

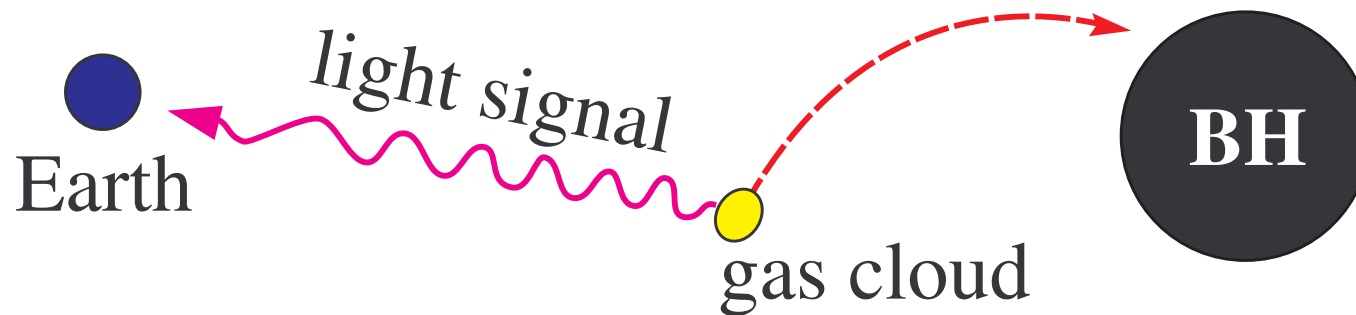
BHを如何に見るか？

一人時間差干涉

Time Delay Self-interferometry (TDS)

---

齊田浩見（大同大学） / [saida@daido-it.ac.jp](mailto:saida@daido-it.ac.jp)



# 1. ニュートン力学では理解できないBHを「見る」ための戦略

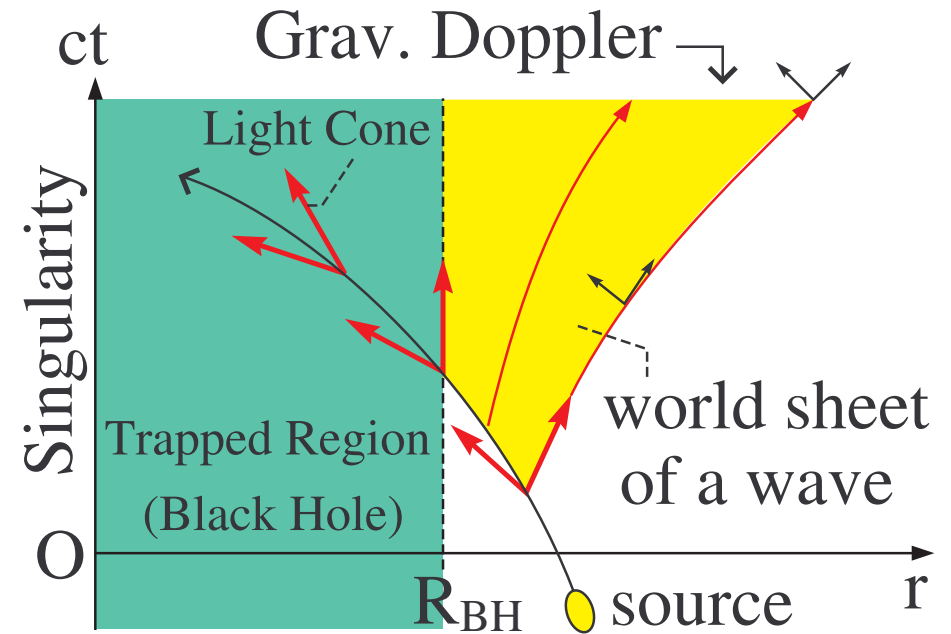
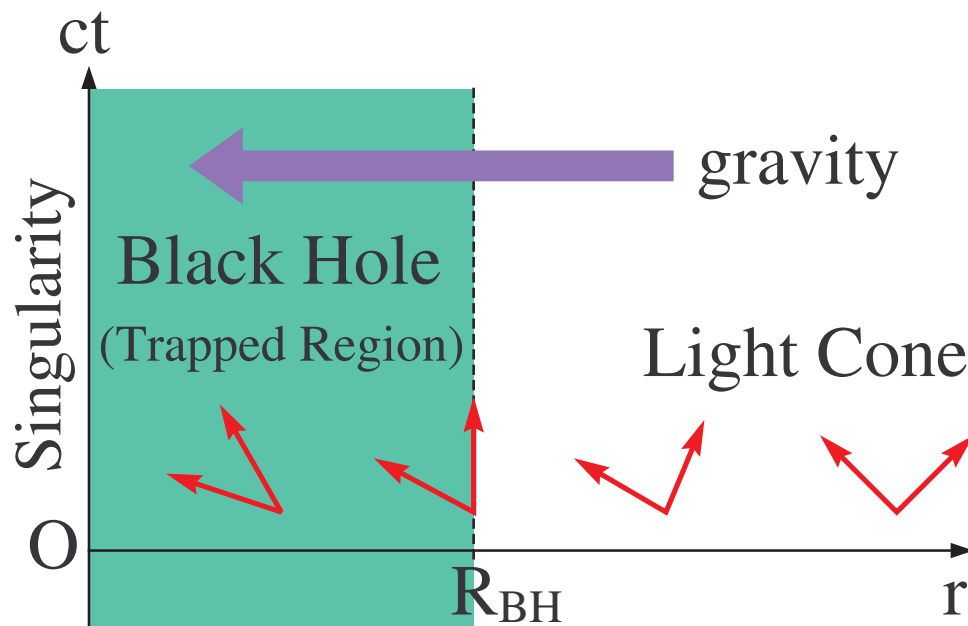
- そもそも「極端に曲がった時空」であるBHを見るとは...

