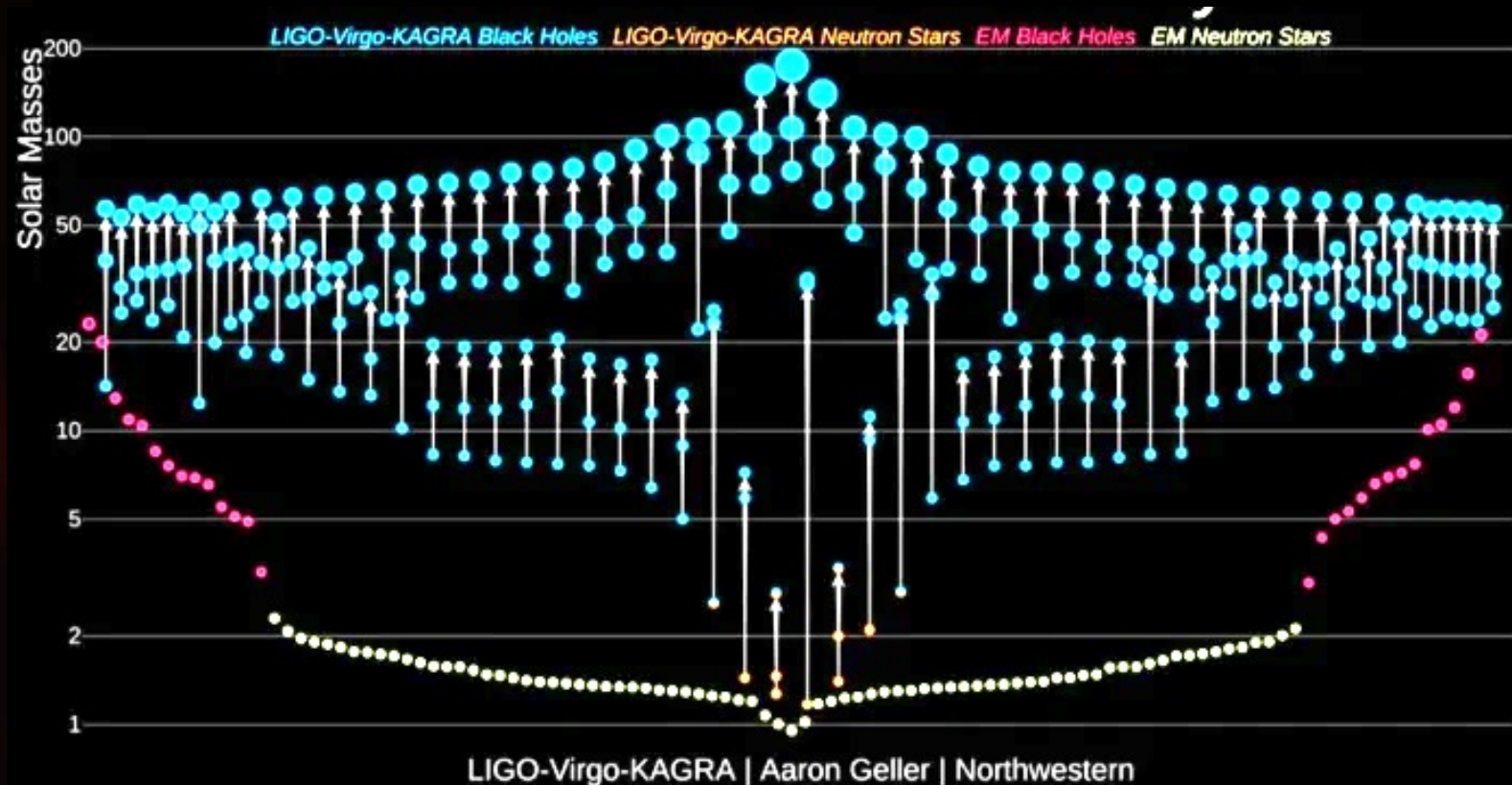


# 見えないブラックホールの探し方



東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖

日本物理学会四国支部講演会@高知大学2023年9月26日15:00

[http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation\\_2023j.html](http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2023j.html)

# 本日の話

- 1 世界の本質は目には見えない
- 2 ブラックホールとは
- 3 ブラックホールを“見る”
- 4 連星ブラックホールからの重力波
- 5 可視光で連星ブラックホールをさがす
- 6 まとめ

1 世界の本質は目には見えない

見えているものだけがすべてではない



*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*



# 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

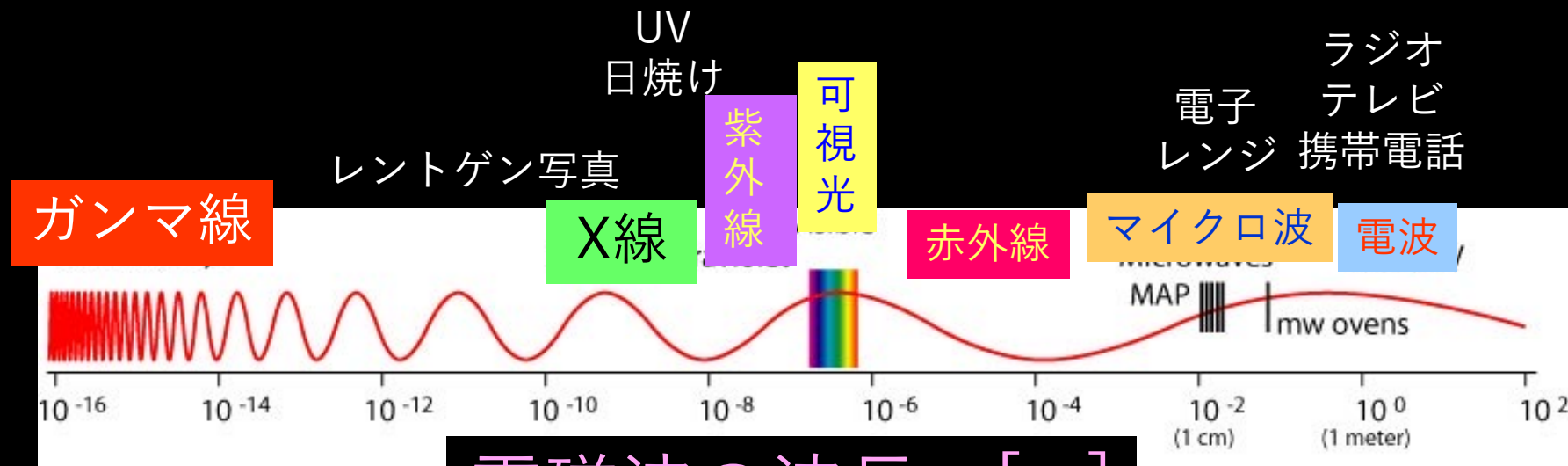
「星の王子様」のなかのキツネの言葉

電気、水道、ガス  
郵便、通信  
教育、介護、医療  
思いやり、絆、やさしさ

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

# 目に見えるのは世界のほんの一部だけ

通常、「光」と呼ばれているものは、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、興味深い疑問だが、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も変わらない（ただし、量子論的には全く自明ではない）

天文学 = 光の分布から「真実」を突き止める

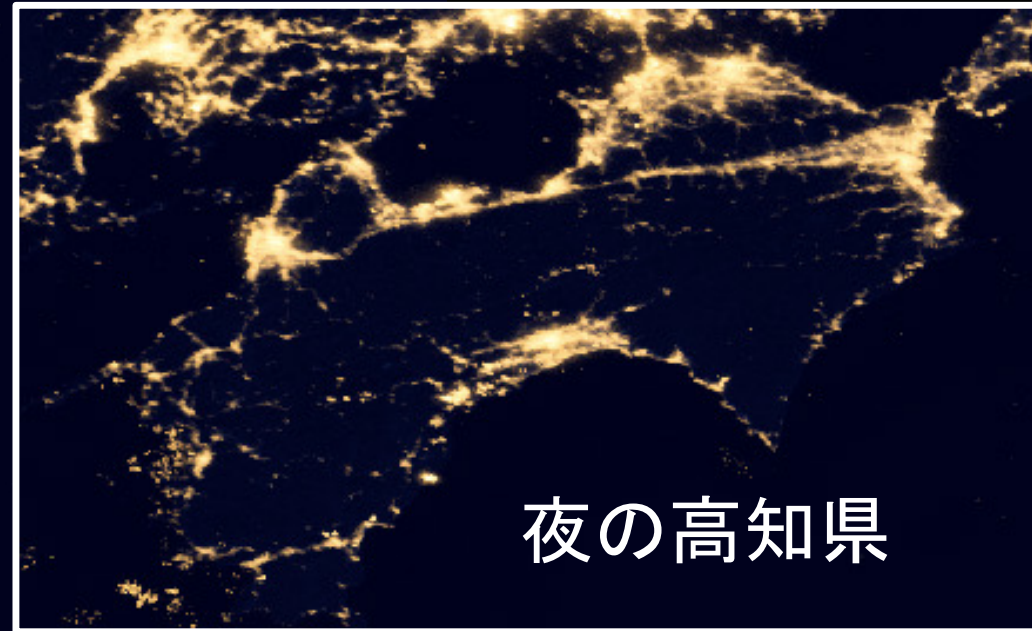


<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/NightLights/page3.php>



# 夜の日本周辺

大切なものは  
目に見えない!?

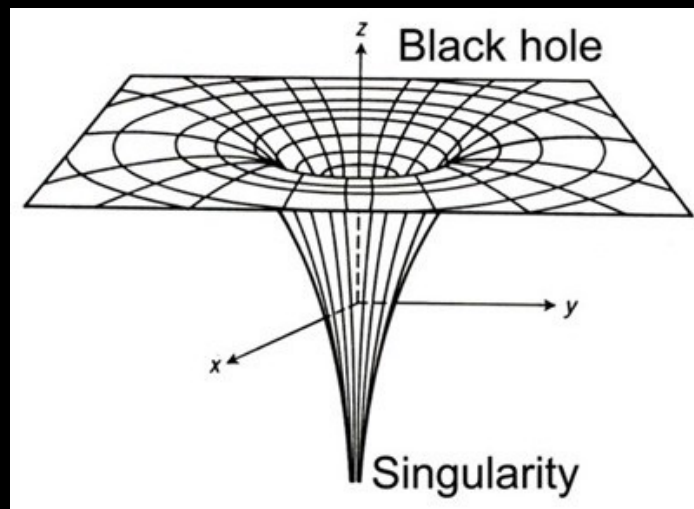


夜の高知県

## 2 ブラックホールとは



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

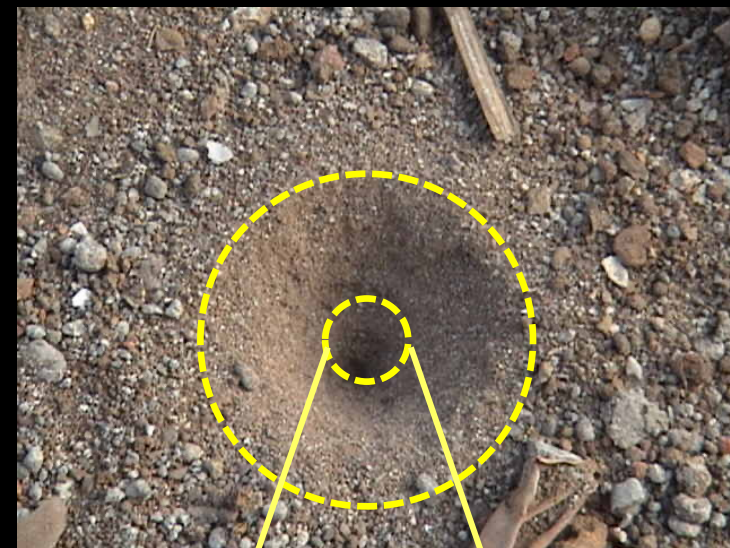
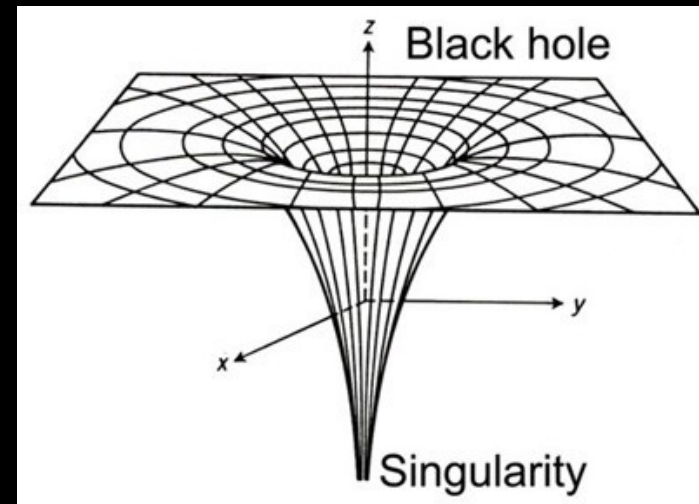
$$ds^2 = - \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) dt^2 + \frac{dr^2}{1 - \frac{r_s}{r}} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)$$

- 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

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

- より複雑な解も知られているが、とりあえず最も単純な球対称解をブラックホールだと理解しておこう



# カール・シュワルツシルト (1873-1916)

Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes  
nach der EINSTEINSchen Theorie.

Von K. SCHWARZSCHILD.

(Vorgelegt am 13. Januar 1916 [s. oben S. 42].)

**Karl Schwarzschild:**

Sitzungsberichte der Königlich  
Preußischen Akademie der  
Wissenschaften (Berlin), 1916,  
Seite 189-196

$$ds^2 = (1 - \alpha/R)dt^2 - \frac{dR^2}{1 - \alpha/R} - R^2(d\vartheta^2 + \sin^2\vartheta d\phi^2), R = (r^3 + \alpha^3)^{1/3}. \quad (14)$$

- 36歳でポツダム天文台長になった神童
  - 1914年に第一次世界大戦が勃発すると、自ら志願してロシアで従軍
  - 戦場で皮膚病を患いつつも、一般相対論の特殊解を発見
  - 息子のマーチンは星の進化論で高名なプリンストン大学教授
- アインシュタインを介してこの論文を発表した4ヶ月後に死去
  - しかしアインシュタインは、あくまで数学的解に過ぎず実在しないと考えていた

