銀河系中心ブラックホール
の相対論効果の測定

斉田浩見

この研究に至るまで

```
¥begin{tabular}{lcl}
1988年（昭和63年）4月 &：& 東京農業大学第二高等学校 入学 ¥¥    （←群馬県）
1991年（平成 3年）3月 &：& 東京農業大学第二高等学校 卒業 ¥¥   浪人
1992年（平成 4年）4月 &：& 京都大学 理学部 入学（当時，理学部に学科なし） ¥¥
1997年（平成 9年）3月 &：& 京都大学 理学部 卒業（主として物理学を修める） ¥¥   院浪
1997年（平成 9年）4月 &：& 京都大学大学院 人間・環境学研究科 修士課程、¥¥
                          &  & 人間・環境学専攻 自然環境論講座（宇宙論研究室） 入学 ¥¥
1999年（平成11年）3月 &：& 同大学院、学位 修士（人間・環境学）取得 ¥¥
              &  & 論文題名 「Black hole radiation with high frequency dispersion」 ¥¥
1999年（平成11年）4月 &：& 同大学院、同講座、博士課程に進学 ¥¥
2002年（平成14年）3月 &：& 同大学院、学位 博士（人間・環境学）取得 ¥¥
              &  & 論文題名 「Hawking radiation in an expanding universe」
¥end{tabular}
¥begin{tabular}{lcl}
2001年（平成13年）4月 &：& 日本学術振興会 特別研究員 DC2 ¥¥
              &   &（於：京都大学 人間・環境学研究科 宇宙論研究室）¥¥
2002年（平成14年）4月 &：& 日本学術振興会 特別研究員 PD ¥¥
              &   &（於：大阪市立大学 理学研究科 宇宙物理（重力）研究室） ¥¥
2003年（平成15年）4月 &：& 大同工業大学（現，大同大学）教養部 物理学教室 講師 ¥¥ ←30歳以下理論
2008年（平成20年）4月 &：& 同 准教授 ¥hspace{70mm} 現在に至る
¥end{tabular}
```

一般相対論
曲がった時空上の場の量子論
↓
相対論＋量子論＝？
BH熱力学の切り口

阪上さんの言葉など

○ 博士課程進学後：
Tsallis 統計で自己重力系ってどう？　→　即座に断ってしまった

○ 学位取得時の言葉：

斉田くんは過去の研究の流れなどあまり考えず、突然自分の思い付きを言う。
斉田くんが評価を受けるとしても、それには時間がかかると思うよ。
公募書類は、出せるものはどんどん出しなよ。
（→　その教えを守って、PDを1年だけで就職できました。）

10年くらいしたら、きっと何か思うときが来ると思う。
そこが勝負どころになるかもしれないので、頑張れよ。←僕の京大去り際に
初めてエールの言葉？

院生～2011年： **一般相対論 × 曲がった時空上の場の量子論 × 熱力学・統計力学の基礎論**

でごちゃごちゃやって・・・

・Entropy13(2010)1611-1647 ← invited by J.Bekenstein

"Universal Property of Quantum Gravity

implied by Uniqueness Theorem of Bekenstein-Hawking Entropy"

→ **重力は原子スケールで引力ではない（ポテンシャルに下限がある）はず**

→ BH熱力学のアプローチで分かる量子重力の性質はこれが最高レベルだろう

（僕の個人的見解ですが）

・南部さんの酒飲み指導 at 福岡、イカの活け造り（甘くて美味い！）食べながら

2011～2013： **BHを見ようかな！？**（冨松さん、高橋さんのBH磁気圏の話しにも影響されて）

・因果的散逸流（犬塚さん）・・・手で解きたいけど難しすぎる >_<

・BH降着流、鉄輝線、シャドー・・・うーん今から参入する気にも・・・

・シンプルに相対論でBHに迫りたい

・電波天文観測、可視・赤外天文観測の方々と交流始まる

2013～現在 ： **我々の銀河中心の巨大BH候補天体！**

・赤外天文観測の研究者（西山さん）と組む

・2013年、すばるにプロポーザルを出し始める：理論の部分を書く

・2014～現在、すばるを使った研究

ほんとに学位とって10年で思うところが来ました。
そして今，勝負所かなと感じています。

この2日間で思ったこと：

・僕も15年後に、前向きに還暦を
迎えられるようになりたいと思います。

・今後もよろしくお願いします。

GC巨大BH候補天体のGR効果と質量の高精度測定へ向けて２
– GR and BH by Subaru Telescope –

SAIDA Hiromi (Daido Univ.) / 斉田浩見 (talk)

NISHIYAMA S. (Miyagi U. Edu.) / 西山正吾

+ Takahashi M. /高橋真聡
Takamori Y. /孝森洋介
Supporters of S.N.
Students of S.N.

- QG colloquium, 2017.07.24
- 日本物理学会，2017.09.12–15 (talk on 12)

List of members :

observaion & data analysis	theory & data fitting
S.Nishiyama/西山 正吾	H.Saida/斉田 浩見
His supporters/解析協力者†	Y.Takamori/孝森 洋介
His students/西山研の学生	M.Takahashi/高橋 真聡

† R.Schödel, F.Najarro, S.Hamano, M.Omiya, T.Motohide, M.Takahashi, H.Gorin, S.Nagatomo, T.Nagata

1. Introduction

- Sagittarius A* (**Sgr A***, いて座Aスター)

$\rightarrow$ Super-Massive Black Hole (SMBH) candidate at our Galactic Center (GC) – Ref: Gillessen et al 2017 –

Mass :	$M_{\rm SgrA} \simeq 4.43 \times 10^6\, M_\odot$ (3% error)
Spin :	$a_{\rm SgrA} \cdots$ no consensus
Distance :	$D_{\rm SgrA} \simeq 8.41$ kpc (1.5% error)

$\rightarrow$ Present estimations are obtained by Newtonian fitting of stars orbiting Sgr A*.

$\because$ Data of low precision for detecting GR effects

- So far, no GR evidence for the existence of the SMBH at GC/Sgr A* is obtained.

Our Issue

Detection and Test of the GR effects with the gravity of the Galaxtic SMBH/Sgr A*.

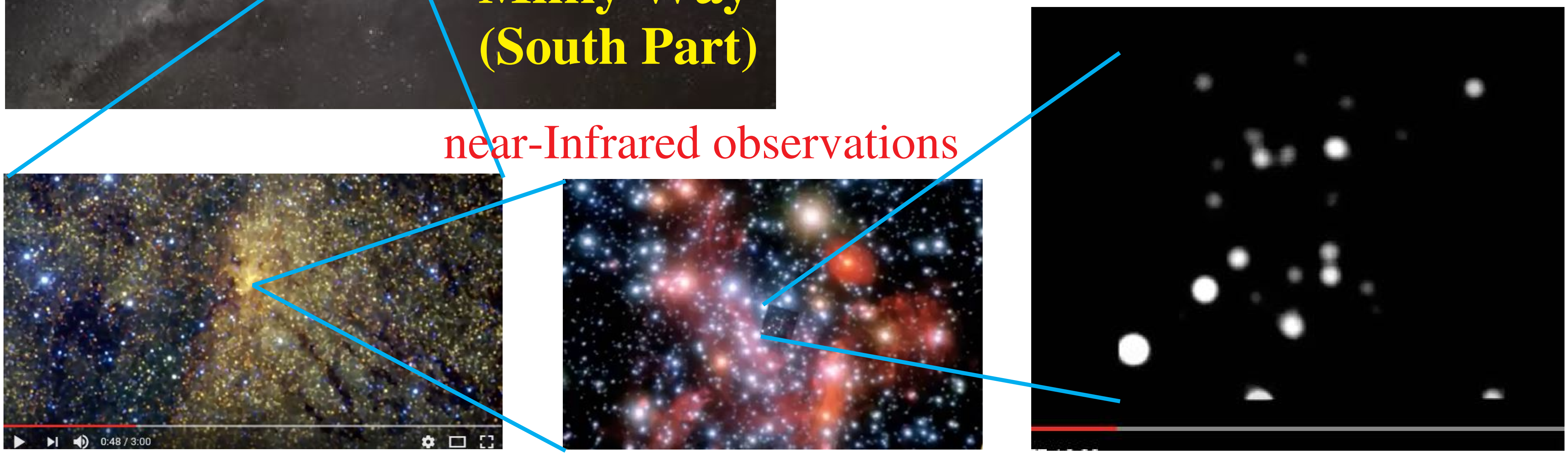
$\rightarrow$ As the probe of Sgr A*'s gravity, we observe a star orbiting Sgr A*.

