

Sgr.A* 直接観測のための理論

—— 一般相対論的に正確な理論へ向けて ——

(研究結果の報告ではなく、課題の整理・提示)

齊田 浩見：一般相対論（大同大学 教養部 物理学教室 at 名古屋市）

with 朝木 義晴：電波天文（データ解析）（宇宙科学研究所）

高橋 真聡：理論天文（BH磁気圏）（愛知教育大学）

南部 保貞：一般相対論（名古屋大学）

三好 真：電波天文（観測）（国立天文台）

若松 謙一：光赤外天文（観測）（岐阜大学名誉教授）

「天文学会 年会（春）2012.3.22 at 龍谷大学」に基づいた話です。

1. 導入

1.1 「BH候補天体」から「BHそのもの」へ

- 基本事項: BHは $\left\{ \begin{array}{l} \text{時空の因果構造で決まる特別な領域 (空っぽ)} \\ \text{内部で物質が定常的に留まるのは不可能 (特異点)} \\ \text{物質が詰まっている他の天体とは本質的に異なる} \end{array} \right.$
- 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）

◇ コメント

「地平面」には何種類も定義がある
「事象の地平面」には { 「BHの事象の地平面」
「宇宙論的事象の地平面」 } の2種類ある
どちらの「事象の地平面」も無限の未来を基準にして定義
(無限未来の時空構造を見ない限り事象の地平面は検出できない)

→ BH観測において「事象の地平面を見る」という言い方は
相対論的に不適切！ (“Event Horizon Telescope” は相対論屋には不可解)

→ 相対論的に適切な言い方：「BH地平面」を見る

しかし、「Visible”なBH地平面」の定義は、まだ相対論的（理論的）に
定められていない。（数学的に上手い定義が未だ不明）

→ **BH Horizon Telescope** なら相対論屋は文句は言わないはず。

(BH観測計画を通して「Visible BH地平面」の数学的な定義も考えたい。)

2. 一般相対論的な理論へ向けて：正攻法の3部構成

(1) 地平面に吸い込まれる 一般相対論的な降着流

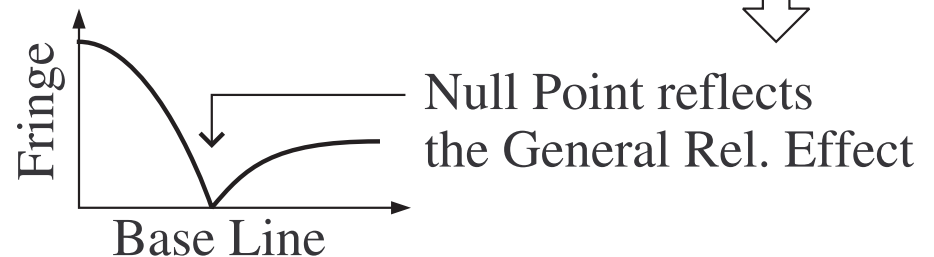
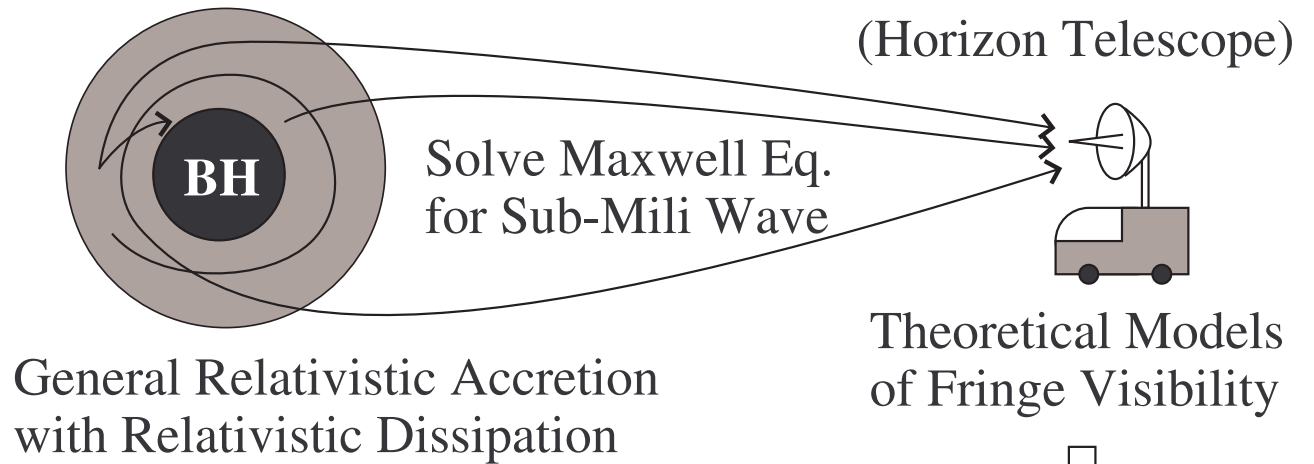
因果的な散逸
重力場・時空構造
(相対論屋)

