

ブラックホール存在の観測的立証に向けた  
一般相対論的な理論整備

齊田 浩見 (大同大学 at 名古屋市)

with { **Black Hole Horizon Project** members  
**Sgr.A\* Daily Monitoring Group**

物理学会 2012年秋季大会 2012.9.13 at 京都産業大学

天文学会 2012年秋季年会 2012.9.19 at 大分大学

★ 天文学会での発表は3回目の一般相対論の人です。

# 1. 導入

## 1.1 「BH候補天体」から「BHそのもの」へ

---

- 基本事項: BHは 

{	時空の因果構造で決まる特別な領域（空っぽ）
	内部で物質が定常的に留まるのは不可能（特異点）
	物質が詰まっている他の天体とは本質的に異なる
- これまでの「BH候補天体」: 基本的にニュートン重力に基づいて推定  
→ 「一般相対論だからこそ」の現象を見ない限り「候補」のまま
- 大きな目標: 「BHそのもの」の観測研究  
→ 最初の課題: BH存在の確実な証拠（直接的な証拠）を得ること  
→ この課題は「天文観測として挑戦的な課題」であると同時に「基礎物理学的な意義」も重要（次ページ）。

## 1.2 「BH存在の確実な証拠を得る」ことの基礎物理学的な意義

---

- 一般相対論の実験・観測的な直接検証は未成功  
→ 重力相互作用の詳細は不明… **基礎物理学の重要課題の一つ**
- BHは一般相対論なしには考えられない（ニュートンじゃダメ）



「BH存在の確実な証拠を得ること」は

一般相対論の直接検証に繋がる重要な手段の一つ

意義：「BHそのもの」の直接的天文観測で『詳細が未知の基本相互作用（重力）の解明に迫る』という基礎物理学の新展開を切り拓く。



『観測的BH物理学・天文学』の創出

以上の意義も見据えた上で、SgrA\* の「BH地平面（事象の地平面）」の存在の直接証拠を掴むための観測計画を企てている。

（観測天文（装置デザイン・開発・データ解析）  
理論天文（BH降着円盤など：観測寄りの理論） の協力計画！  
理論物理（一般相対論：数学的な純粹理論）

（将来的には、実験物理（重力波など）とも協力して  
『観測的BH物理学・天文学』を創出できたらいいな。）

観測計画：SgrA\* を狙って1000km オーダー基線長VLBI（サブミリ電波）  
をアンデス山地に「キャラバン型」で展開したい。

→ キャラバン型VLBIの国内実証・検証実験を計画中

理論準備：BHの時空構造をダイレクトに反映したデータの抽出が目的。

→ 今日の話はこれ（僕はこれを担当）

## 2. 観測計画 **BH Horizon Project** の目標

### 2.1 BH Horizon Project の最大目標：BH Shadow

- 降着円盤などの発光による「輝く背景」に浮かび上がる

**BHの吸収断面積の「影」**

→  $\left\{ \begin{array}{l} \text{「影」の存在} \rightarrow \text{BH存在の「定性的」な証拠} \\ \text{「影」の詳細} \rightarrow \text{BHの質量と角運動量の測定} \end{array} \right.$

… しかし、今日はBH影の話ではないです。

(以上は BH Horizon Project の宣伝)



電磁波によるBH観測量は BH Shadow しかないのか？

## 2.2 電磁波によるBH観測：BH Shadow しかないのか？

- 今日の論点：

**BH Shadow の他の「電磁波によるBH観測の可能性」を探る**

→ { 観測計画を無駄に終わらせないためにも考えるべき課題  
→ 「あれは失敗したけど、これは成功した」と言えるように。  
新しい可能性を探ることは、理論研究として楽しい  
→ 自分の研究成果、と迷わず言えるといいな。



◇ 現在の観測技術ではちょっと検出が難しそうな観測量

◇ 現在の観測技術 (+  $\alpha$ ) で検出が期待できる観測量

の2つを紹介。

### 3. チャンスを捉えて：2013年夏にSgrA\*へ落下するガス塊を利用

#### 3.1 S.Gillessen, et al, Nature 481 (2012) p.51

(A gas cloud on its way towards the supermassive black hole at the Galactic Center)