2. Our Approach

2.1 Observation target : S2/S0-2

- ex. of observational evidence

Towards the Galactic Center
Stars Orbiting Sgr A*
by ESO, Gillessen & Genzel



• Newtonian fitting, 16 years data. (Test particles!)

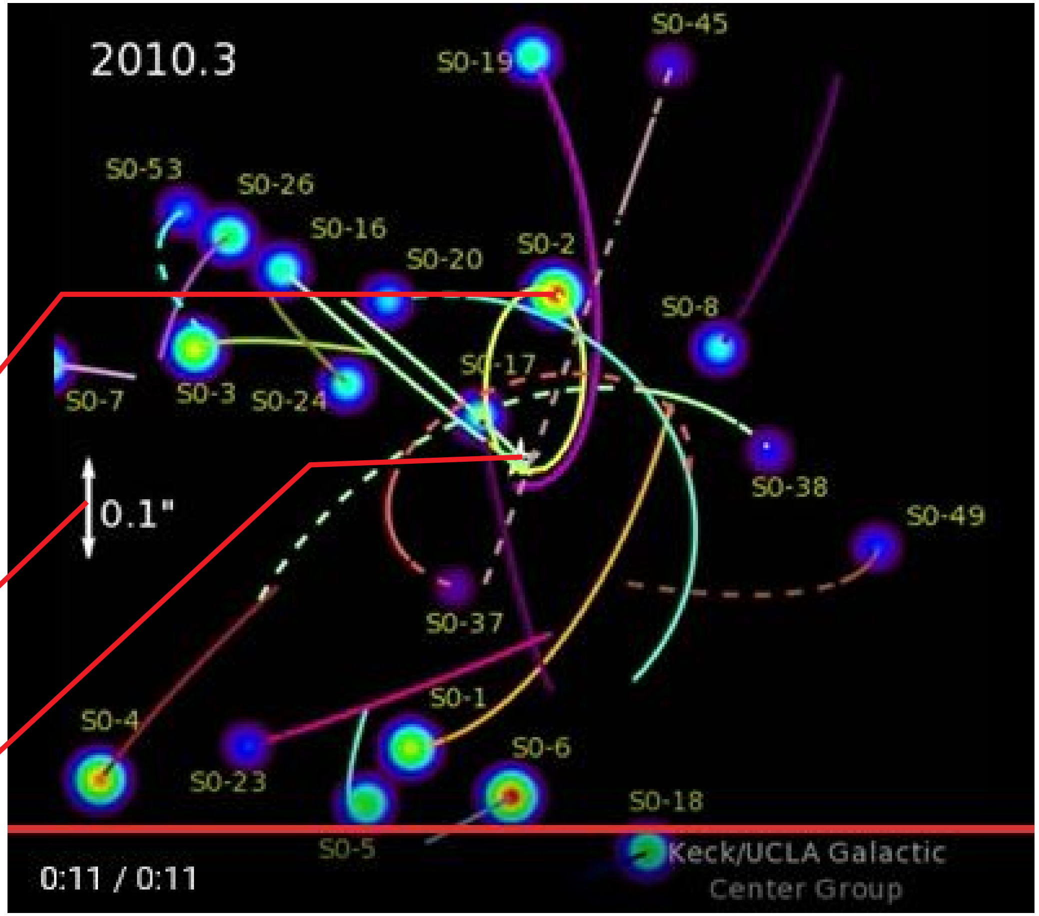
S-stars

Newtonian fitting with IR obs. data by Keck/UCLA

S0-2 (S2)

