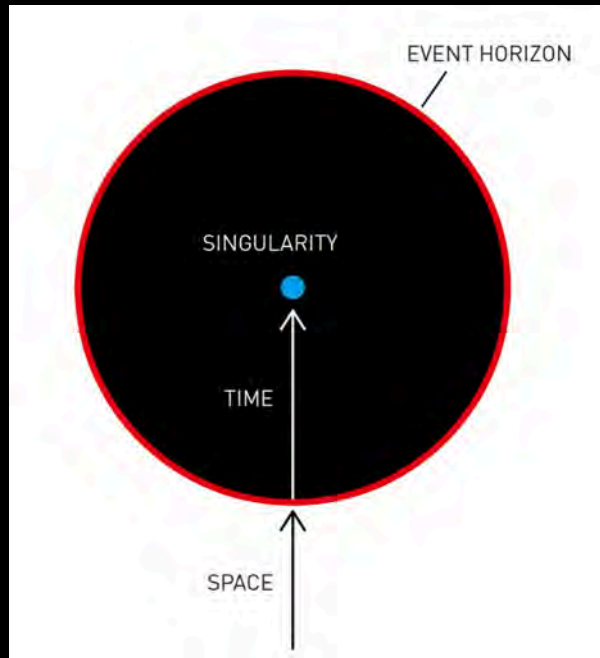
- ただし、量子論を考慮すると以下のホーキング温度に対応する黒体放射を出していると考えられている(が、ミニブラックホールでない限り無視できる)

$$k_B T_H = \frac{\hbar c^3}{8\pi G M} \approx 6 \times 10^{-8} \left(\frac{M_\odot}{M} \right) \text{K}$$



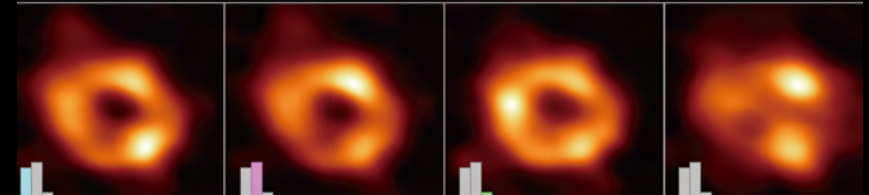
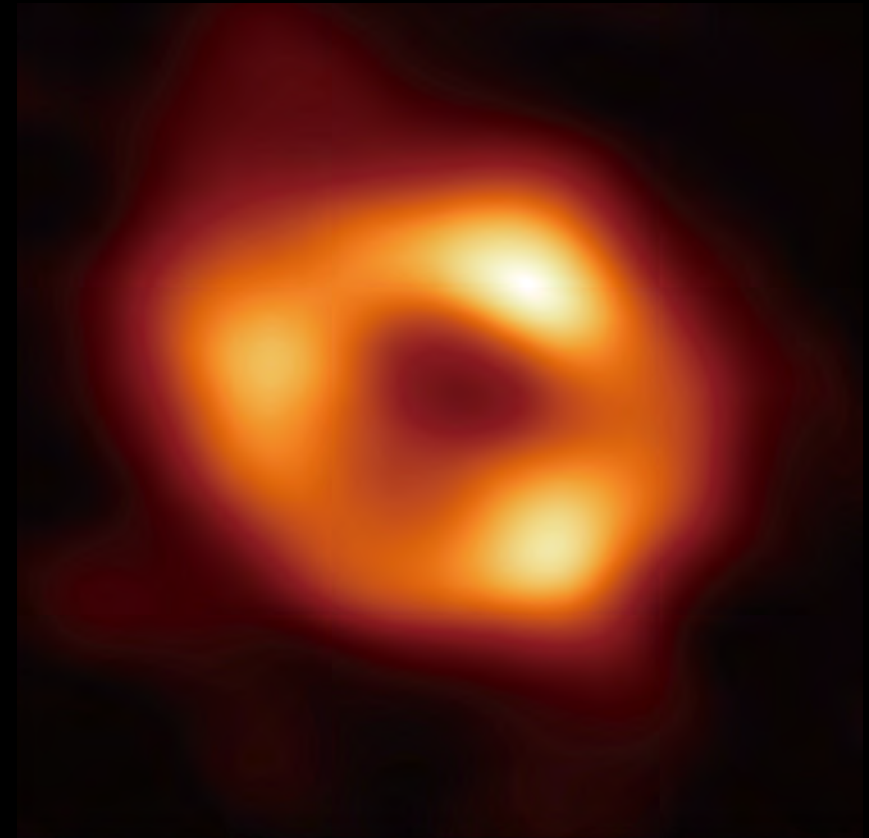
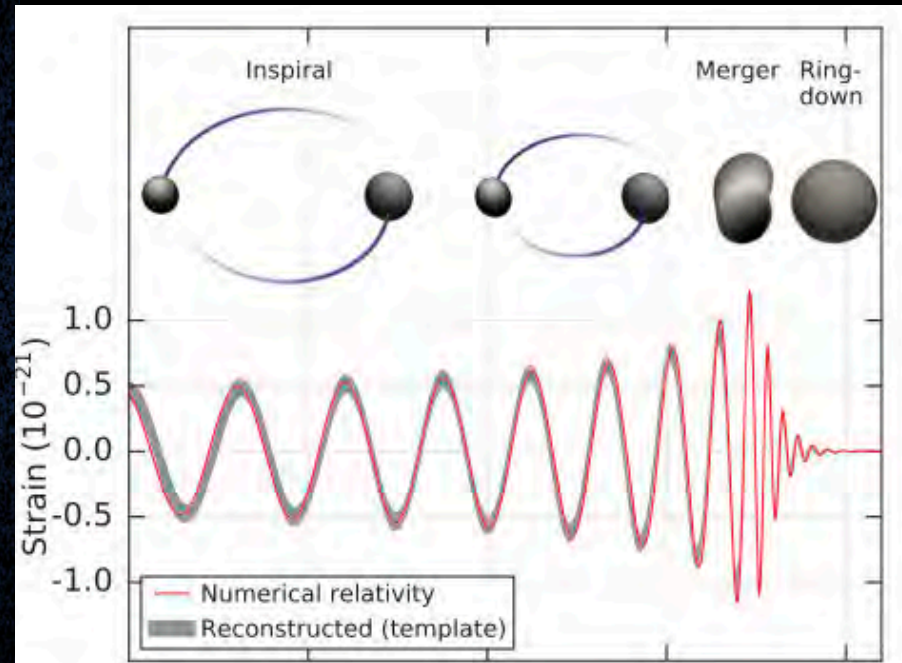
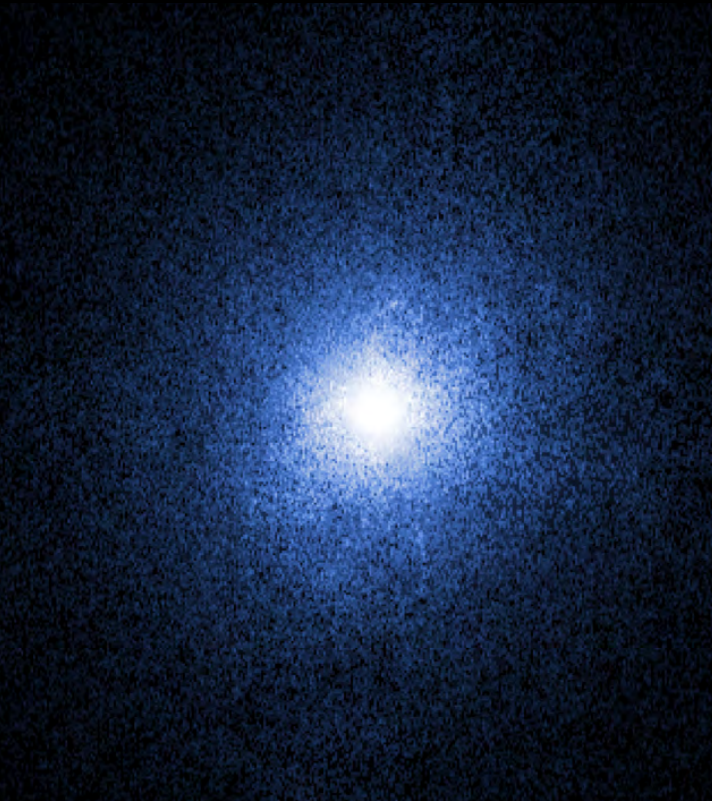
球対称ブラックホール解はどこまで現実的なのか

- 一般相対論において特異点(≡ブラックホール)の形成はかなり一般的である
- それを数学的に証明したRoger Penroseは2020年ノーベル物理学賞



<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2020/press-release/>

3 ブラックホールを“見る”



はくちょう座X1 (Cygnus X-1)

- 観測的に初めて認められたブラックホール(候補)
 - 1964年に明るいX線天体として発見
 - 公転周期5.6日の連星系で、青色超巨星とブラックホール(太陽質量の約20倍)からなる
 - 青色超巨星から吹き出されたガスが、ブラックホールの周りに降着円盤をつくり、それが落ち込むときに強いX線を放出する
 - 単に“見える”だけでなく、全天で最も明るいX線源の一つ

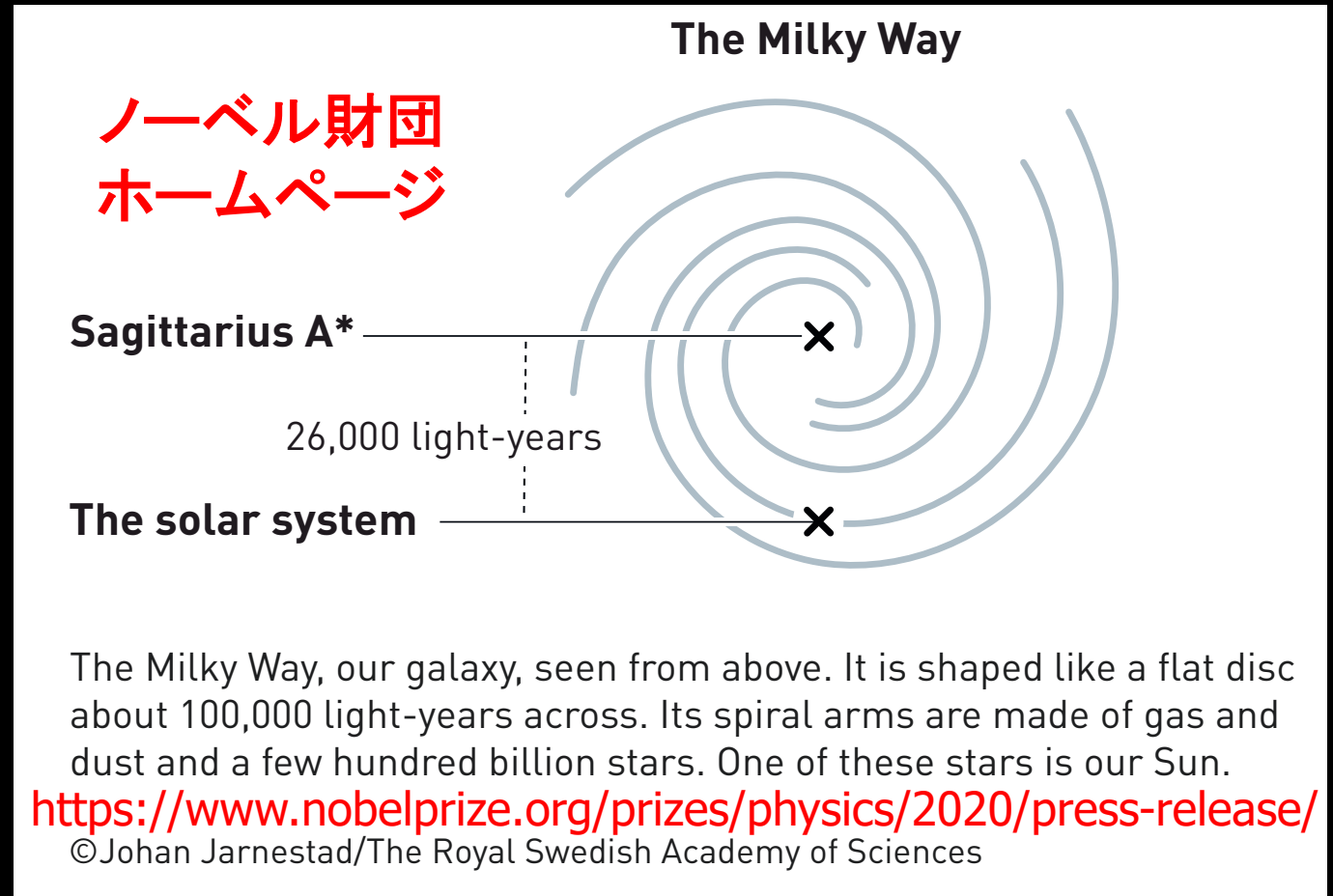
X線観測衛星
チャンドラ
による画像

http://www.nasa.gov/mission_pages/chandra/multimedia/photo09-065.html

銀河系中心天体: Sgr A* (いて座エースター)