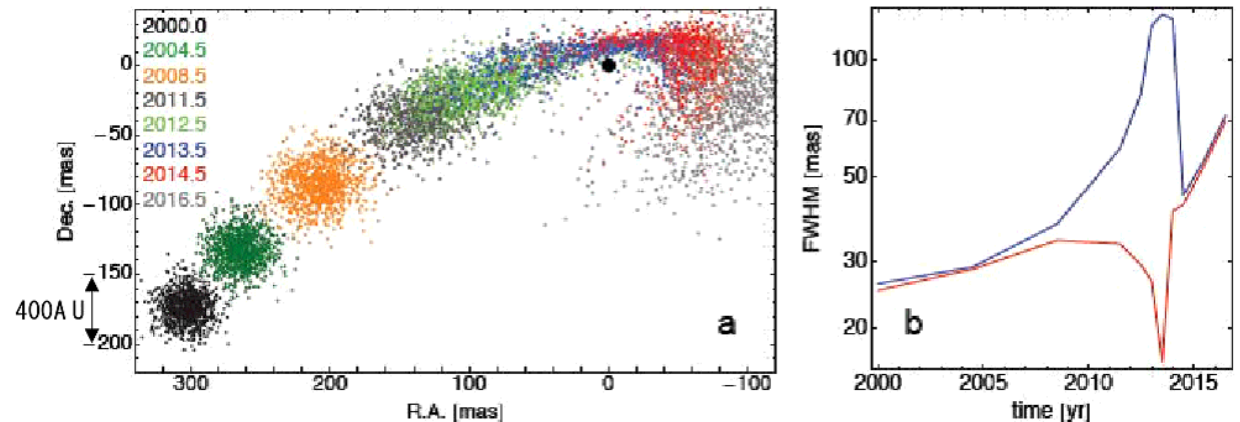
- SgrA\* (400万  $M_{\odot}$ ) に,

現在サイズ { 半径：125AU  
質量：4  $M_{\oplus}$   
温度：550K

のガス雲が，SgrA\* から  
260AUの距離まで接近。