length $\sim 10^3$AU

Sgr A*

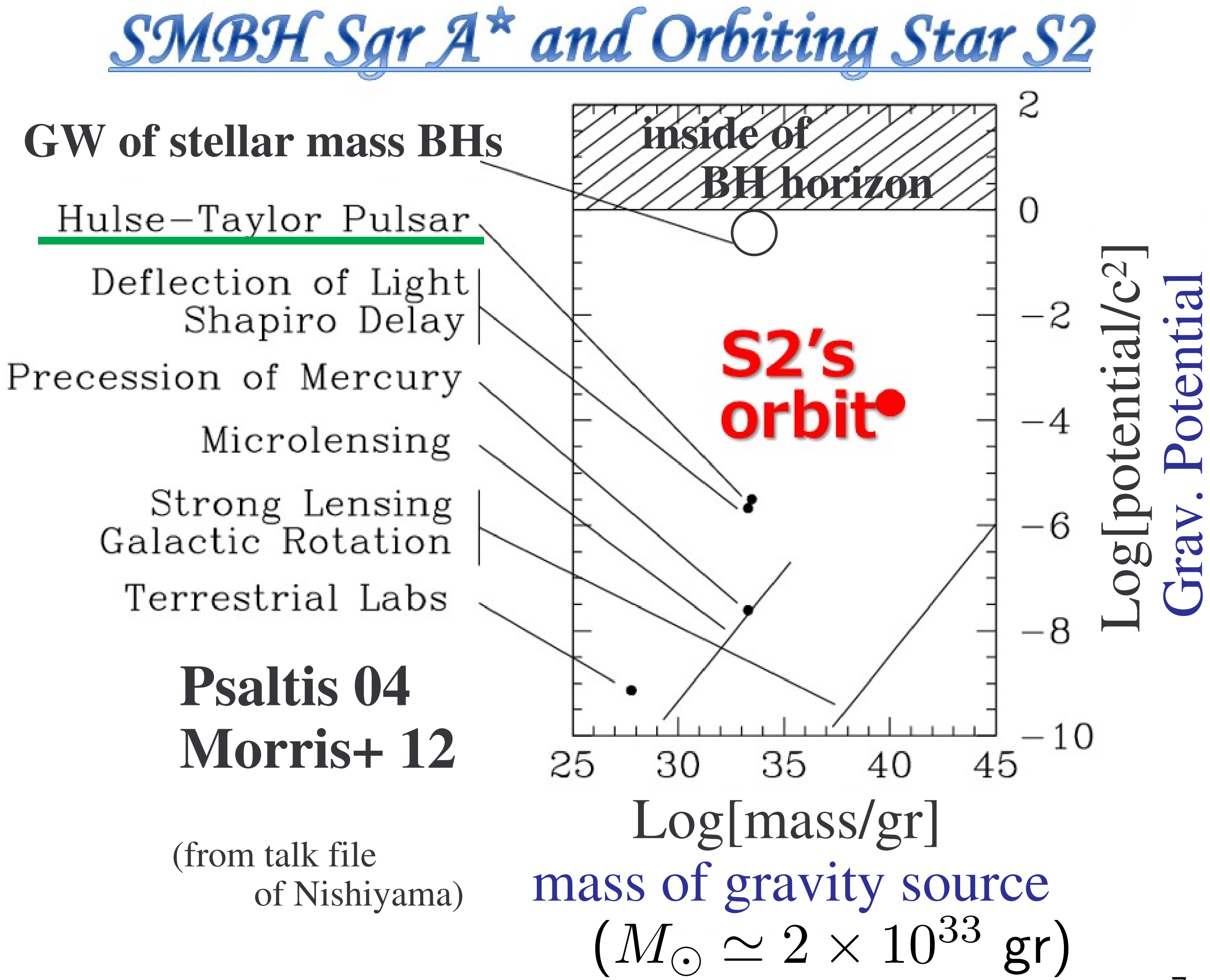


Some stars, called **S-stars**, orbiting Sgr A* have been recognized by Newtonian fitting of obs. data.

- S0-2 (**S2**): Near Pericenter (近点が近い)

$\rightarrow$ Pericenter distance $\simeq 100$ AU $\simeq 10^3 \dfrac{GM_{\rm SgrA}}{c^2}$

S2 at pericenter experienes the strongest grav. potential ever observed by photons.



(from talk file of Nishiyama)

- S2's important evidences

◇ Test particle analysis (S2 in Sgr A*'s gravity) and Newtonian fitting goes well within the error-bars of current observational data.

◇ The strongest gravitational potential ever observed by photons is expected at S2's pricenter, 2018.

↑ **The Main Event!**

$\Downarrow$

S2 as a good probe of strong grav.

S2 will provide us with the strongest GR effects (in photon obs.) by simple GR calculations.

2.2 Obs. quantity

Photo by Sean Goebel —

- Our obs. quantity:
  Redshift z of Infra-Red photon from S2

$$z := \frac{\lambda_{\rm obs}}{\lambda_{\rm S2}} - 1$$

◇ **Subaru telescope** is good for high precision obs. of z.

↔ US and Europe (Germany) groups seem to focus on high precision obs. of S2's position.

my photo —

- GR effect observed by Subaru telescope:

$$\boxed{\Delta z := z_{\mathrm{Einstein}} - z_{\mathrm{Newton}}}$$

$$\text{where} \begin{cases} z_{\mathrm{Einstein}} & = z \text{ calculated in GR} \\ z_{\mathrm{Newton}} & = z \text{ cal. in Newtonian grav.} \end{cases}$$

◇ GR-redshift z_{Einstein} is composed of

- ○ Timelike geodesic of S2 orbiting Sgr A*
- ○ Null geodesics of photons from S2 to us

in Kerr spacetime.

◇ Current status of my calculation $(c\,,\,G = 1)$:

$\rightarrow$ PN $+\ \alpha$ (to next page)

$\rightarrow$ S2 motion by GR, but photon path by SR

$$\because \begin{cases} \text{BH spin effects on } z < \text{Subaru's resolution} \\ \text{Light bending effects on } z < \text{Subaru's resolution} \end{cases}$$

(Angélil and Saha, 2010)

$$z_{\rm Newton} = v_{\rm S2//} \leftarrow \text{"Radial" (line of sight) velocity}$$

$$z_{\rm Einstein} = \frac{\lambda_{\rm obs}}{\lambda_{\rm S2}} - 1 \simeq \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{2M_{\rm SgrA^*}}{r_{\rm S2}}}} \frac{1 + v_{\rm S2//}}{\sqrt{1 - v_{\rm S2}^2}} - 1$$

$$\simeq v_{\rm S2//} + \frac{1}{2}\left[\frac{2M_{\rm SgrA^*}}{r_{\rm S2}} + v_{\rm S2}^2\right] \qquad \leftarrow \text{PN form}$$

with some corrections to the PN $\cdots$

with some corrections to the PN:

- r_{S2} and $v_{\mathrm{S2(ZAMO)}}$ given by the timelike geodesic of S2, not by the PN orbit of S2.
- Change of photon's travel time (on the straight orbit) due to the motion of S2 (Römer effect)
- Count the leap years (for planning Subaru obs.)

$$\Downarrow$$

Following numerical results:

- made under the above approximation.
- I.C. at the previous apocenter (in 2010) read from Gillessen et al 2017.