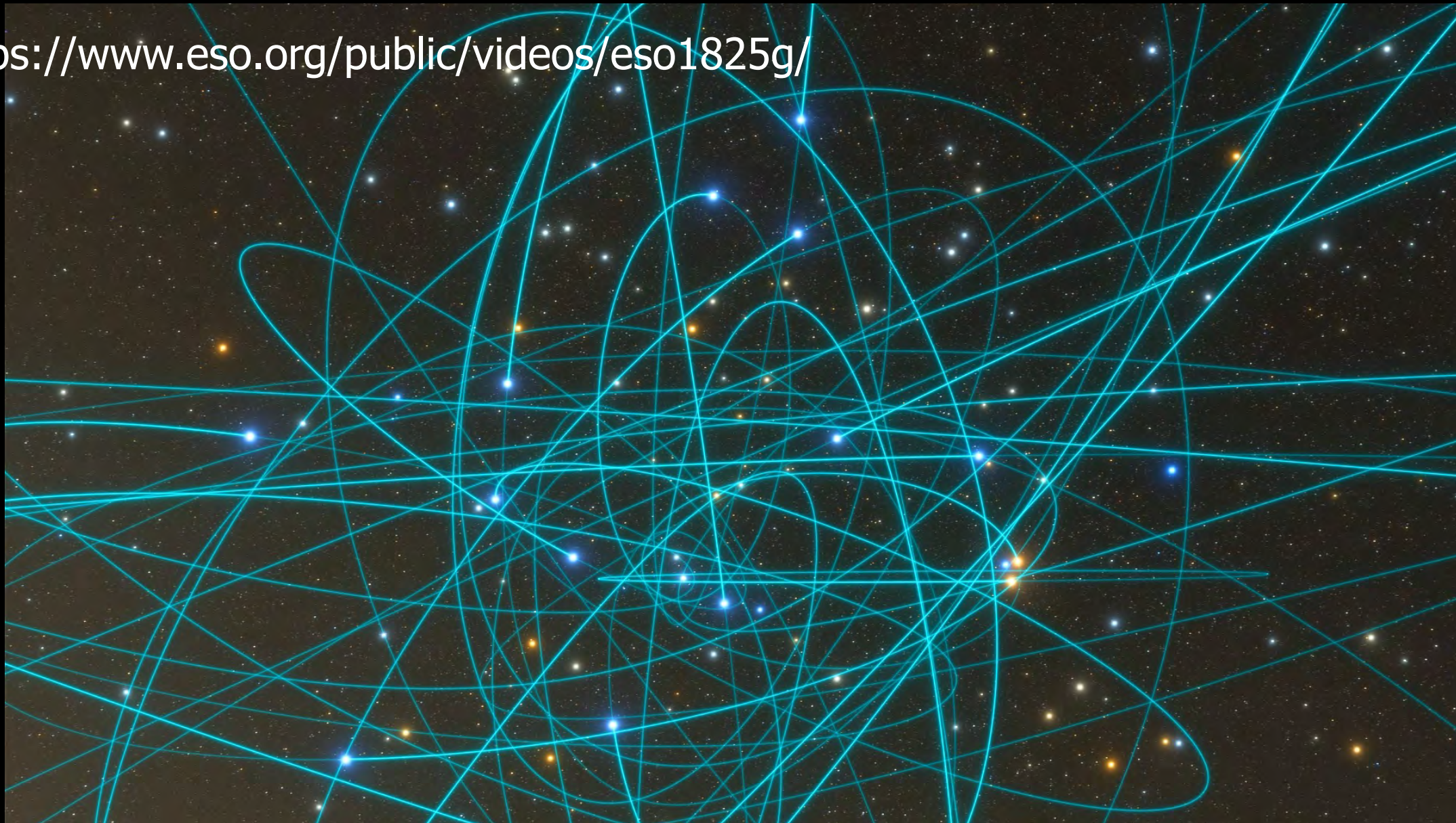
- 2020年ノーベル物理学賞 for the discovery of a supermassive compact object at the centre of our galaxy

- Reinhard Genzel (ドイツマックスプランク研究所) と Andrea Ghez (UCLA)
- Sgr A*の周辺の星の運動を20年以上にわたりモニターし、そこに400万太陽質量の超巨大ブラックホールが存在することを観測的に確立

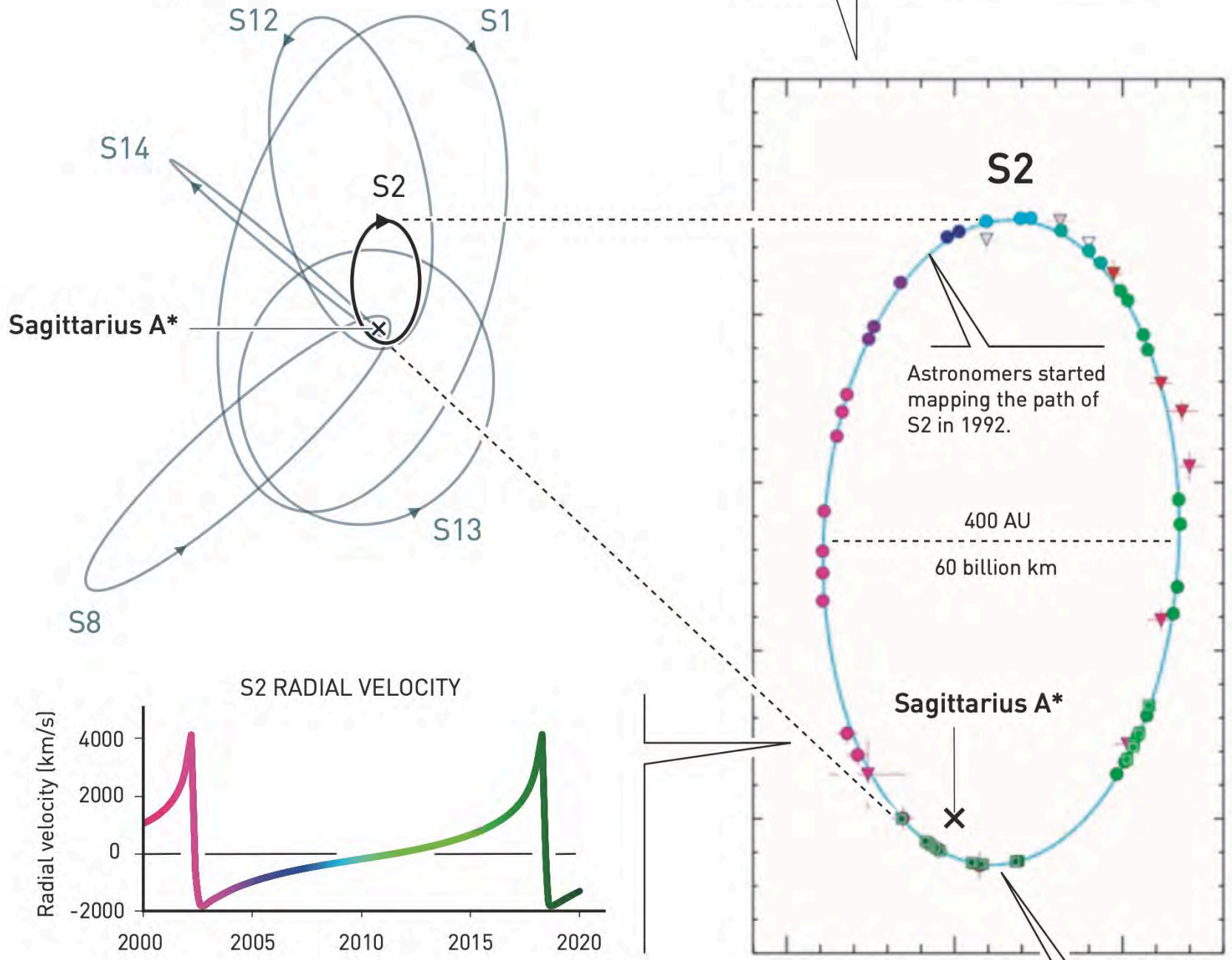


Sgr A*付近の星の運動

<https://www.eso.org/public/videos/eso1825g/>



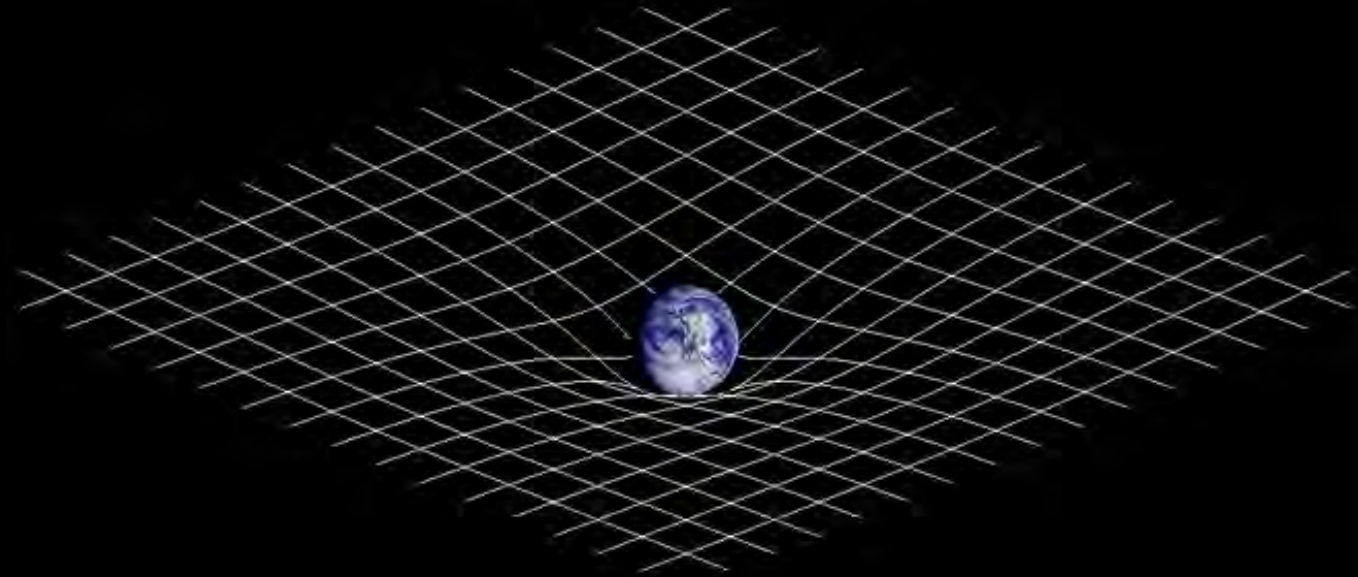
約20年間にわたるSgr A*の周りの星の軌道



<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2020/press-release/>

重力波：時空の歪みは波として伝わる

- 物体が静止している時には、それによって生まれる空間の歪みもまた変化しない

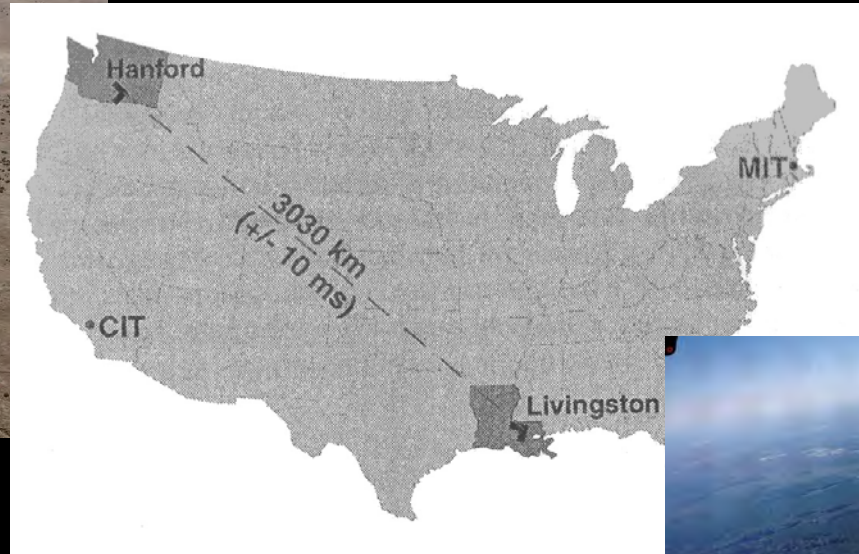


- しかし、物体が運動していると、歪みのパターンが時間変化する → 波が発生する (重力波)

重力波の直接検出を成し遂げた米国の advanced LIGO(Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)