プラズマ・磁場
乱流・発光過程
(理論天文屋)



一般相対論に基づき，かつ

可能な限りパラメータへの依存度が低い降着流・発光モデルの提示。

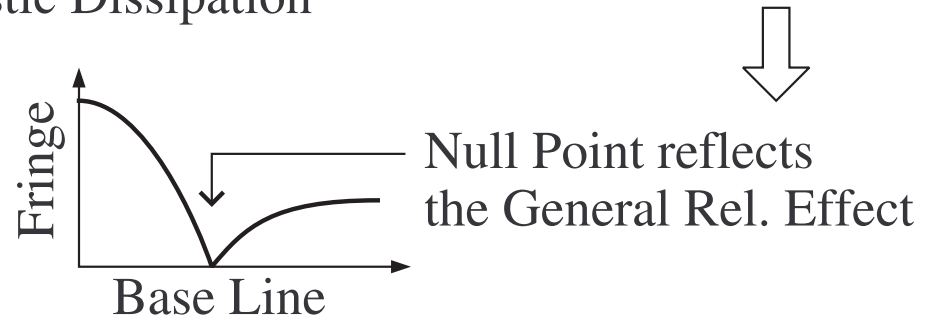
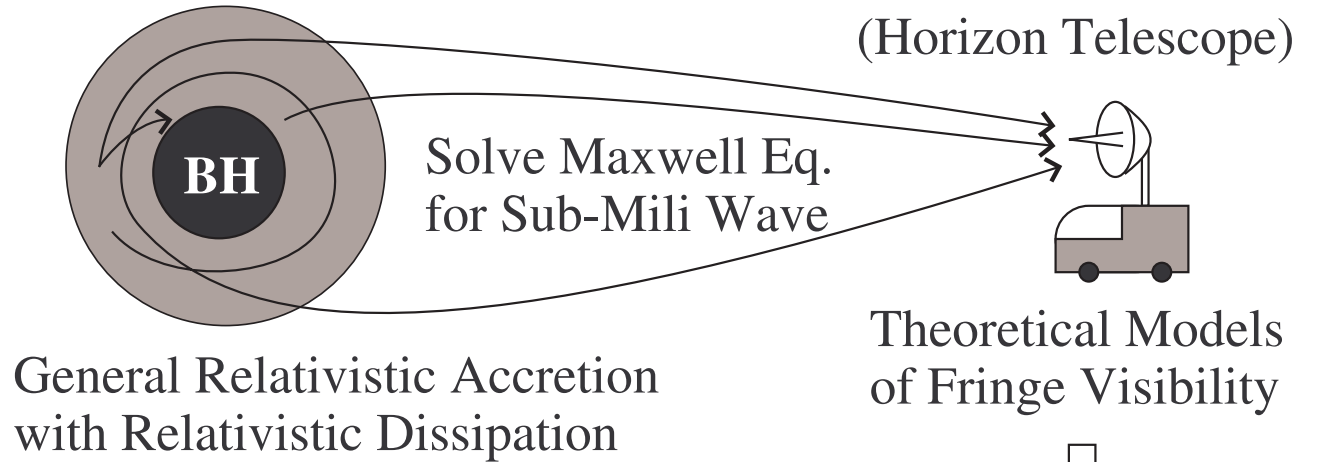


List the theoretical variations of the Fringe Curves based on General Relativity strictly !