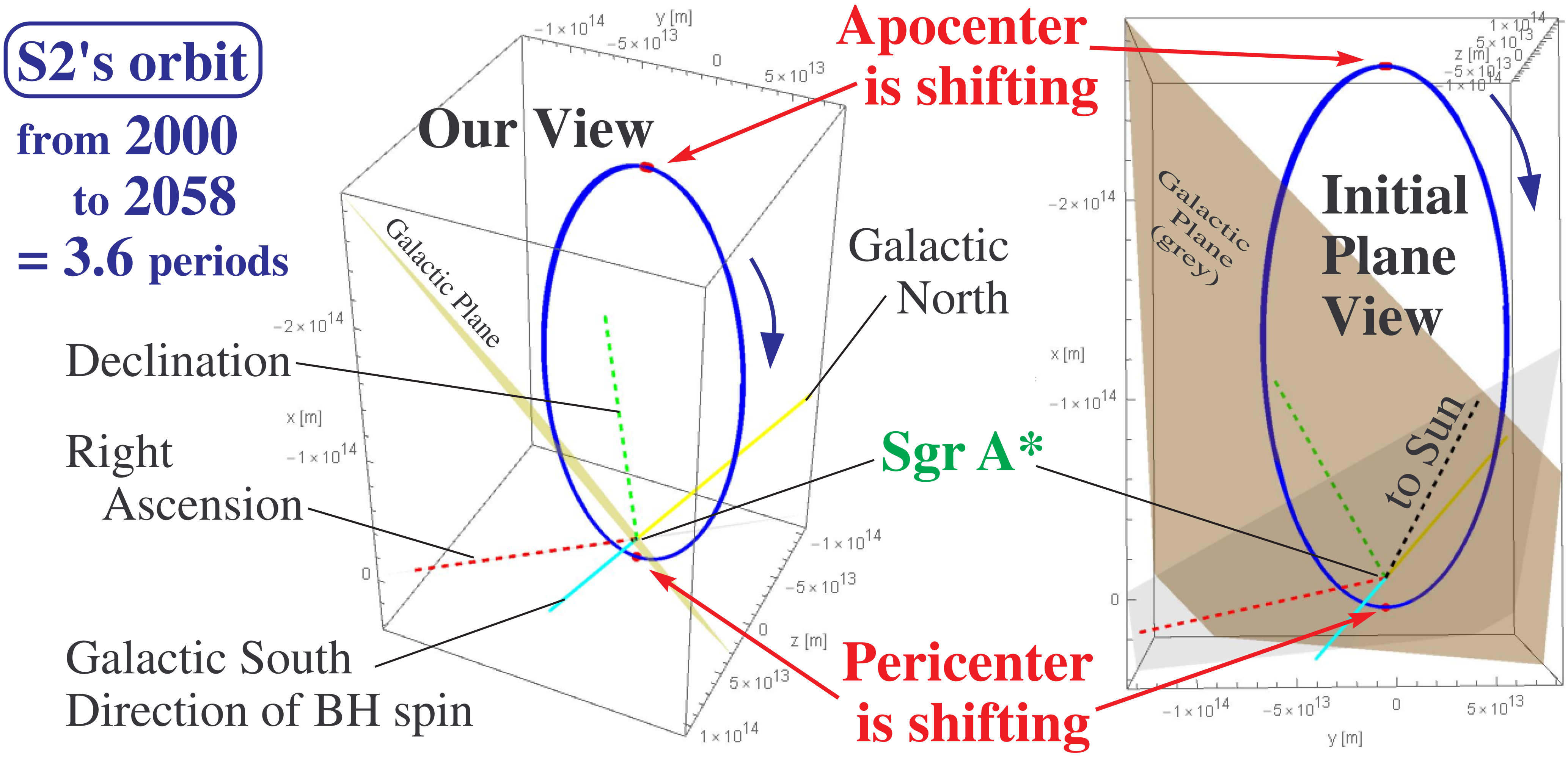
3. For Main Event in 2018

3.1 Theoretical estimations

- Predictions with our GR calculation:
  - made under the previous approximation.
  - I.C. at the previous apocenter (in 2010) read from Gillessen et al 2017.
  - set BH parameters as

$$\begin{cases} M_{\rm SgrA} = 4.43 \times 10^{6} M_{\odot} & : \text{ Gillessen et al 2017} \\ a_{\rm SgrA} = 0.98\, M_{\rm SgrA} & : \text{ to Galactic South} \end{cases}$$

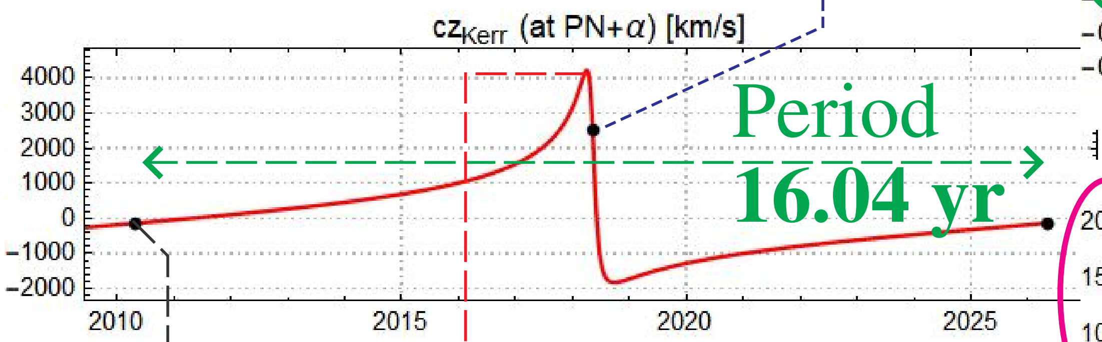
- Orbit of S2 : Periapse shift $\ll$ Current resolution
  $\rightarrow$ Astrometry for GR effects is difficult in 2018

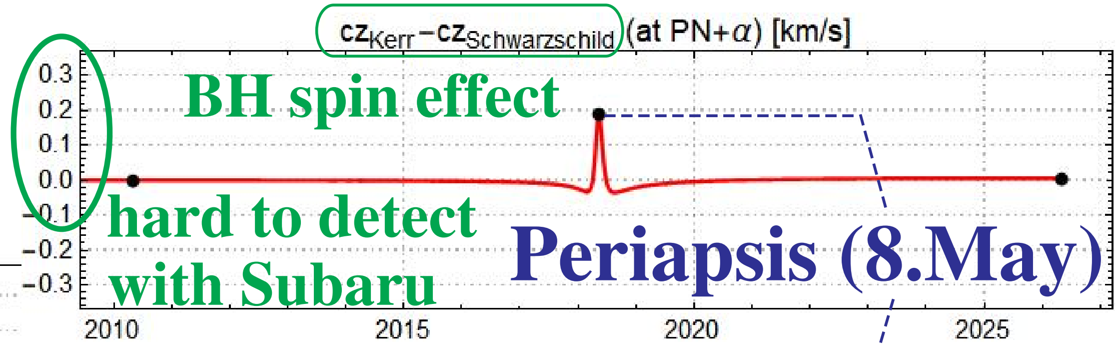


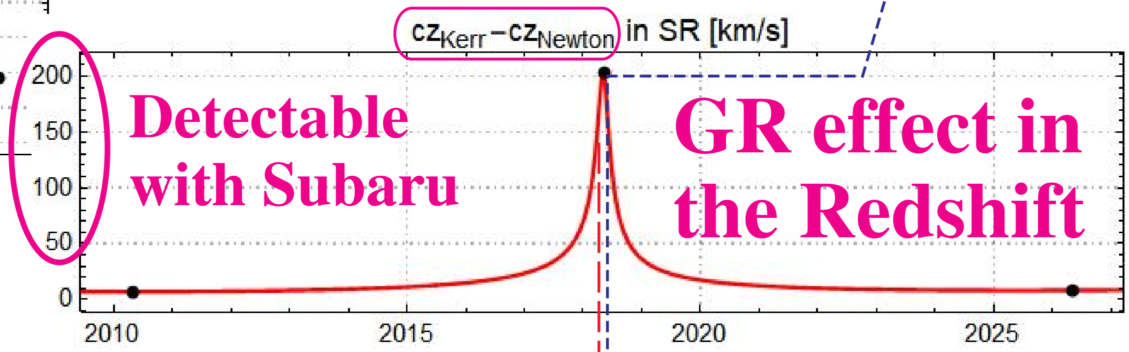
• Expected redshift and GR effect for 1 period

Plots : cz [km/s] vs. t [yr]

Periapsis: 2018.352 yr (8.May)







Peak of cz: 2018.249 yr (1st April)

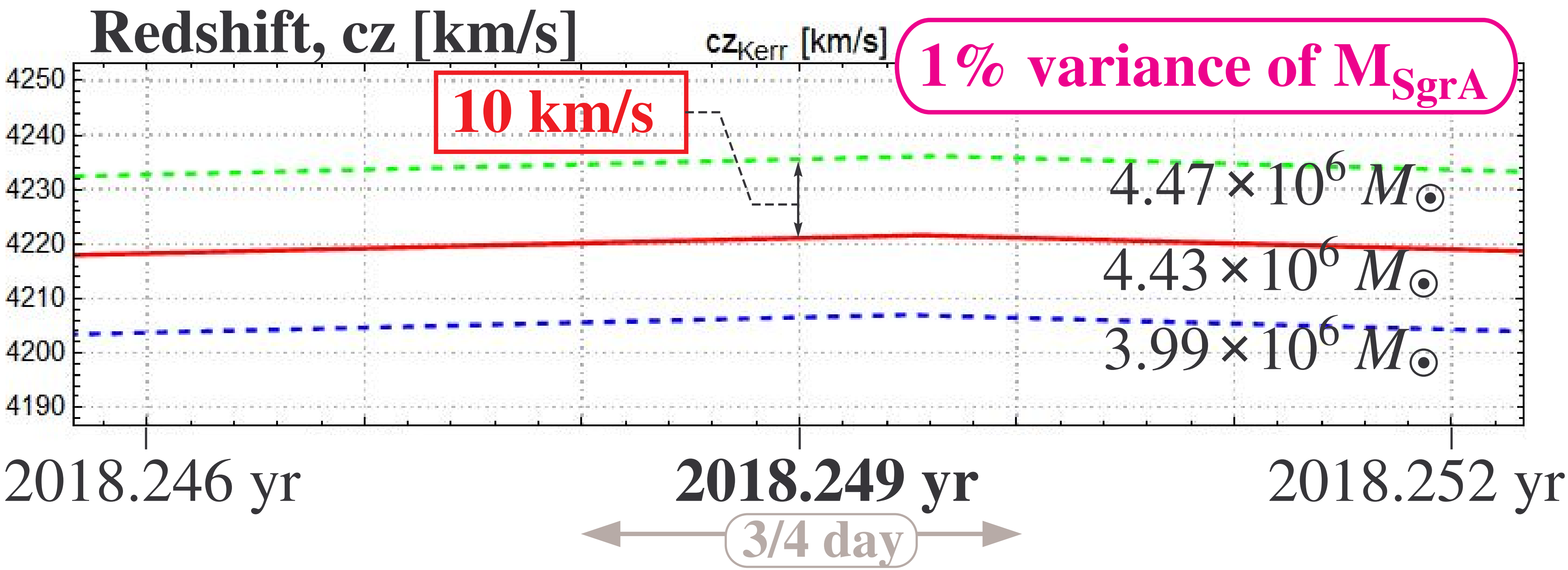
Apoapsis: 2010.330 yr (I.C. from Gillessen et al 2017)