定性的：

曲がった時空の効果の観測でBH地平面の存在を確認すること

定量的：

曲がった時空の効果から質量・角運動量（・電荷）を測ること



- どんな「曲がった時空の効果」を狙うか？

- 強い重力レンズ効果 **Strong Gravitational Lensing (SGL)** に注目

- ◇ SGLの空間的情報 — 見た目の画像

- BHシャドー

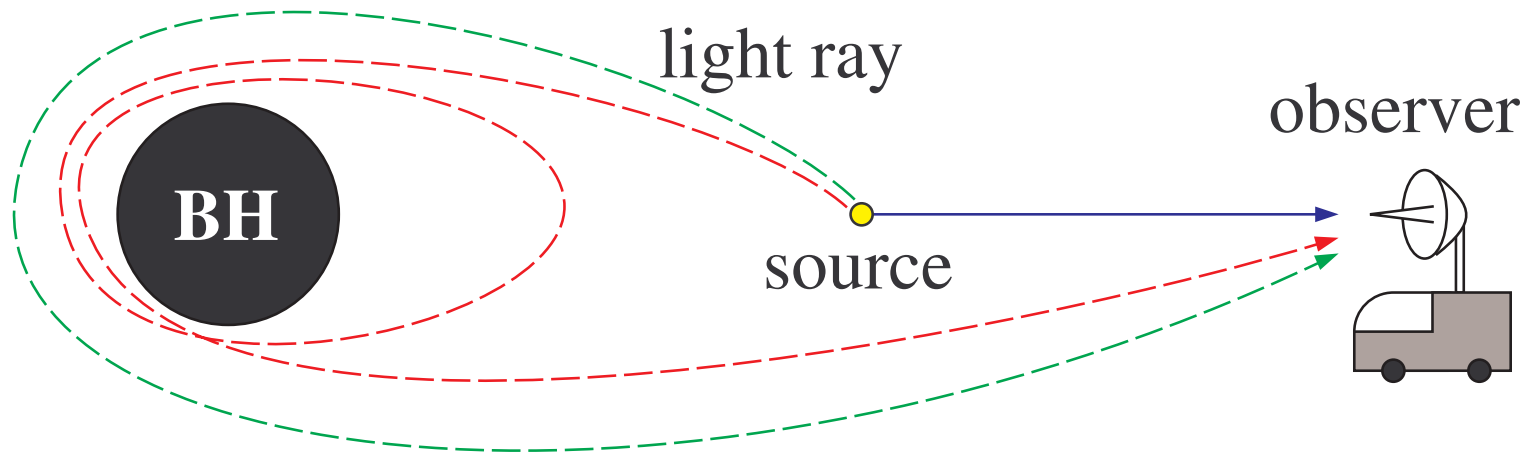
- ◇ SGLの時間的情報 — 電波の時間的な振動パターン

- 一人時間差干渉 **Time Delay Self-interferometry**

## 2. 一人時間差干渉で可能な「BHの測り方」

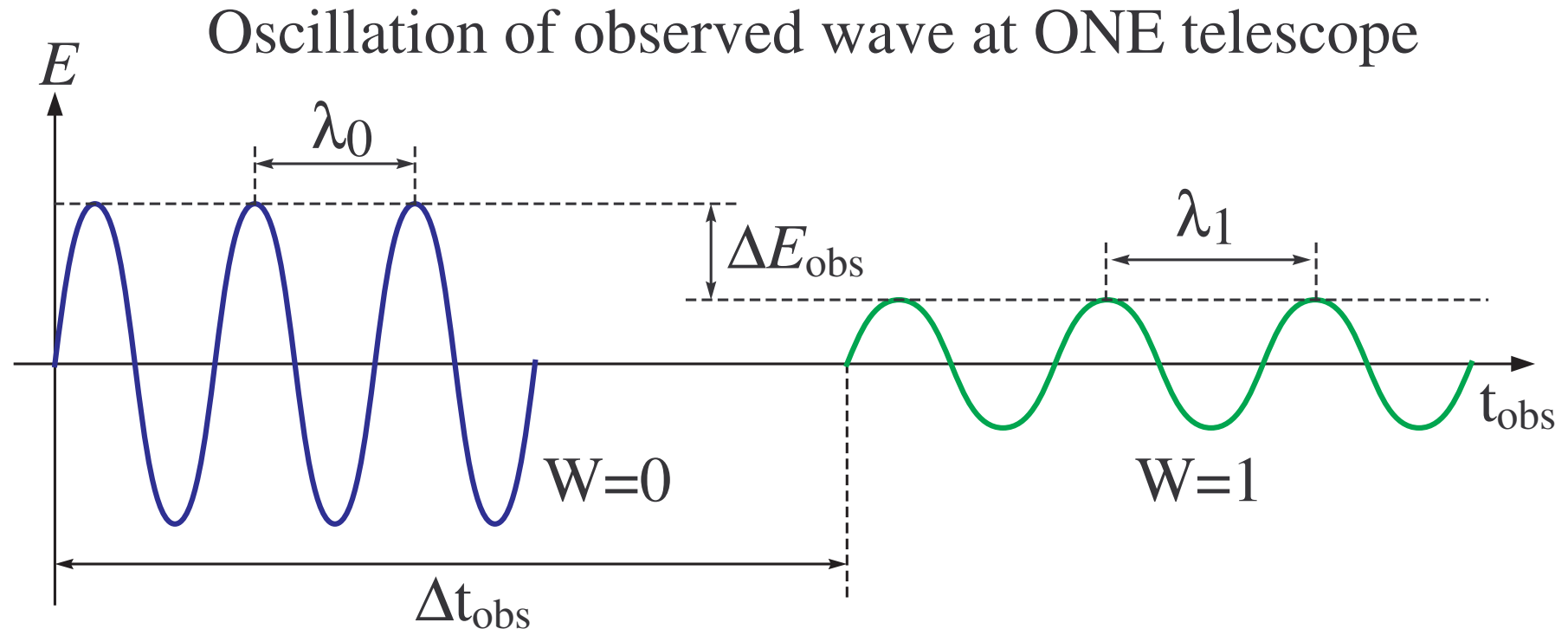
( Time Delay Self-interferometry , TDS  $\neq$  Tokyo Disney Sea)

- 設定 :  $\left\{ \begin{array}{l} \text{BH近くの光源から同時に出た光線を観測} \\ \text{全ての方向にパルスの(数波長)で強度が同じ光線} \end{array} \right.$



→ 「巻付き数  $W = 0$  の光線」と「巻付き数  $W = 1$  の光線」の  
 $\left\{ \begin{array}{l} \text{到達時間の差} \\ \text{強度の比} \end{array} \right.$  で『BH観測』が出来そう!?

- 2つの光  $W = 0, 1$  が, 1つの電波望遠鏡にどう表れるか?