# 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）

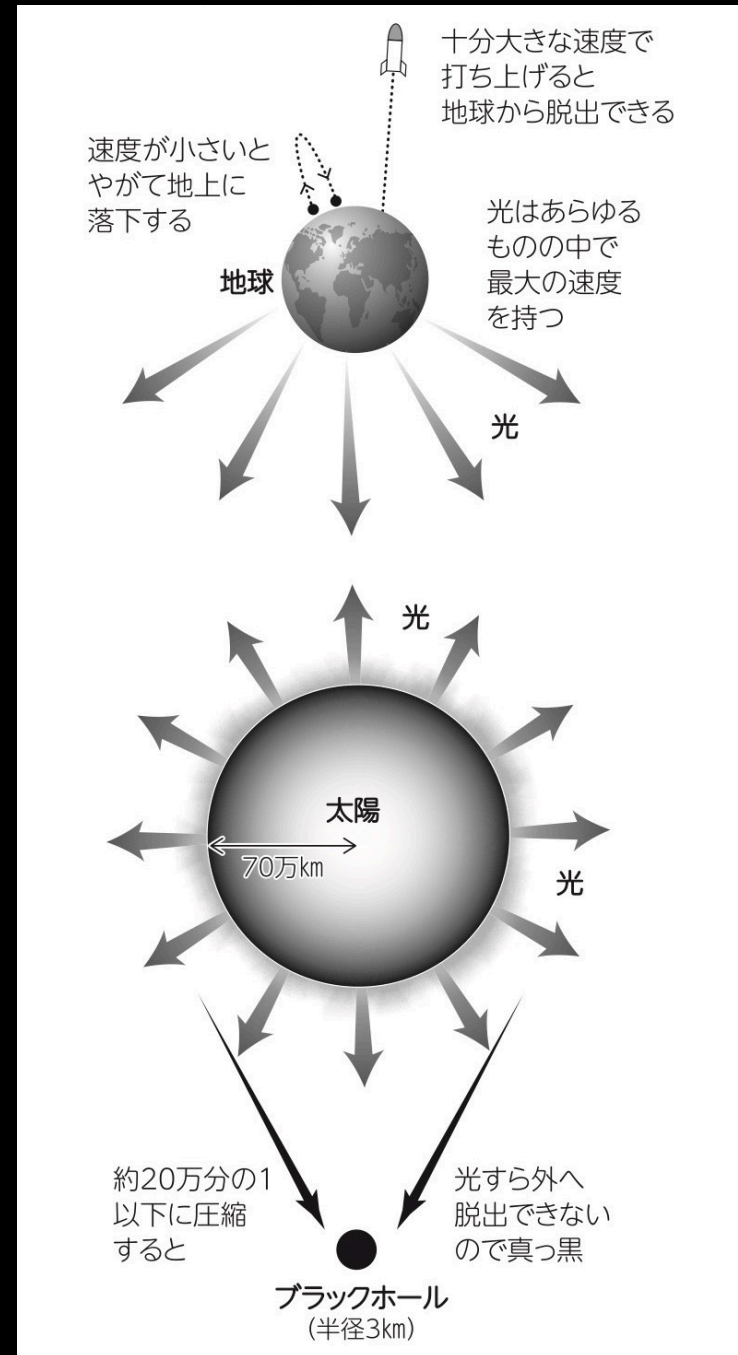
## ■ 黒い穴（ブラックホール）

- 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

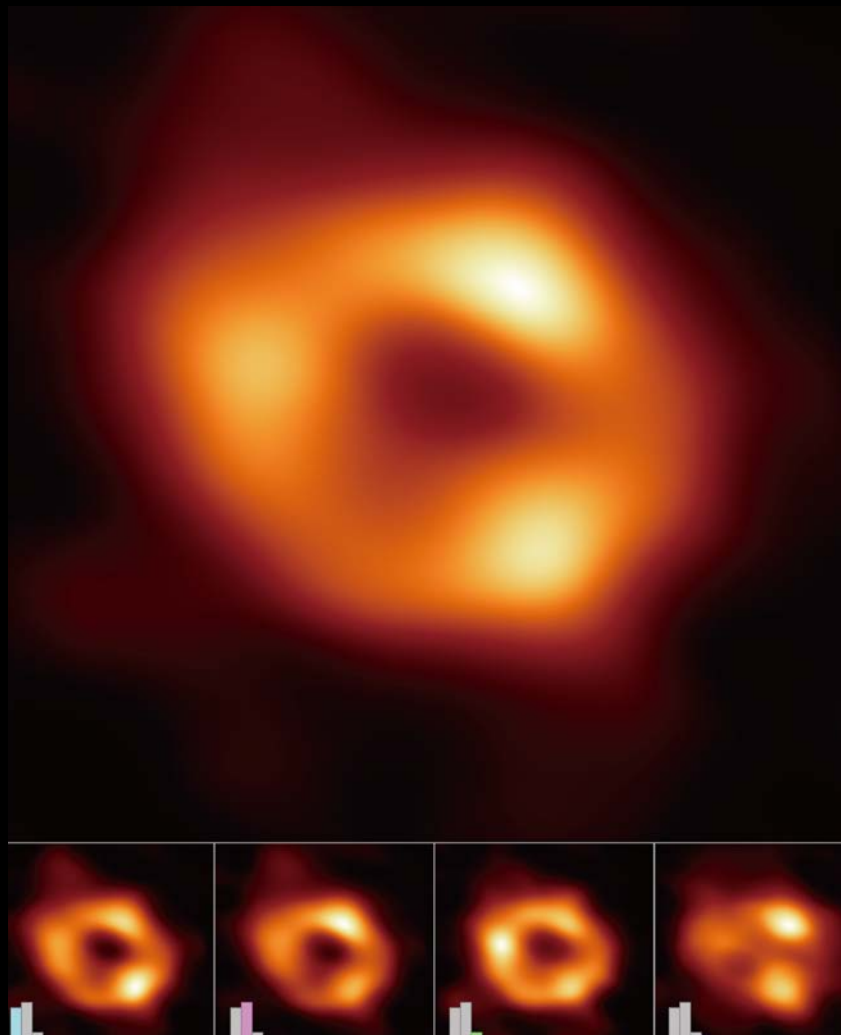
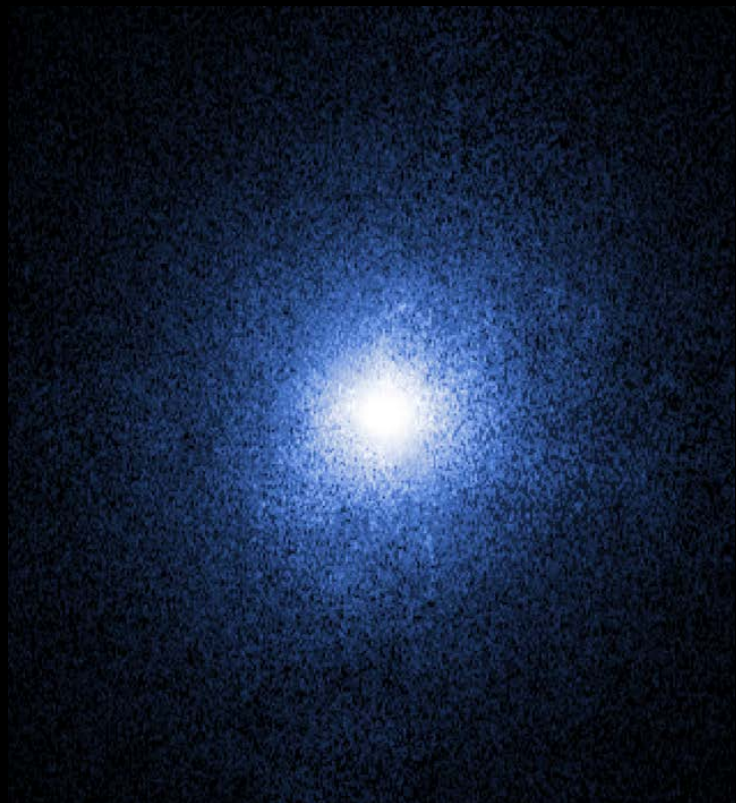
## ■ ホーキング放射

- 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、微視的なミニブラックホールでない限り無視できる）

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



### 3 ブラックホールを“見る”



# ① 初めてのブラックホール(1971)： はくちょう座X1

- 観測的に初めて認められたBH(ブラックホール)
  - 1964年に明るいX線天体として発見
  - 1971年に小田稔らが、青色超巨星と見えないBH（太陽質量の約20倍）からなる公転周期5.6日の連星系であることを示す
    - 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BHに落ち込むときに強いX線を放出
    - 単に“見える”だけでなく、全天で最も明るいX線源の一つ
- 数多く存在するX線連星中の恒星質量BHの代表例

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

## ② クエーサーの発見と巨大ブラックホール

### ■ クエーサー (QSO=quasi-stellar object)

- 1963年、マルテン・シュミットは電波源3C273が非常に遠方にある明るい点源であることを発見
- 小さなサイズからこれほどの光度を出せる機構は、巨大BHに落ち込む重力エネルギーしかない
- 宇宙論的距離にある活動銀河核の一種

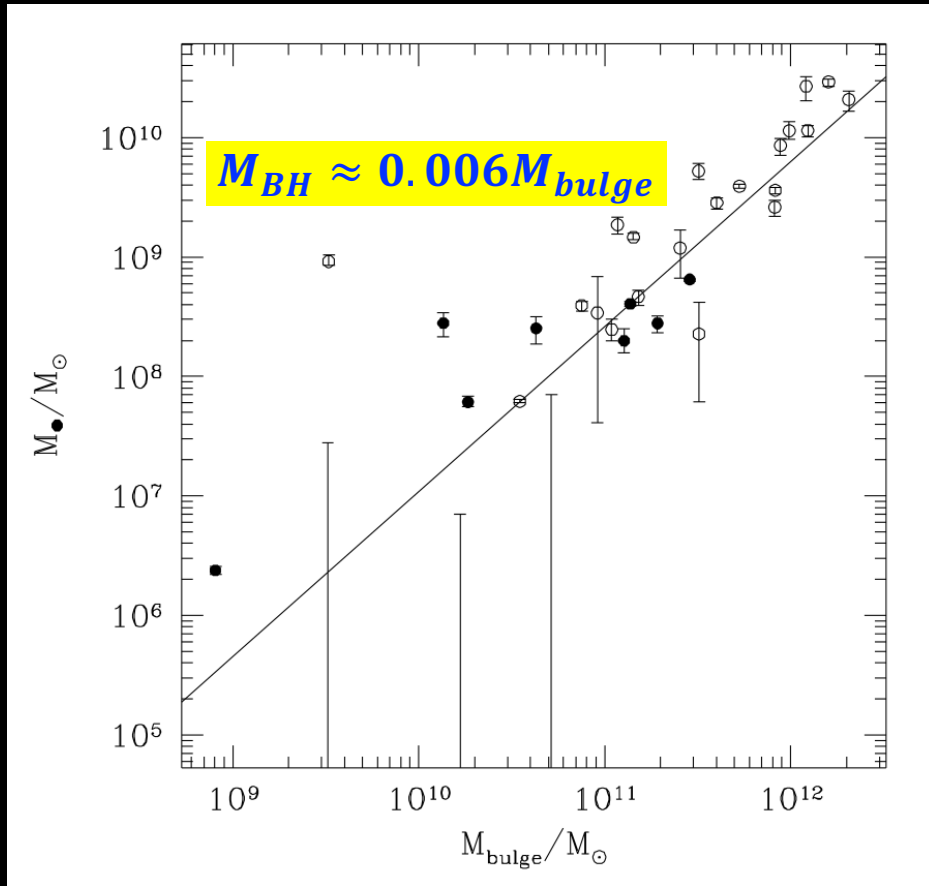
### ■ 銀河とクエーサーの共進化

- 現在では、ほとんどの銀河の中心部には、太陽質量の100万倍から10億倍もの超巨大ブラックホール(SMBH)が存在することが観測的に確立
- SMBHは稀どころか、銀河の形成と進化に重要な役割

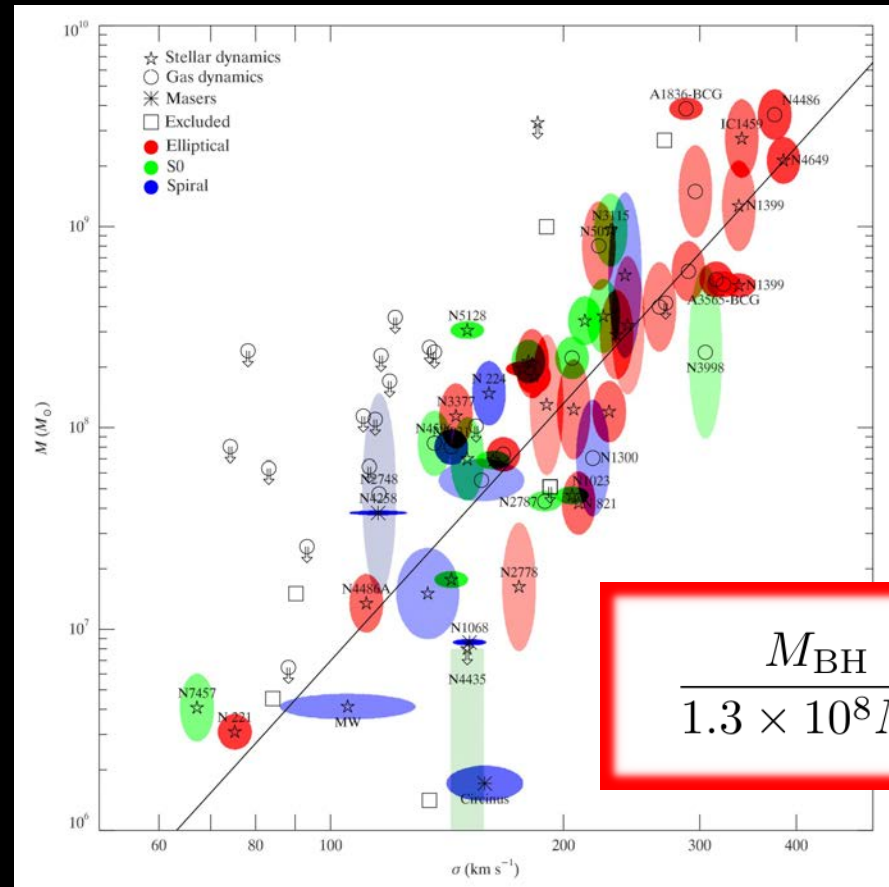


# 銀河中心の超巨大ブラックホール (SMBH)

- 銀河のバルジとSMBHの質量の比例関係が銀河とSMBHの共進化を示唆



Magorrian et al. AJ 115(1998)2285



Gültekin et al. ApJ 698(2009)198

### ③ 銀河系中心巨大ブラックホール：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

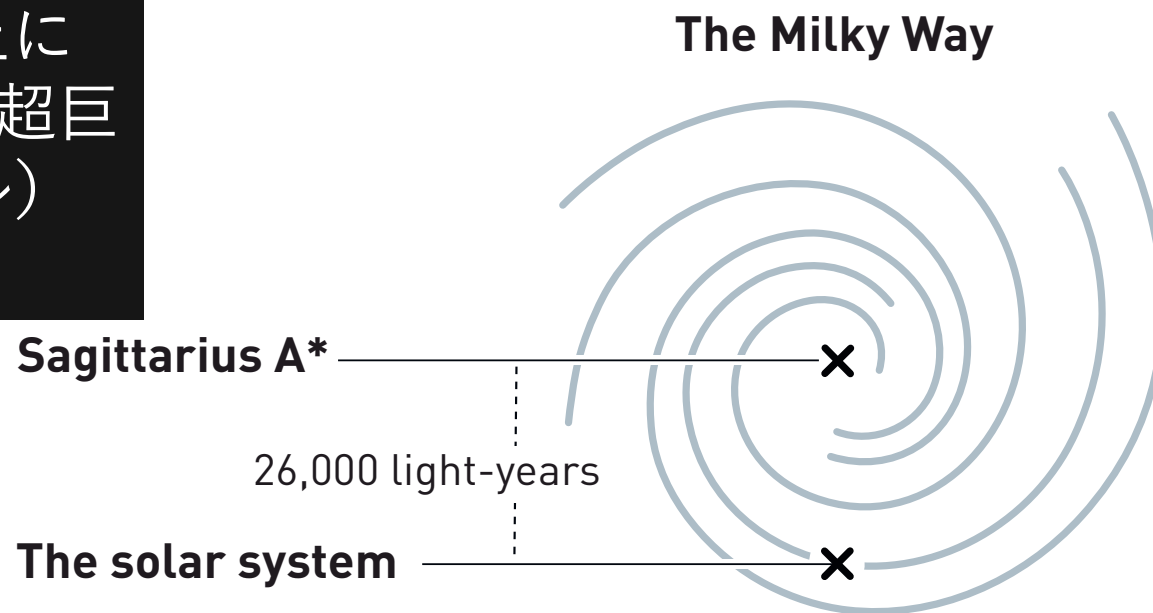
Sgr A\*の周辺の星の運動を20年以上にわたりモニターし、400万太陽質量の超巨大コンパクト天体（≡ブラックホール）が存在することを観測的に確立



Reinhard Genzel  
(マックスプランク研究所)



Andrea Ghez  
(UCLA)



The Milky Way, our galaxy, seen from above. It is shaped like a flat disc about 100,000 light-years across. Its spiral arms are made of gas and dust and a few hundred billion stars. One of these stars is our Sun.  
<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2020/press-release/>  
©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

# Sgr A\*付近の星の運動

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



# ④ ブラックホールは本当に「ブラック」なのか？

- 一般相対論が完成した直後の1916年、シュワルツシルトが、奇妙な性質を持つ解を発見
  - そこからは、光を含むいかなる物質も外に出ることはできない
  - 現在ブラックホールと呼ばれているこの天体は、アインシュタインでさえ、現実的にはありえない数学的解に過ぎないと考えた
  - しかし、その後の観測によってブラックホールだと考えられる天体が数多く発見されてきた
  - しかし、ブラックホールは本当に「ブラック」なのか（そこから光は脱出できないのか）確認されたわけではなかった



のみ込まれた物質や光はブラックホールの外に脱出できない



# EHT (イベント・ホライズン・テレスコープ)

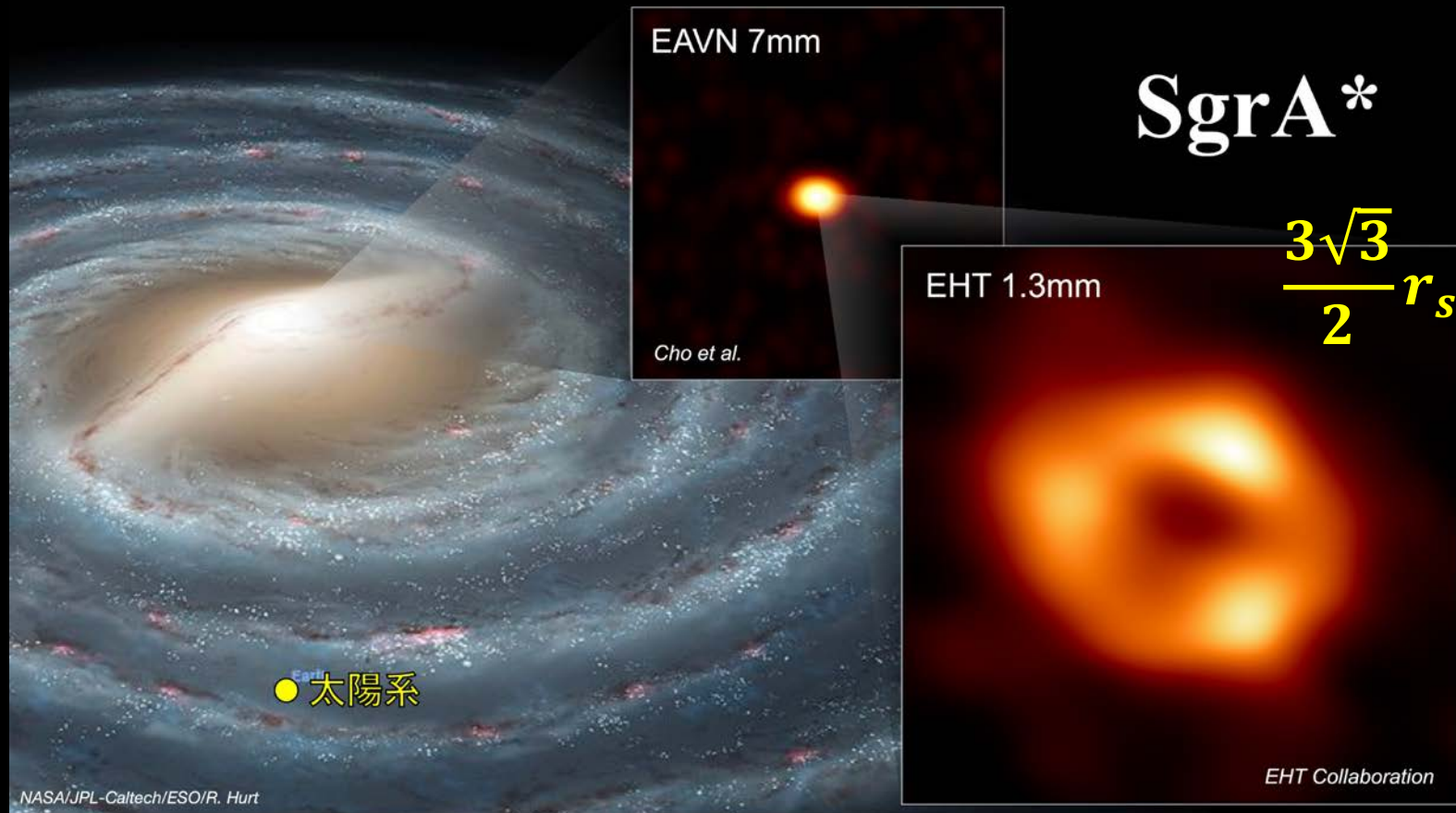
- 世界中の電波望遠鏡11台をつなぎ、地球サイズの大望遠鏡として運用する国際共同プロジェクト
- 銀河中心の超巨大ブラックホールのシュワルツシルト半径程度を解像する
- 百聞は一見にしかず