1 month diff.

$\rightarrow$ $c\,\Delta z_{\rm max} \simeq$ **200 km/s** at 2018.343 yr (5th May)

Detectable by Subaru ! (error $\sim$ 10 km/s)

- Variance of $M_{\rm SgrA}$ near the peak of cz, 2018.25



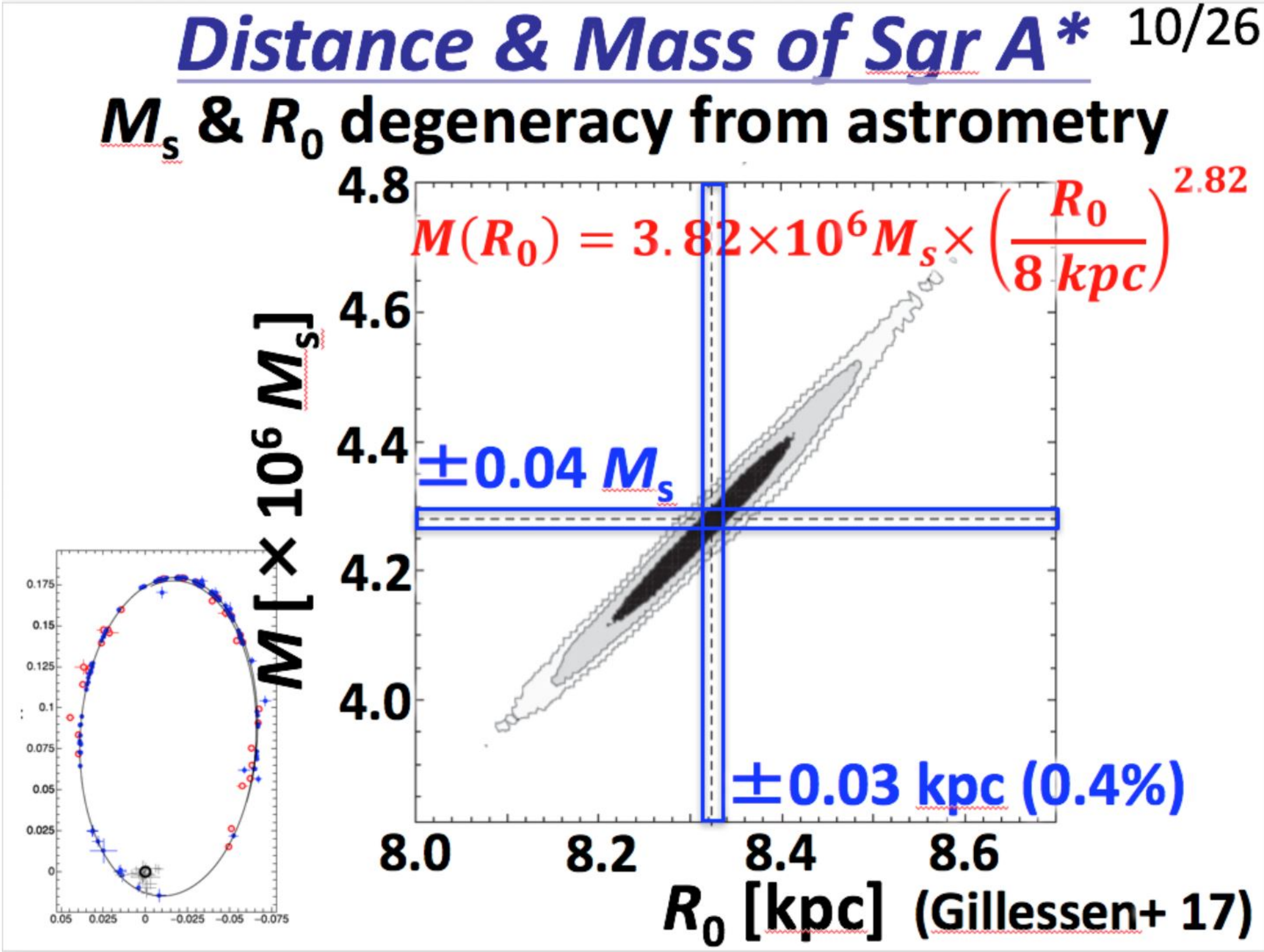
$\rightarrow$ **1%** var. of $M_{\rm SgrA}$ $\Leftrightarrow$ **10 km/s** var. of cz

Measurable with Subaru ! (error $\sim$ 10 km/s)