- 
- $\Delta t_{\text{obs}}$  : 主に, BHの強い重力レンズで決まる
  - $\Delta E_{\text{obs}}$  : 主に, BHの強い重力レンズで決まる
  - $\lambda_0 \neq \lambda_1$  : 光源の速度による運動論的ドップラー効果

\* 厳密には,  $\Delta t_{\text{obs}}$  と  $\Delta E_{\text{obs}}$  は BH, 光源, 観測者の位置関係 にも依存。

● 2つの光（電波） $W = 0$  と  $W = 1$  を如何にして同定するか？

→ 同一光源が同時放射した2つの光  $W = 0, 1$  は coherent なはず。

→ 自己干渉 “Self-interference” によって

2つの光  $W = 0, 1$  を同定できるのでは？

→ 一人時間差干渉（ Time Delay Self-interferometry , TDS ）

◇ 観測家に聞きたいこと …

一人時間差で干渉をとるには  $\lambda_0 \simeq \lambda_1$  が必要か？

しかし，変調すればよいので， $\lambda_0 \simeq \lambda_1$  は特に考えなくてよい？

電波望遠鏡で検出できる波長域に  $\lambda_0, \lambda_1$  が入るかどうかが重要？

- 今（これから）考えている問題

測定量とBH質量・角運動量（角速度）の関係：

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{質量} \\ \text{角運動量（角速度）} \end{array} \right. , \begin{array}{l} M(\Delta t_{\text{obs}}, \Delta E_{\text{obs}}, \lambda_0, \lambda_1) \\ J(\Delta t_{\text{obs}}, \Delta E_{\text{obs}}, \lambda_0, \lambda_1) \end{array}$$