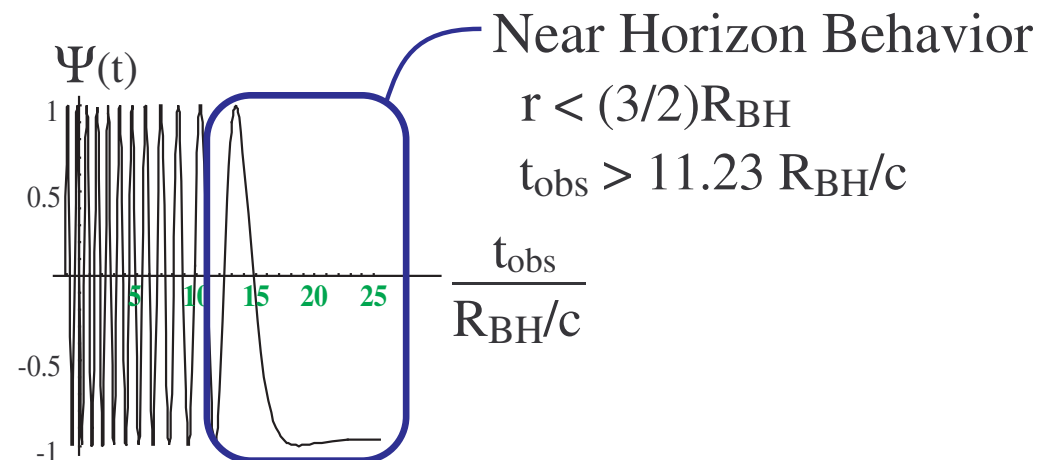
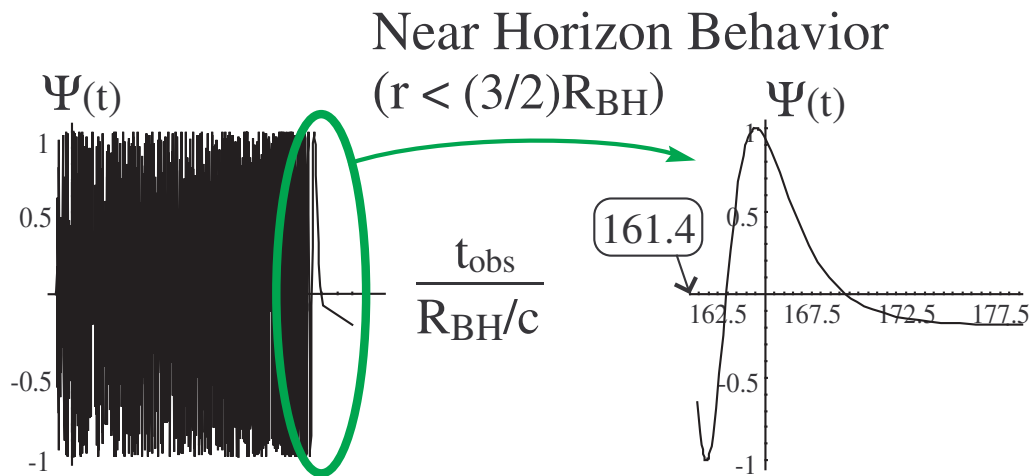
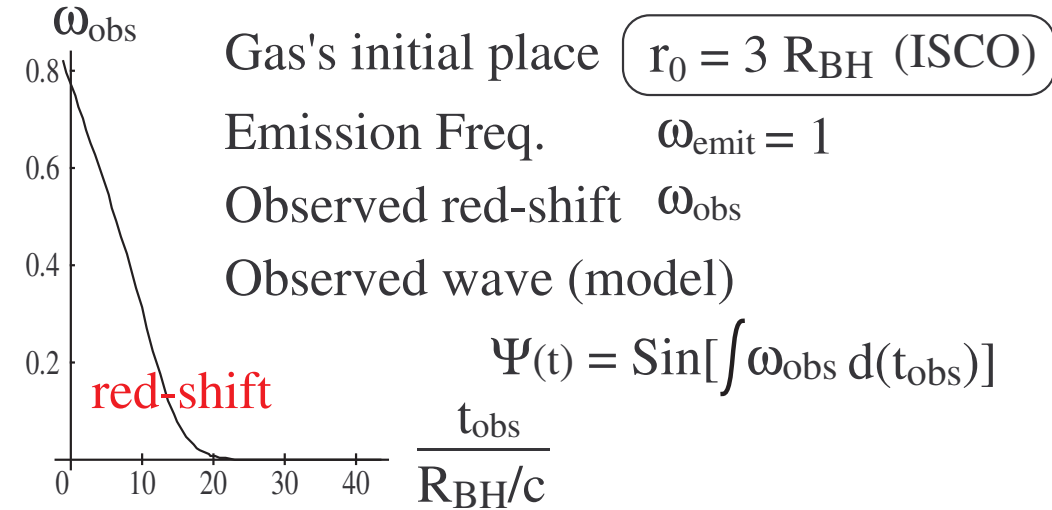
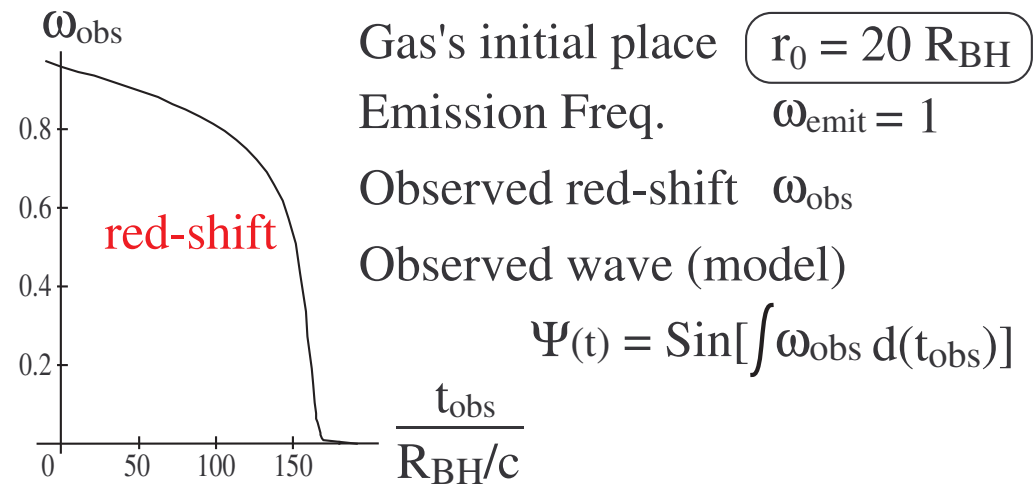
ガスの一部は SgrA\* に落下  
して吸い込まれるだろう。



