

SgrA*を巡る恒星S2観測による 重力理論の制限への期待

SAIDA Hiromi / 齊田浩見（大同大学）

（天文に興味を持つ一般相対論の理論物理屋です。）

銀中祭り, 2014.11.15-16

1. 重力理論の検証

1.1 一般相対性理論 (ざっくりしたまとめ)

- 実験事実：

(a) 光速不変の原理 + 相対性原理

→ 特殊相対性理論

- 光速がこの宇宙の最高速度
- 同時刻の概念の相対性
- 質量エネルギー

(b) 等価原理

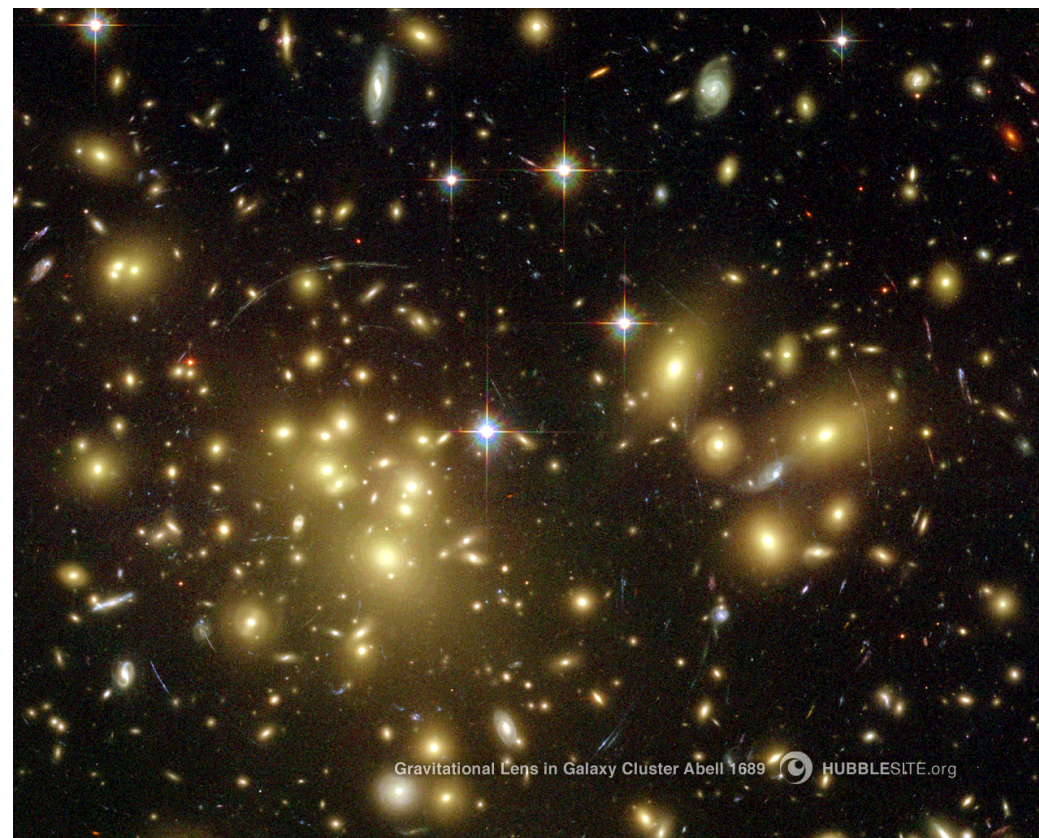
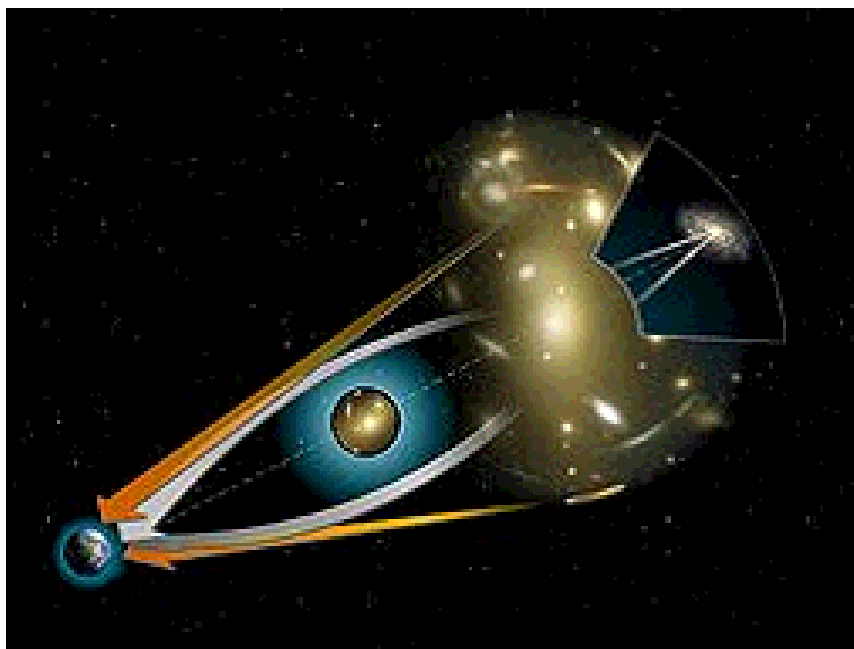
- 自由落下系で局所的に重力が打ち消される。
(局所的に特殊相対論が成立する。)
- 光の軌道も重力で曲がる (次ページ)