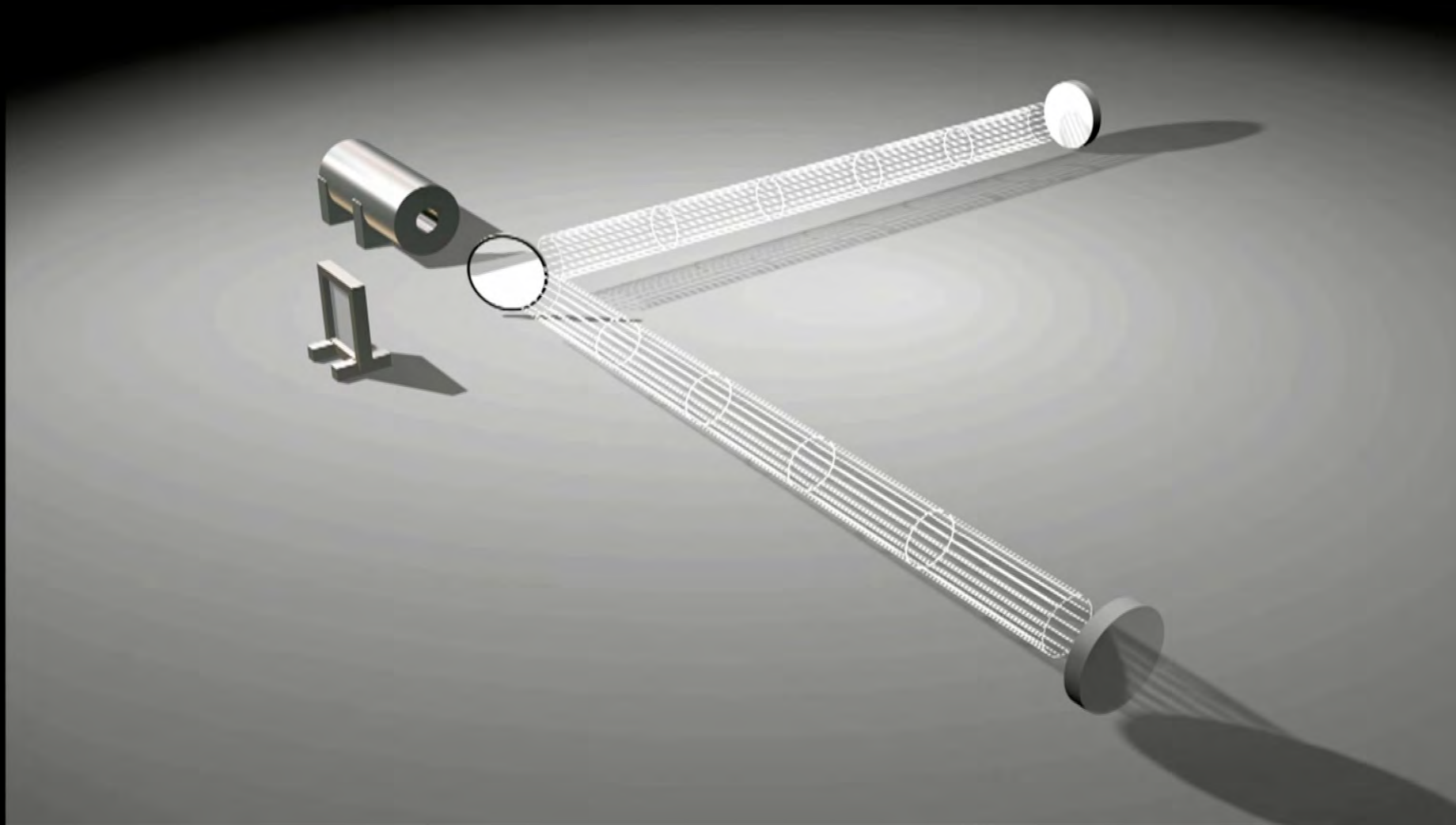
米国ワシントン州
ハンフォード



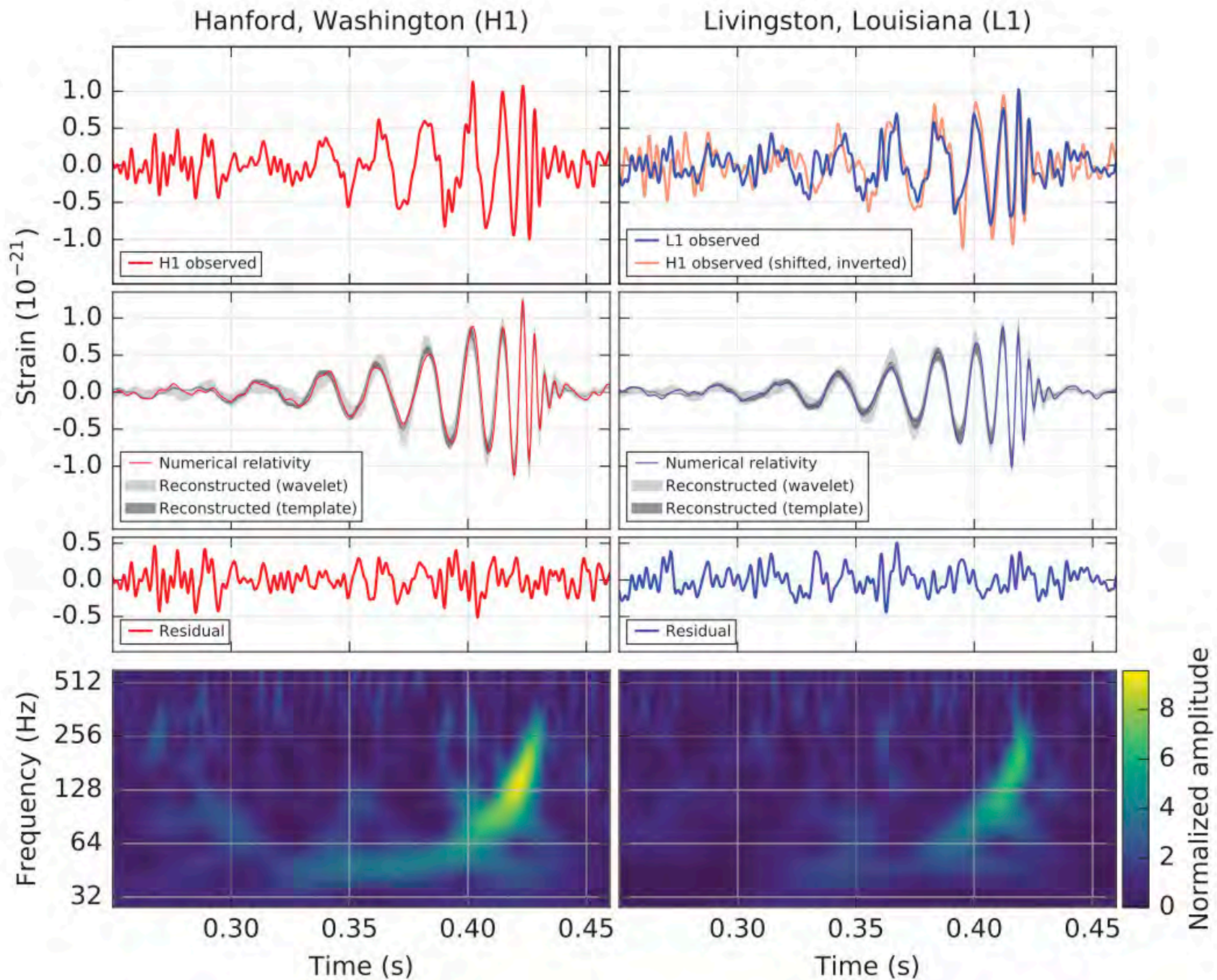
米国ルイジアナ州
リビングストン



レーザー干渉計重力波検出器

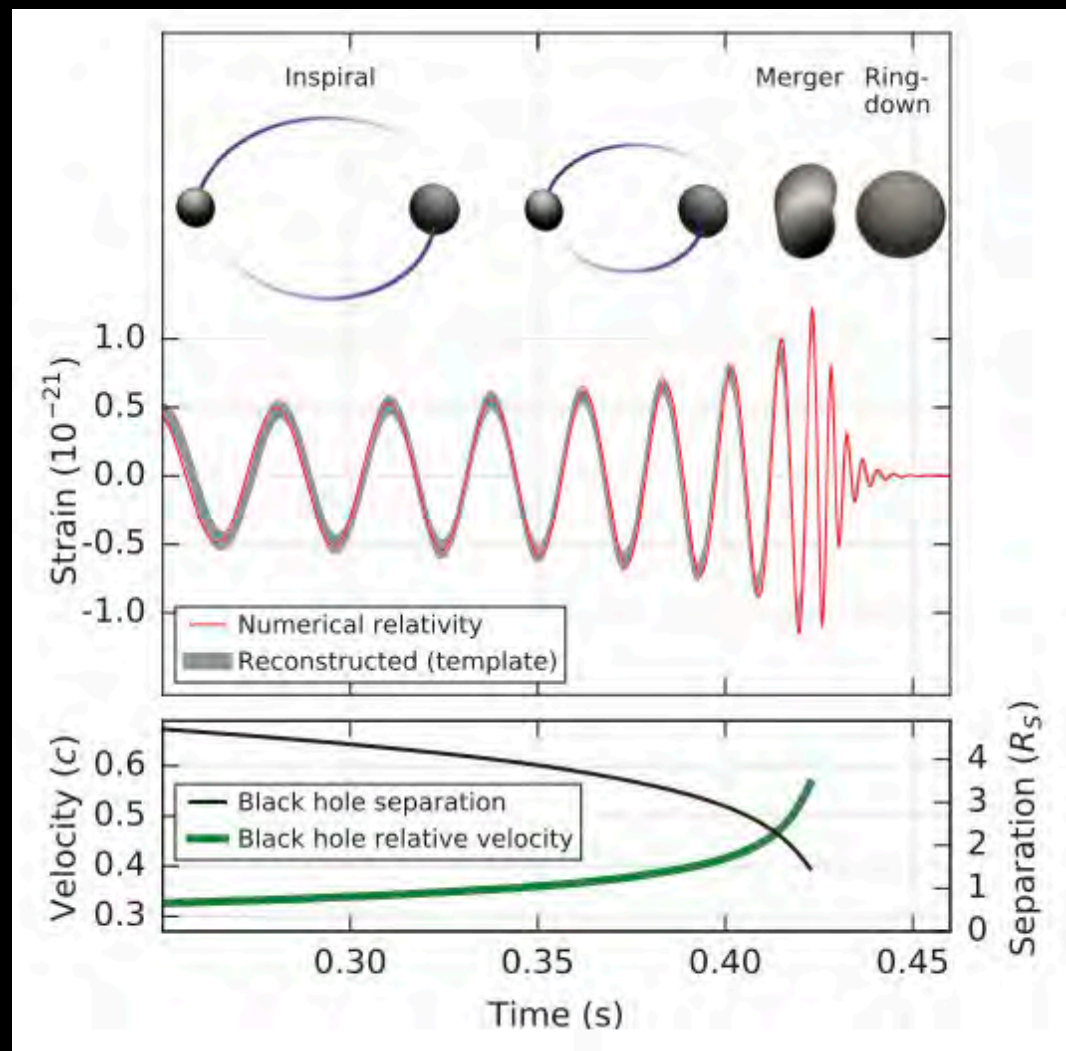


2015年9月14日 9時50分45秒 (協定世界時)



Abbott et al.
Phys.Rev.Lett.
116(2016)
061102

ブラックホール連星が合体した瞬間の重力波を検出



- 太陽の約30倍の質量を持つ2つのブラックホールからの重力波だった
 - 重力波の直接検出にとどまらない
 - 宇宙にブラックホール同士の連星があることを初めて発見
- 2017年ノーベル物理学賞

Abbott et al.

Phys.Rev.Lett.116(2016)061102

高知新聞(2016年2月12日朝刊)のトップニュース!



発行所 高知新聞社
高知市本町3丁目2-15
088-822-2111 780-8572
© 高知新聞社 2016

札幌	6	足指	高知	室戸
東京	9			
名古屋	12			
大阪	15			
岡山	18			
福岡	21			
那覇	0			
降水確率(%)				
	6	10	0	
	12	30	20	10
	18	予想最高気温	19	17
	24	予想最低気温	12	6

国際実験チーム

宇宙誕生の謎迫る

重力波を初観測

【ワシントン共同】浅見英一「アインシュタインが100年前に存在を予言した「重力波」について、米大学を中心とした国際実験チーム「LIGO(ライゴ)」が11日、二つのブラックホールが合体したときに放たれた重力波の観測に成功した、と発表した。重力波の直接観測は世界初で、宇宙の成り立ちに迫るノーベル賞級の成果。

重力波はアインシュタインの一般相対性理論で1916年に予言した。ブラックホールのような非常に重い物体が激しく動く、周囲の時間の流れや空間が揺れて、波のように伝わる現象とされる。重力波の初観測により、重力や時空を説明する相対性理論の正しさがあらためて裏付けられた。光や電波では見えない天体の姿や生まれたての宇宙を調べられると期待されている。

重力波望遠鏡を米西部ワシントン州と南部ルイジアナ州で運用。2台ともほぼ同時に重力波を捉えた。一辺の長さが4キロのL字形の巨大装置で、それぞれの中心部から直角の2方向に同時にレーザー光を放ち、4キロ先の鏡に反射させ戻ってきた光を測る。重力波が届くと鏡までの距離が伸び縮みし、光の戻る時間にずれが生じるのを検知する仕組みだ。日本も岐阜県飛騨市の地下に重力波望遠鏡「かぐら」を建設。ノーベル物理学賞を受賞した梶田隆章東大宇宙線研究所長らが観測を指揮している。