Supplementary Figure S4. Simulation of orbital tidal disruption of Gaussian cloud: evolution of spatial structure as a function of time (panel a, North is up, East is left). Panel b shows the evolution of the FWHM along directions parallel (blue) and perpendicular (red) to the orbit.

## 3.2 BH観測を可能にする観測量 1 : 現在技術では検出難しそう

- BHに吸い込まれる粒子 ( ex. radial free fall ) からの波動を遠方で観測



→ BH地平面に近づいた後 ( $r \sim \frac{3GM}{c^2}$ ) の「時間変動」に特徴あり！



- 波の「引き延ばし」の典型的な表式（BH時空上の赤方偏移を評価）：

BH地平面の近傍を落ちる光源から出る光の位相の観測値は，

$$\Theta(t_{\text{obs}}) = \int \omega_{\text{obs}} dt_{\text{obs}} \sim \omega_{\text{emit}} \exp\left[-\frac{ct_{\text{obs}}}{2R_{\text{BH}}}\right]$$

- パワー・スペクトルの典型的な形は **プランク分布を含む！**

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{典型的な波動} : \psi(t_{\text{obs}}) = A(\omega_{\text{emit}}) \exp[i\Theta(t_{\text{obs}})] \\ \text{フーリエ変換} : f(\Omega, \omega_{\text{emit}}) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\Omega t_{\text{obs}}} \psi(t_{\text{obs}}) dt_{\text{obs}} \end{array} \right.$$

から， 
$$P(\Omega) := |f(\Omega, \omega_{\text{emit}})|^2 = \frac{4\pi R_{\text{BH}} |A|^2}{c\Omega} \frac{1}{e^{4\pi R_{\text{BH}}\Omega/c} - 1}$$

- 「**温度**」  $\frac{\hbar c}{4\pi R_{\text{BH}}}$  の**プランク分布**で『BH観測』ができる！

（Kerr では「温度」と「化学ポテンシャル」で  $M, J$  が得られる。）

しかし，実際の測定がすごく上手くいっても理論的な注意点あり...

● 実数の波動： $\Psi_R(t_{\text{obs}}) := A(\omega_{\text{emit}}) \cos[\Theta(t_{\text{obs}}) + \Theta_0]$  ( $\Theta_0$ ：初期位相)

→ フーリエ変換： $F_R(\Omega, \omega_{\text{emit}}) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\Omega t_{\text{obs}}} \Psi_R(t_{\text{obs}}) dt_{\text{obs}}$

→ パワースペクトル：

$$P_R(\Omega) := |F_R(\Omega, \omega_{\text{emit}})|^2 \sim \frac{\pi R_{\text{BH}} A(\omega_{\text{emit}})^2}{c \Omega} \frac{h}{e^{4\pi R_{\text{BH}} \Omega / c} - 1}$$

ただし、 $\begin{cases} h = e^{4\pi R_{\text{BH}} \Omega / c} + 2 \cos(\Theta_{\infty} + \Theta_0) e^{2\pi R_{\text{BH}} \Omega / c} + 1 \\ \Theta_{\infty} = \Theta(t_{\text{obs}} \rightarrow \infty) : \text{“Frozen” Phase} \end{cases}$