——以上は実験事実——

実験事実から何を読み取るか？

参考：上の議論の詳細は省きます。専門外の方々には、もしよければ、ご参考までに高校生向け講座 (at 愛知教育大学) で使った資料をご覧ください。

補足：弱い重力レンズ効果



おとめ座の方向、約24億光年彼方の
銀河団 Abell1689

◇ 光の軌道も重力で曲がることは確認済み！

- 光の軌道が曲がることを理解する戦略

→ 実験事実 (a) , (b) から , 次の基本仮説を導入
(アインシュタイン)

定性的な基本仮説

重力 (物質) があると時空が曲がる , と理解する。
ただし , 局所的には (十分小さな時空領域では) ,
平坦に見えるような曲がり方である。

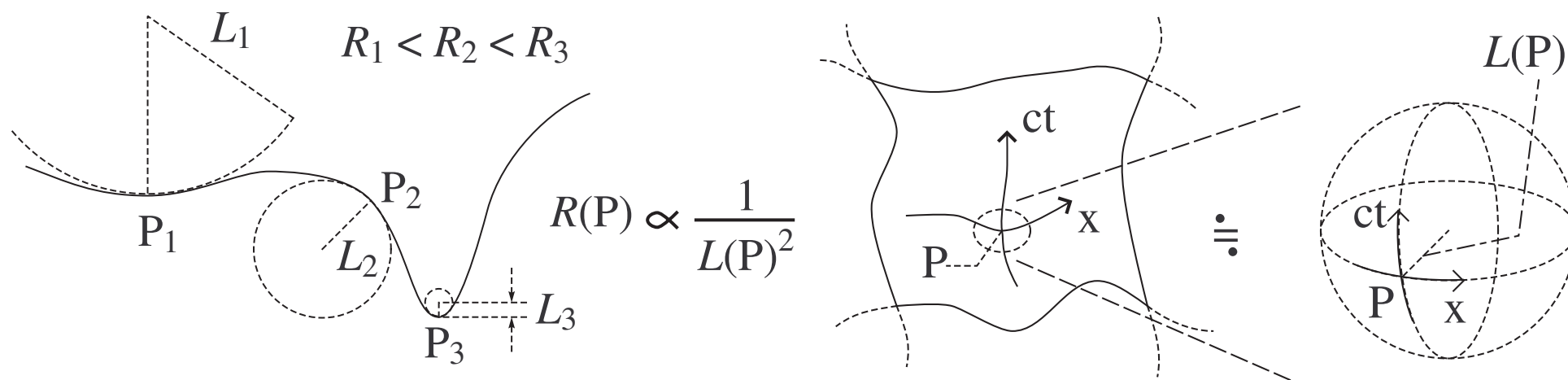
→ この定性的な表現を定量的に表したときに ,
最もシンプルな方程式 (Einstein 方程式) を
仮定するのが一般相対性理論。