相対論と理論天文が協力すべき課題

(2) BH時空上の光の伝播
や回折・干渉の計算

- 第一近似：
 - 光の測地線
- 波動計算：
 - Teukolsky 方程式
- 星間物質の影響：
 - 天文学の蓄積



List the theoretical variations of the Fringe Curves based on General Relativity strictly !

(3) BHシャドウとそのFringe Visibility 計算



様々な『BH周辺環境』を想定してフリンジ曲線のテンプレートを用意。

(→ 観測結果と照合)

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)

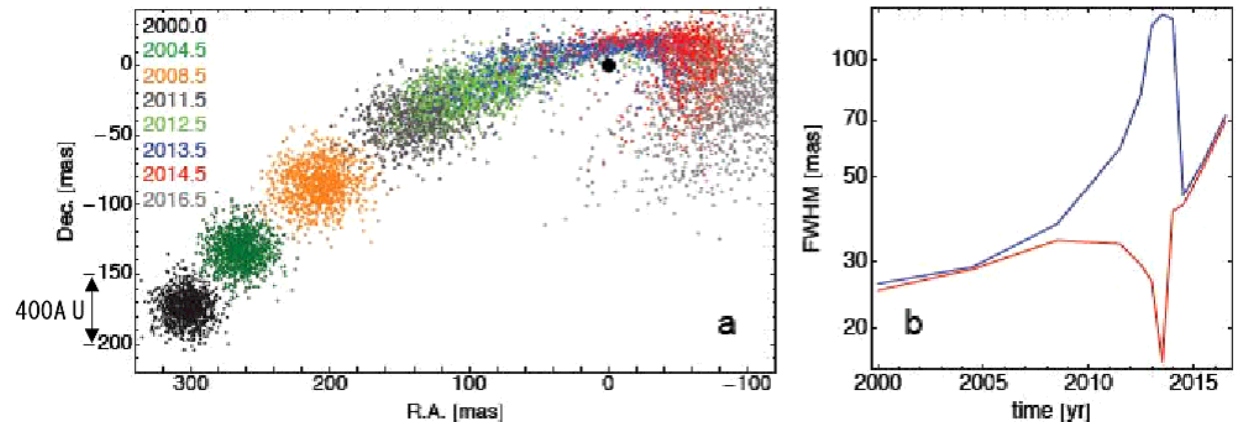
- SgrA* (400万 M_{\odot}) に,

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.