円急騰一時110円台

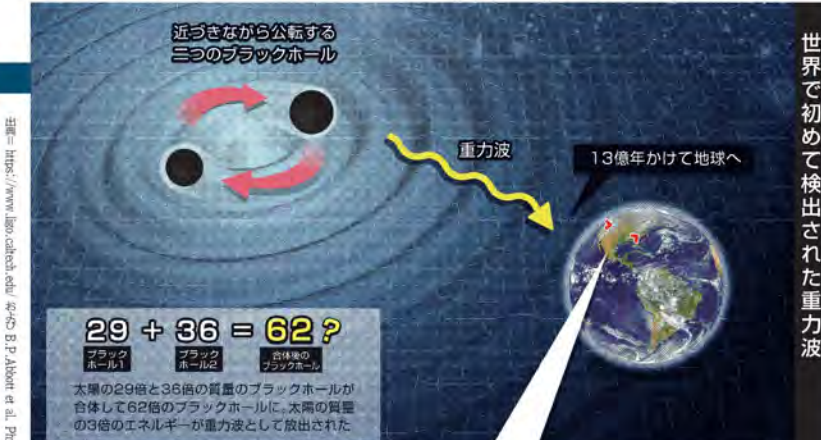
米利上げ観測後退で

ロンドン市場

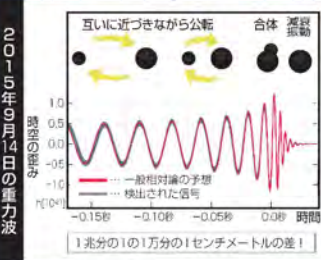
【ロンドン共同】11日の海外市場で安全資産とされる円の対ドル相場が一時1ドル110円台へ急騰する一方、原油価格は1ドル26円台に下落し欧州、アジア株も軟調に推移、投資準備制度理事会(FRB)議長は10日の議会証言をきっかけに早期の追加利上げ観測が後退。円急騰による輸出関連企業の採算悪化など日本に悪影響が及ぶ恐れが強まった。(4面に関連記事) 円相場は11日のロンドン市場で急上昇し、一

15年9月14日、地球から13億光年離れたと

実際の紙面



29 + 36 = 62?
ブラックホール1 + ブラックホール2 = 合体後のブラックホール
太陽の29倍と36倍の質量のブラックホールが合体して62倍のブラックホールに。太陽の質量の3倍のエネルギーが重力波として放出された

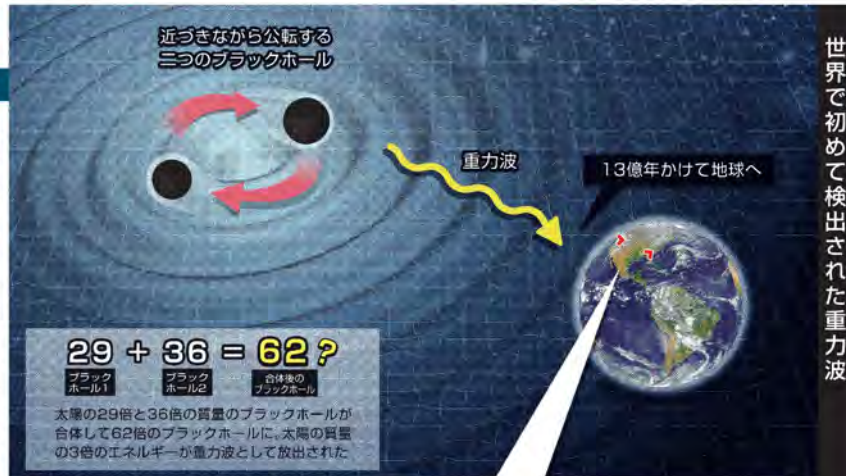


LIGOの実験施設

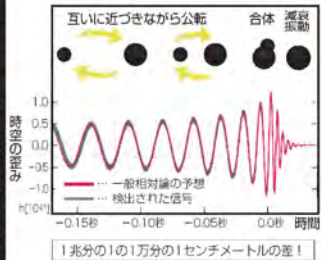
29 + 36 = 62でノーベル賞

世界で初めて検出された重力波

須藤 靖



29 + 36 = 62?
ブラックホール1 + ブラックホール2 = 合体後のブラックホール
太陽の29倍と36倍の質量のブラックホールが合体して62倍のブラックホールに。太陽の質量の3倍のエネルギーが重力波として放出された



LIGOの実験施設

世界で初めて検出された重力波

須藤 靖

29 + 36 = 62を発見!

この16年手首は、米国のLIGO... (transcription of the article text follows)

日本でも、東京大学理学部... (transcription of the article text follows)

高知の重力波の通過の際、... (transcription of the article text follows)

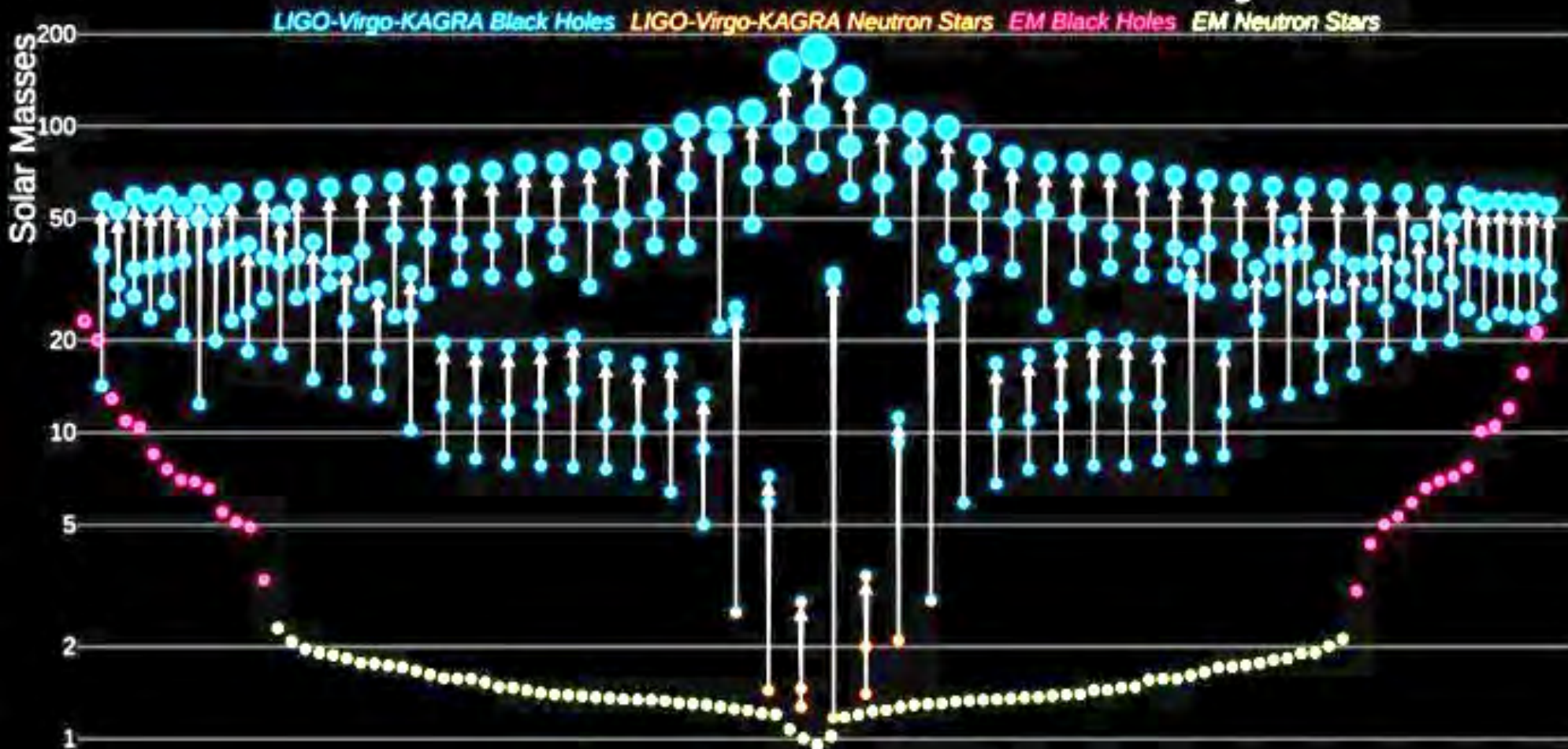
写真= https://www.ligo.caltech.edu/~445/B.P.Abott et al. Physical Review Letters 116, 061102(2016) SSI&w&w&w&w

写真= https://www.ligo.caltech.edu/~445/B.P.Abott et al. Physical Review Letters 116, 061102(2016) SSI&w&w&w&w

二〇一六年十月八日朝刊

宇宙はブラックホール連星であふれているらしい

Masses in the Stellar Graveyard

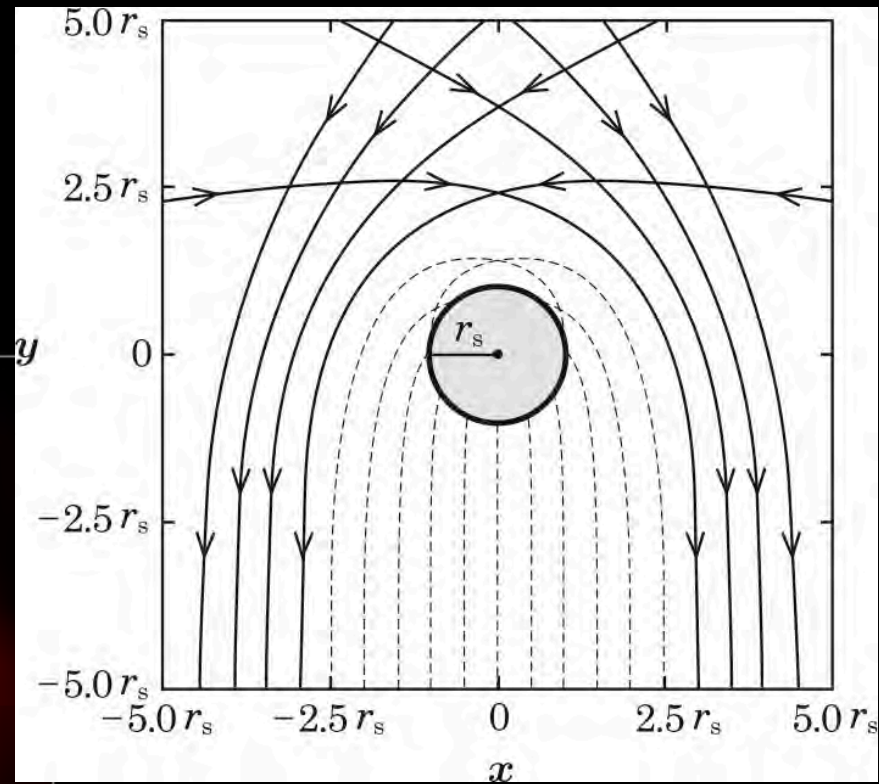
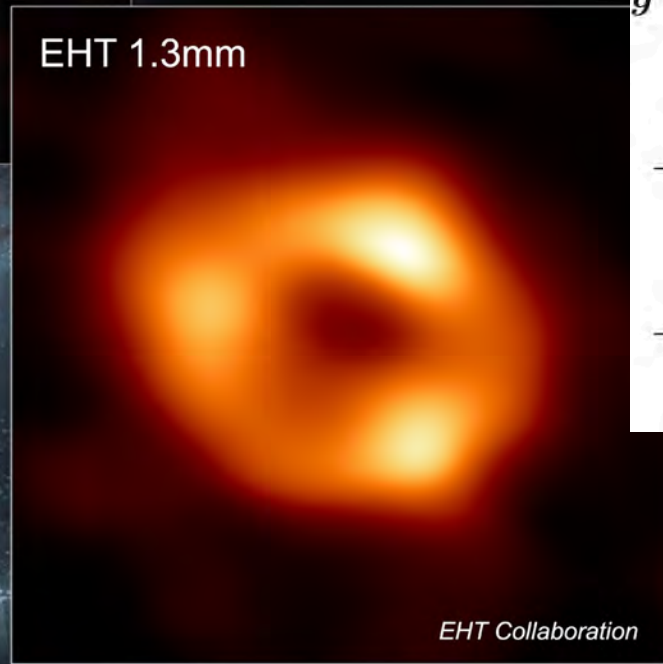
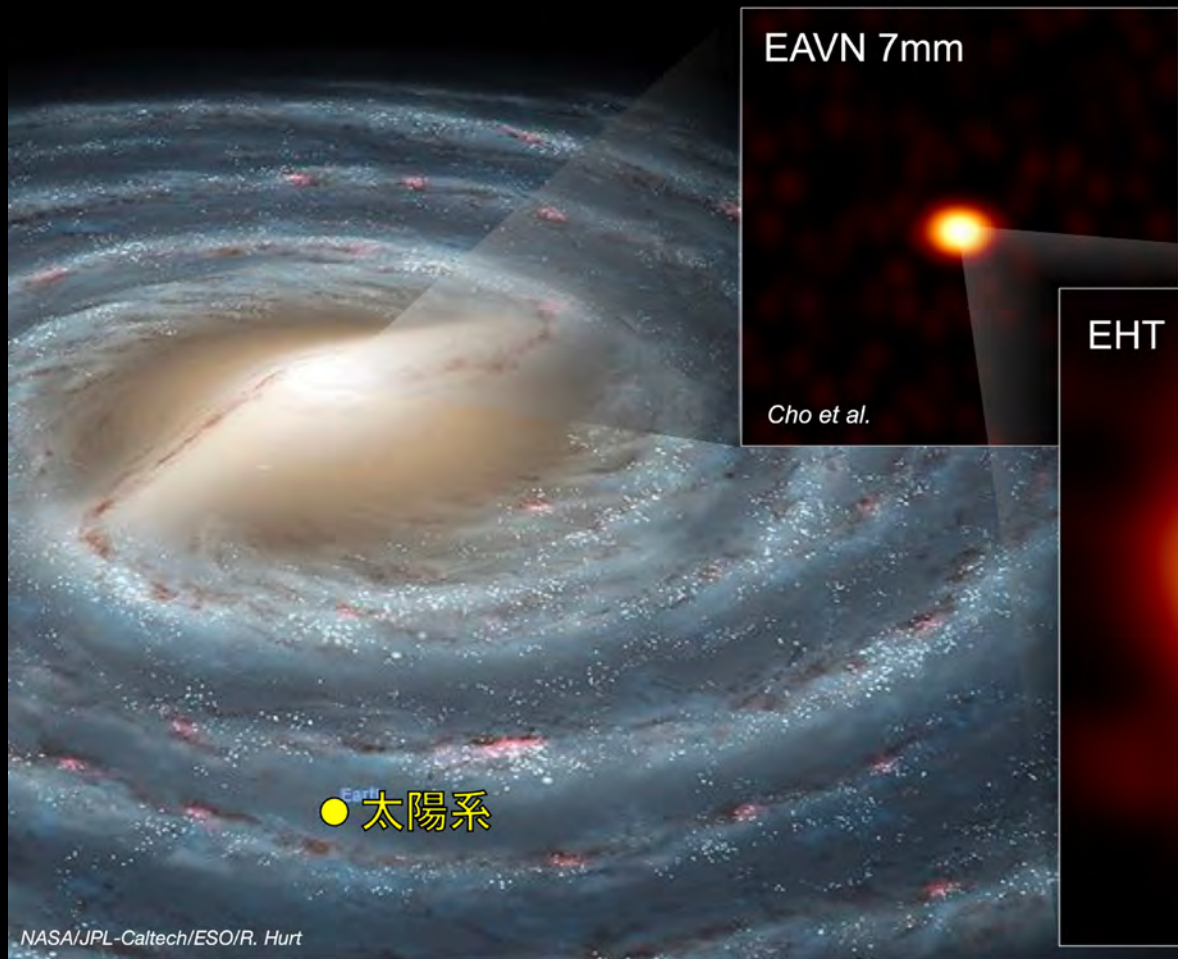