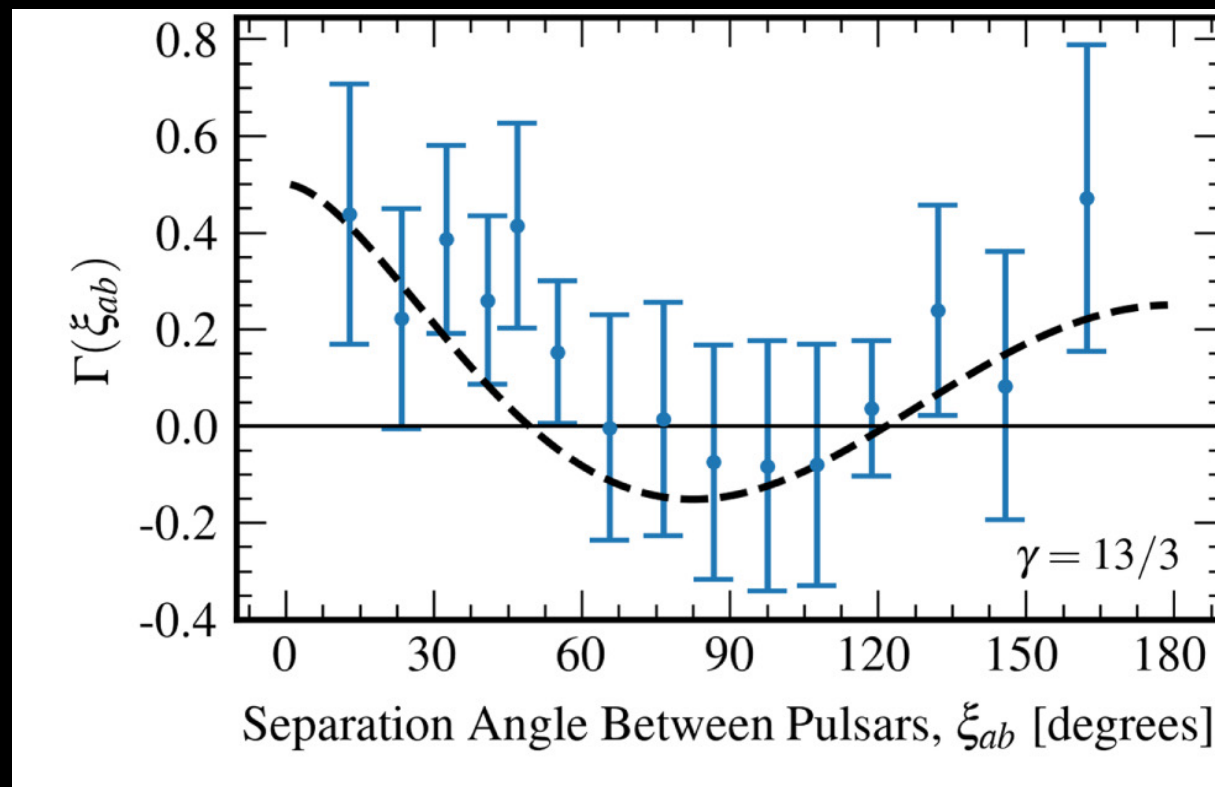
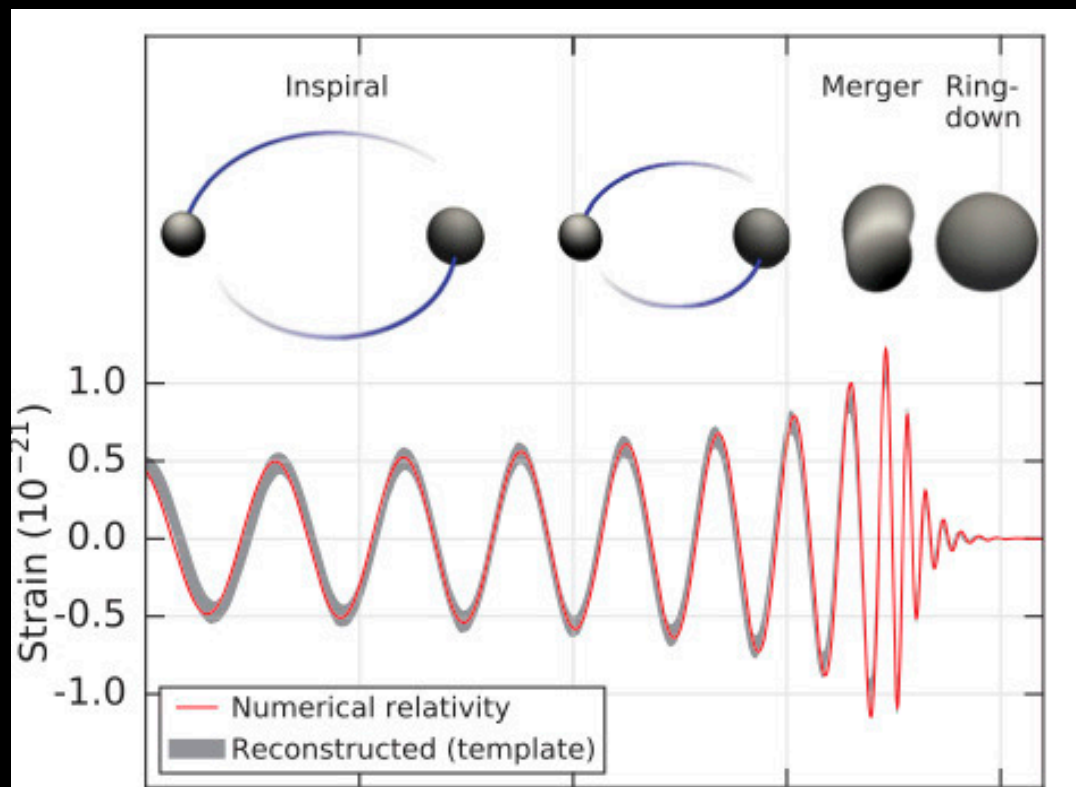


# ブラックホールシャドウの撮影：M87と天の川銀河

- 2022年5月12日、国際共同プロジェクトEHT(Event Horizon Telescope:事象の地平線望遠鏡)が、天の川銀河の中心にあるSMBHの「影」の撮影結果を発表
- 2019年4月10日の楕円銀河M87(5千万光年先)の中心ブラックホール(65億倍太陽質量)に続く2例目
- ブラックホールは本当に「ブラック」であることを証明



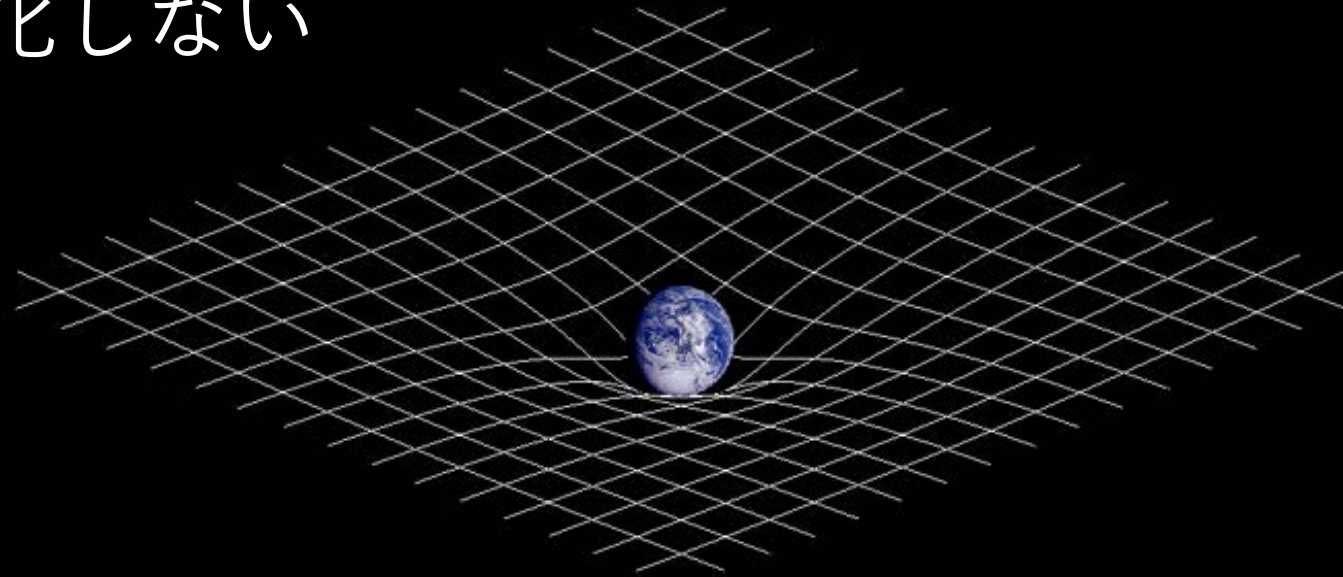
# 4 連星ブラックホールからの重力波





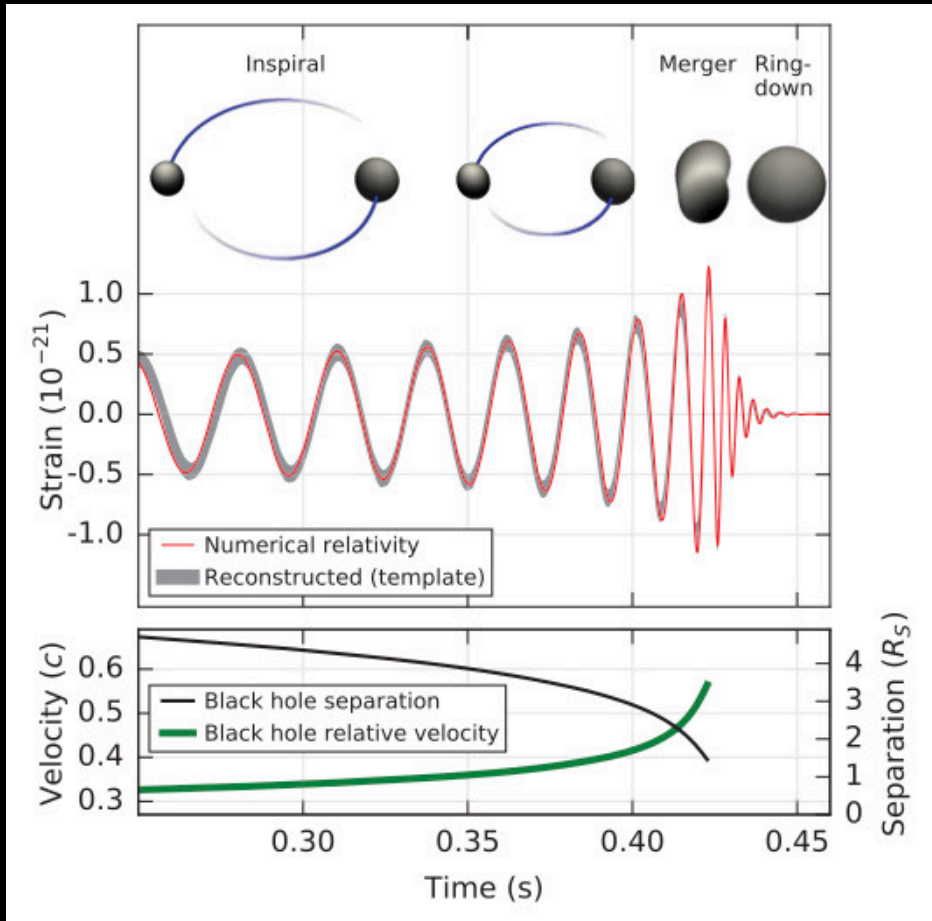
# 一般相対論が予言する時空の歪みを伝える波（重力波）

- 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は変化しない



- しかし一般相対論によると、物体が激しく運動すれば歪みのパターンが時間変化し、波として伝わる（重力波）
- とはいえ、その振幅はとてつもなく小さい

# 重力波の地上直接検出の初成功 (2015)



Abbott et al.

Phys.Rev.Lett. 116 (2016) 061102

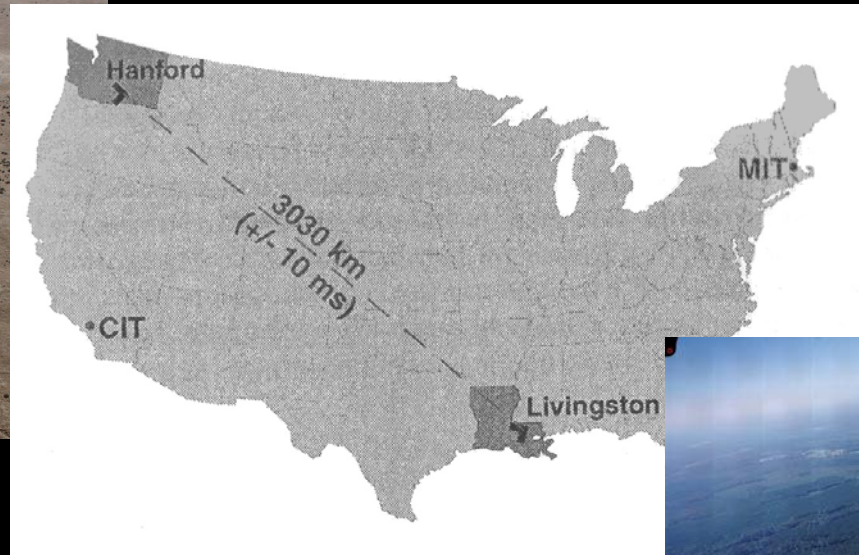
<https://www.ligo.caltech.edu/>

- 3km離れた2点間の距離  $L$  の変化を  $\Delta L/L=10^{-21}$  の精度で検出 (2015年)
  - 地球・太陽間の距離がわずかに原子1個分だけ変化した程度に対応する驚異的な感度
  - 2017年のノーベル物理学賞
  - 一般相対論の予言以来100年後の観測的検証
  - 基礎物理学理論と最新測定技術発展のすごさ
- 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