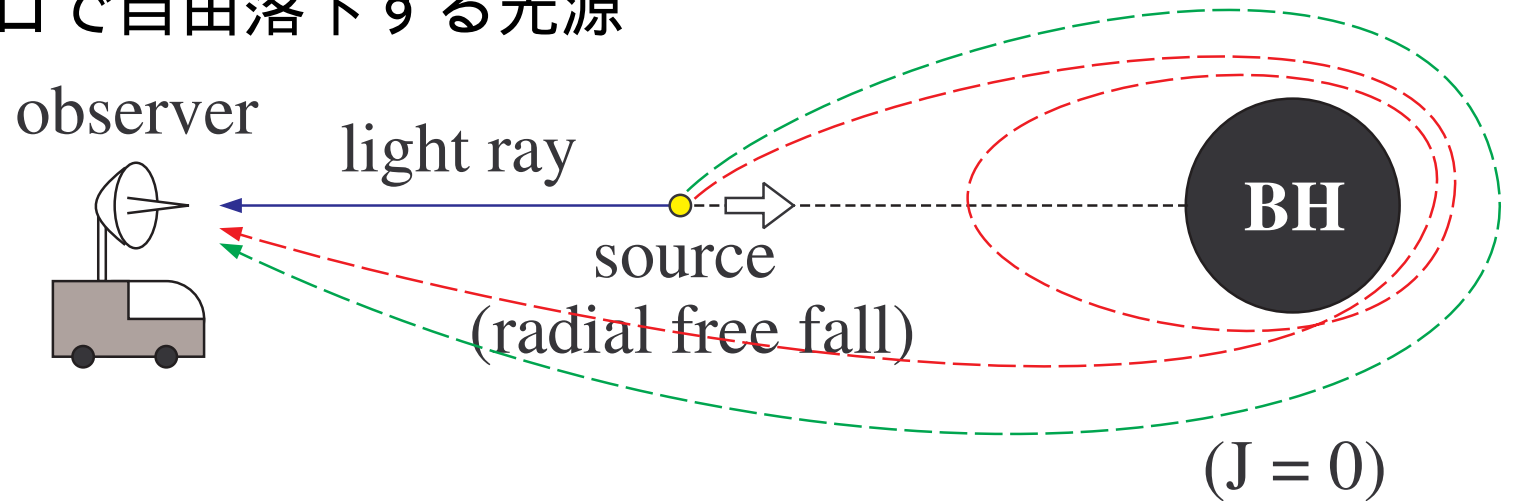
3.2 BHの存在を示す確かな観測量：一般相対論の理論的示唆

- BHに吸い込まれる粒子からの波動（電磁波）を遠方で観測

→ 単純化して現象の本質を評価する：

- Schwarzschild BH (半径 R_{BH} , 角運動量 $J = 0$)
- 視線方向に初速ゼロで自由落下する光源
- 視線方向の光線

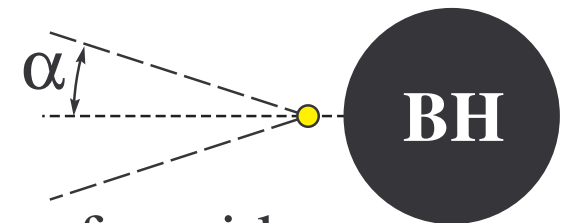
正確には、視線方向以外の光線も観測量に影響するが、ここでは最も効く効果を析的に評価。
 (右図の青線で示す軌道の光)