EHT (イベント・ホライズン・テレスコープ)

- 世界中の電波望遠鏡11台をつなぎ、地球サイズの大望遠鏡として運用する国際共同プロジェクト
- 銀河中心の超巨大ブラックホールのシュワルツシルト半径程度を解像する
- 百聞は一見にしかず



ブラックホールシャドウ: $\frac{3\sqrt{3}}{2} r_s$





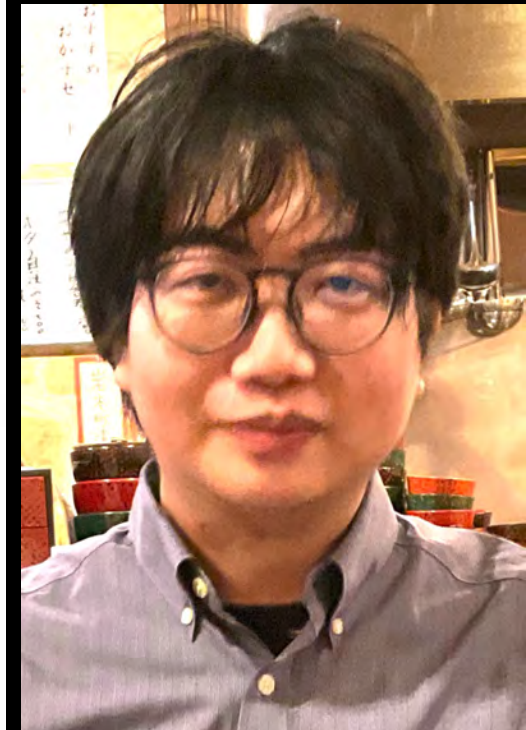
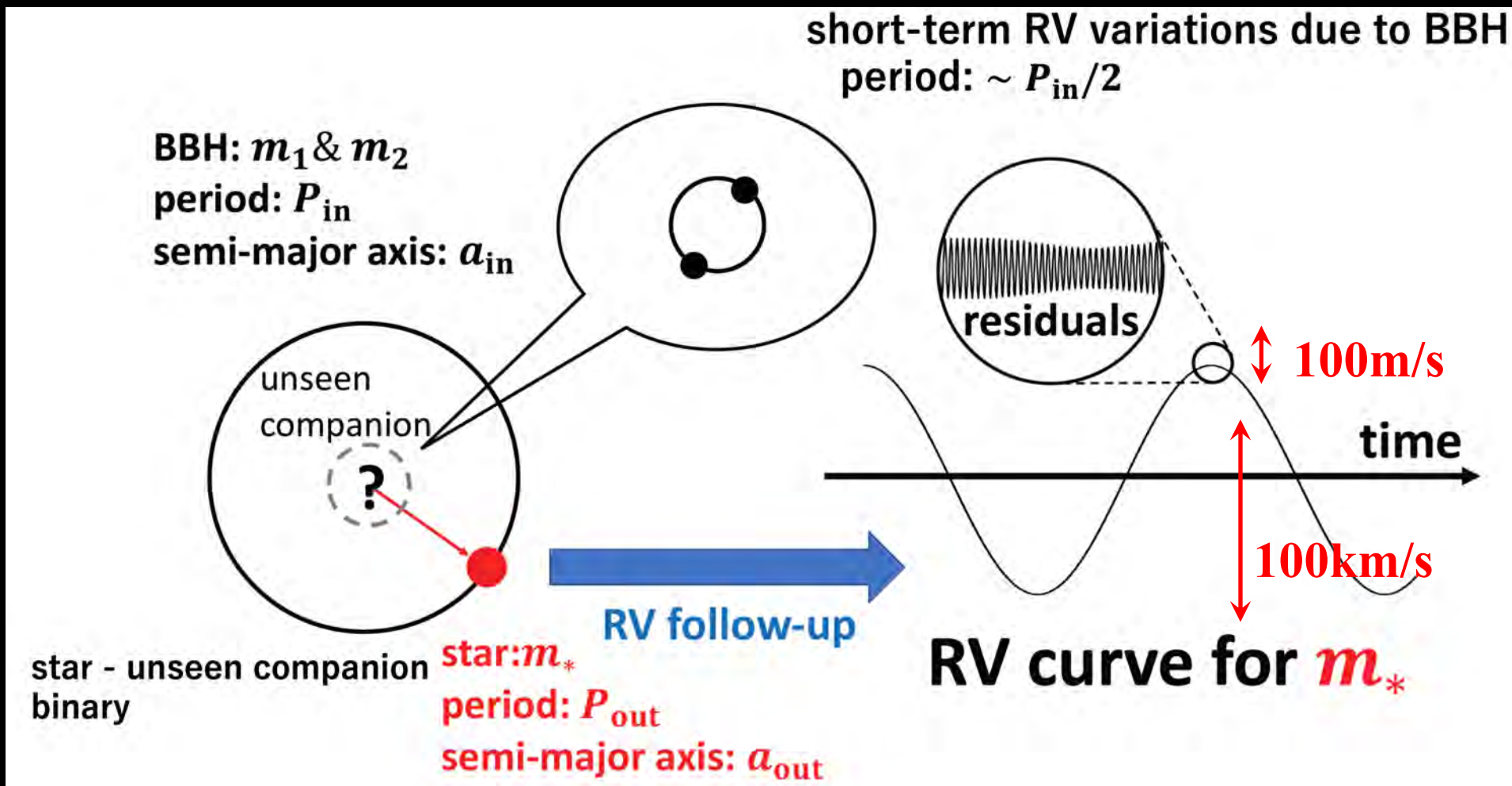
4 ブラックホール3体系をさがす



重力波以外のブラックホール連星探査

- 宇宙にはブラックホール連星は数多くある
 - そもそも単独ブラックホールは銀河系内に1億個程度あると予想されている(が、ほとんどは見えない)
 - 重力波で検出できるブラックホール連星@系外銀河は合体直前のみ
 - 長公転周期ブラックホール連星なら銀河系内にもっと多くあるはず
- 光を用いたブラックホール連星探査の方法論
 - 挙動不審な運動をする恒星を見つけ、恒星・ブラックホール連星(=ブラックホールを含む3体系)を探す
 - 系外惑星の視線速度サーベイ、位置天文学的サーベイ(ガイア衛星)
 - 予想される信号は？ (Hayashi, Wang+YS 2020, Hayashi+YS 2020, 2021)

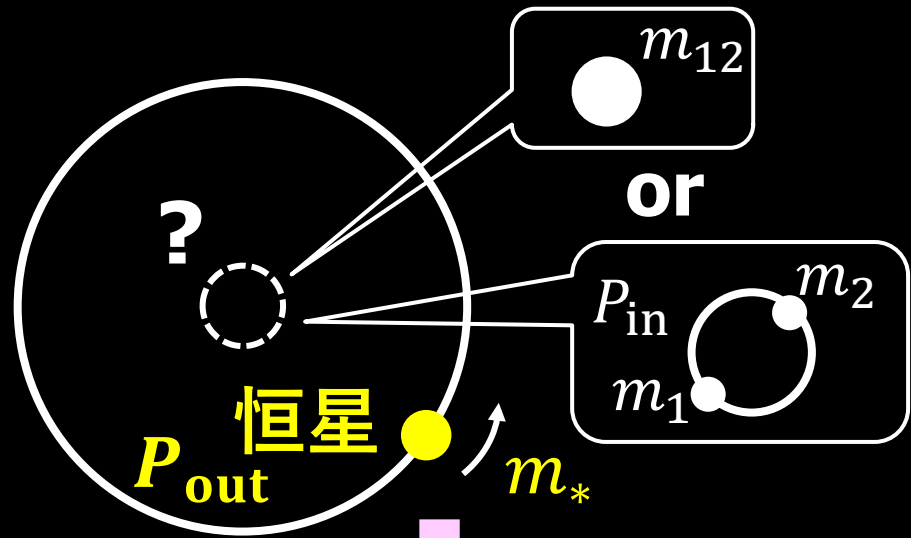
ブラックホール連星+恒星からなる三体系の理論モデル



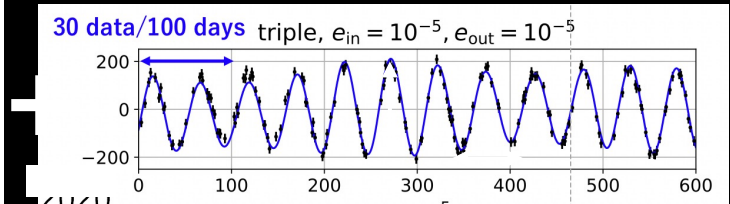
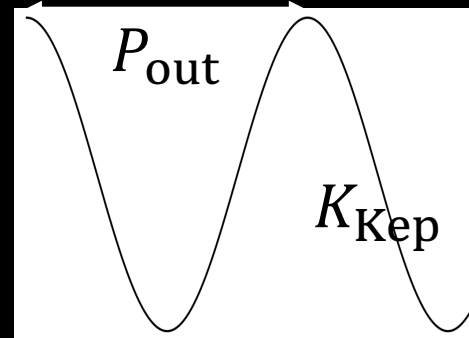
同一軌道面の場合の力学モデル: Hayashi, Wang & YS 2020, ApJ 890, 112

斜行軌道面の場合の力学モデル: Hayashi & YS 2020, ApJ, 897, 29

ブラックホール連星による恒星の動径速度変動



(i) 同一軌道面 3 体系 振幅 $\sim K_{Kep} \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right)^3$



周期 $\sim P_{in}/2$

ケプラー運動

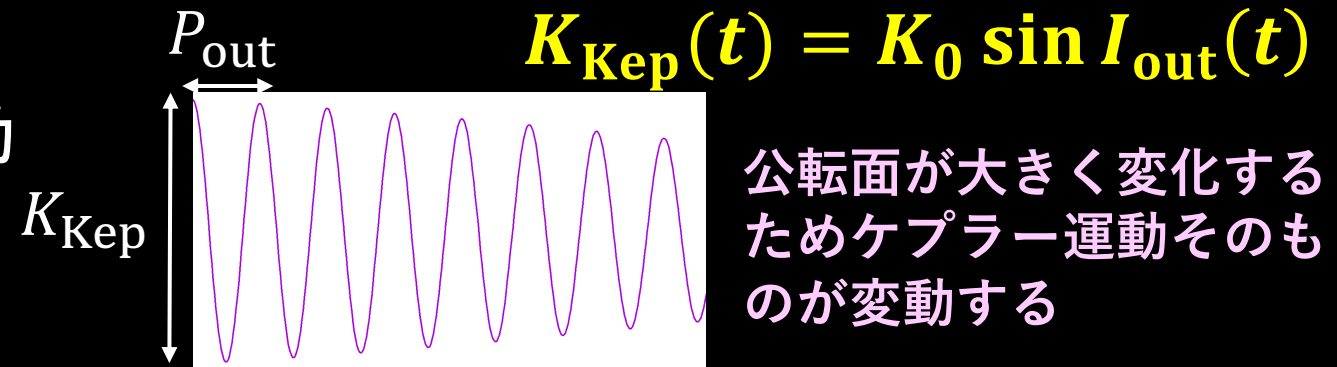
+ 短周期動径速度変動
(BH連星による摂動の効果)