Note: Variance of the time $\sim$ 1 hour $\cdots$ too small

$\Downarrow$

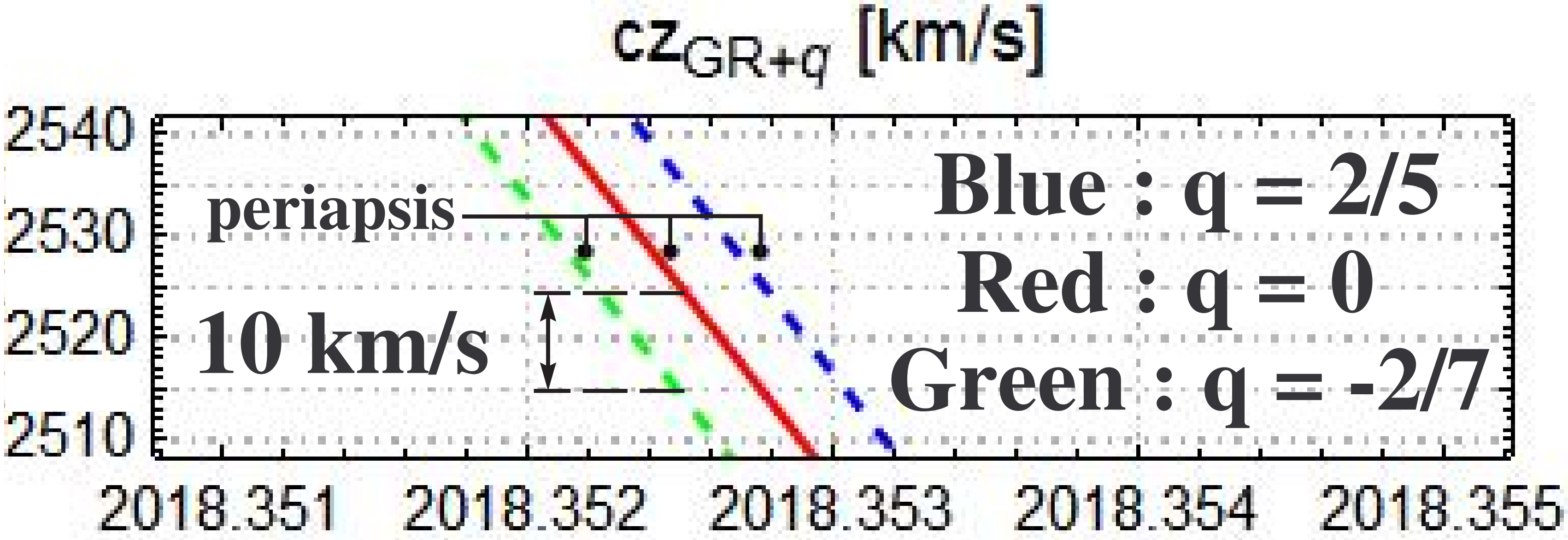
Precise determination of distance to GC is possible with astrometric data.



- Quadrupole deviation (preliminary)

near the periapse of cz, 2018.35

$\rightarrow\ g_{\mu\nu} = g_{\mu\nu}^{(\mathrm{Kerr})} + q\,\delta g_{\mu\nu}^{(quad)}$, GR $\Leftrightarrow$ $q = 0$



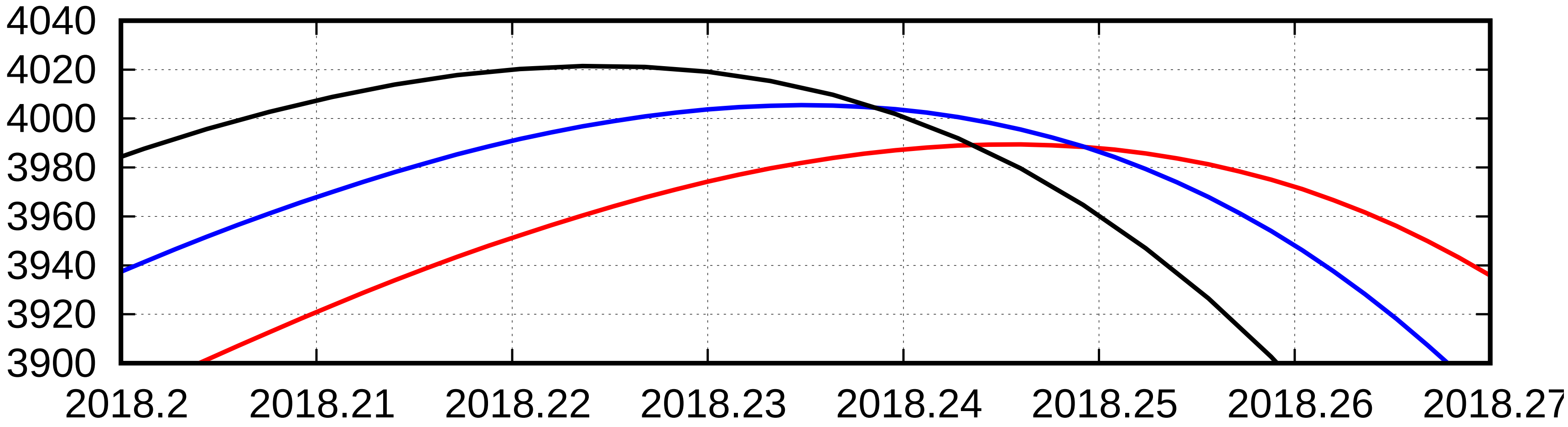
$\rightarrow$ $|q| < O(0.1) \Leftrightarrow$ **10 km/s** var. of cz

Note: No restriction on q, so far ?

- Effect of Invisible masses around the SMBH near the peak of cz, 2018.25

→ Estimate by the Plummer distribution model

Black: 0% , Blue: 1% , Red: 0.5% of $M_{\rm SgrA}$



→ Restriction of $< 0.5\%$ ⇔ **10 km/s** var. of cz

Note: current restriction $< 1\%$

$$\Downarrow$$

In summary ...

These effects can be distinguished by observing the time evolution of $cz(t)$ near the peak and periapsis, with the accuracy $c\,\delta z \sim 10$ km/s

Is $c\,\delta z \sim 10$ km/s possible with Subrau ?

3.2 Observational estimations

- Our error (preliminary)

May.2014	Aug.2015	May.2016	Jul.2016	May.2017	Aug.2017
○ fair	△ mech. trouble	○ fine	× bad seeing	○ fine	○ good

