

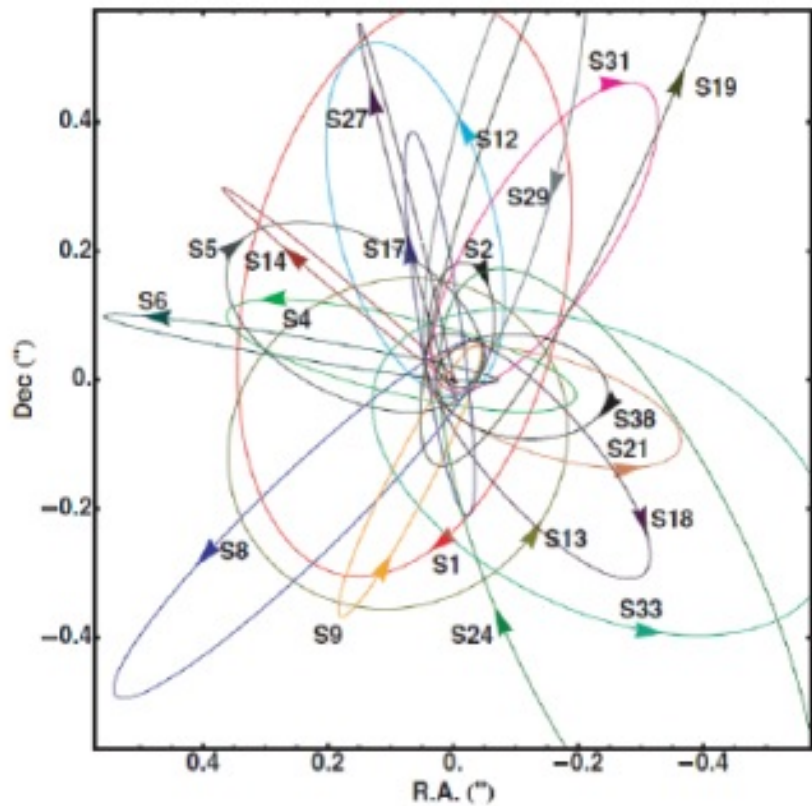
# 銀河中心BHのスピンをover-spinningを含めて再検討する

孝森 洋介 (和歌山高専)

# 銀河中心領域のS星たち

2/16

Gillessen et al. (2009)



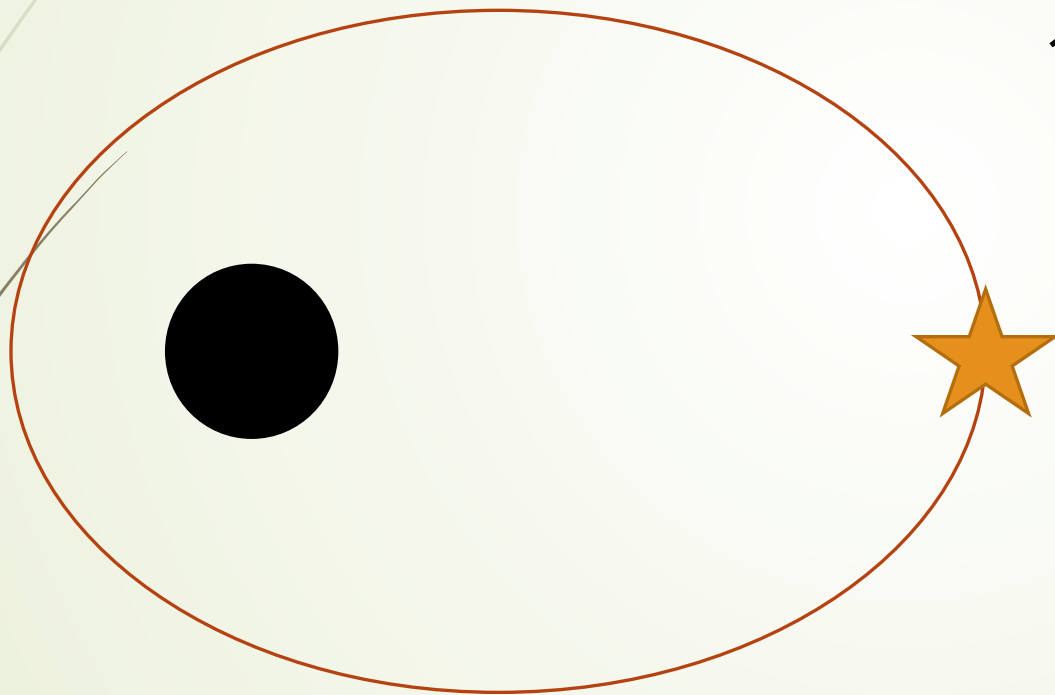
- 銀河中心領域を見ると周回運動をしている恒星（S星）がたくさん見える。  
⇒ 銀河中心にBHがある！
- 2018年にS 2が最接近する！  
⇒ BHの情報がより得られる！