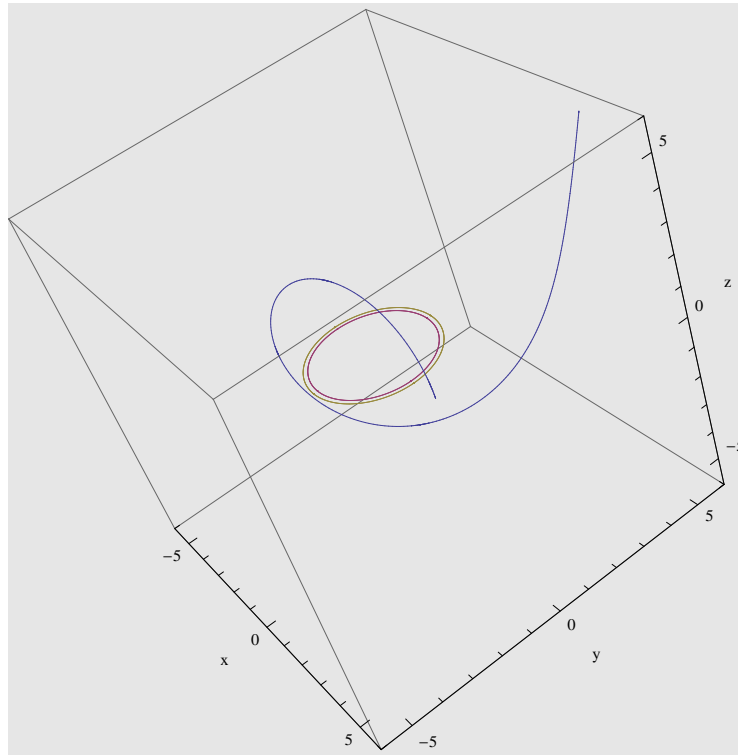
→ 測定量と  $M, J$  の関係の公式化を目指す。

→ 困難な点：光の測地線方程式を，

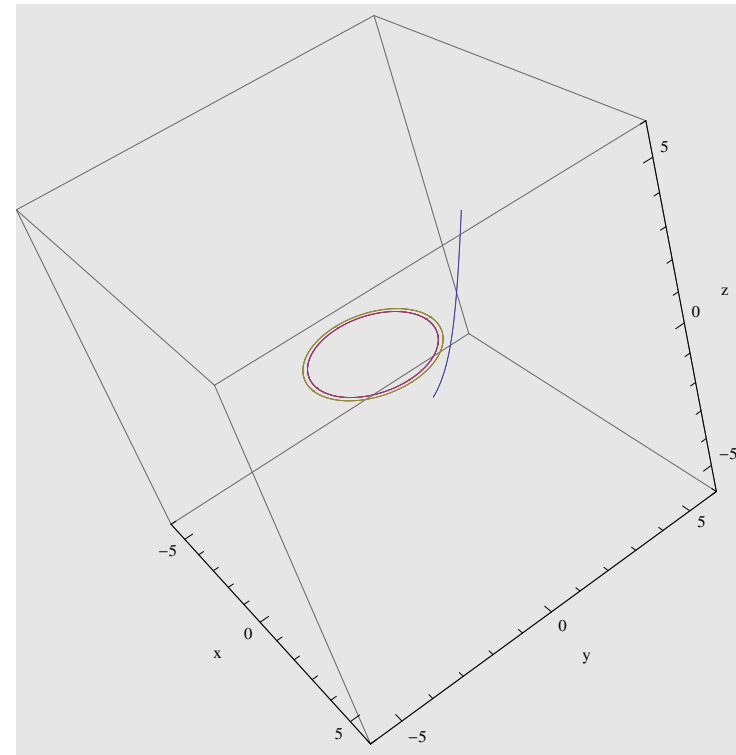
始点・終点・巻付き数を指定してどう解くか？

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{数値的手法} \\ \text{解析的手法} \end{array} \right. \begin{array}{l} \rightarrow \text{とにかくシューティング! ?} \\ \rightarrow \text{光の測地線方程式の解は楕円積分で書けそう} \\ \rightarrow \text{楕円関数を駆使して数値計算の簡素化を工夫} \end{array}$$

- お試し計算：  $M$  ,  $J$  , 光源を与えて  $\Delta t_{\text{obs}}$  ,  $\Delta E_{\text{obs}}$  ,  $\lambda_0/\lambda_1$  を評価



$z$  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 :  $J = (1/2)(GM^2/c)$  ← 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)



$$\diamond \text{他のパラメータ：} \left\{ \begin{array}{l} \text{観測者の位置} : \left[ \begin{array}{l} r = 3.65 \times 10^7 (GM/c^2) \\ \theta = 0.300 \text{ rad } (17^\circ) \\ \phi = 0.405 \text{ rad} \end{array} \right. \\ \text{光源から見た} \\ \text{放射時の振動数} : \omega_{\text{source}} = \frac{2\pi}{10} \end{array} \right.$$

$$\diamond \text{計算結果：} \left\{ \begin{array}{l} \Delta t_{\text{obs}} \simeq 30 \frac{GM}{c^3} \rightarrow \left[ \begin{array}{l} \text{Sgr.A}^* : \text{約 } 10 \text{ min.} \\ \text{Cyg.X-1} : \text{約 } 0.001 \text{ sec.} \end{array} \right. \\ \left( \frac{E_1}{E_0} \right)^2 = \frac{[\text{intensity of } W = 1]}{[\text{intensity of } W = 0]} \simeq 0.00868 \sim O(10^{-2}) \\ \frac{\lambda_0}{\lambda_1} = \frac{[\text{freq. of } W = -0.94]}{[\text{freq. of } W = 0.06]} \simeq 0.956871 \end{array} \right.$$