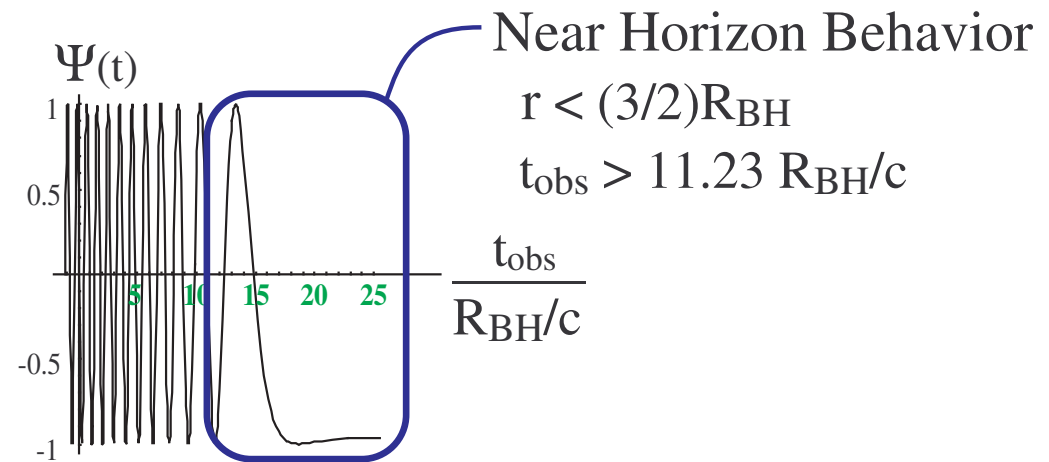
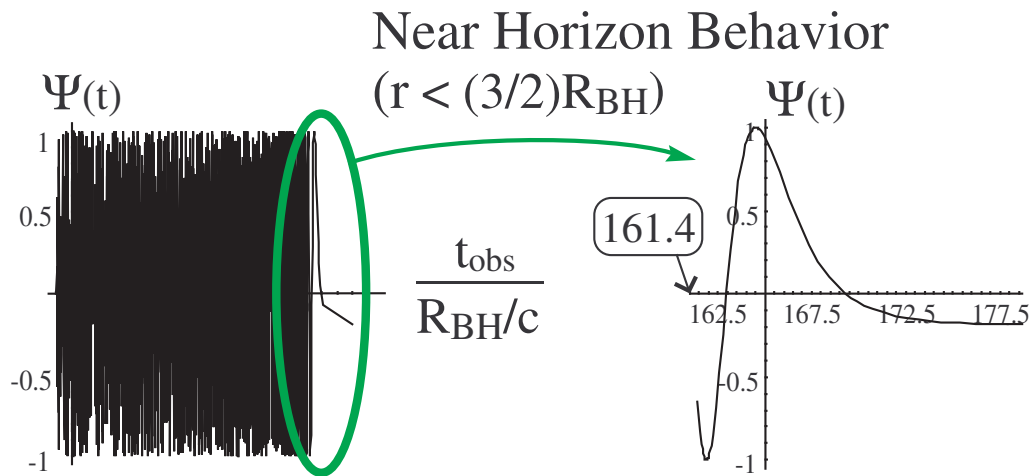
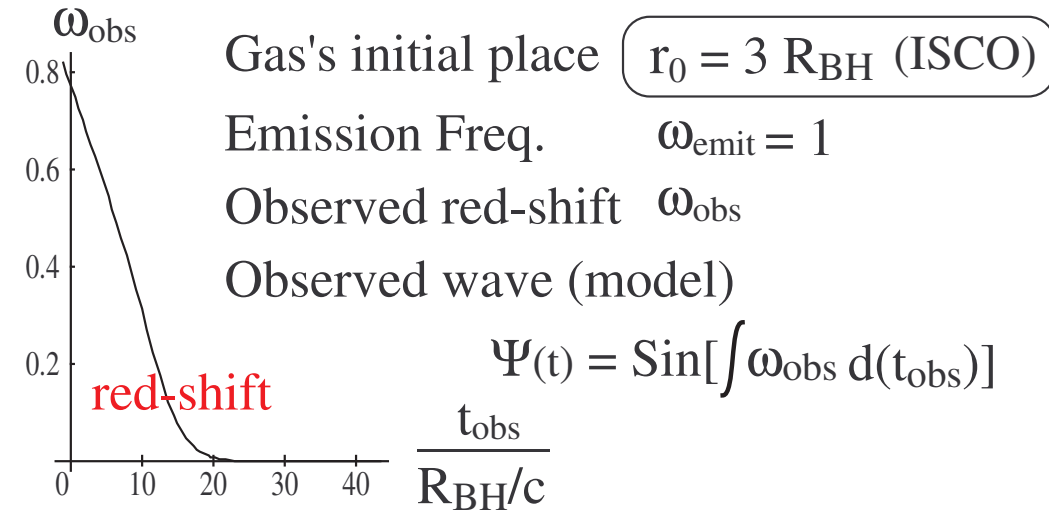
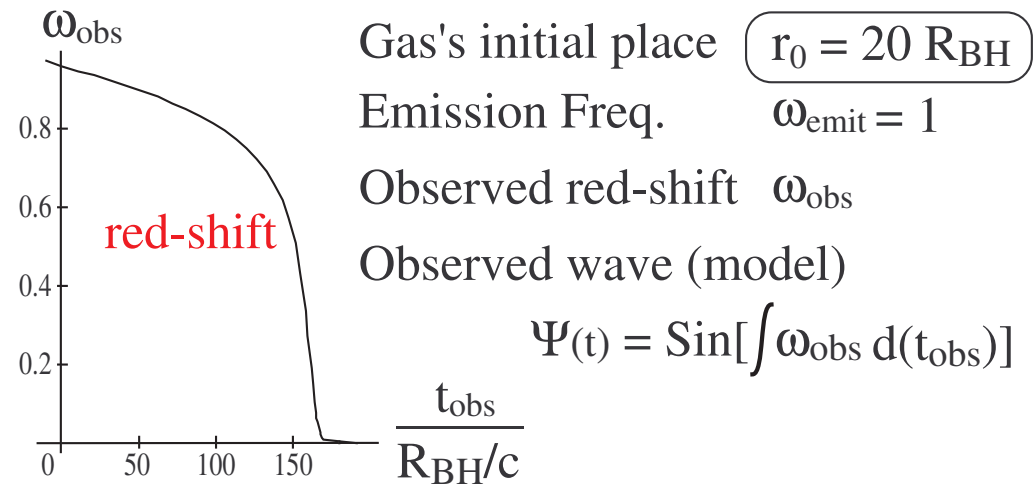
$$\alpha \rightarrow \pi \text{ as } r_s \rightarrow \infty$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \text{ at } r_s = \frac{3}{2} R_{BH}$$

$$\alpha \rightarrow 0 \text{ as } r_s \rightarrow R_{BH} \text{ cone of avoidance}$$