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



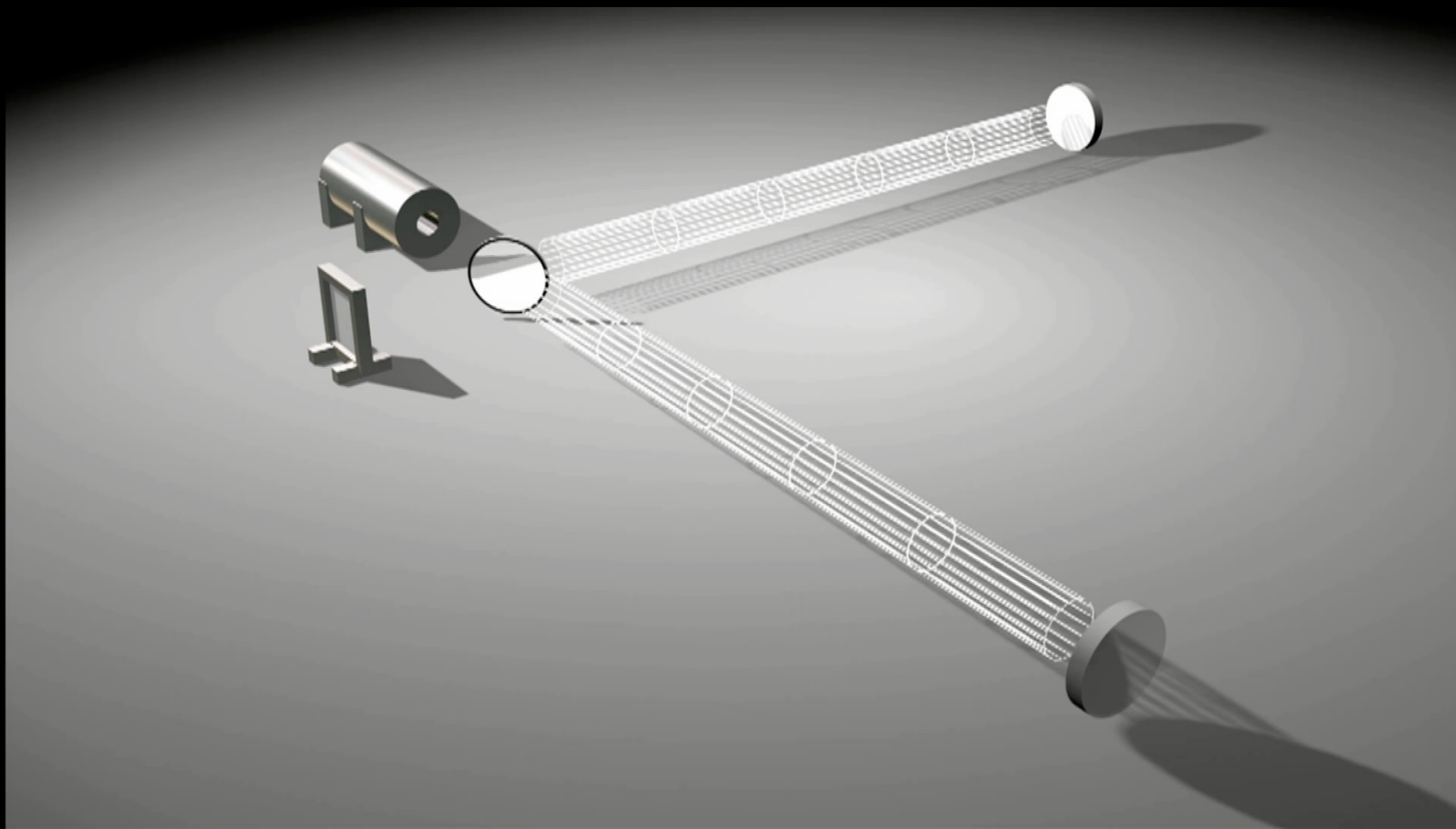
米国ワシントン州  
ハンフォード



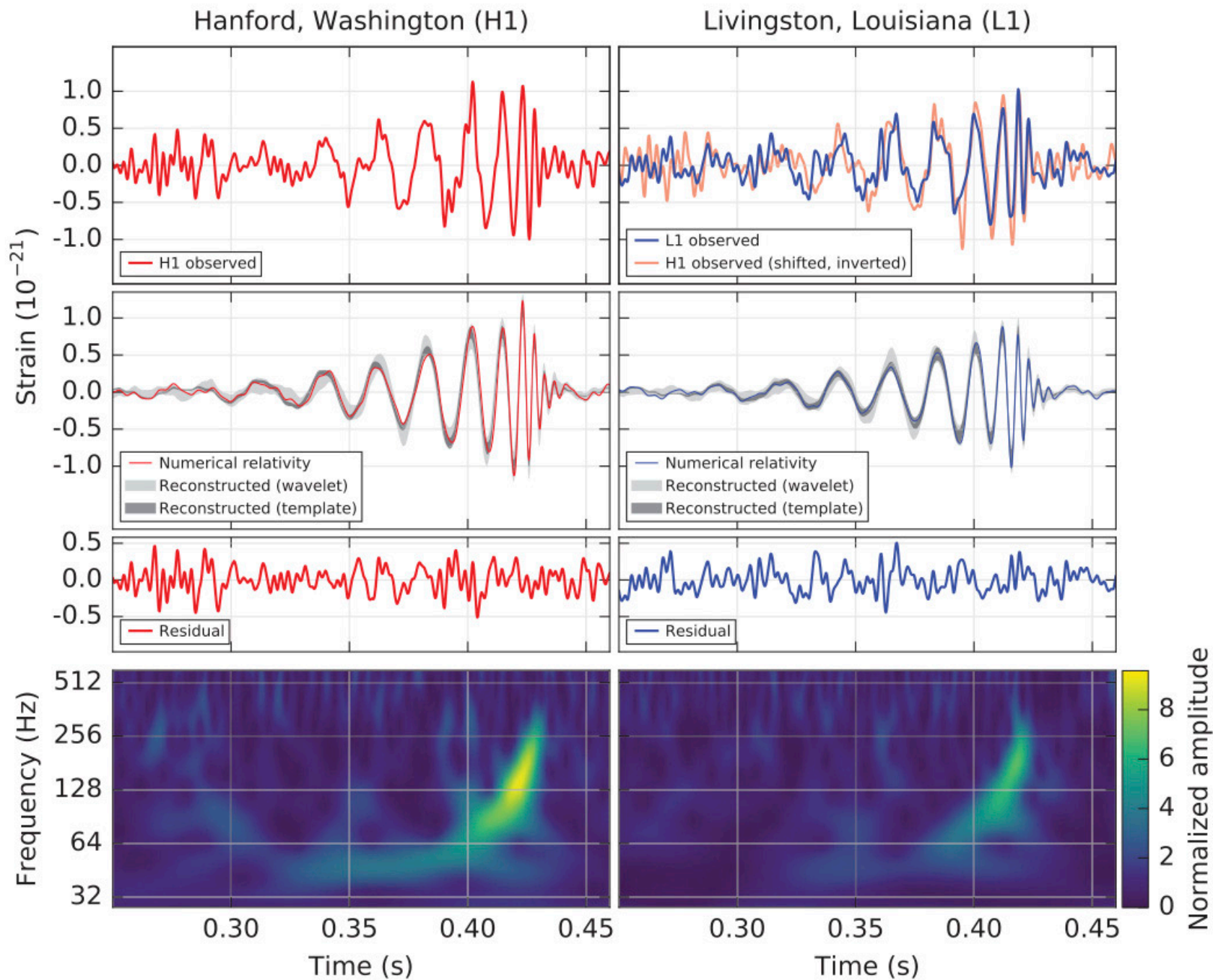
米国ルイジアナ州  
リビングストン



# レーザー干渉計重力波検出器



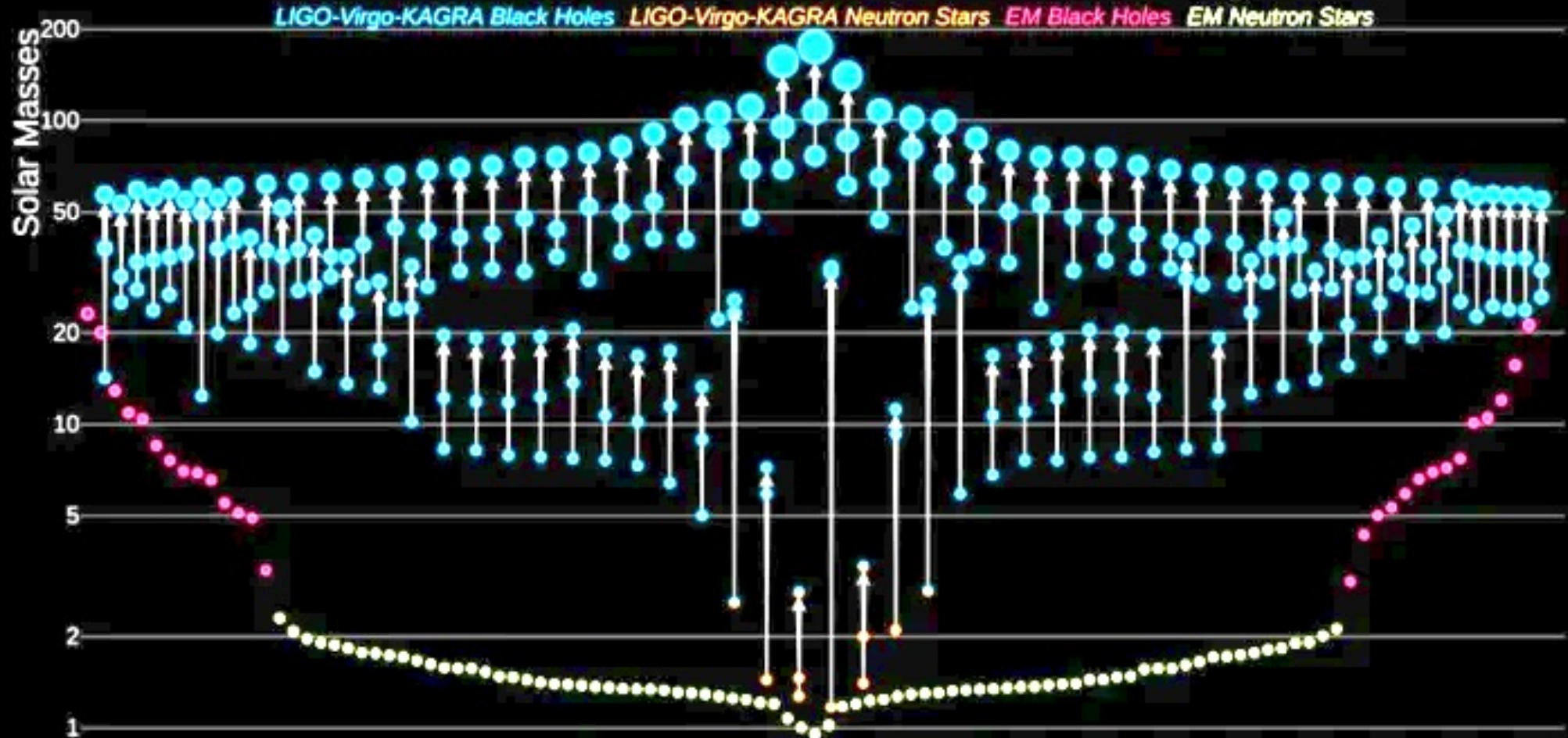
2015年9月14日 9時50分45秒 (協定世界時)



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

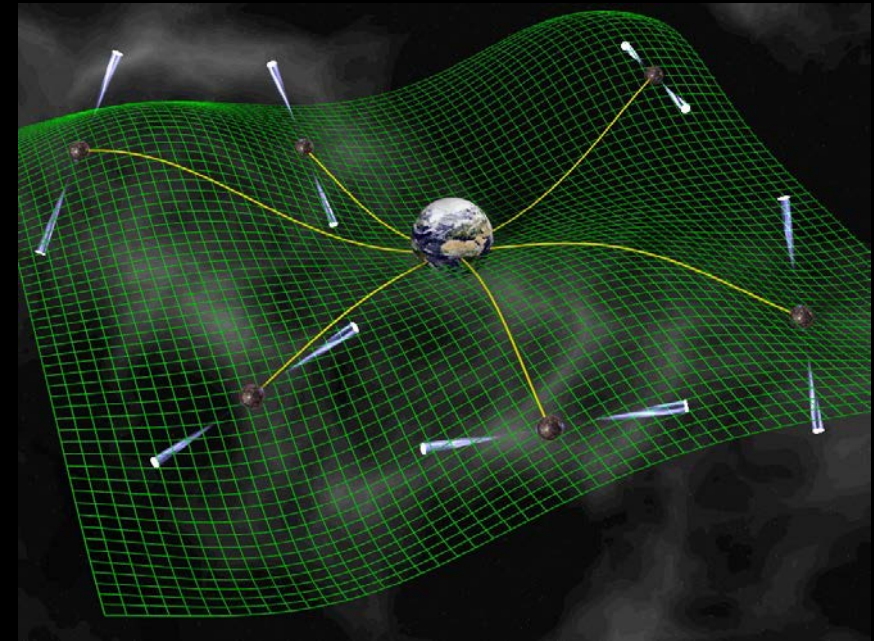
# 宇宙はブラックホール連星であふれていた

## Masses in the Stellar Graveyard

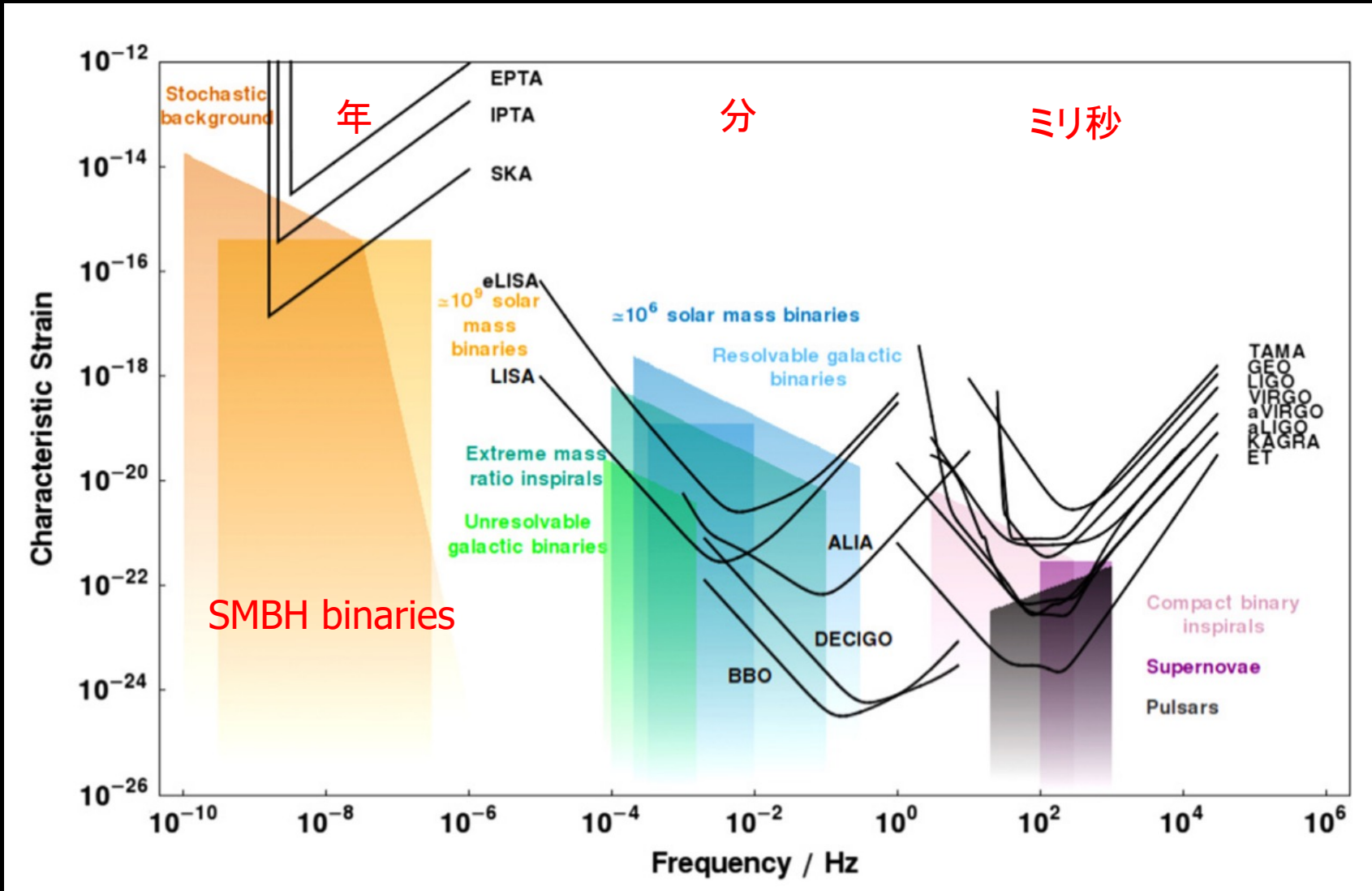


# 超巨大ブラックホール連星からの重力波

- LIGOが発見したのは、恒星質量(太陽の10-100倍程度)連星BHからの重力波
- 銀河中心の超巨大BH連星(太陽の100万-100億倍程度)からの重力波を検出したい！
  - 波長が長すぎて地上の検出器(数km程度)では不可能
  - 銀河系内のパルサー(正確な時計となる)を用いて、超巨大BH連星からの長波長の重力波を探查しよう
  - 銀河系そのものが一つの巨大な検出器とみなせる
  - PTA (Pulsar Timing Array)



# 期待される重力波源の周波数と振幅

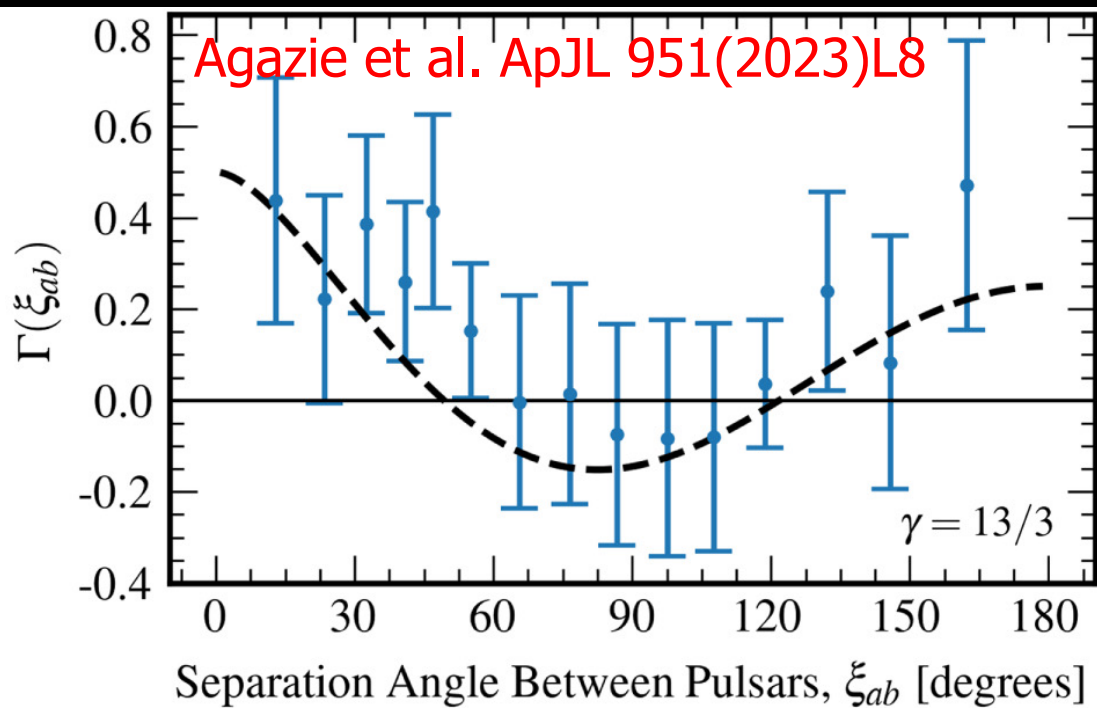




# PTAによる背景重力波のevidence (2023)

## ■ NANOGravi (North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves)

- 68個のミリ秒パルサーの到着時間の変動を15年間モニター
- その変動パターンが背景重力波の一般的予言と一致



- 2つのパルサーaとbからのパルス到着時間遅れの相関をそれらの角度 $\xi_{ab}$ でプロット
- 重力波の偏光モードは+と×なのでいずれも90度で負相関、0度、180度で正相関がもっとも強くなるはず
  - 実際にはパルサーまでの距離が重力波の波長よりずっと長いため、重力波の進行方向に対する補正が必要 ⇒ Hellings-Downs curve (1983)
  - データはHDの予言と整合的 (3-4  $\sigma$ :evidence)
  - 5  $\sigma$ 以上ならdetection ⇒ 将来に期待

# PTA背景重力波の起源

- データは背景重力波から予想される統計的性質と整合的

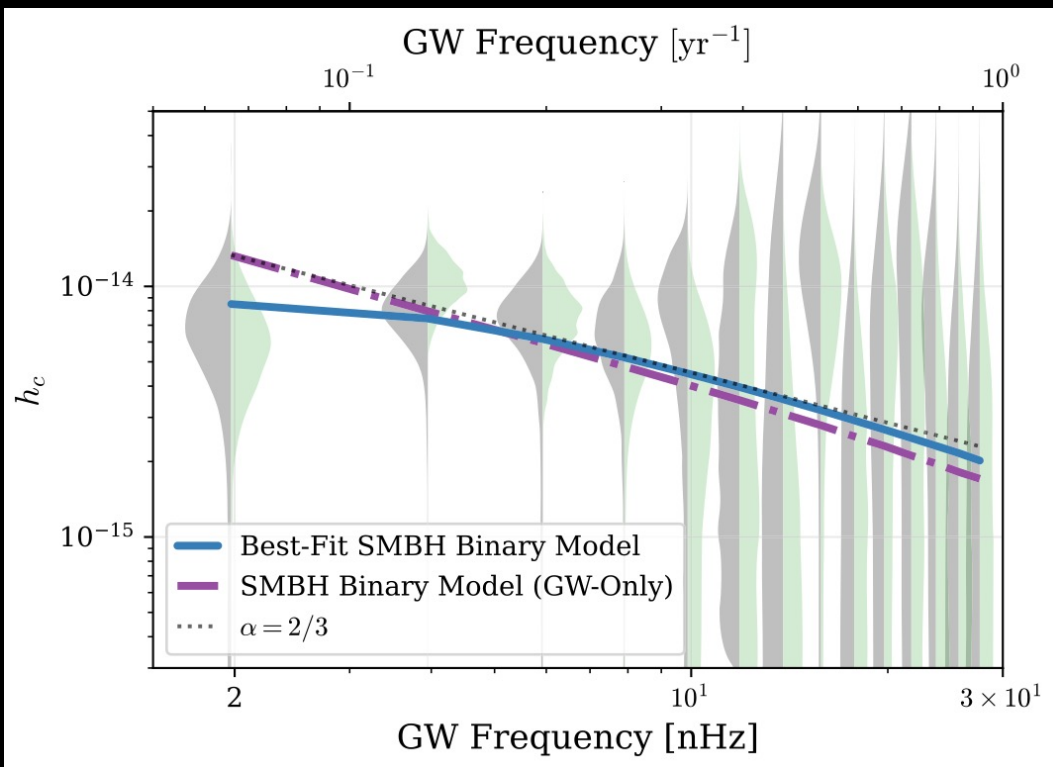
- では、その具体的な起源は？

- **SMBH binaryの合体？**

- 銀河は数多くの合体を経験して成長している+ほとんどの銀河はその中心にSMBHを持つ=銀河の合体時にそれらの中心にあるSMBHもまた合体するはず

- しかし合体の時間スケールが宇宙年齢よりも長くなる可能性？ (**final parsec 問題**)