**S星たちの運動から銀河中心BHの情報（質量・自転）を得る！**

# S星の運動から銀河中心領域の情報を得る

3/16

軌道の情報から中心天体の情報（質量）が分かる。



ケプラーの第3法則

$$T^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{GM}$$

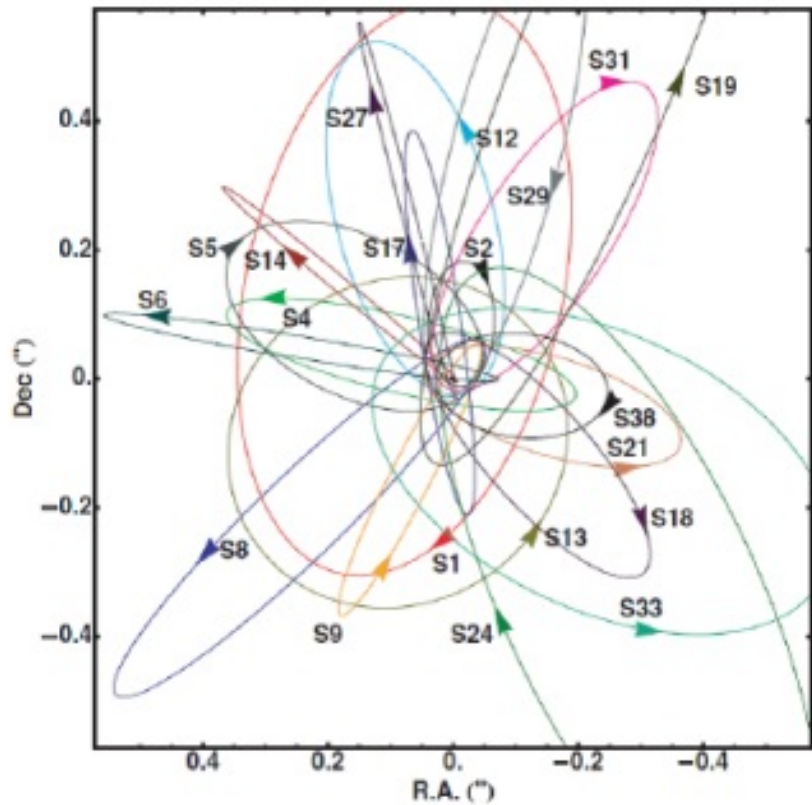
$T$  : 軌道周期

$a$  : 楕円の長半径

$M$  : 中心天体の質量

# 銀河中心ブラックホール

4/16



- S星たちはケプラー運動している
- 銀河中心はコンパクトな電波源

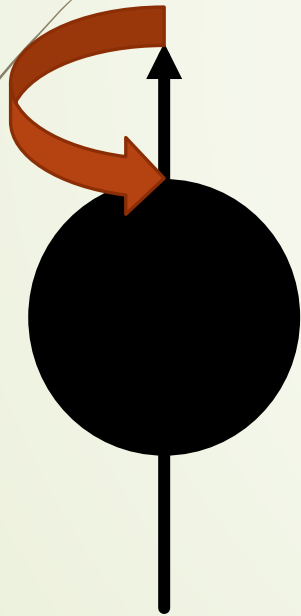


**太陽質量の約400万倍の質量をもった  
ブラックホールが存在している！**

# 自転ブラックホールとその重力

5/16

一般相対性理論では「エネルギー」と「運動量」が重力源になる。  
⇒ 「質量」だけでなく「自転運動（角運動量）」も重力源になる！



重たいものが高速で回ると  
それに“引きずられる”。

# カー解

6/16

回転ブラックホールを表すアインシュタイン方程式の解 (Kerr 1963)