- 一般相対性理論：

『重力と時空の曲がり具合（曲率）の関係式』としてシンプルなる形を仮定する。

アインシュタイン方程式：
$$R(P) \propto \frac{G}{c^2} \rho(P)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} G = 6.673 \times 10^{-11} \text{ [m}^3/\text{s}^2 \text{ kg]} , c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ [m/s]} \\ \rho(P) : \text{時空点 } P \text{ での物質の質量密度 [kg/m}^3\text{]} \\ R(P) : \text{時空点 } P \text{ での時空の曲率 [1/m}^2\text{]} \dots \text{ 下図参照} \end{array} \right.$$



1.2 重力理論の検証

- 定性的な論点：

『曲がった時空』という考え方で良いのか？

この考え方で実験・観測を説明できる限りは、
きっとOKだと信じる。

→ 以下，曲がった時空という考え方を前提にする。

- 定量的な論点：

アインシュタイン方程式で良いのか？

- ◇ アインシュタイン方程式でOKな実験・観測

- 太陽系惑星空間

- 弱い重力レンズ効果

- パルサー周期の時間変化

・
・
・

弱い重力場におけるテストは一般相対論でOK

- ◇ 一般相対論でOKかどうか未検証な領域
 - 現在の宇宙の加速膨張（？）
 - BH周辺のような強重力場

これらの領域では、アインシュタイン方程式を修正した基礎方程式に基づいた理論で観測を説明・予言する可能性が研究されて続けている。



重力理論の検証のフロンティア

- アインシュタイン方程式の可否を検証する舞台は、
- 宇宙論的な巨大スケールでの重力の現象
 - BH周辺のような極めて強い重力の現象

2. SgrA* を周回する S2

2.1 S2 の観測事実

- SgrA* を周回する恒星がいくつも(?)
観測的に見つかっている → S-stars
- 既知の最短周期の恒星： **S2**
- S2 の軌道を決める要素（大雑把に）
 - SgrA* の質量（重力源）
 - S2 の初期位置と初速度
 - 周辺環境 → まずはクリーンだと仮定 } → 観測が続いている

- 例 : A.M.Ghez, et. al., ApJ689 (2008) 1044–1062
Table 5 (抜粋)

SgrA* 質量 M_{BH}	=	$4.53_{-0.55}^{+0.34} \times 10^6 M_{\odot}$
SgrA* までの距離 R_{SgrA^*}	=	$8.36_{-0.44}^{+0.30}$ kpc
S2の周期 T_{S2}	=	15.78 ± 0.35 year
軌道長半径 a	=	$124.4_{-3.3}^{+2.4}$ micro-arc-second
軌道の離心率 e	=	0.8866 ± 0.0059
近日点に最接近した時刻 t_{peri}	=	西暦 $2002.3358_{-0.0093}^{+0.0065}$ 年
Inclination angle I	=	$-44.7 (= 135.3 - 180) \pm 1.3$ deg
Ascending node angle Ω	=	$45.9 (= 225.9 - 180) \pm 1.3$ deg
Periapsis angle ω	=	$245.18 (= 180 + 65.18) \pm 1.2$ deg