- NANOGrav観測データを説明できる現象論的予言（経験的銀河形成+SMBH合体モデル）は存在する



Agazie et al. ApJL 952(2023)L37

# 5 可視光で連星ブラックホールをさがす

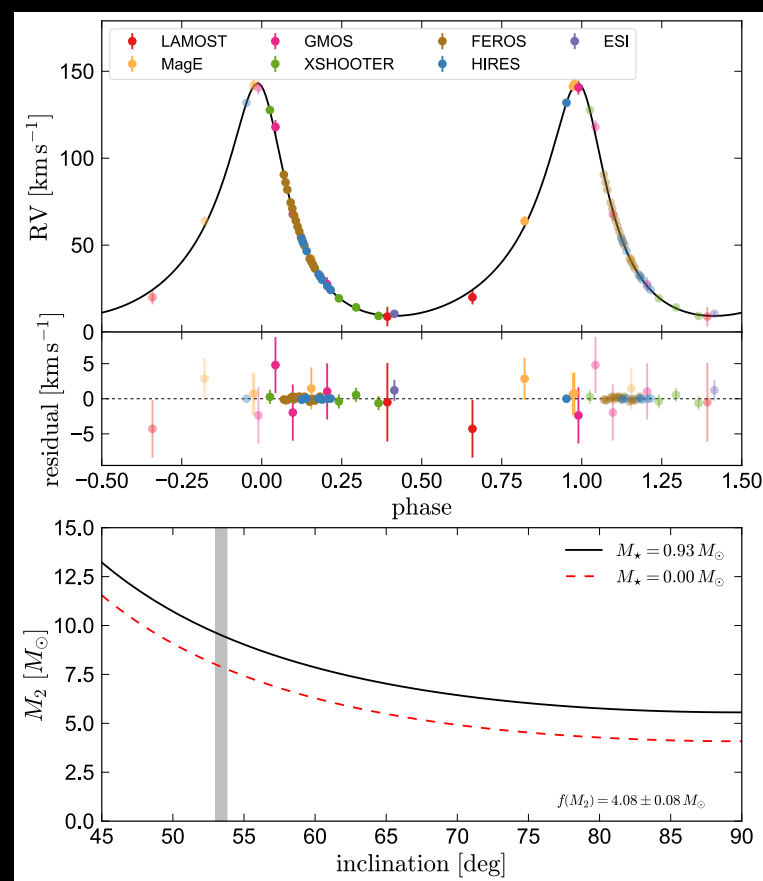
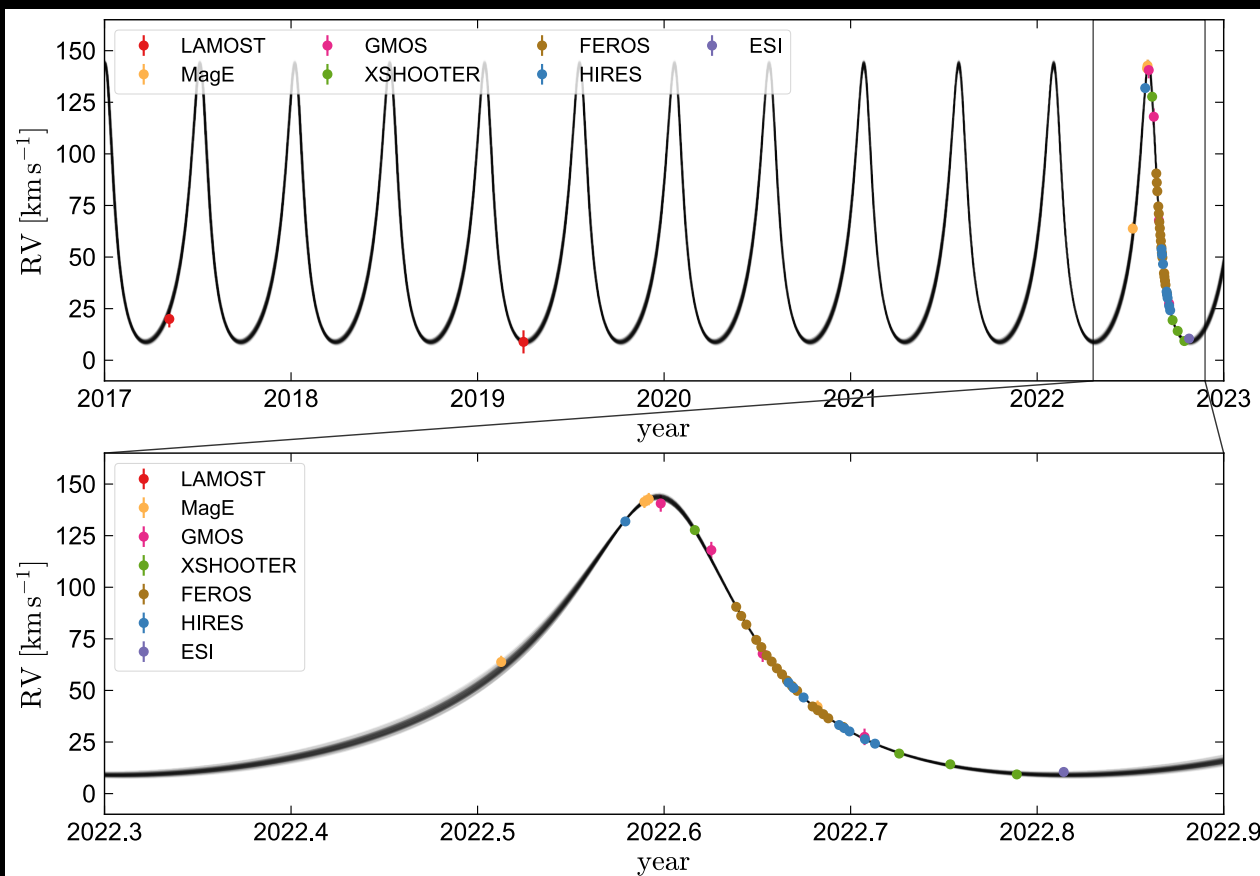
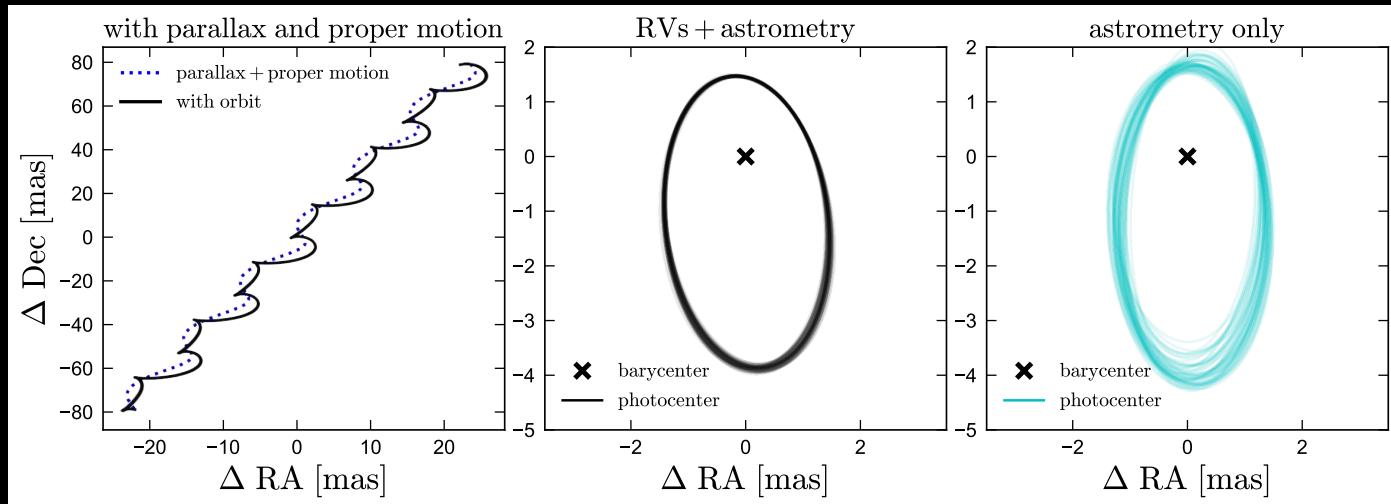


# 重力波以外のブラックホール連星探査

- 観測から宇宙はBH連星で溢れていることが予想される
  - そもそも単独BH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BH連星@系外銀河は合体直前のみ
  - 長公転周期BH連星なら銀河系内にもっと多くあるはず
- 光を用いたBH連星探査の方法論
  - まず挙動不審な運動をする恒星を見つけ、恒星とBHの連星なのか、あるいは恒星とBH連星からなる3体系なのかを調べる
  - 系外惑星の位置天文学的サーベイ（ガイア衛星）で候補を発見し、視線速度フォローアップ観測で検証

# Gaia BH-1

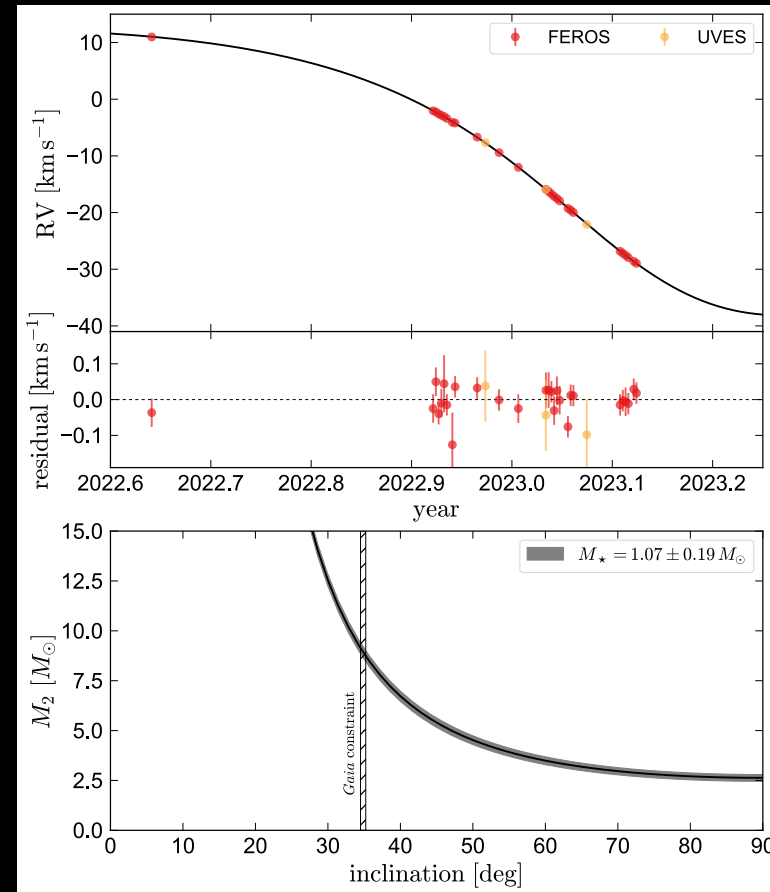
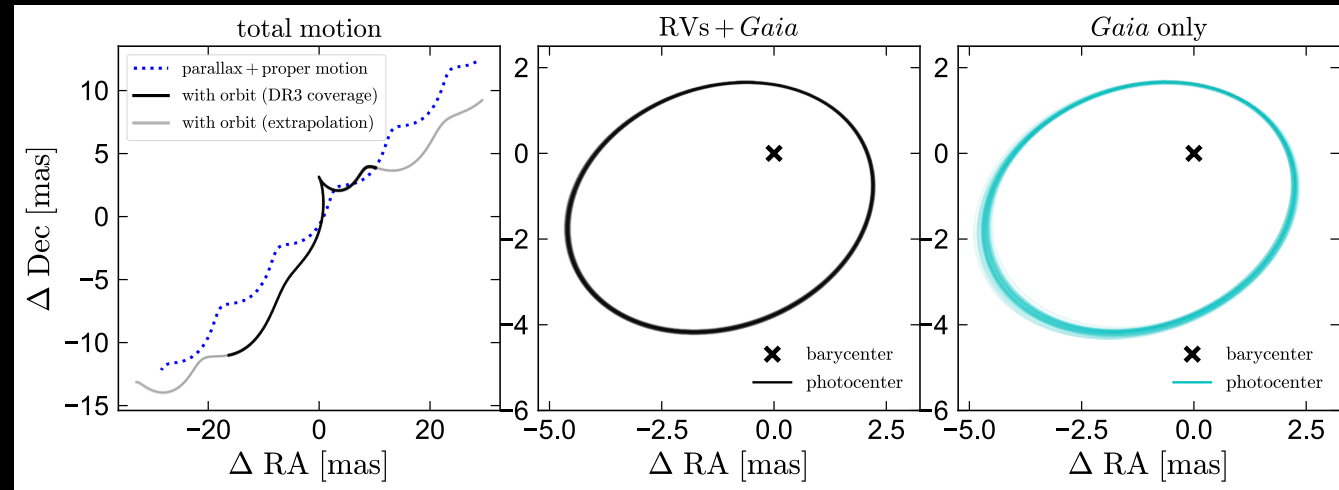
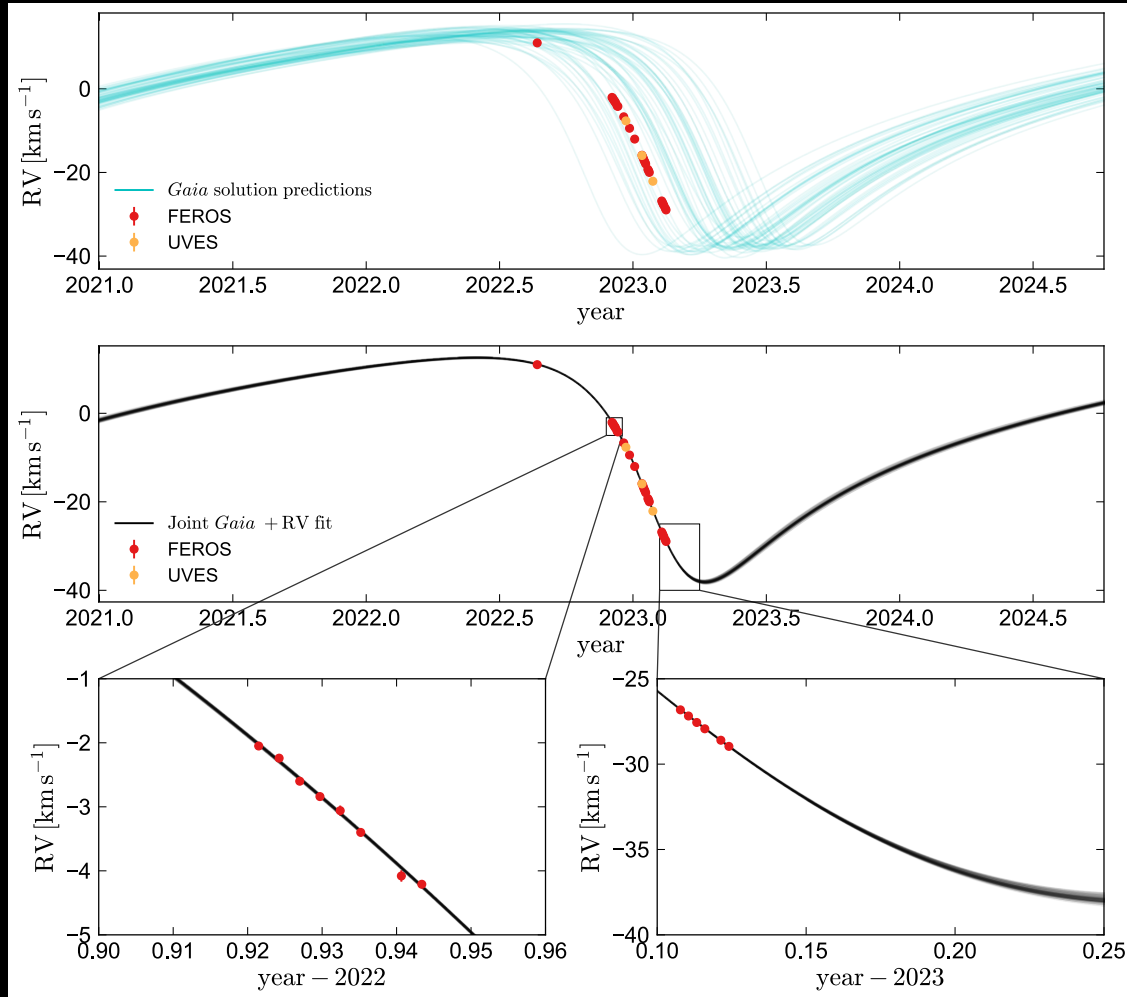
$0.93M_{\odot}$  G star +  $9.6M_{\odot}$  BH  
( $P_{\text{orb}}=186\text{days}$ ) at  $d=477\text{pc}$   
eccentricity  $\sim 0.45$