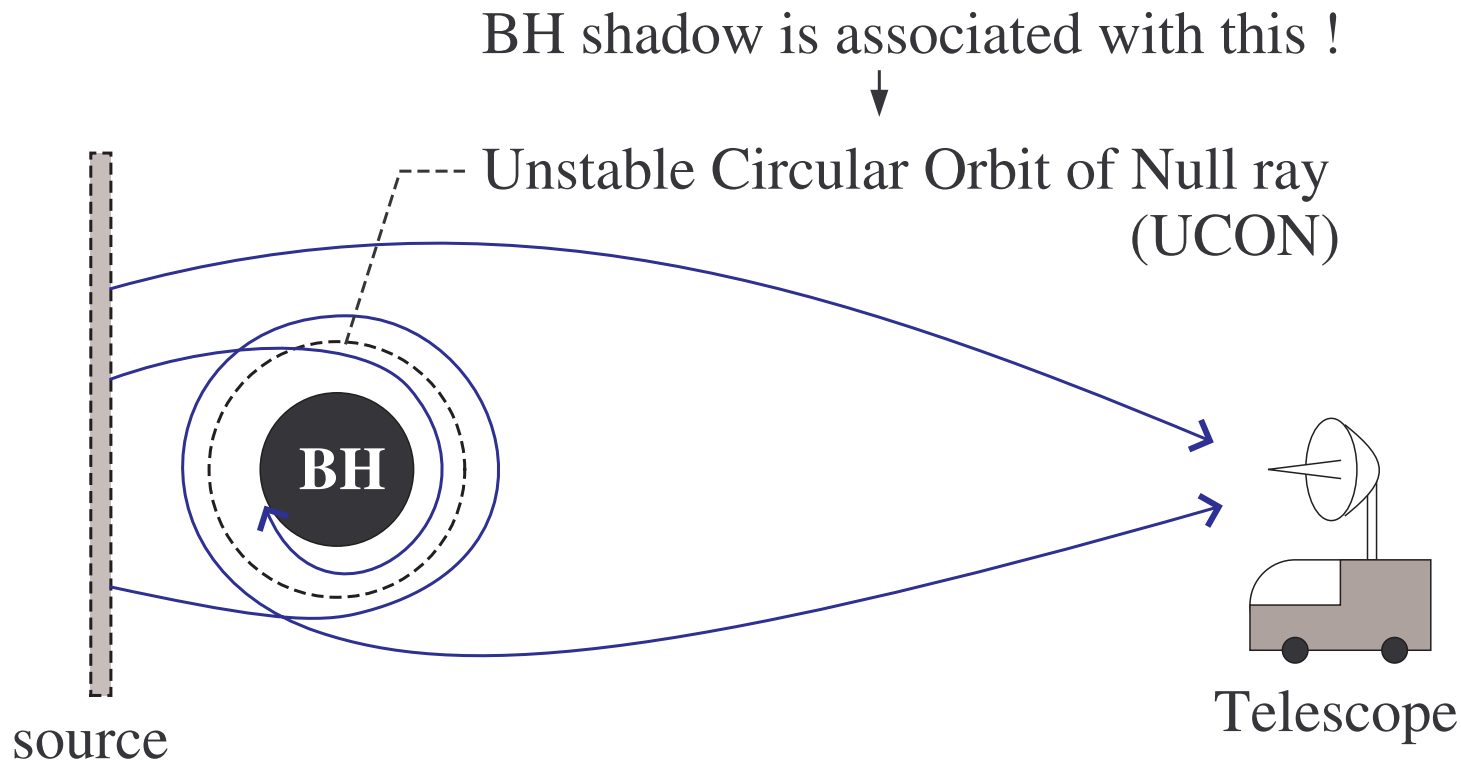
→ 今後，パラメータを振った計算を出来るように工夫する

### 3. 強い重力レンズに関する根本的な問題点

- 厳密には  $\begin{cases} \text{BH シャドウ} & \rightarrow \text{光の不安定円軌道の影} \\ \text{TDSの光} & \rightarrow \text{光の不安定円軌道に巻きつく} \end{cases}$

→ これらの強い重力レンズ効果  $\stackrel{?}{=} \text{BH 地平面の存在} \dots ???$

→ **BH 地平面が存在すれば光の不安定円軌道も必ず存在するか？**



## 4. まとめ

- BHを「見る」とは「曲がった時空の効果」を捉えること

→ 強い重力レンズ効果に注目

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{見た目の画像} \quad : \text{BHシャドー} \\ \text{電波の時間変動} \quad : \text{一人時間差干渉 TDS} \end{array} \right.$$

- TDSの測定量とBH質量・角運動量の関係：
$$\left\{ \begin{array}{l} M(\Delta t_{\text{obs}}, \Delta E_{\text{obs}}, \lambda_0, \lambda_1) \\ J(\Delta t_{\text{obs}}, \Delta E_{\text{obs}}, \lambda_0, \lambda_1) \end{array} \right.$$

→ この関係を如何に導くか考え中

- 重力理論の問題

**BH地平面が存在すれば光の不安定円軌道も必ず存在するか？**

→ 強い重力レンズでBHを見る上で、

この問題を理解することは必須だと思う。