Boyer-Lindquist座標

$$ds^2 = - \left( 1 - \frac{2GMr}{c^2 \Sigma} \right) c^2 dt^2 + \frac{\Delta}{\Sigma} dr^2 + \Sigma d\theta^2 + \frac{A \sin^2 \theta}{\Sigma} d\phi^2 - \frac{4GMa r \sin^2 \theta}{c^2 \Sigma} c dt d\phi$$

$$\Sigma = r^2 + a^2 \cos^2 \theta$$

$$\Delta = r^2 - \frac{2GMr}{c^2} + a^2$$

$$A = (r^2 + a^2)^2 - a^2 \Delta \sin^2 \theta$$

質量( $M$ )とスピン( $a$ )をパラメータに持つ。

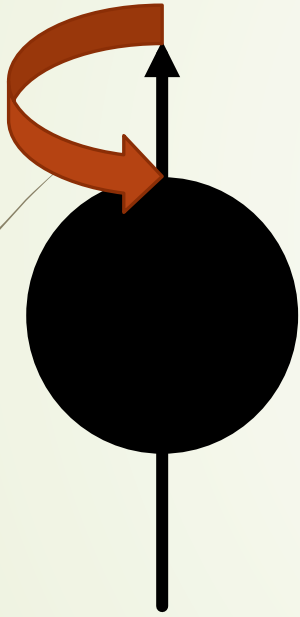
※スピンは長さの次元を持たせてある。角運動量は  $J = aMc$



# カー解のパラメータ領域

7/16

$$0 \leq \frac{c^2 a}{GM} \leq 1$$



回転ブラックホール

$$\frac{c^2 a}{GM} > 1$$

普通は現実的でないと考えない

裸の特異点  
(over-spinning)

# Over-spinning Kerrは非現実的か？

8/16

普通の星のスピンパラメータはいくつか？

星の自転の角運動量からスピンパラメータを見積もる。

$$\frac{c^2 a}{GM} = \frac{2 r_s v}{5 r_g c}$$

$r_s$ : 星の半径  
 $v$ : 星の自転の速さ  
 $r_g = \frac{GM}{c^2}$ : 重力半径



# 地球のスピンパラメータはいくつか？

9/16

$$\frac{c^2 a}{GM} = \frac{2 r_s v}{5 r_g c} \sim 8 \times 10^2$$

$$r_s \sim 6 \times 10^6 \text{ m}$$

$$r_g \sim 5 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$v \sim 5 \times 10^2 \text{ m/s}$$

$$c \sim 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

**地球の外部重力場はover-spinning Kerr！！**

# 地球による重力場

10/16

$$ds^2 = - \left( 1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right) c^2 dt^2 + \frac{\Delta}{\Sigma} dr^2 + \Sigma d\theta^2 + \frac{A \sin^2 \theta}{\Sigma} d\phi^2 - \frac{4GMa \sin^2 \theta}{c^2 \Sigma} c dt d\phi$$

over-spinでも  $a/r \ll 1$  となる領域がありそこでは

$$g_{tt} \sim - \left( 1 - \frac{2r_g}{r} + \frac{r_g^3}{r^3} \left( \frac{c^2 a}{GM} \right)^2 \cos^2 \theta \right)$$

ニュートン重力

回転の効果

# 地球による重力場

11/16

地球の外は  $a/r \ll 1$

$$g_{tt} \sim - \left( 1 - \frac{2r_g}{r} + \frac{r_g^3}{r^3} \left( \frac{c^2 a}{GM} \right)^2 \cos^2 \theta \right)$$

ニュートン重力  $\gg$  回転の効果

地球の周りの質点の運動はニュートン重力でだいたい決まる。  
 $\Rightarrow$  ケプラー運動が良く成り立つので矛盾は起きない。

$$r_s \sim 6 \times 10^6 \text{ m}$$

$$r_g \sim 5 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$a \sim 8 \times 10^2 r_g$$

# 銀河中心にあるのはブラックホールか？

12/16

S星たちがケプラー運動しているからと言って中心領域の重力場は“**ブラックホールの重力場**”と言ってよいか？

⇒ NO!