● 観測される周波数（無限の赤方偏移）と波動（引き伸ばし）



→ 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**が得られればBH存在の**確証**！

（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・・・

● 実数の波動でパワーを計算：

$$\begin{cases} \psi_{\sin}(t_{\text{obs}}) := A(\omega_{\text{emit}}) \sin[i\Theta(t_{\text{obs}})] \\ \psi_{\cos}(t_{\text{obs}}) := A(\omega_{\text{emit}}) \cos[i\Theta(t_{\text{obs}})] \end{cases}$$

→ フーリエ変換：

$$\begin{cases} f_{\sin}(\Omega, \omega_{\text{emit}}) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\Omega t_{\text{obs}}} \psi_{\sin}(t_{\text{obs}}) dt_{\text{obs}} \\ f_{\cos}(\Omega, \omega_{\text{emit}}) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\Omega t_{\text{obs}}} \psi_{\cos}(t_{\text{obs}}) dt_{\text{obs}} \end{cases}$$

→ パワースペクトル：

$$\begin{cases} P_{\sin}(\Omega) := |f_{\sin}(\Omega, \omega_{\text{emit}})|^2 = \frac{\pi R_{\text{BH}} |A|^2}{c \Omega} \frac{(e^{2\pi R_{\text{BH}} \Omega / c} - 1)^2}{e^{4\pi R_{\text{BH}} \Omega / c} - 1} \\ P_{\cos}(\Omega) := |f_{\cos}(\Omega, \omega_{\text{emit}})|^2 = \frac{\pi R_{\text{BH}} |A|^2}{c \Omega} \frac{(e^{2\pi R_{\text{BH}} \Omega / c} + 1)^2}{e^{4\pi R_{\text{BH}} \Omega / c} - 1} \end{cases}$$

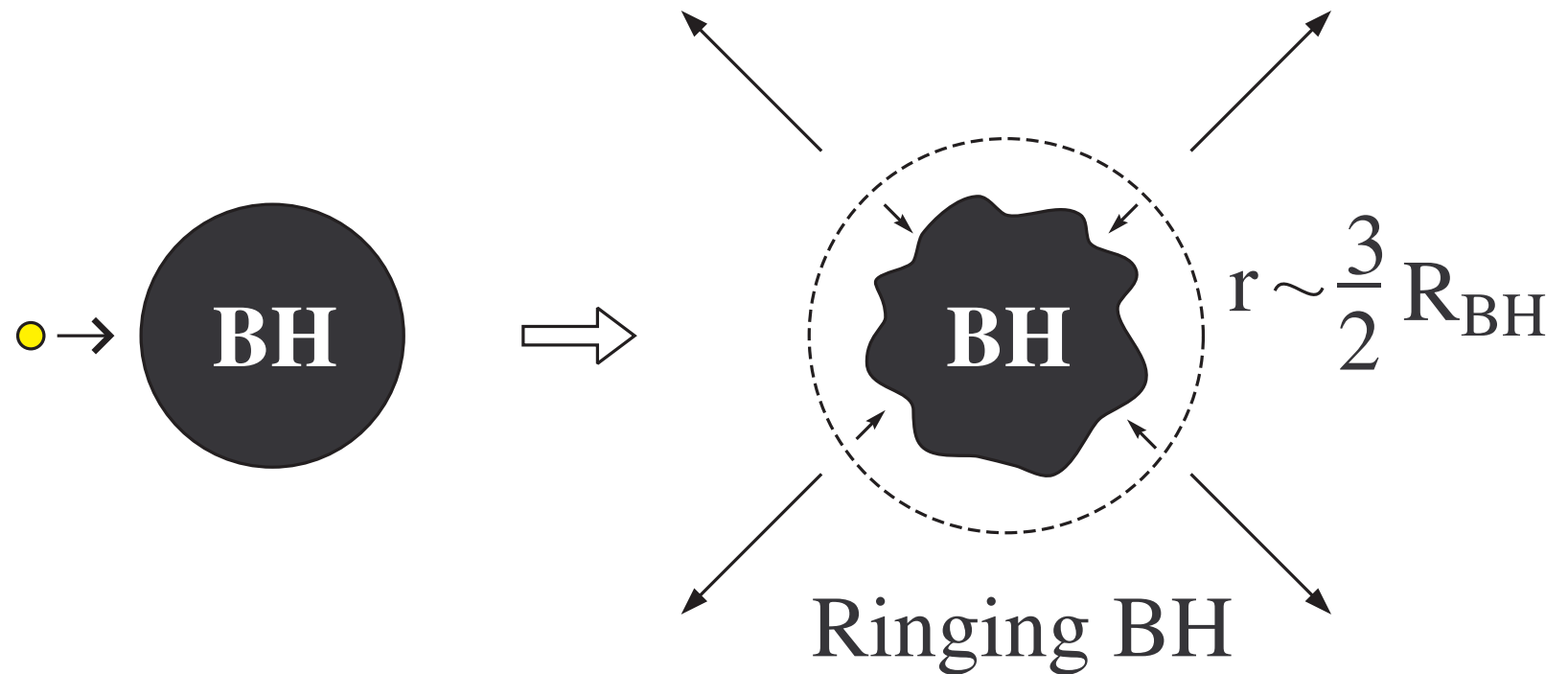
→ 注意：実際に測定される波動（ $C_1 \psi_{\sin} + C_2 \psi_{\cos} + \dots$ ）では，展開係数 C_k が分からないと，測定値にフィットすべき理論曲線が描けない。