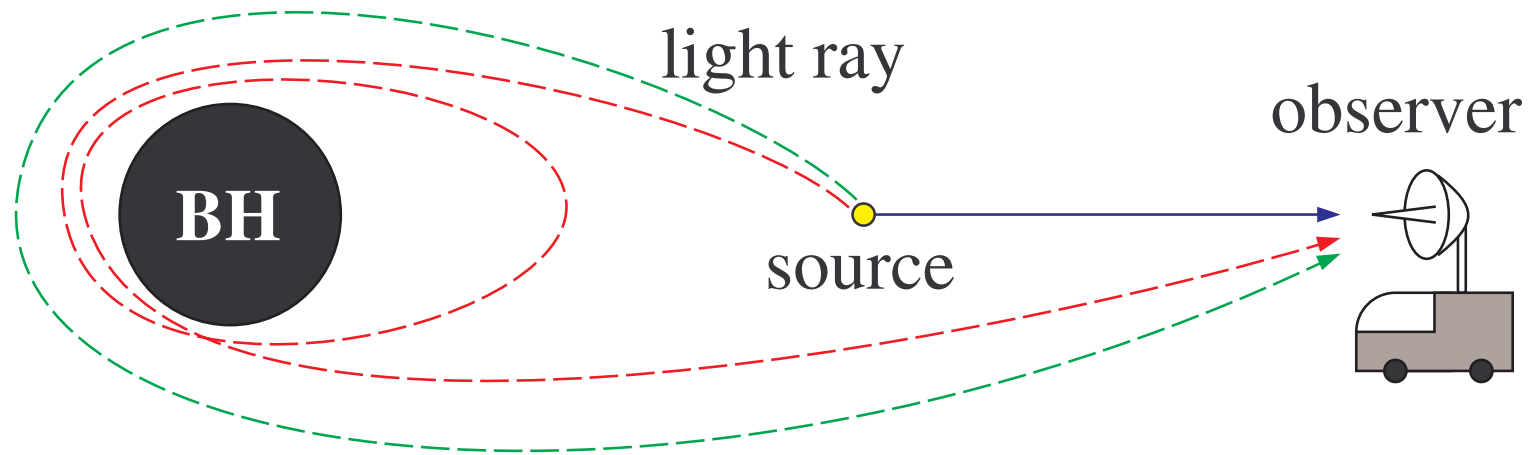
注意：実際に測定される波動では、 $A(\omega_{\text{emit}})$ 、 $\Theta_0$ 、 $\Theta_{\infty}$  が分からないと、測定値にフィットすべき理論曲線が描けない。