El-Badry et al.  
MNRAS  
518 (2023)1057

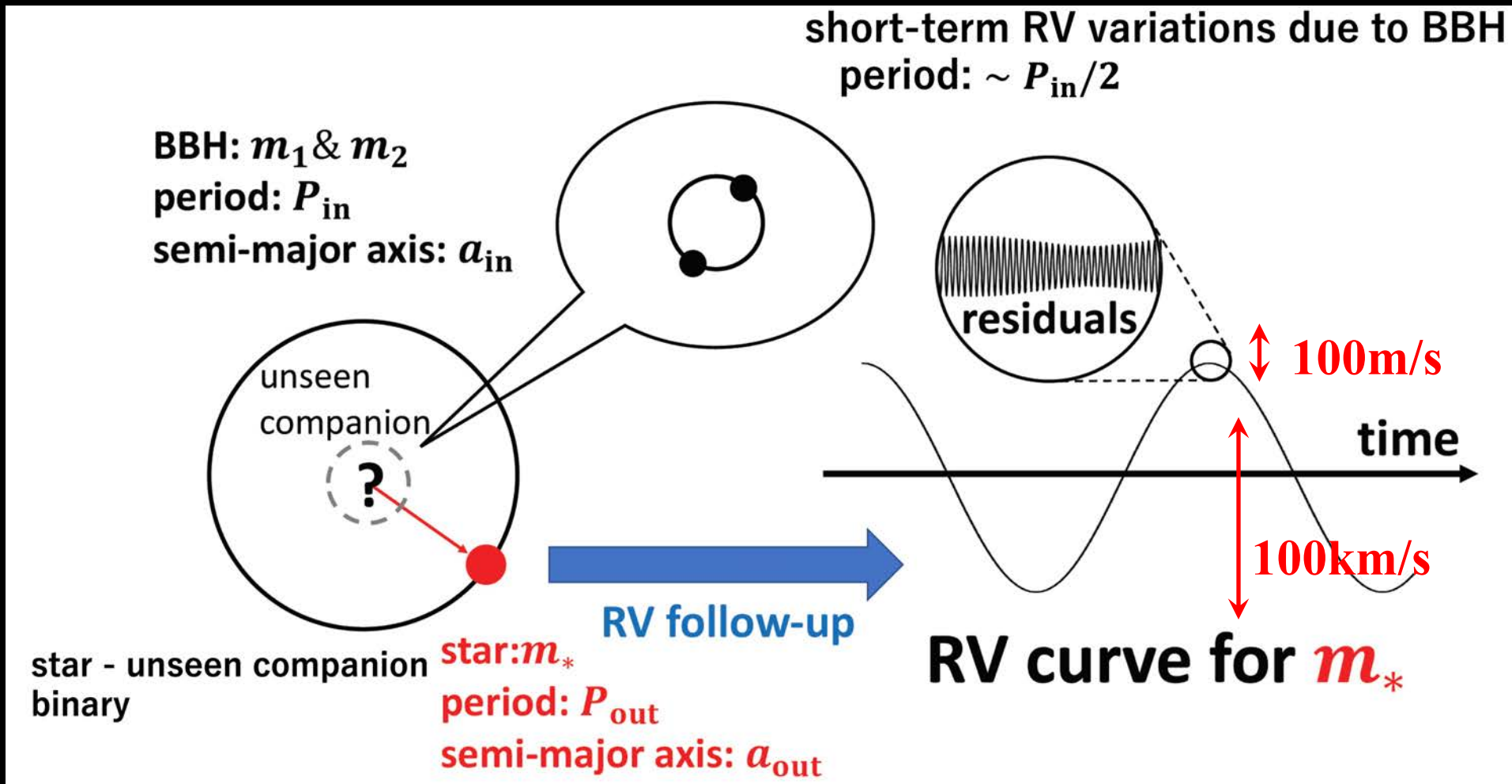
# Gaia BH-2

1  $M_{\odot}$  red giant + 9  $M_{\odot}$  BH  
( $P_{\text{orb}}=1277$ days) at  $d=1.16$ kpc  
eccentricity  $\sim 0.52$



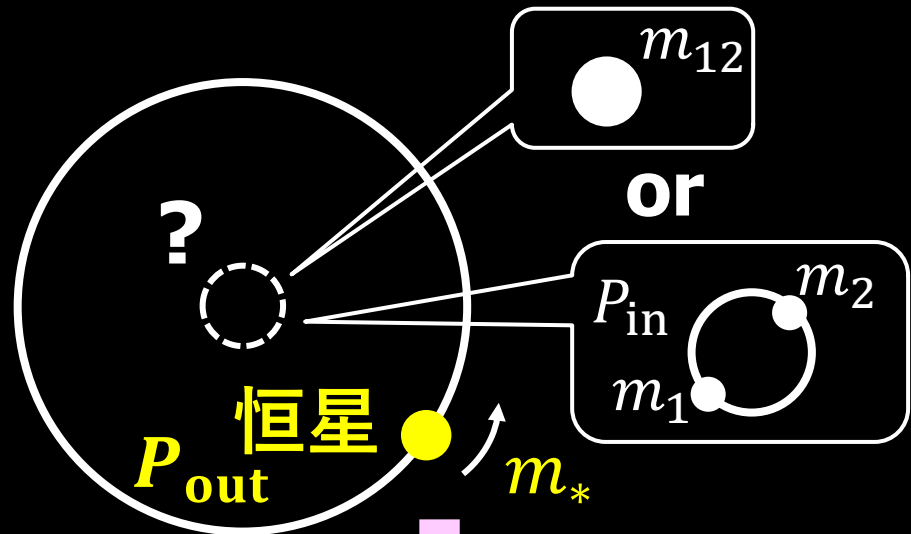
El-Badry et al.  
arXiv:2302.07880

# BH連星+恒星からなる三体系の理論モデル

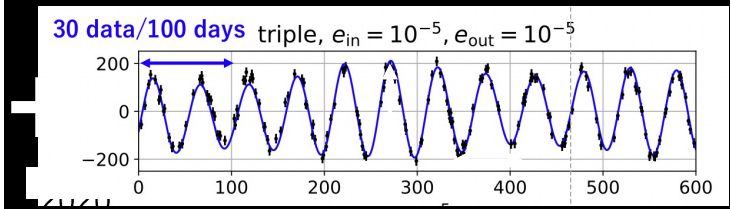
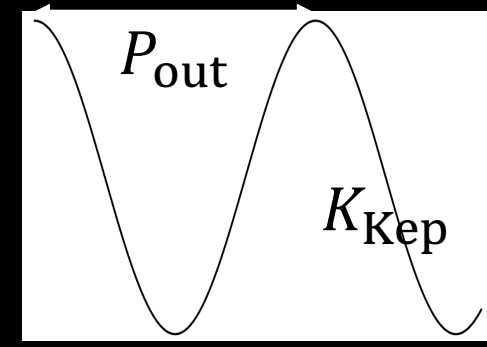


同一軌道面の場合の力学モデル: Hayashi, Wang & YS 2020, ApJ 890, 112  
斜交軌道面の場合の力学モデル: Hayashi & YS 2020, ApJ, 897, 29

# BH連星の周りの恒星の動径速度変動



(i) 同一軌道面 3 体系 振幅  $\sim K_{Kep} \left( \frac{P_{in}}{P_{out}} \right)^{\frac{7}{3}}$



ケプラー運動

周期  $\sim P_{in}/2$

+ 短周期動径速度変動 (BH連星による摂動の効果)