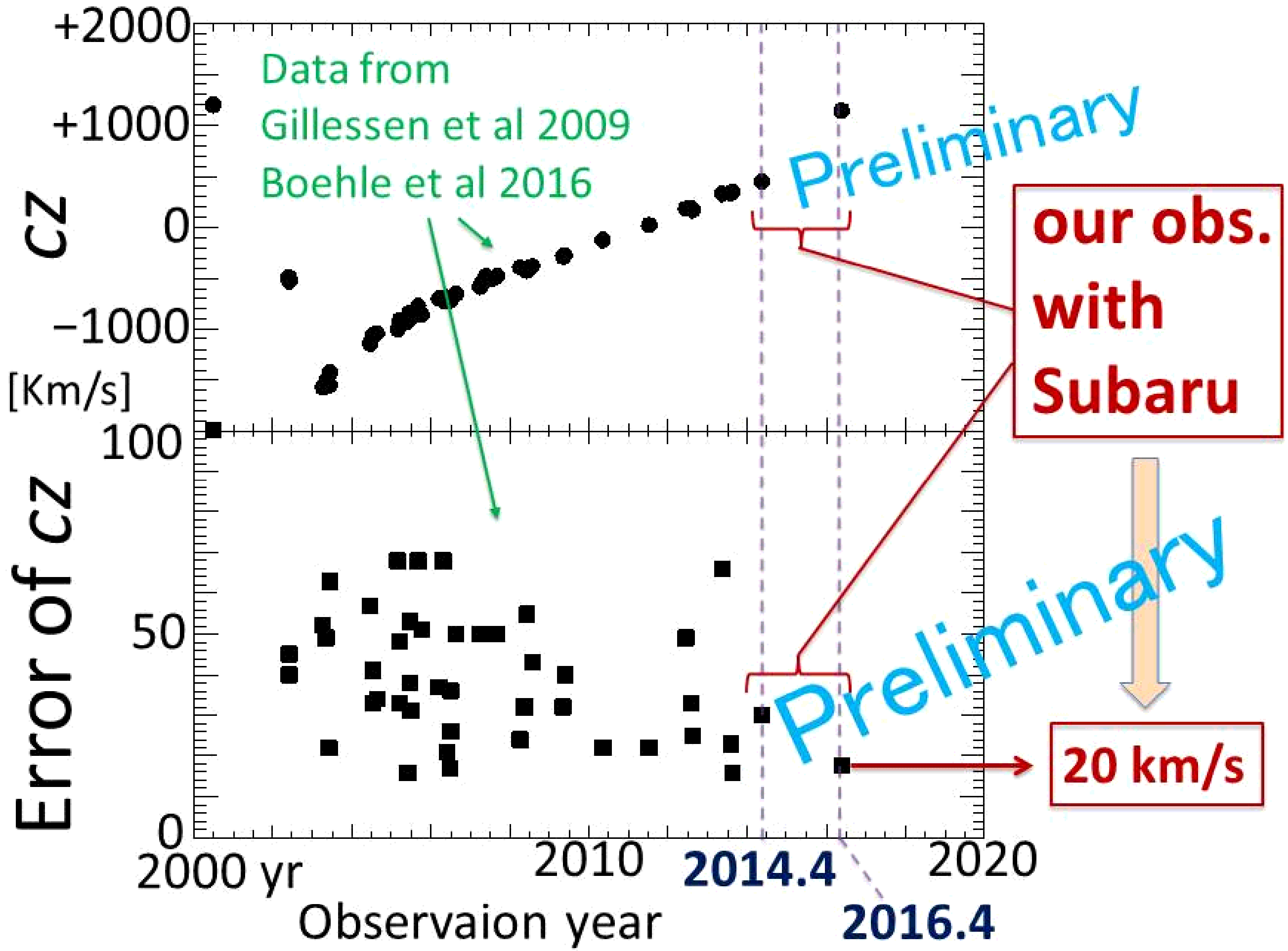
$c\,\delta z \sim$ 15 km/s

Subaru's high resolution observation of cz

⇓

Taking more data until 2021, we aim to reduce

$c\,\delta z \to$ **10 km/s**



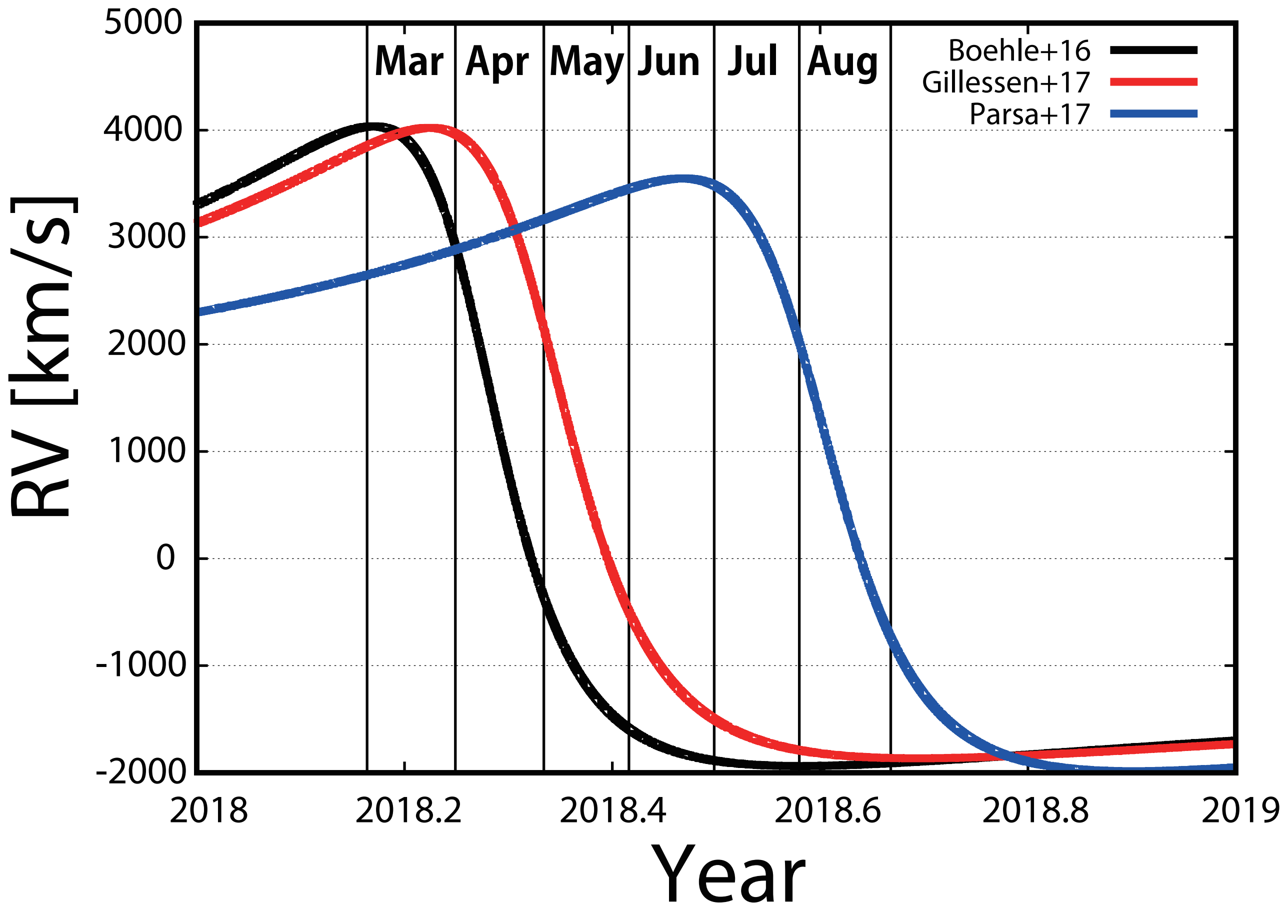
- Obs. plan for 2018/periapsis

◇ Current errors of quantities of S2 $\sim O(1)\%$

→ Period uncertainty $\delta T \simeq 0.16$ yr $\simeq$ 3 months

→ Recent 3 data sets show...