観測屋さんによると、引き伸ばされた波長が長すぎて検出が超困難！？

## 3.2 BH観測を可能にする観測量2：現在技術で検出できそう!?

- BH近傍の粒子 (ex. Rest at ZAMO) から出る波動を遠方で観測



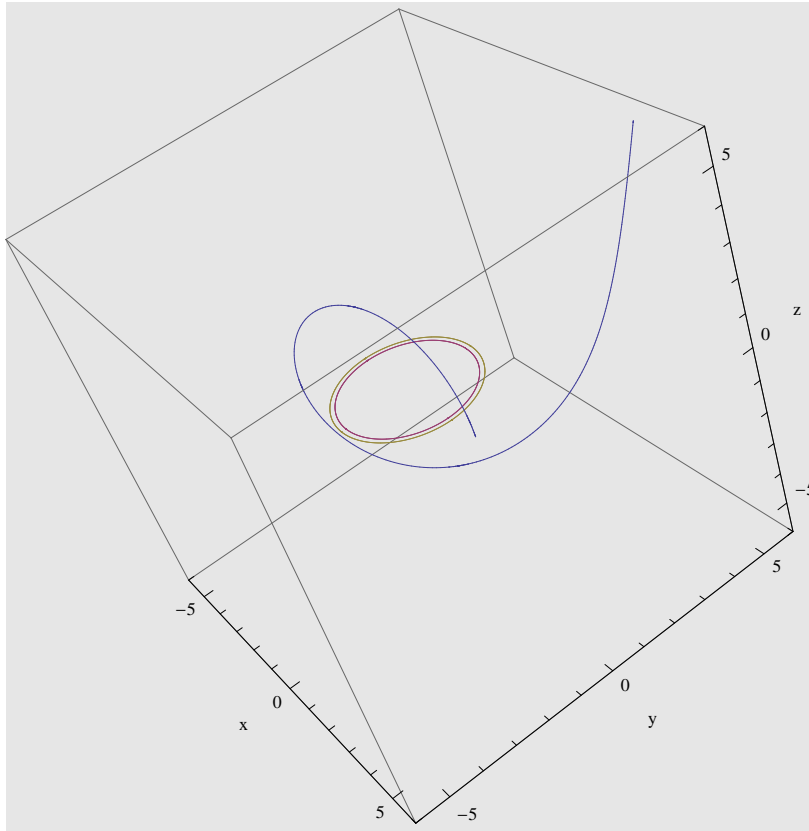
→ 仮定：粒子はあらゆる方向に同じ強度・位相・周波数で発光

→ 「巻付き数  $W = 0$  の光線」と「巻付き数  $W = 1$  の光線」の

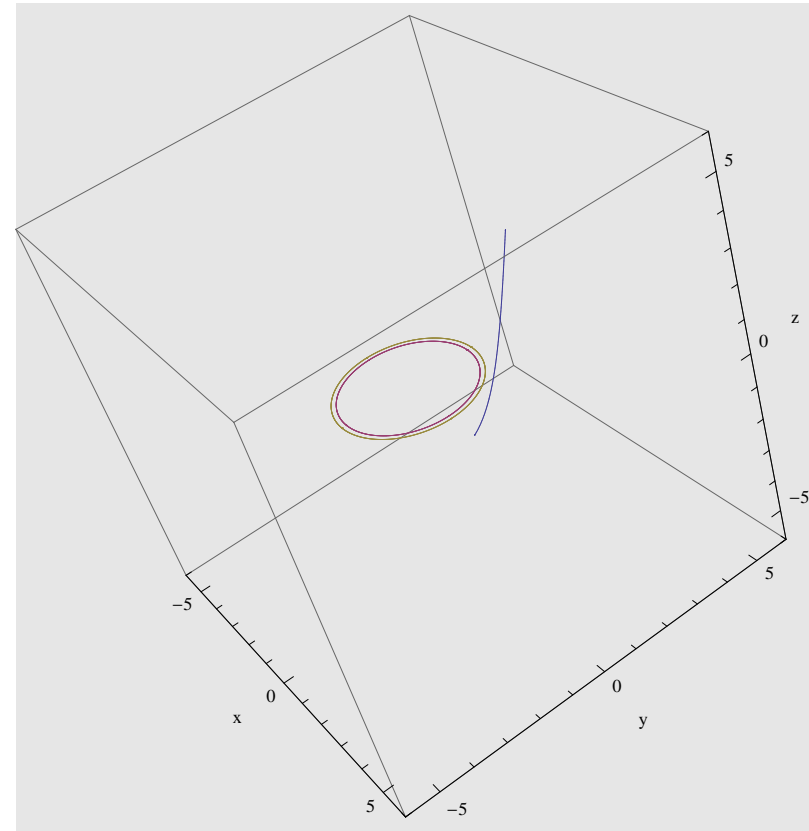
⎧ 到達時間の差  
⎧ 強度の比      で『BH観測』が出来そう!?

◇ 同一の光源からの光であることは、2本の光線の「強度干渉」で判断

● 数値計算の例（まだ，これしか計算できていない）



$z$ 軸の巻付き数  $W = -0.94$



$z$ 軸の巻付き数  $W = 0.06$

- 
- 単位規格化 :  $G = 1, c = 1, M = 1$
  - BH角運動量 :  $J = (1/2)(GM^2/c) \leftarrow$  係数は  $0 \sim 1$  が可能
  - 発光の位置 :  $(0, 3(GM/c^2), \pi/2, 0)$  in Boyer-Lindquist coord.
  - 光源の速度 :  $(1.70, 0, 0, 0.0603) \rightarrow u_{(\phi)}/u_{(t)} \simeq 0.03$  (ZAMO)