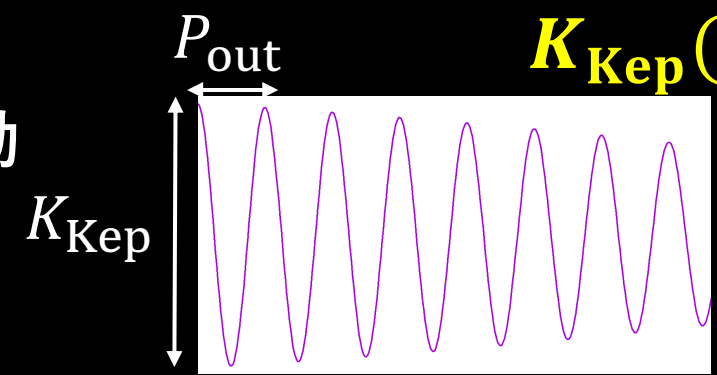
高精度動径速度モニター観測

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

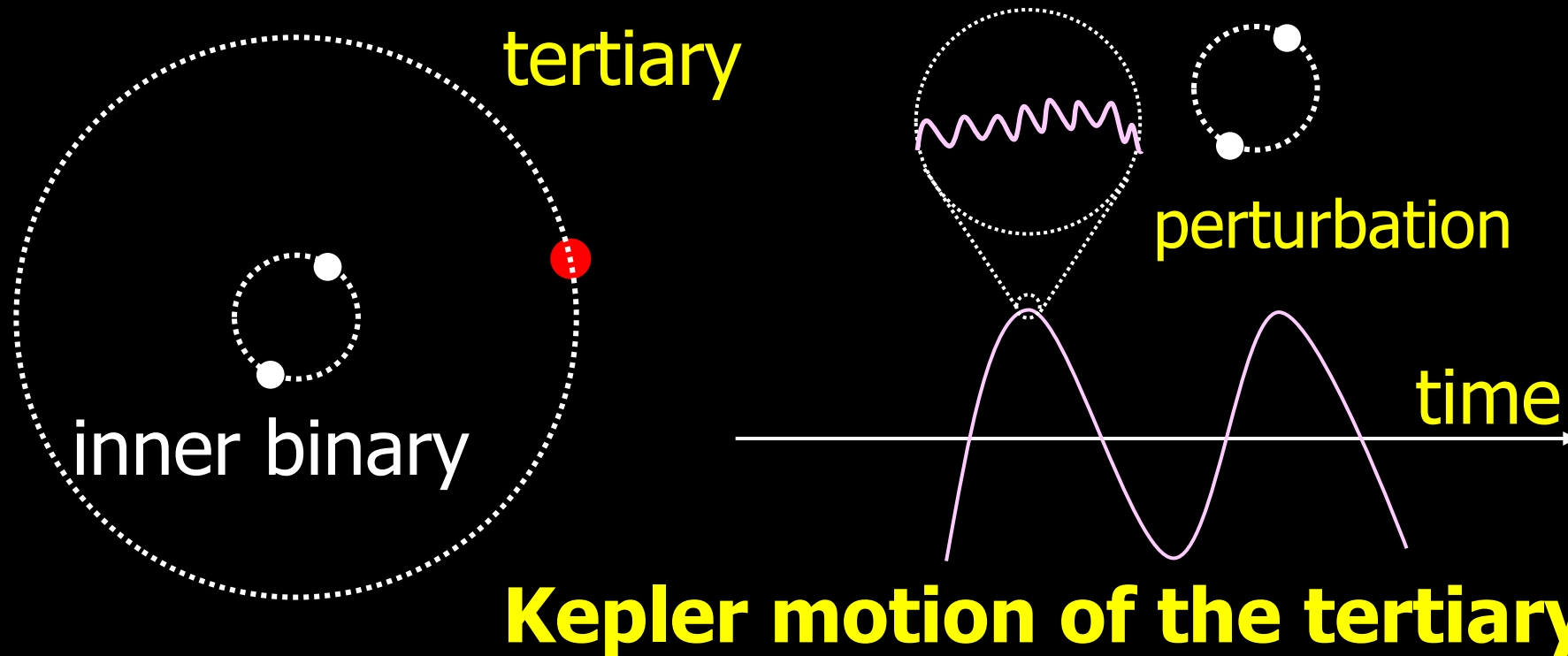
$$K_{Kep}(t) = K_0 \sin I_{out}(t)$$



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



# Short-term Radial velocity modulation of a tertiary star due to an inner binary



## Kepler motion of the tertiary

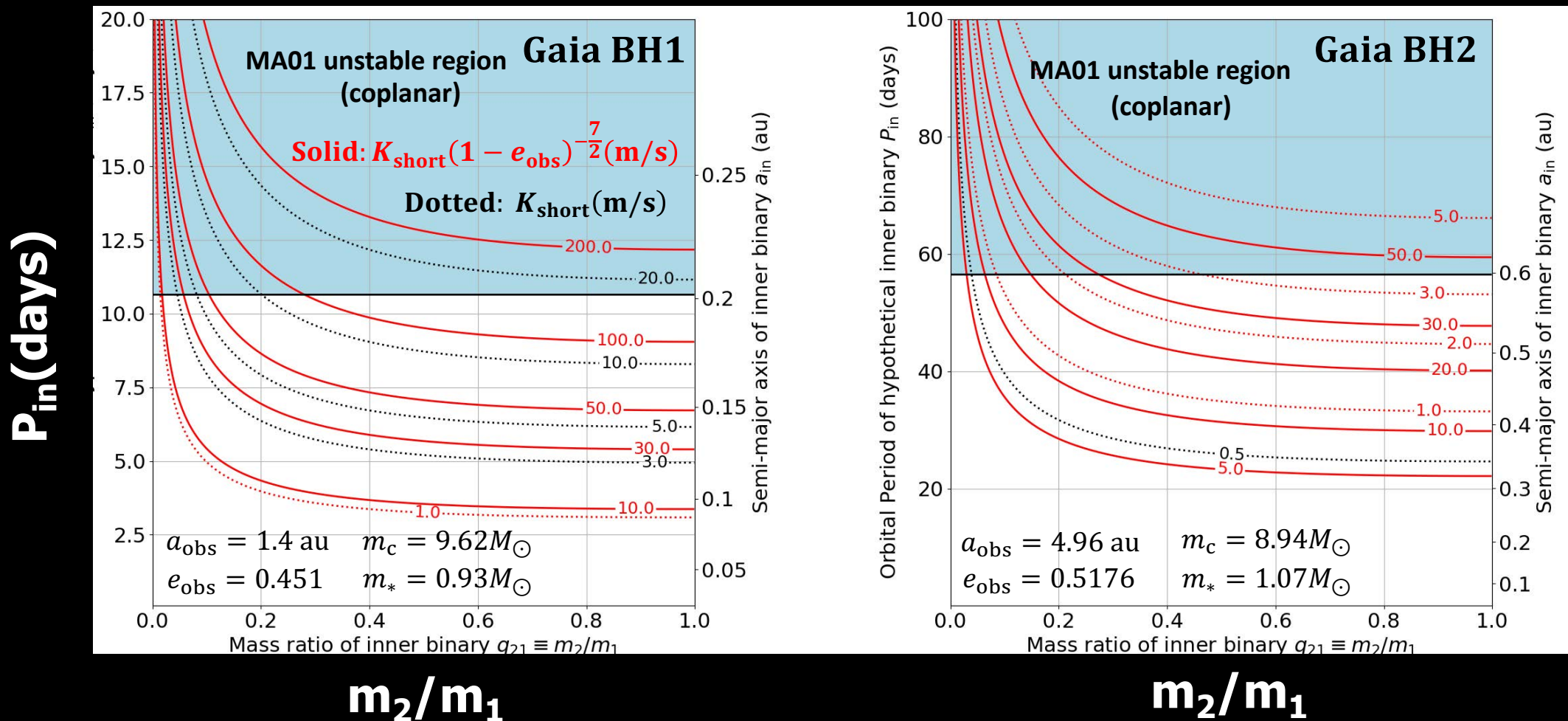
Hayashi, Wang + YS: ApJ 890(2020)112

Hayashi + YS: ApJ 897(2020)29

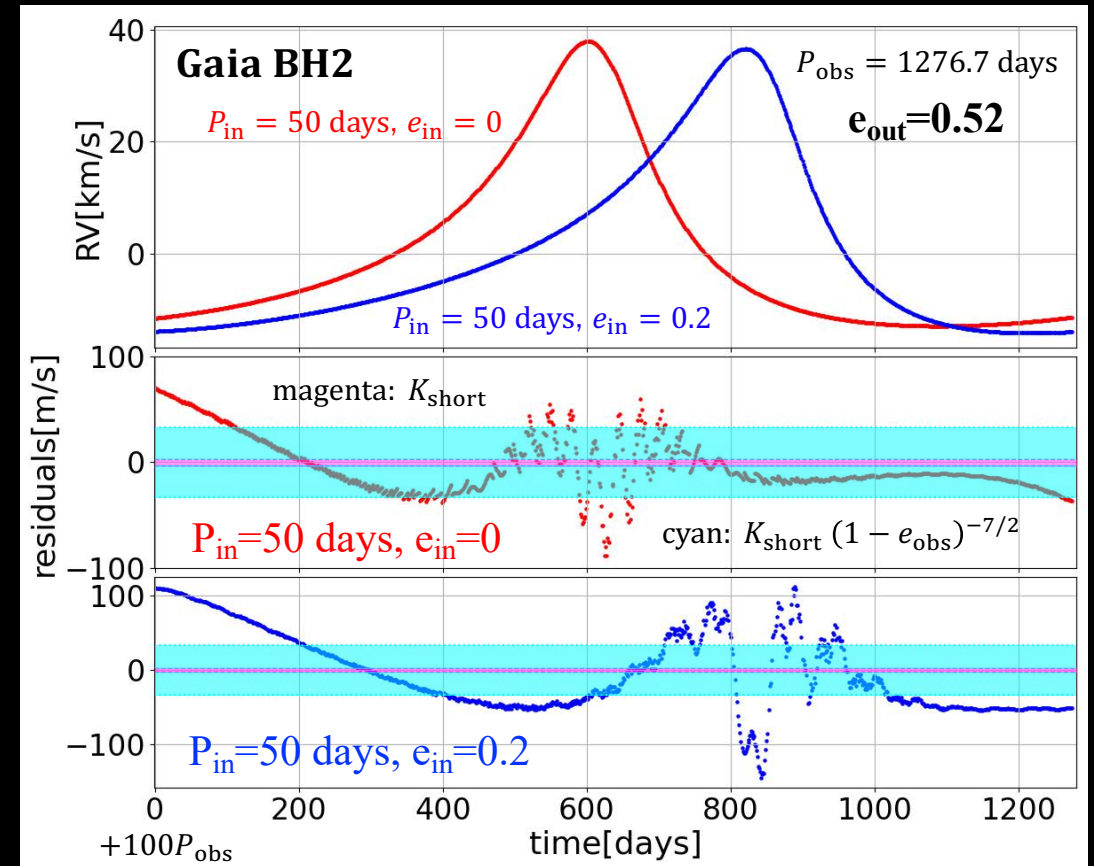
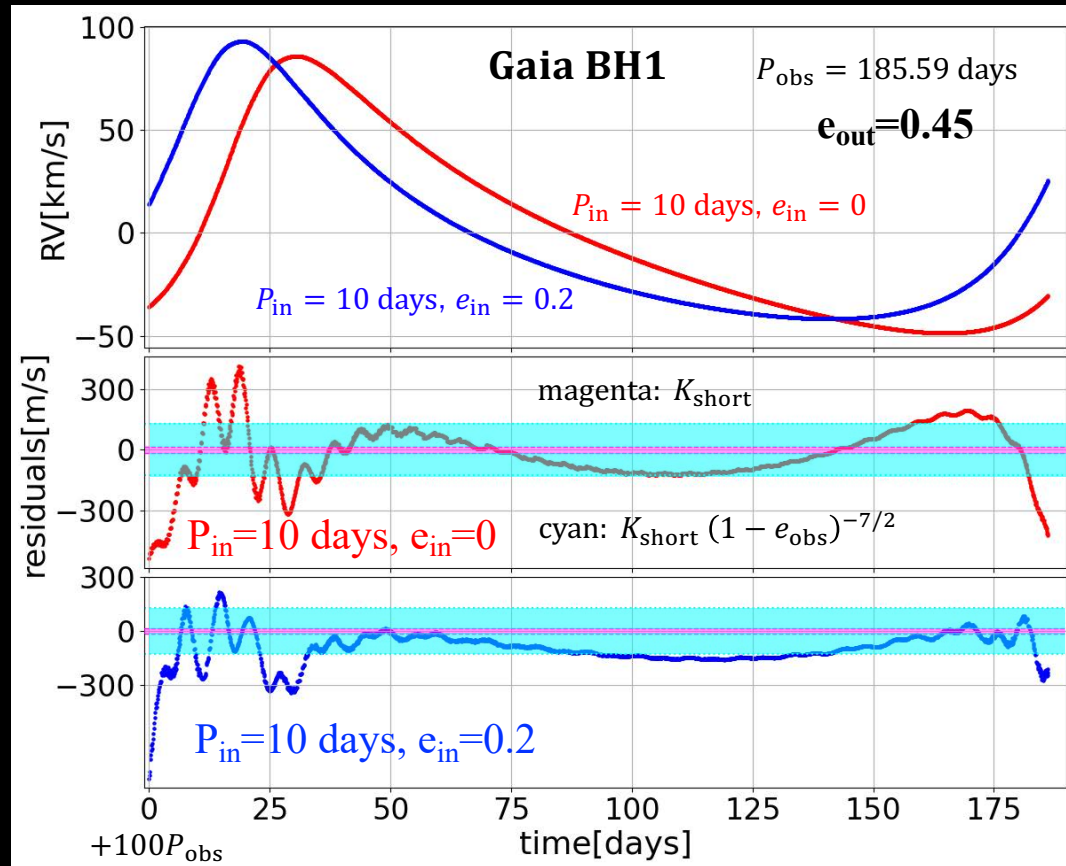
Hayashi, YS + Trani (2023): arXiv:2307.01793

# Short-term RV modulations expected from analytic approximation (coplanar + circular tertiary)

Contours of expected semi-amplitudes of short-term RV modulations:  
~ (1-100) m/s for coplanar outer orbits (Hayashi, YS + Trani 2023)

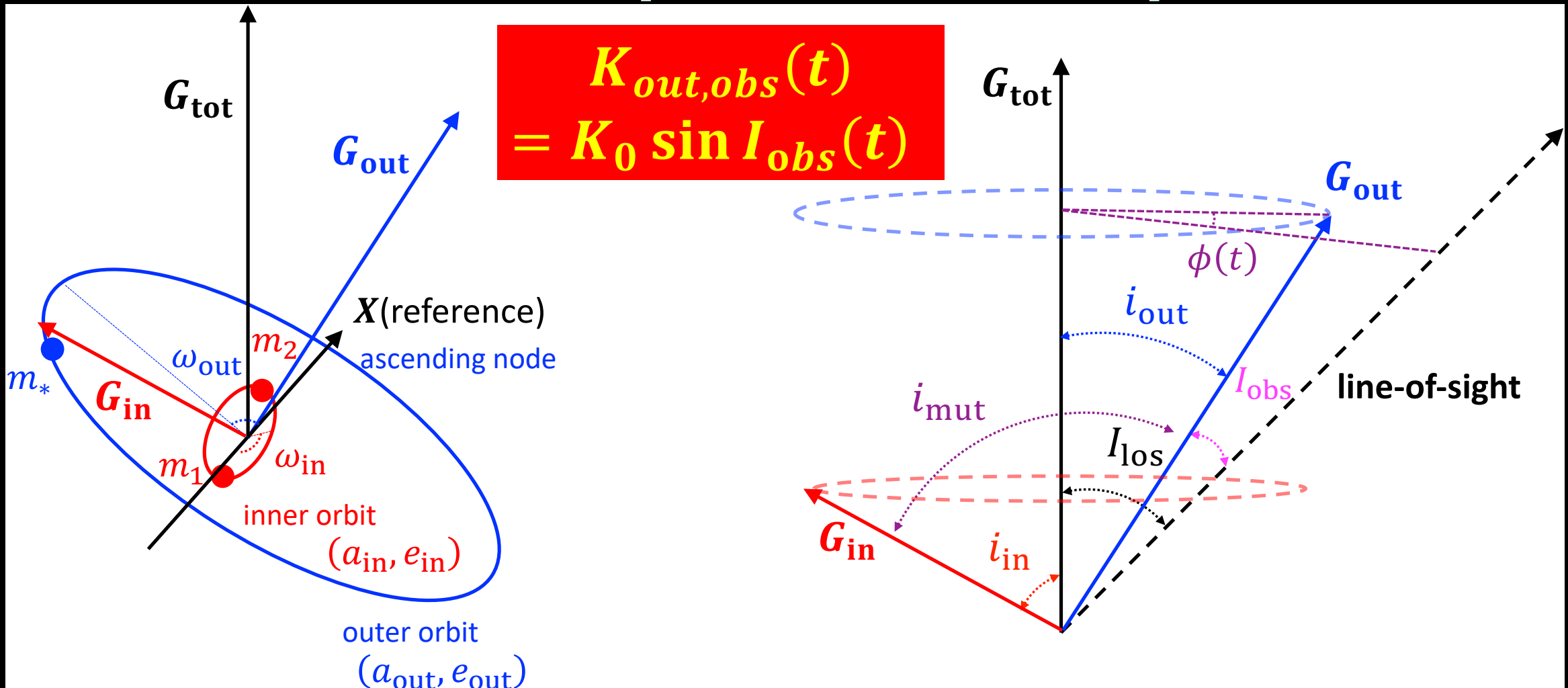


# Short-term RV modulations from direct three-body simulation (coplanar + tertiary with observed eccentricity)



- Due to the outer eccentricity, the amplitude of the short-term RV modulations becomes (10-100) times larger at the pericenter passage than the analytic estimate for circular outer orbits

# Long-term RV modulations due to nodal precession and ZKL (von Zeipel-Kozai-Lidov) oscillations for non-coplanar inclined triples



# Evolution of inclination for non-coplanar triples

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

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

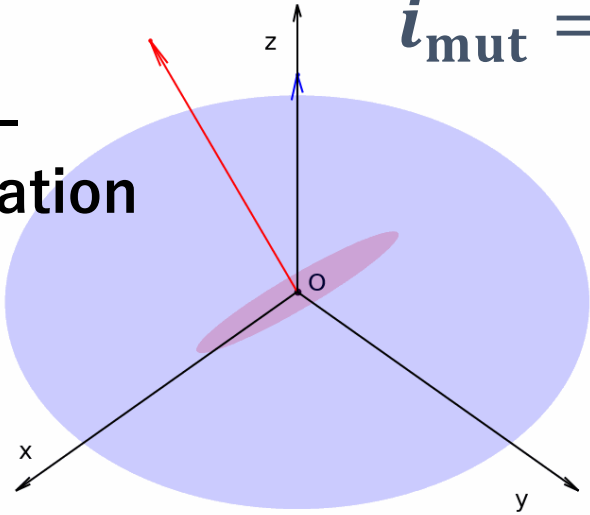
$i_{\text{mut}} = 45^\circ$

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

strong Kozai-Lidov oscillation

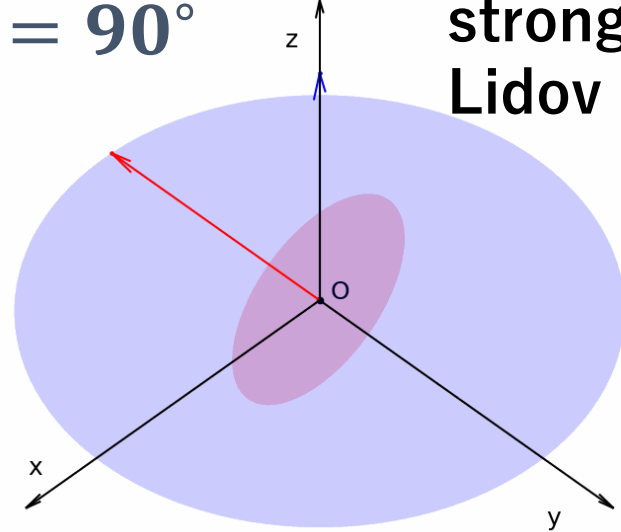
weak Kozai-Lidov oscillation

⇒ small-amplitude nodal precession



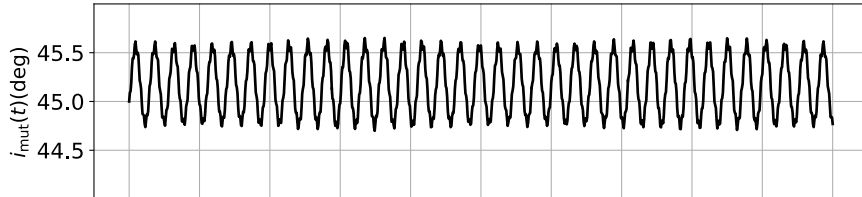
Hayashi + YS: ApJ 897(2020)29

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

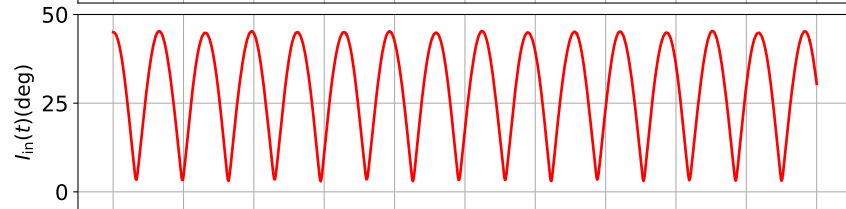


⇒ large-amplitude sporadic precession

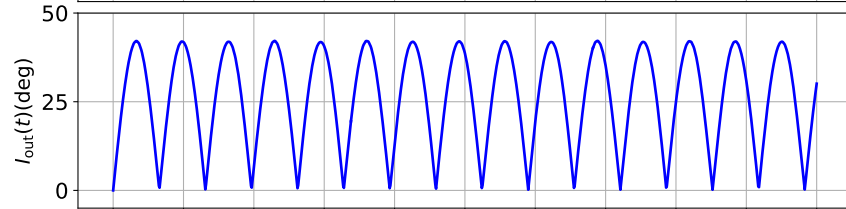
$i_{\text{mut}}(t)$



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

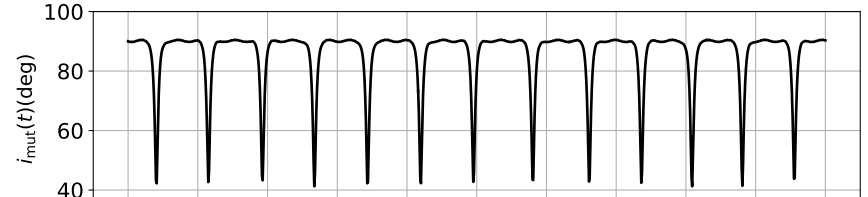


$I_{\text{out}}(t)$

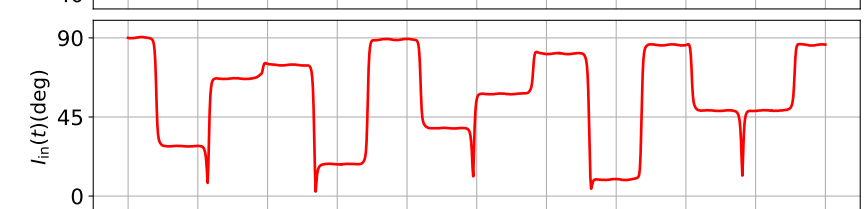


$t/P_{\text{out}}^{(0)}$

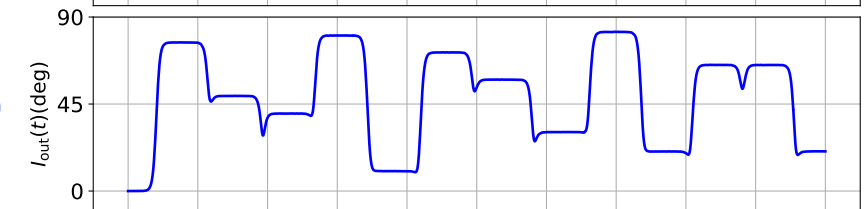
$i_{\text{mut}}(t)$



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

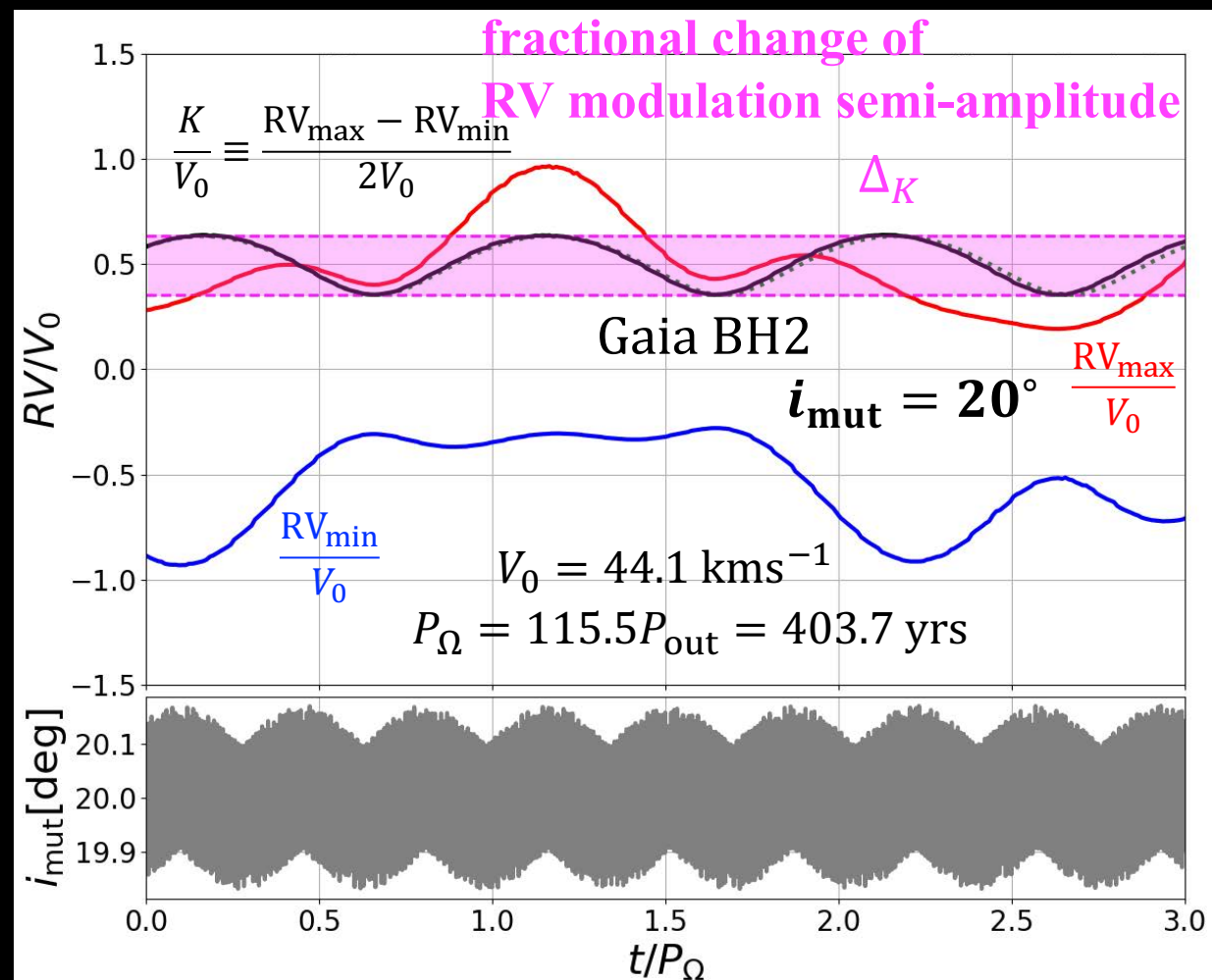
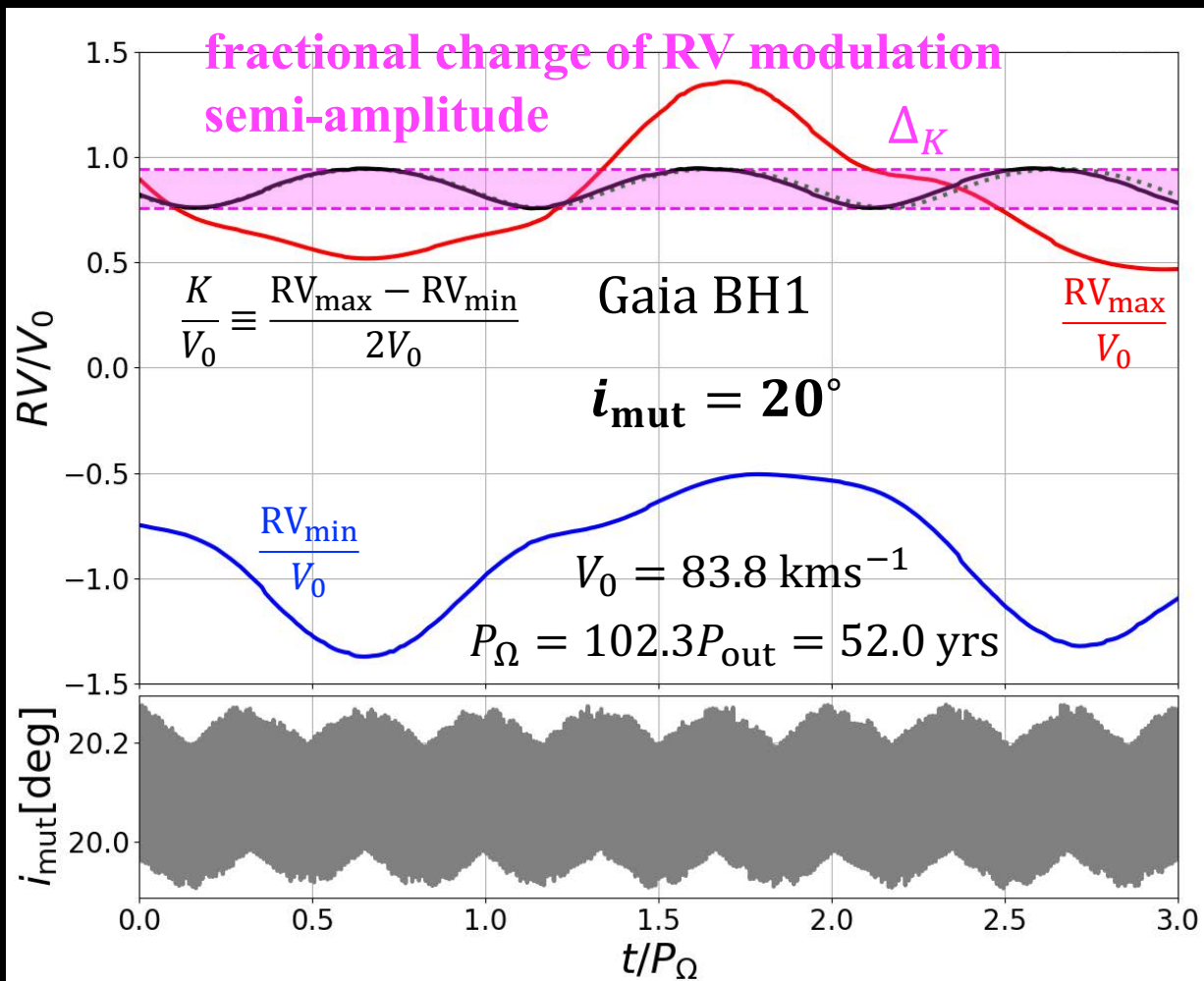