4. その他の『BHだからこそ』の観測量：BH準固有振動

4.1 準固有振動 (Quasi-Normal Mode = QNM) の定義

- 準固有振動 := 入射波なし，放射波のみの波動モード

→ BHでは...



→ 基本的には重力波で実現（電磁波で同じ境界条件は実現する？）

4.2 BH QNM の特徴

- BHの質量 M と角運動量 J だけで $\left\{ \begin{array}{l} \text{振動数 } \omega_{\text{QNM}} \\ \text{減衰率 } \gamma_{\text{QNM}} \end{array} \right.$ が決まる減衰振動

例: $J = 0$ のとき, $\omega_{\text{QNM}} = \frac{a_n}{R_{\text{BH}}}$, $\gamma_{\text{QNM}} = \frac{b_n}{R_{\text{BH}}}$ ($a_n, b_n = \text{const.}$)

(係数 a_n, b_n は $n = 0, 1, 2, \dots$ で決まる加算 (無限) 個の数)

→ $\omega_{\text{QNM}}, \gamma_{\text{QNM}}$ もBHそのものを反映する観測量

(重力波検出実験では QNM が重要な測定量の一つとの認識)

◇ 今回の『SgrA* へのガス塊落下』では, ガス塊の質量が SgrA* の質量に比べて小さすぎるので, 重力波 QNM の検出は期待できない。

→ 検討するなら, 電磁波 QNM の可能性 (あり得るかな?)

5. まとめと今後

- 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！
 - $\left\{ \begin{array}{l} \text{観測計画のデザインと実証・検証} \\ \text{BH存在の確証を得る理論の整備} \end{array} \right.$ 興味ある方を大歓迎！
- 理論整備1：相対論的な散逸・光伝搬を含んだ降着流（正攻法）
 - $\left\{ \begin{array}{l} \text{因果的な散逸・強い重力場：一般相対論のセンスが必要} \\ \text{発光・プラズマ・乱流過程：天文理論のセンスが必要} \end{array} \right.$
- 理論整備2：SgrA* に落下するガスの利用
 - Kerr BH に落ちる粒子が出す光のパワースペクトルの測定値から
BH時空が備える普遍的なプランク分布の評価
- 予備的課題：電磁波による準固有振動モードが発生し得るか検討