S星は近くてせいぜい重力半径の1000倍程度のところを周回している。つまり、その程度の半径でケプラー運動が実現されるような“**裸の特異点の重力場**”の可能性も排除はできない。

※もっと言えばS星のケプラー運動が再現できればなんでも良い。

# S星の運動からスピンパラメータに制限をつける

13/16

重力ポテンシャル

$$g_{tt} \sim - \left( 1 - \frac{2r_g}{r} + \frac{r_g^3}{r^3} \left( \frac{c^2 a}{GM} \right)^2 \cos^2 \theta \right)$$

ニュートン重力

回転の効果

「ニュートン重力」～「回転の効果」となるようなスピンパラメータでS星たちの運動がケプラー運動からずれる。

# S星の運動からスピンパラメータに制限をつける

14/16

$$g_{tt} \sim - \left( 1 - \frac{2r_g}{r} + \frac{r_g^3}{r^3} \left( \frac{c^2 a}{GM} \right)^2 \cos^2 \theta \right)$$

「ニュートン重力」～「回転の効果」となるようなスピンパラメータでS星たちの運動がケプラー運動からずれる。

$$\frac{2r_g}{r} \sim \frac{r_g^3}{r^3} \left( \frac{c^2 a}{GM} \right)^2 \quad \longrightarrow \quad \frac{c^2 a}{GM} \sim 10^3$$
$$r/r_g \sim 10^3$$

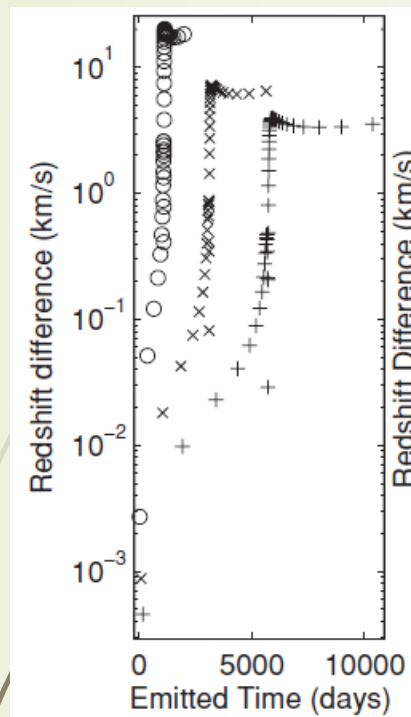
**銀河中心領域のスピンパラメータは最大1000程度！**



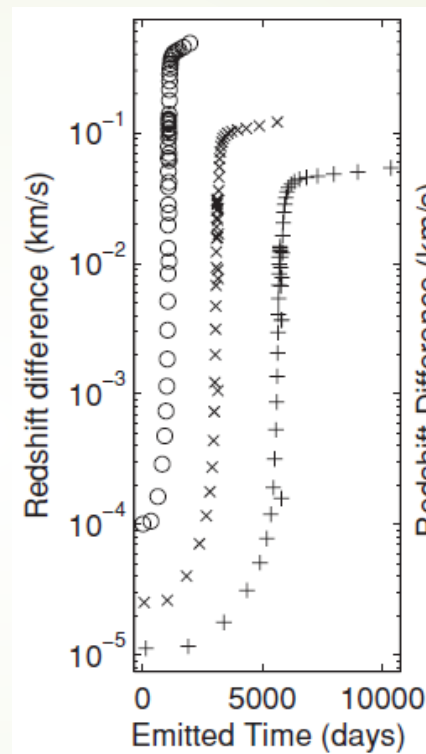
# これからの観測で期待される制限

15/16

星の軌道による光の赤方偏移を計算 ( Angelil&Saha 2010)



Schwarzschild効果  
~10km/s



慣性系の引きずり効果  
~0.1km/s

もし, Schwarzschild効果が見えるなら  $c^2 a / GM < 10$  くらいまでいけそう。

# まとめ

16/16

- 銀河中心領域には太陽質量の400万倍の質量が集中している。
- S星の運動はケプラー運動で良くフィットできる。
- S星がケプラー運動を保てるレベルで重力場はいろいろ変更可。  
銀河中心領域の重力場にover-spinning Kerrを適用すると  
スピンパラメータは1000程度まで許される。
- 将来的にSchwarzschild効果が見えてくれば、スピンパラメータは  
10程度まで制限可。  
(もし、Over-spinningだったらかなり刺激的。)