● 計算結果

→ { 観測者の位置 :  $\begin{cases} r = 3.65 \times 10^7 (GM/c^2) \\ \theta = 0.300 \text{ rad } (17^\circ) \\ \phi = 0.405 \text{ rad} \end{cases} \rightarrow \text{観測時間が光線で違う}$

発光の周波数 :  $\omega_{\text{source}} = \frac{2\pi}{10}$  (光源から見た値... 適当に決めた)

に対して,

{ 観測時間の差 :  $\Delta t \simeq 30 \frac{GM}{c^3} \rightarrow \begin{cases} \text{Sgr.A}^* & : \text{約10分} \\ \text{Cyg.X-1} & : \text{約0.001秒} \end{cases}$

観測強度の比 :  $\frac{[\text{intensity of } W=1]}{[\text{intensity of } W=0]} \simeq 0.00868 \rightarrow O(10^{-3})$

観測周波数の比 :  $\frac{[\text{freq. of } W=1]}{[\text{freq. of } W=0]} \simeq 0.956871 \left( \begin{array}{l} \text{光源の運動による} \\ \text{ドップラー効果の比} \end{array} \right)$

→ 時間差と強度比は技術的に可能性ありそうな値 !? (for Sgr.A\*)

#### 4. まとめ ( 銀河中心BH研究会：11月7～9日 at 宇宙科学研究所 )

- 目標：「BH候補」から「BHそのもの」を扱う新しい研究領域へ

- SgrA\* の直接観測計画：天文研究と相対論研究の協力が必要

→ { 観測計画のデザインと実証・検証  
BH存在の確証を得る理論の整備 } 興味ある方を大歓迎！

- 理論整備：BH ( SgrA\* ) に落下するガスの利用

→ { 1. BHに落ちる粒子が出す光のパワースペクトルから  
BH時空が備える普遍的なプランク分布の評価 ( 難 !? )  
→ 本当に可能性はないのか検討を続けたい  
2. BH近傍の粒子が出す2本の光線から  
BH存在の確証を読み出す ( 可能性ある !? )  
→ 課題：周波数の比, BH周辺環境, 質量と角運動量の同定

## Supple.1. BH 巻付き光線による BH 検出について

- 最も強調すべき点：

BH の性質（質量  $M_{\text{BH}}$  と自転角速度  $\Omega_{\text{BH}}$ ）で決まるもの

- 到達時間の差 → BH 質量と自転の角速度で決まる
- 観測強度の比 → BH 質量や自転角速度によらないかも !?( 要検討 )

→ この2つの検出で，少なくとも

**BH 存在の一般相対論的な強い示唆** が得られる。

→ 強度比が BH の性質によらないとしたら，この2つの検出で

- BH の性質  $M_{\text{BH}}$  ,  $\Omega_{\text{BH}}$  の値を得ることは無理
- BH 存在の一般相対論的な強い示唆としての明確度は上がる  
( ∵ 強度比は BH の存在だけで決まる普遍的な量 )

- 考慮する点： $\left\{ \begin{array}{l} (1) \text{ 2本の光線が同一光源から出た, と同定する方法} \\ (2) \text{ 光源の運動, 性質への依存性} \\ (3) \text{ 星間物質の影響} \end{array} \right.$

◇ (1) について：

- 一つの方法が、電波望遠鏡一つで「時間差干渉」をすること。  
(光源でのコヒーレンスが保たれていた場合、という仮定で。)
- 必ずしも「干渉」に頼らなくても、  
2本の光線が同一光源から出ていることが分かればよい。

◇ (2) について：

- 光源の運動による運動論的ドップラー効果で観測周波数に差が出る
- 落下ガス塊の3次元シミュレーションから、光源の軌道が欲しい。  
BH近傍で一般相対論的な運動方程式を解いた正確な軌道がよい。  
(初期値だけでもよい… 測地線ならすぐ解ける。)

◇ (3) について：よろしくお願いします。