高精度動径速度モニター観測

BH連星の重心に対するケプラー運動
+ BH連星による短周期摂動項

(ii) 斜行軌道面 3 体系

公転面傾斜角 $I_{out}(t)$ が古在-Lidov 効果で時間変化

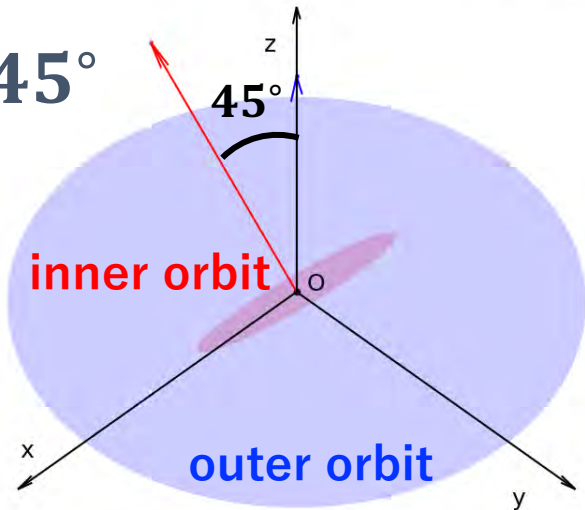


公転面が大きく変化する
ためケプラー運動そのも
のが変動する

斜行軌道面 3 体系の初期条件

古在-Lidov 効果が
弱い場合

$$i_{\text{mut}} = 45^\circ$$



$$P_{\text{out}} = 78.9 \text{ days}$$

$$P_{\text{in}} = 10 \text{ days}$$

$$m_1 = m_2 = 10M_\odot$$

$$m_* = 3M_\odot$$

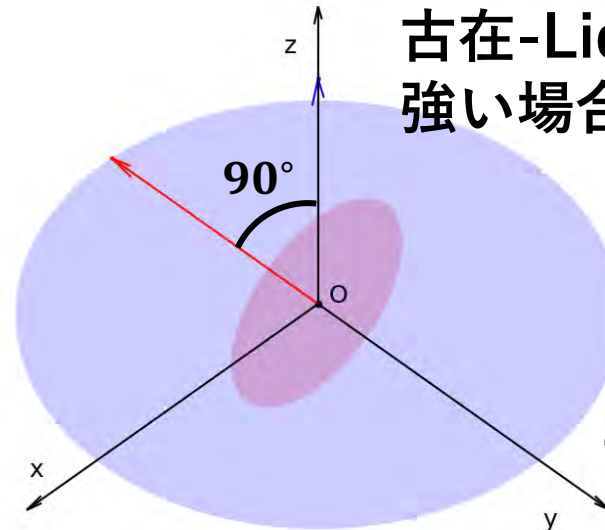
$$e_{\text{out}} = 0.03$$

$$e_{\text{in}} = 10^{-5}$$

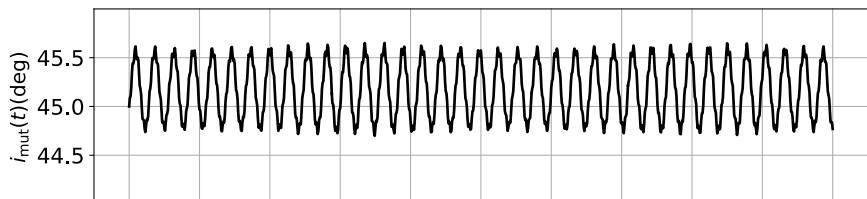
$t = 0P_{\text{out}}^{(0)}$

古在-Lidov 効果が
強い場合

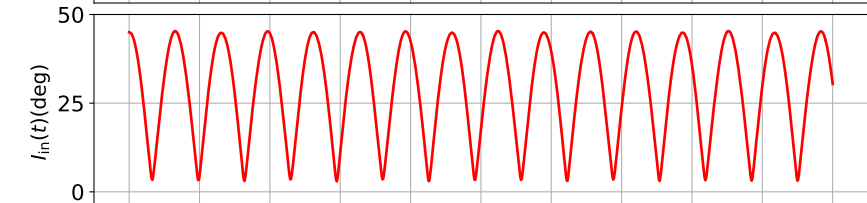
$$i_{\text{mut}} = 90^\circ$$



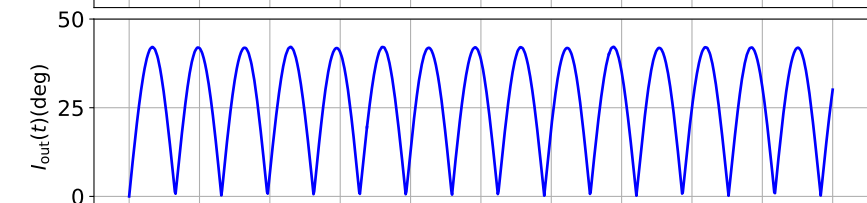
$$i_{\text{mut}}(t)$$



$$I_{\text{in}}(t)$$

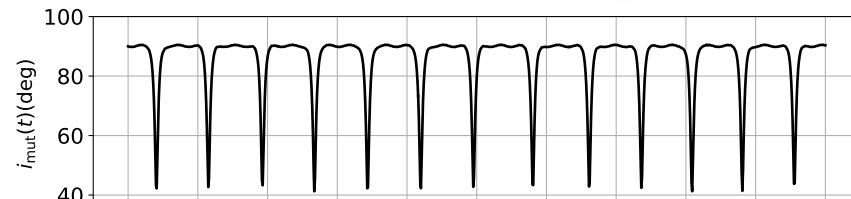


$$I_{\text{out}}(t)$$

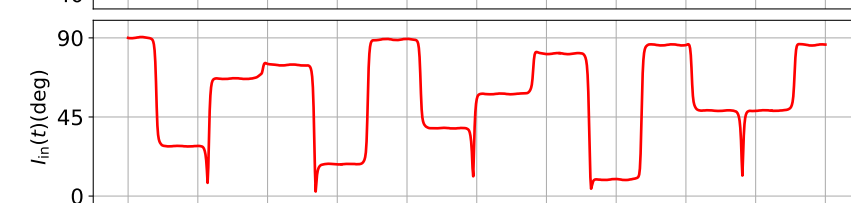


$t/P_{\text{out}}^{(0)}$

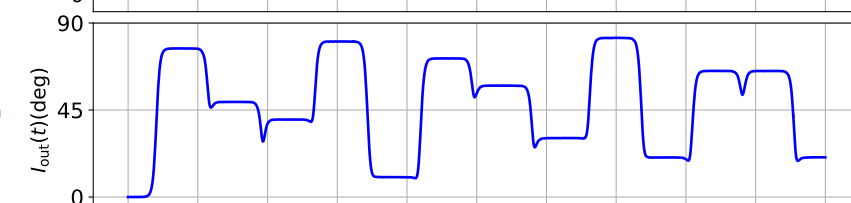
$$i_{\text{mut}}(t)$$



$$I_{\text{in}}(t)$$



$$I_{\text{out}}(t)$$



$t/P_{\text{out}}^{(0)}$

斜行軌道面 3 体系の進化

$t = 0P_{out}^{(0)}$

$t = 0P_{out}^{(0)}$

$i_{mut} = 45^\circ$

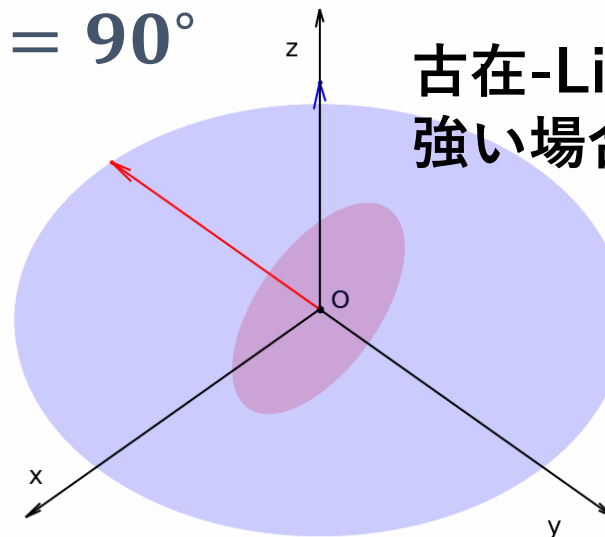
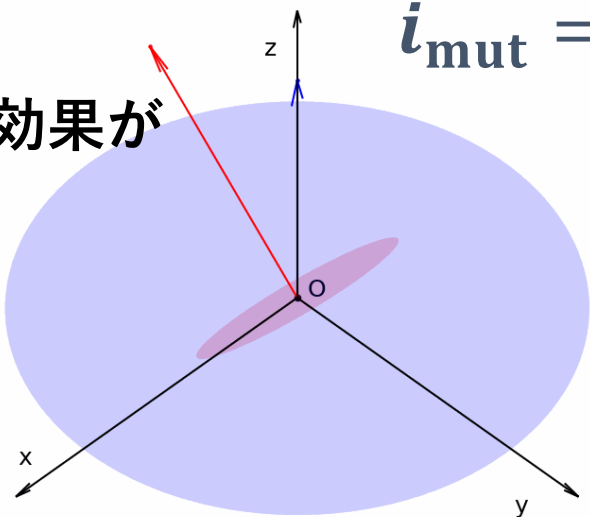
$i_{mut} = 90^\circ$