$I_{\text{out}}(t)$



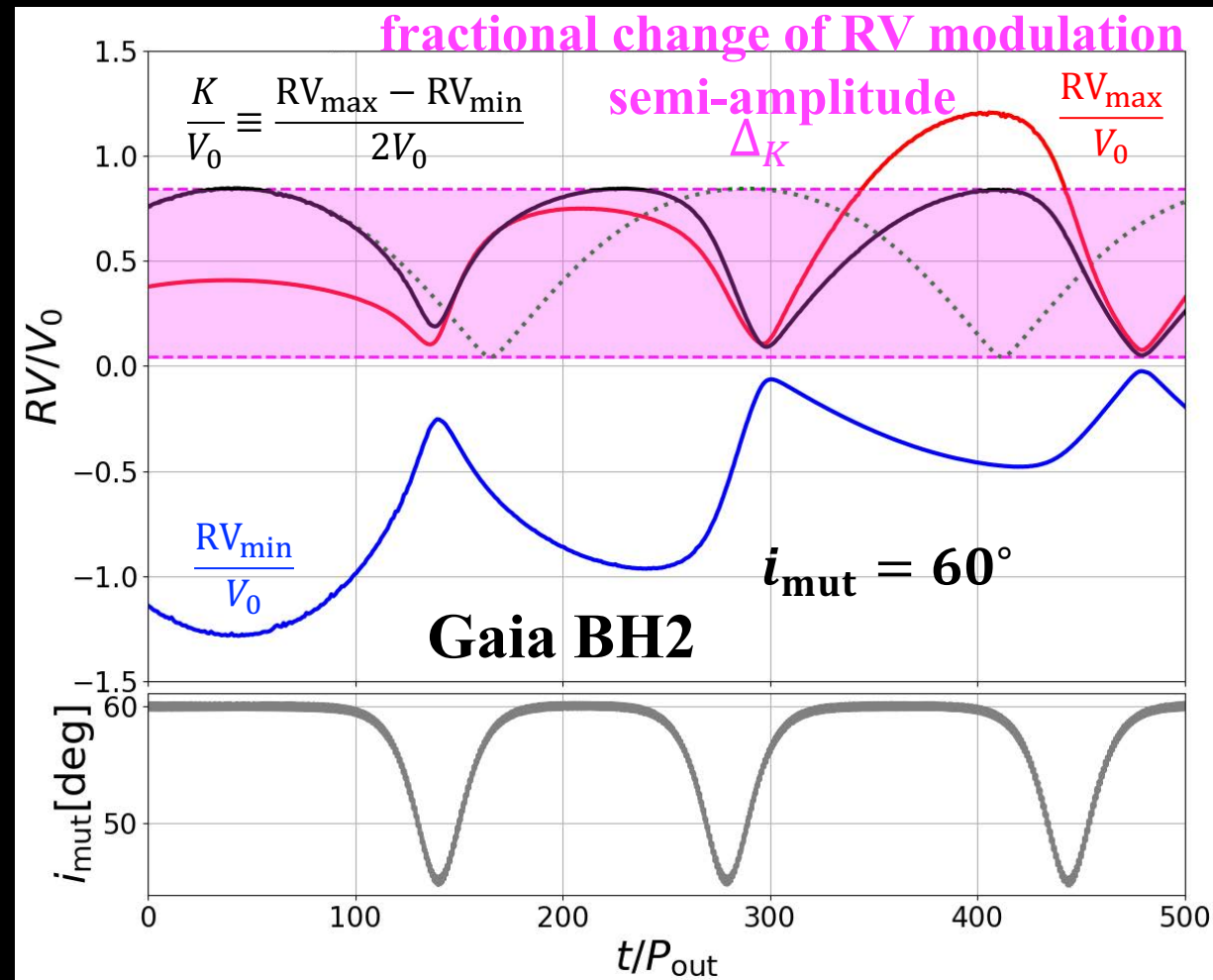
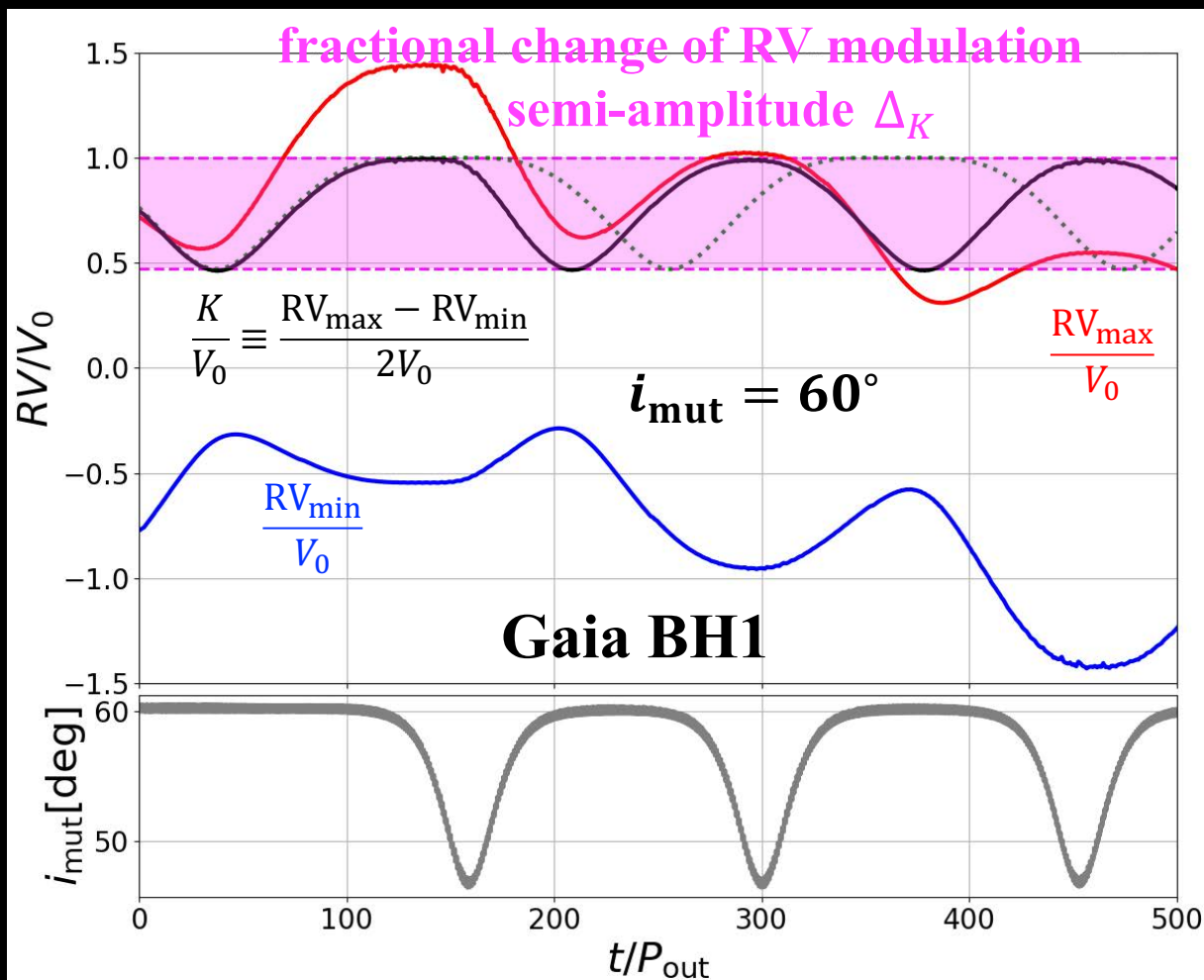
$t/P_{\text{out}}^{(0)}$

# Long-term RV modulations due to nodal precession ( $i_{mut} = 20^\circ$ )

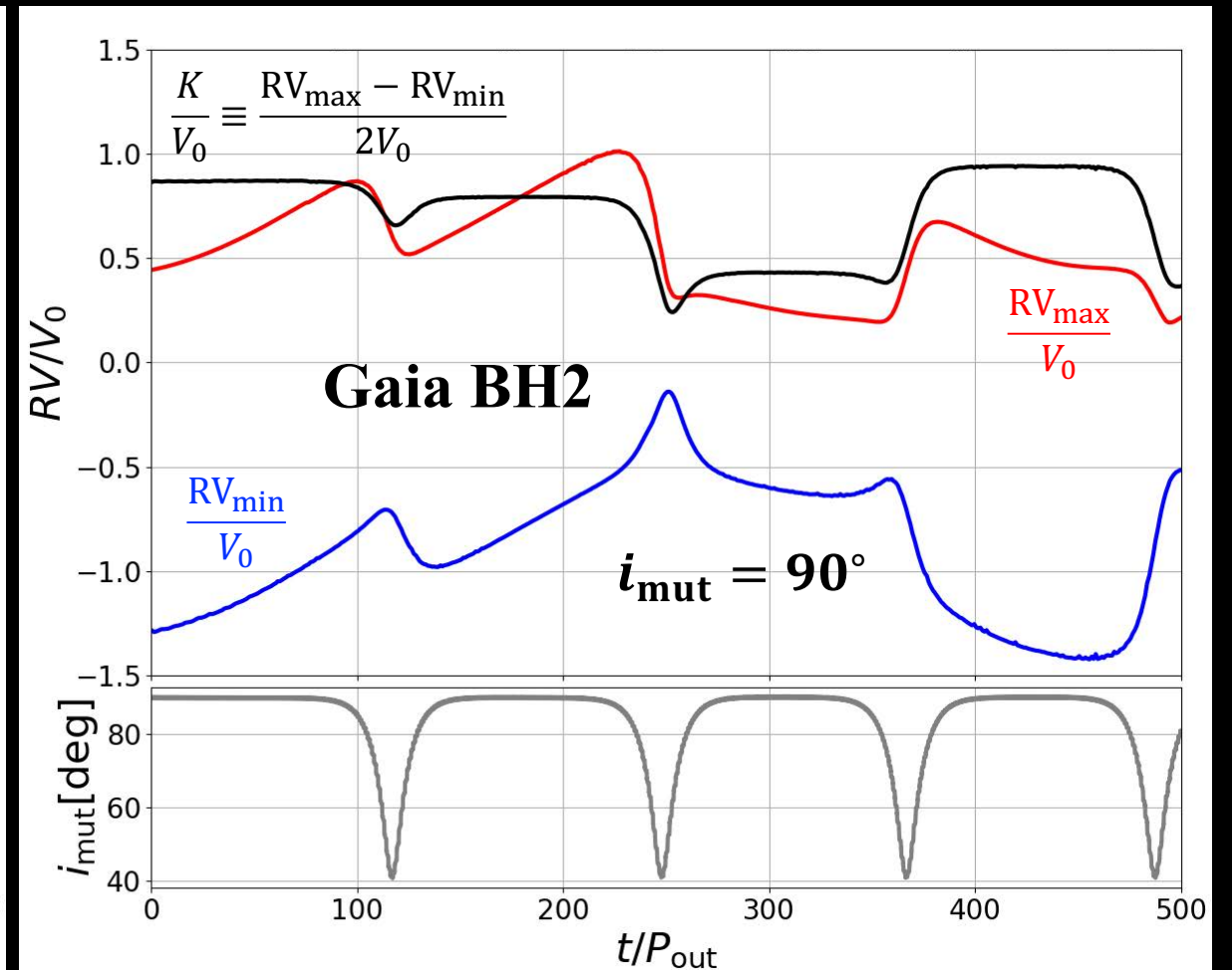
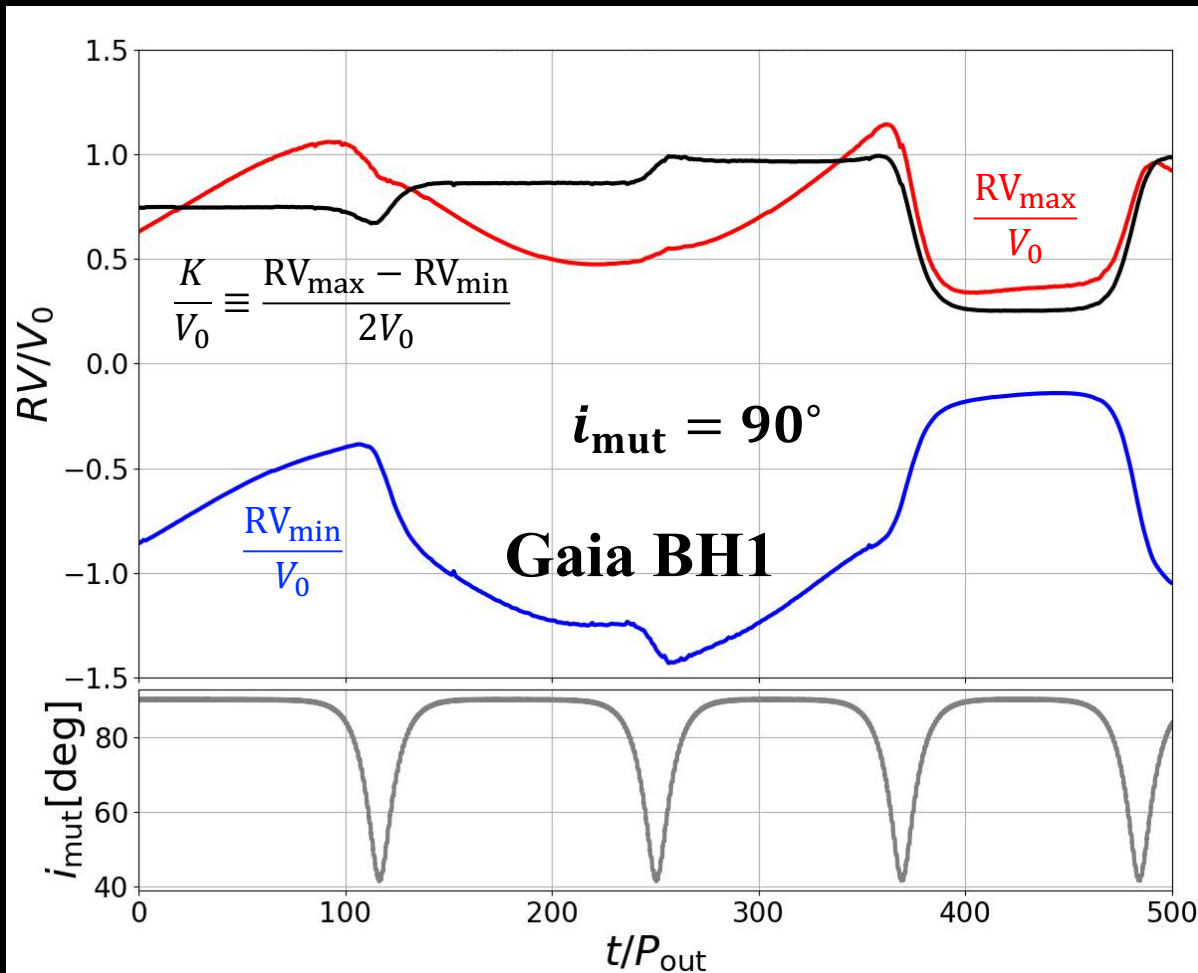


Hayashi, YS + Trani (2023)

# Long-term RV modulations due to moderate ZKL oscillations ( $i_{mut}=60^\circ$ )



# Long-term RV modulations due to strong ZKL oscillations ( $i_{mut}=90^\circ$ )



Hayashi, YS + Trani (2023)



# 6 まとめ

# 宇宙物理学の研究人生から得た個人的教訓

## ■ 数学的自然法則の解はすべてこの宇宙のどこかで実在する！

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（ひょっとすると厳密に）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



# 結論

- 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）
- ブラックホールは本当にブラックだった
  - ただしブラックホールを中心にもつ天体そのものは、宇宙でもっとも明るい種族である
- 天文学はこのダーク成分の正体を明らかにし、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"