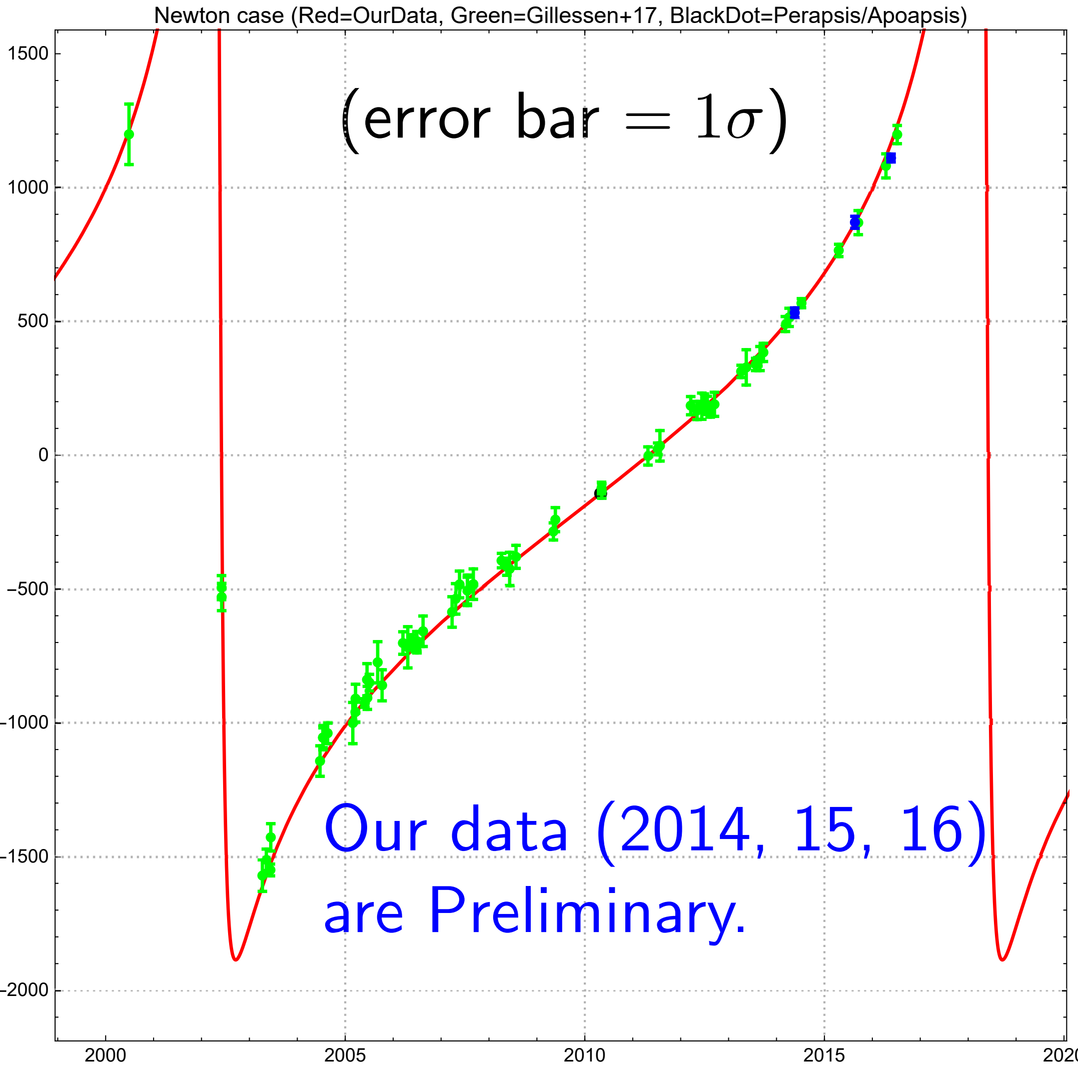
We need 7 obs. terms to cover the peak and decline phase of $cz(t)$ curve.



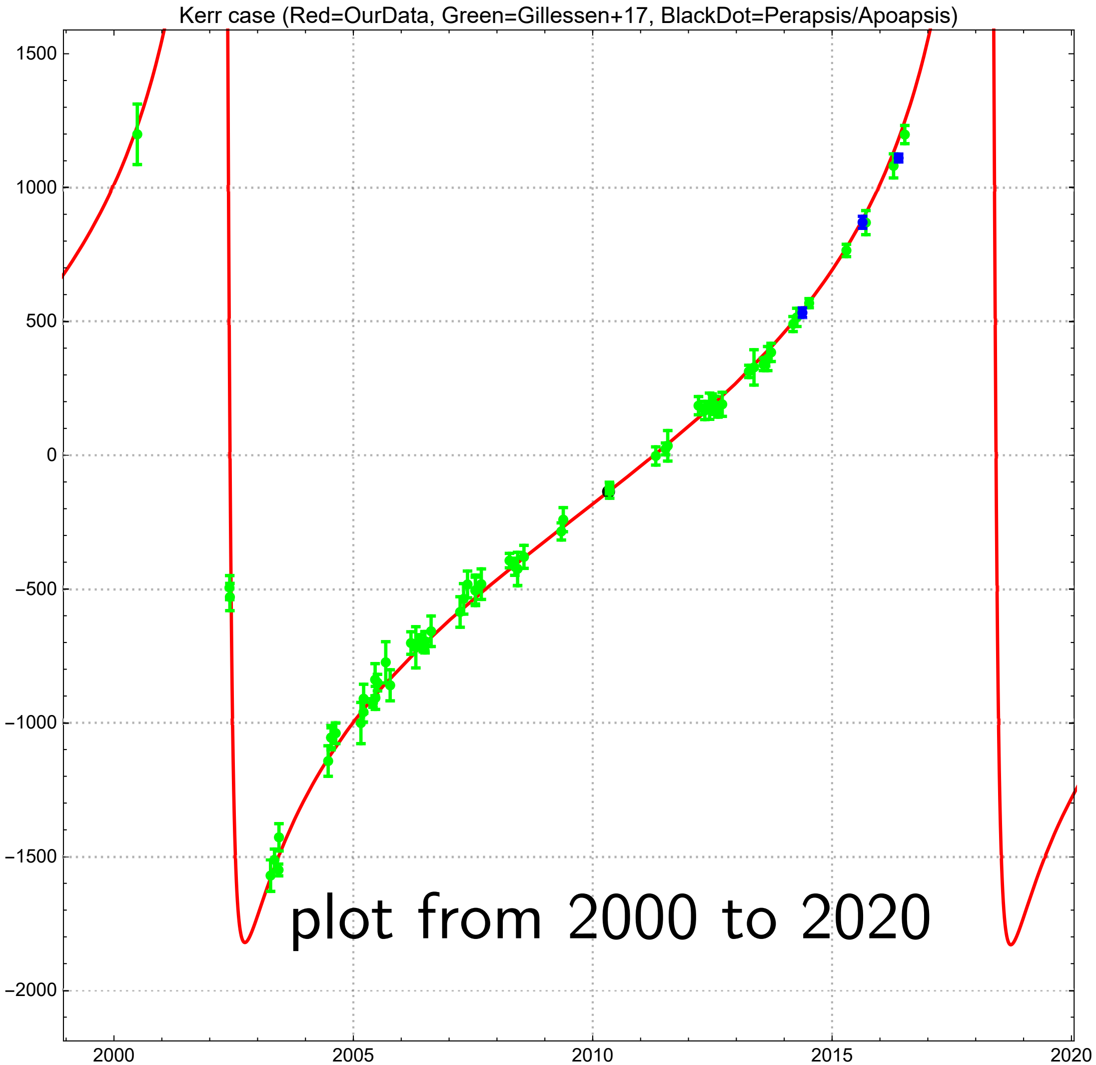
$(\mathrm{RV} = cz)$

◦ Supplement: test-fit using Gillessen et al 2017

left: Newton case



right: Kerr case



$\rightarrow$ No GR effect has been detected by now.

4. Summary

- S2's periapsis is in the first half of 2018
- We will measure the redshift of photons of S2
  with a small uncertainty $c\,\delta z \sim 10$ km/s
- This accurate observation will give ...
  - 1st GR evidence of the Galactic SMBH $\simeq 20\,\sigma$
  - Sgr A* mass $\sim 1\%$ and distance $\sim 0.4\%$ errors
  - Quadrupole deviation factor $|q| < O(0.1)$
  - Invisible mass $< 0.5\%$ of Sgr A* mass

and our current tasks are...

- Tasks for theoretical prediction

◇ Current I.C. of S2 motion is taken from
Newtonian fitting result at apocenter.
→ Under construction of numerical code for
full GR fitting of observational data.

◇ Current ray calculation is done with Special Rel.
→ Improve our calculation to solve null geodesics
for near future telescope. (ex. 30m telescope)

- Tasks for observation and data analysis

◇ Intense observation around 2018

→ Proposal to Subaru telescope was submitted

◇ Correction of observed spectrum

→ Making use of atmospheric absorption lines

◇ Elimination of errors

→ systematic, seasonal, etc...

I see Sgr A^* as the laboratory of BH and GR.

— END —