古在-Lidov 効果が
強い場合

⇒ 大振動の
非定常歳差
運動

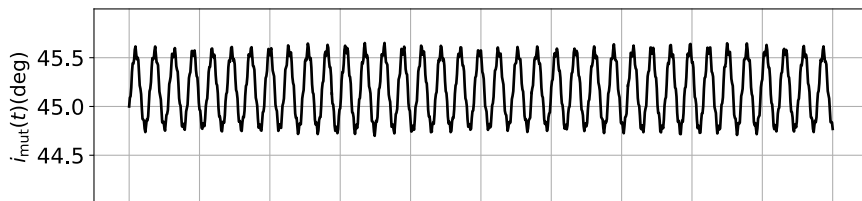
古在-Lidov 効果が
弱い場合

⇒ 小振幅の
周期的変動

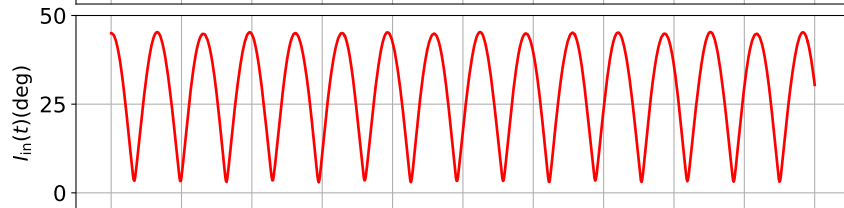


$$K_{Kep} = K_0 \sin I_{out}(t)$$

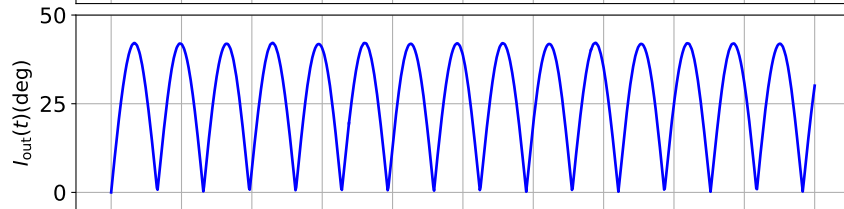
$i_{mut}(t)$



$I_{in}(t)$

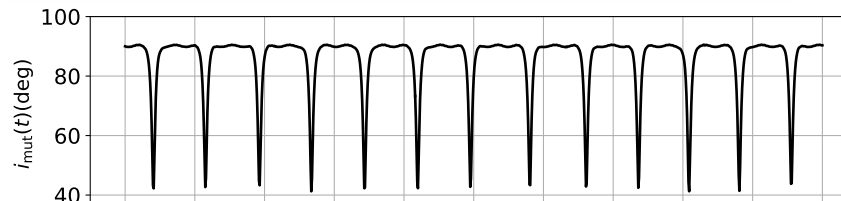


$I_{out}(t)$

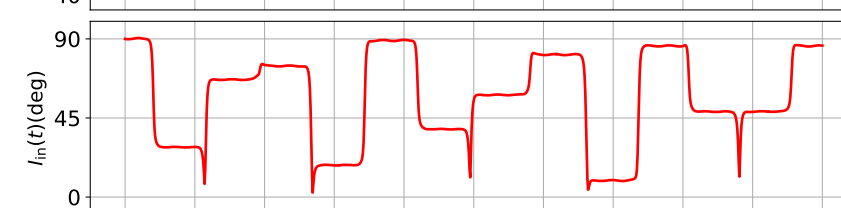


$t/P_{out}^{(0)}$

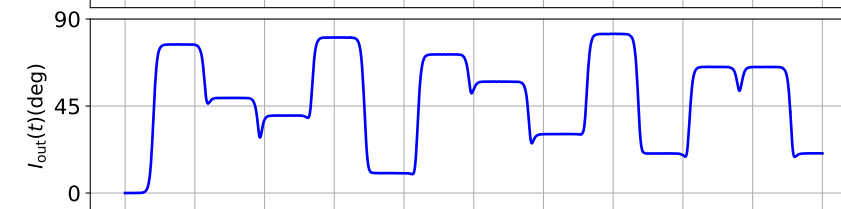
$i_{mut}(t)$



$I_{in}(t)$



$I_{out}(t)$

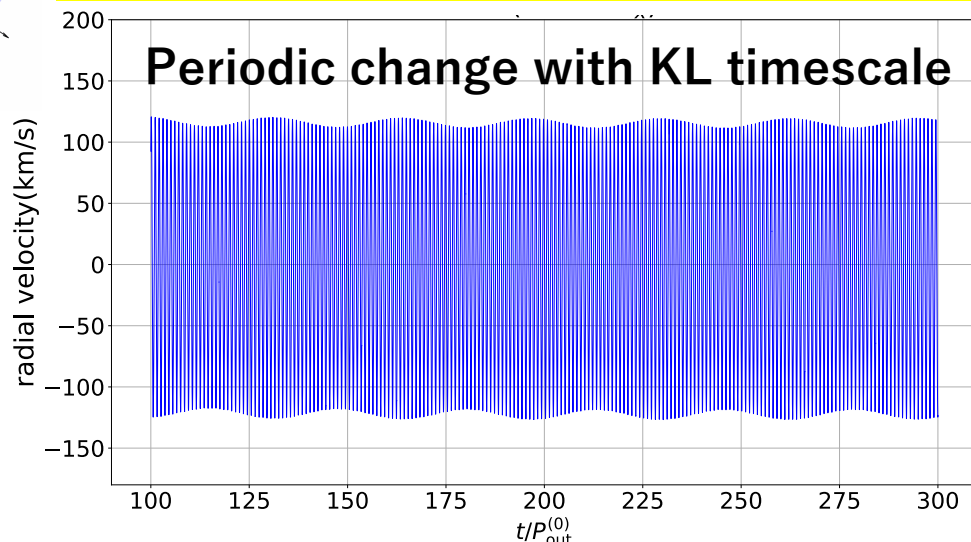


$t/P_{out}^{(0)}$

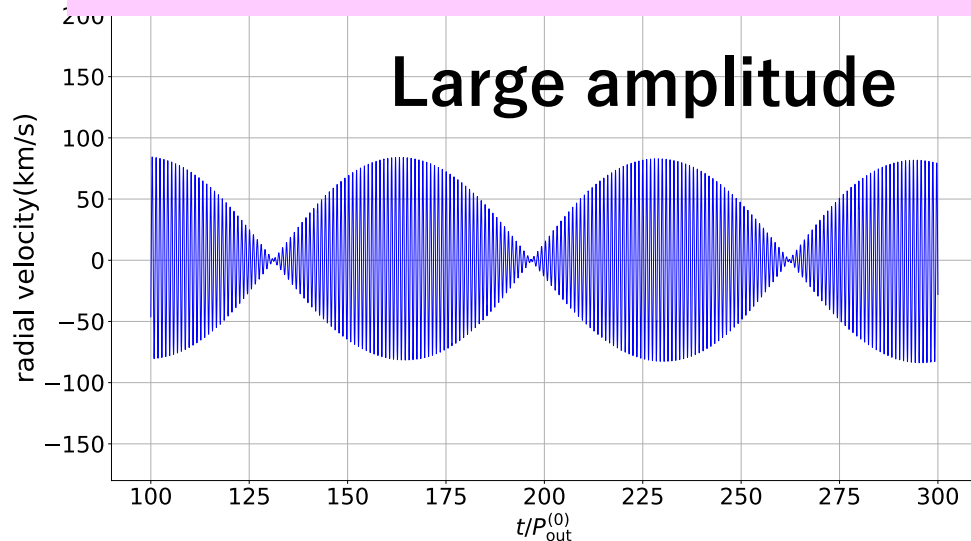
斜行軌道面 3 体系のケプラー動径速度の進化

$i_{\text{mut}} = 45^\circ$ $K_{\text{Kep}} = K_0 \sin I_{\text{out}}(t)$

x-direction (near edge-on) total RV

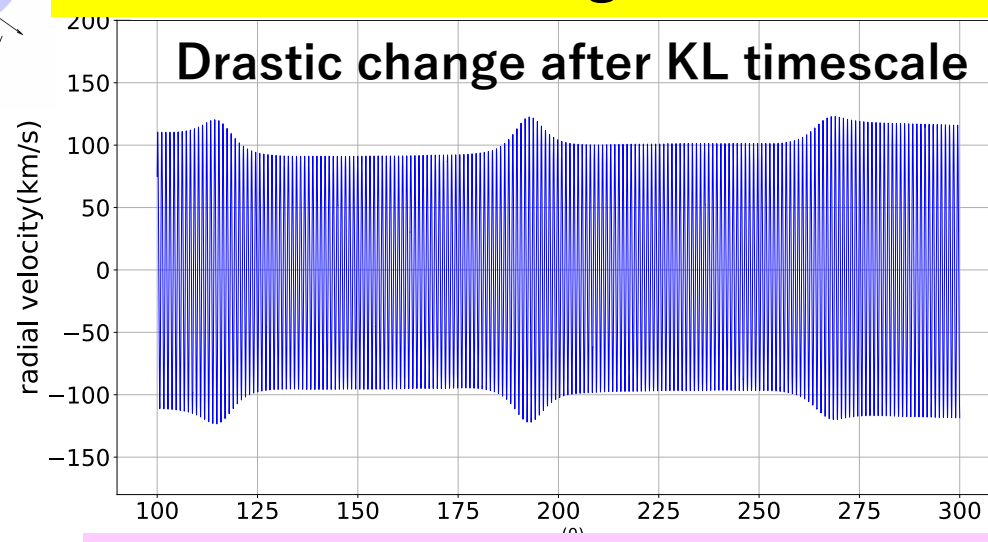


z-direction (near face-on) total RV

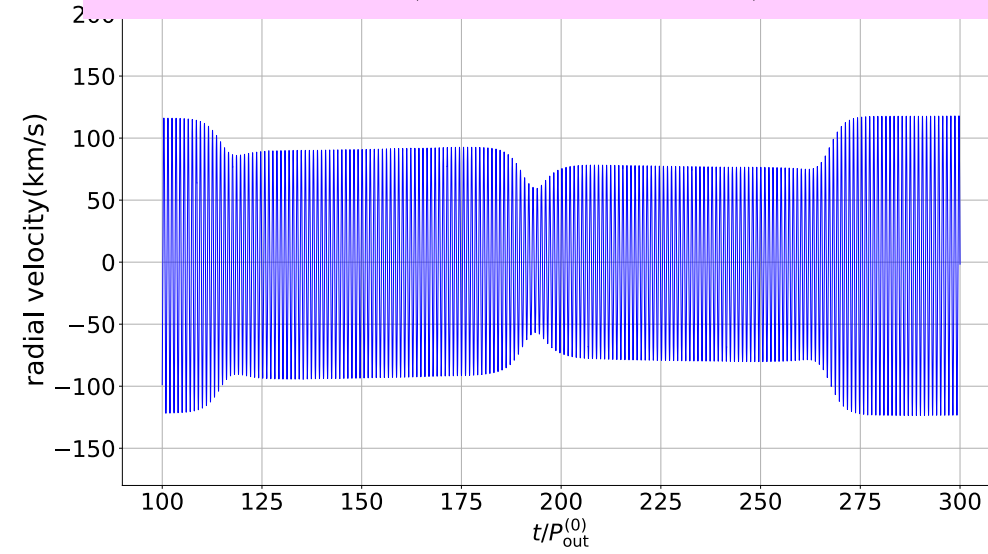


$i_{\text{mut}} = 90^\circ$

x-direction (near edge-on) total RV

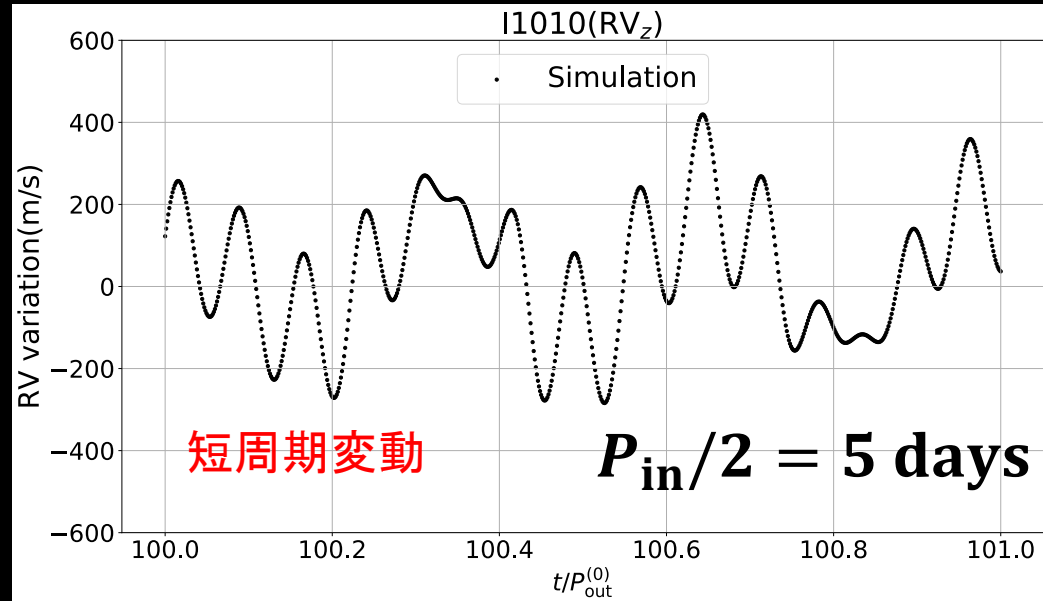


z-direction (near face-on) total RV



斜行3体系の場合の動径速度変動

振幅は3桁異なる



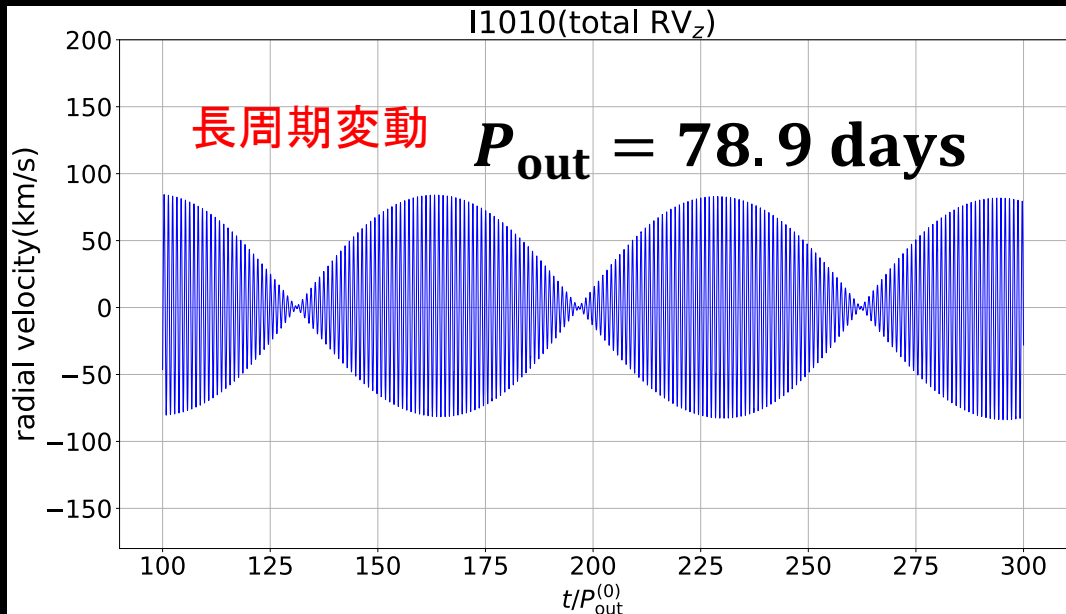
10M_☉ + 10M_☉のBH連星(公転周期10日)の周りを、初期軌道傾斜角45度で80日で公転する恒星の例

短周期変動

内側のブラックホール連星の公転周期の半分で、振幅はO(100m/s)

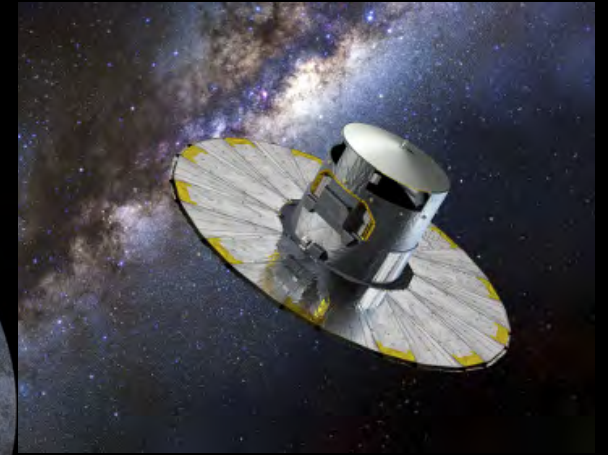
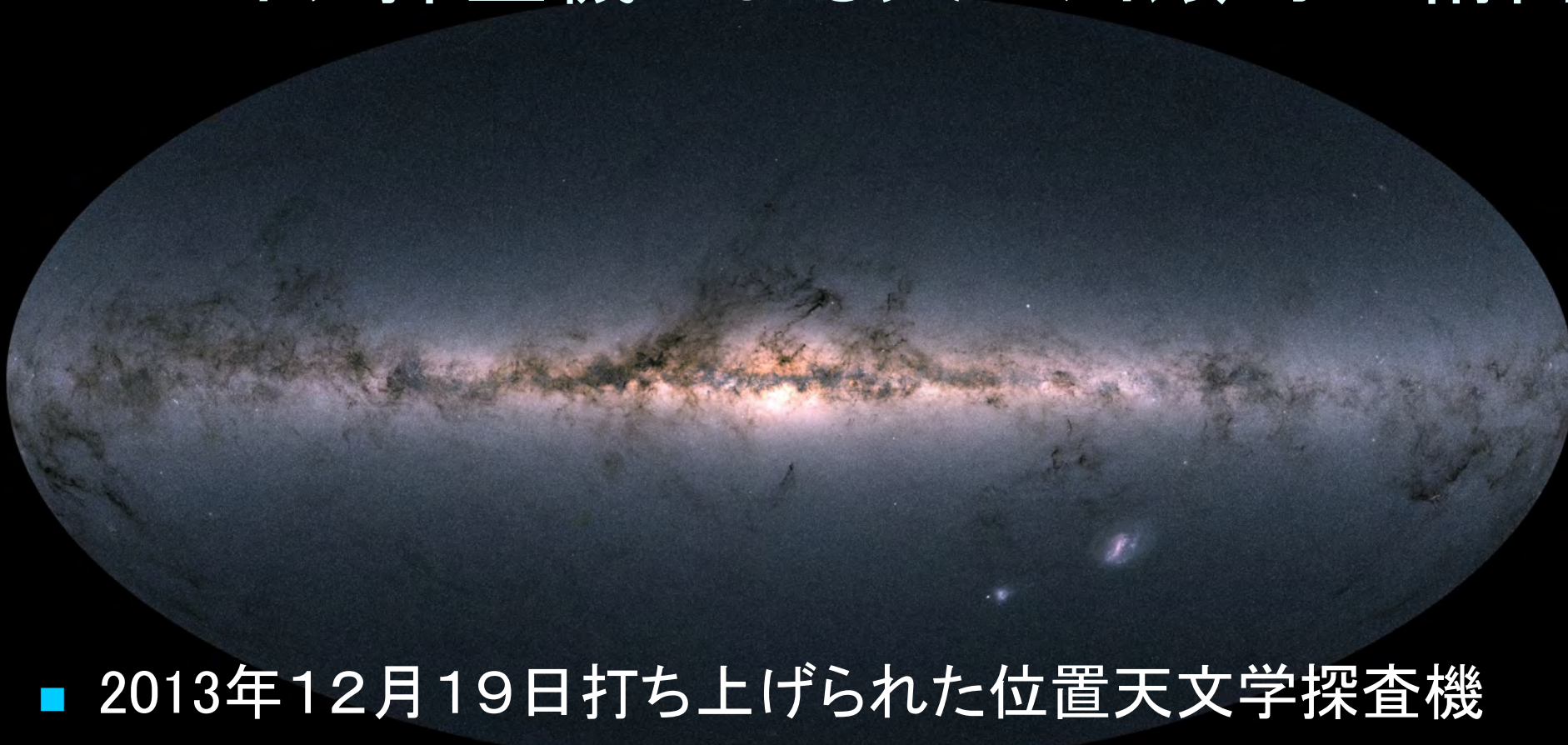
長周期変動

軌道面の歳差運動 + 古在-Lidov振動で、振幅はO(100km/s)



Hayashi & YS 2020, ApJ, 897, 29

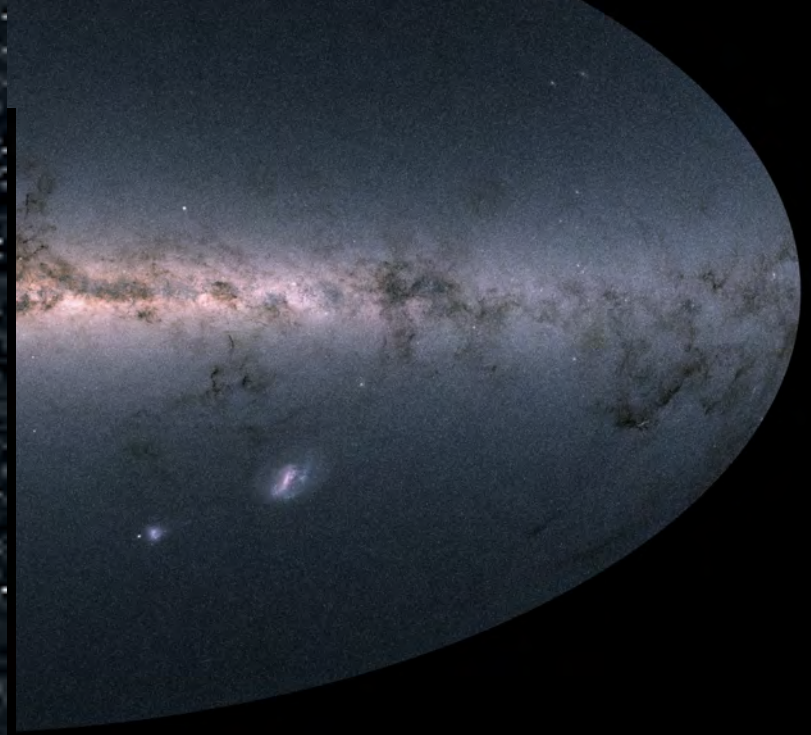
ガイア探査機による天の川銀河の精密3次元地図



- 2013年12月19日打ち上げられた位置天文学探査機
- Astrometryによって銀河系の恒星約10億個の距離を決定
- さらに測光と動径速度観測を組み合わせ、系外惑星やブラックホール連星を含む恒星多体系を探査できる

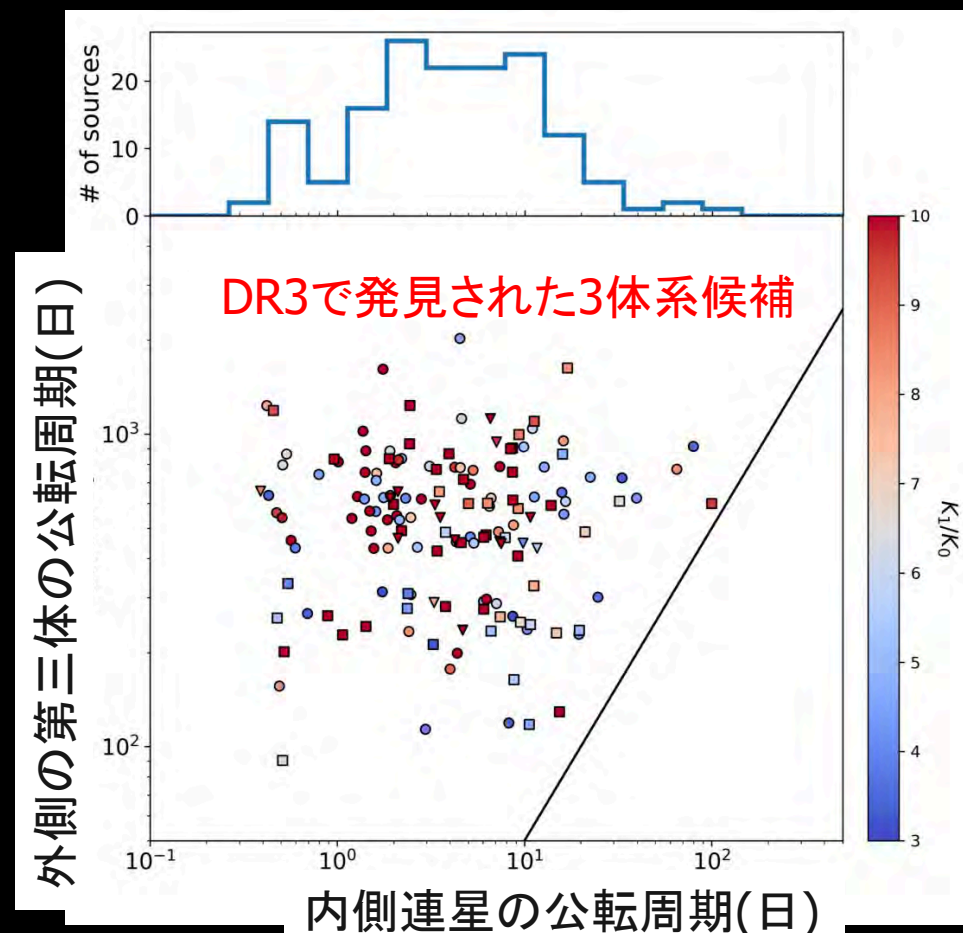
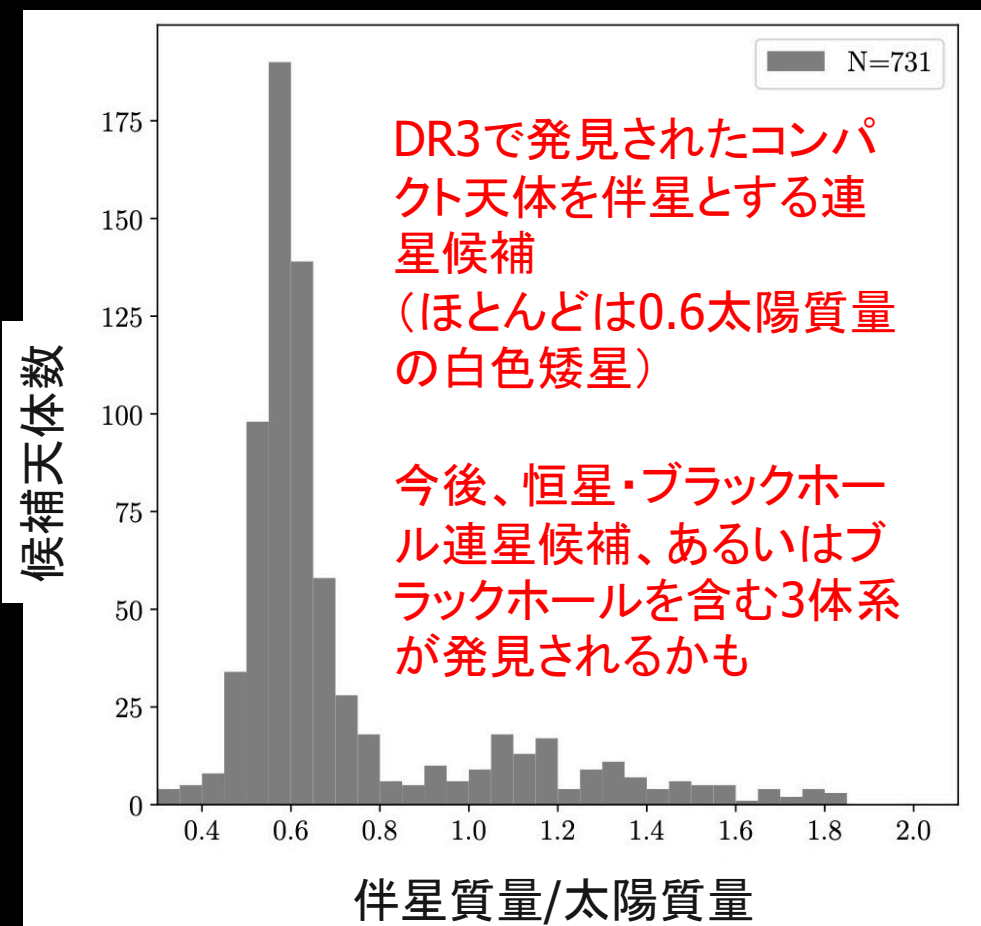
<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/home>

GAIA mission



Gaia DR3 (Data Release 3: 2022年6月13日公開)

- Gaia collaboration: Arenou et al. "Gaia Data Release 3: Stellar multiplicity, a teaser for the hidden treasure" arXiv:2206.05595 **DR4, DR5に期待!**



5 まとめ

世界の闇を白日のもとにさらす
天文学

見えているものだけが世界のすべてではない



*Mon dessin ne représentait pas un chapeau. Il représentait
un serpent boa qui digérait un éléphant*

大切なものは目に見えない



*J'ai alors dessiné
l'intérieur du serpent boa, afin que les grandes personnes puissent
comprendre. Elles ont toujours besoin d'explications*



宇宙物理学から得た個人的教訓(証明は不可能)

■ 数学的自然法則の解はすべてこの世界で実現するのか？

1. この世界の森羅万象(さらに世界あるいは宇宙そのもの)は、物理法則にしたがっている
2. その物理法則は、数学を用いて高い精度で(ひょつとすると厳密に)書き下すことができる
3. 物理法則に矛盾しない現象(例えば基礎方程式から数学的に導かれる解)は、どれだけ可能性が低くとも、この広い宇宙のどこかで必ず実現している
4. どれほど微弱な信号であろうと、技術の進歩によって検出可能となる日がやがてやってくる



まとめ

- この世界の主役はダーク(ダークマター、ダークエネルギー、ブラックホール、系外惑星などなど)
- **ブラックホールの中心部は本当にブラックだった**
 - ただしブラックホール天体そのものは極めて明るい
- 天文学はこのダーク成分を白日のもとにさらすことで、世界の闇をより深く理解する試み
- **ブラックホールと恒星からなる多体系探査が進行中**



*Everything not forbidden by the laws of nature is **mandatory***
— Carl Sagan "Contact"

今回の話題に関連した参考文献



朝日新書 2022年



東京大学出版会
初版 2006年 第2版 2021年



講談社ブルーバックス 2019年