→ ニュートン力学を仮定して軌道を再現すると …

◇ 尤も確からしい値で計算

◇ 座標設定：

○ SgrA*：原点

○ 軌道面： $z = 0$

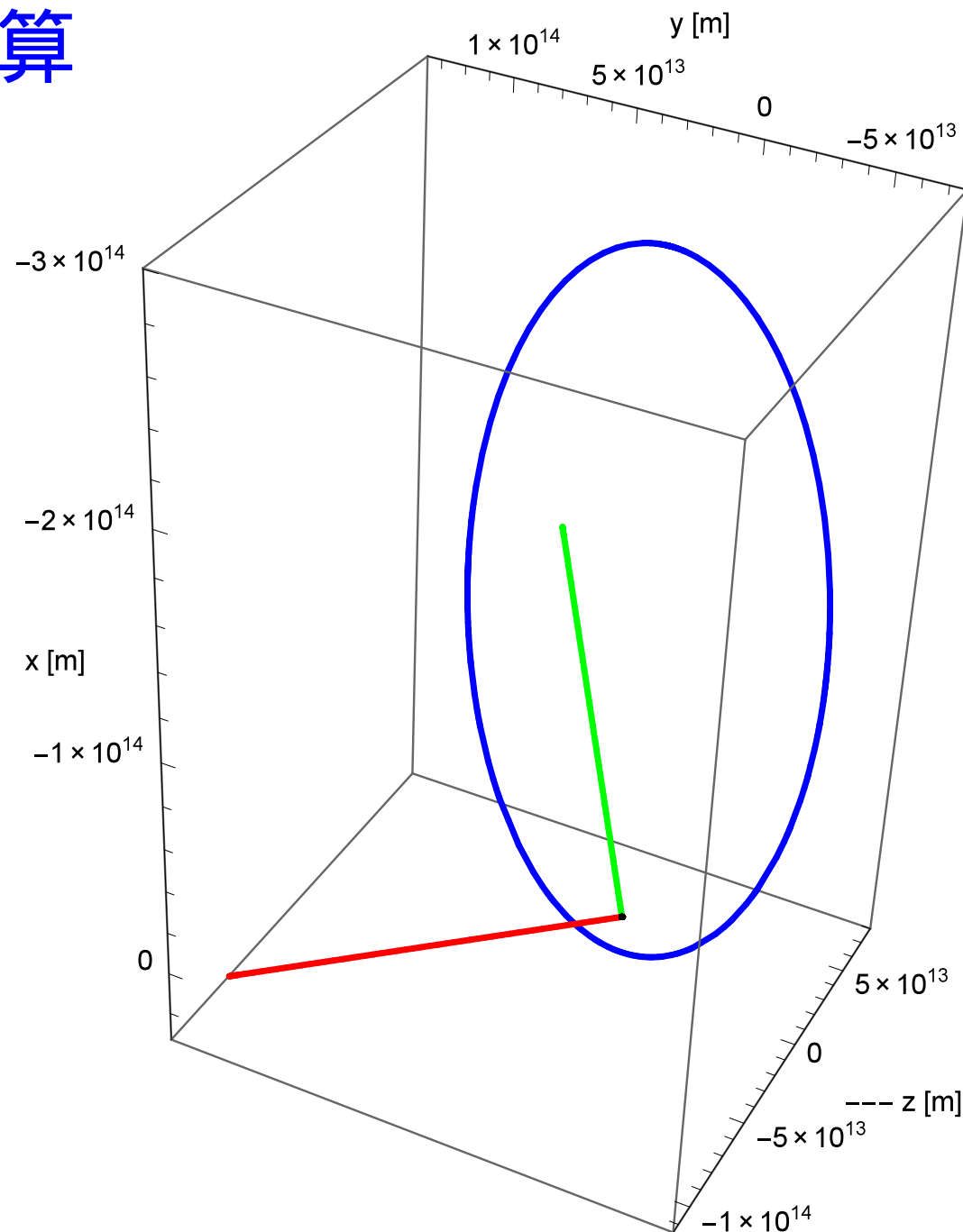
○ 近日点： $(0, y_{\text{peri}}, 0)$

◇ 図は地球から見た配置

○ 赤線：赤経 R.A.

○ 緑線：赤緯 Dec.

○ 運動は図の時計回り

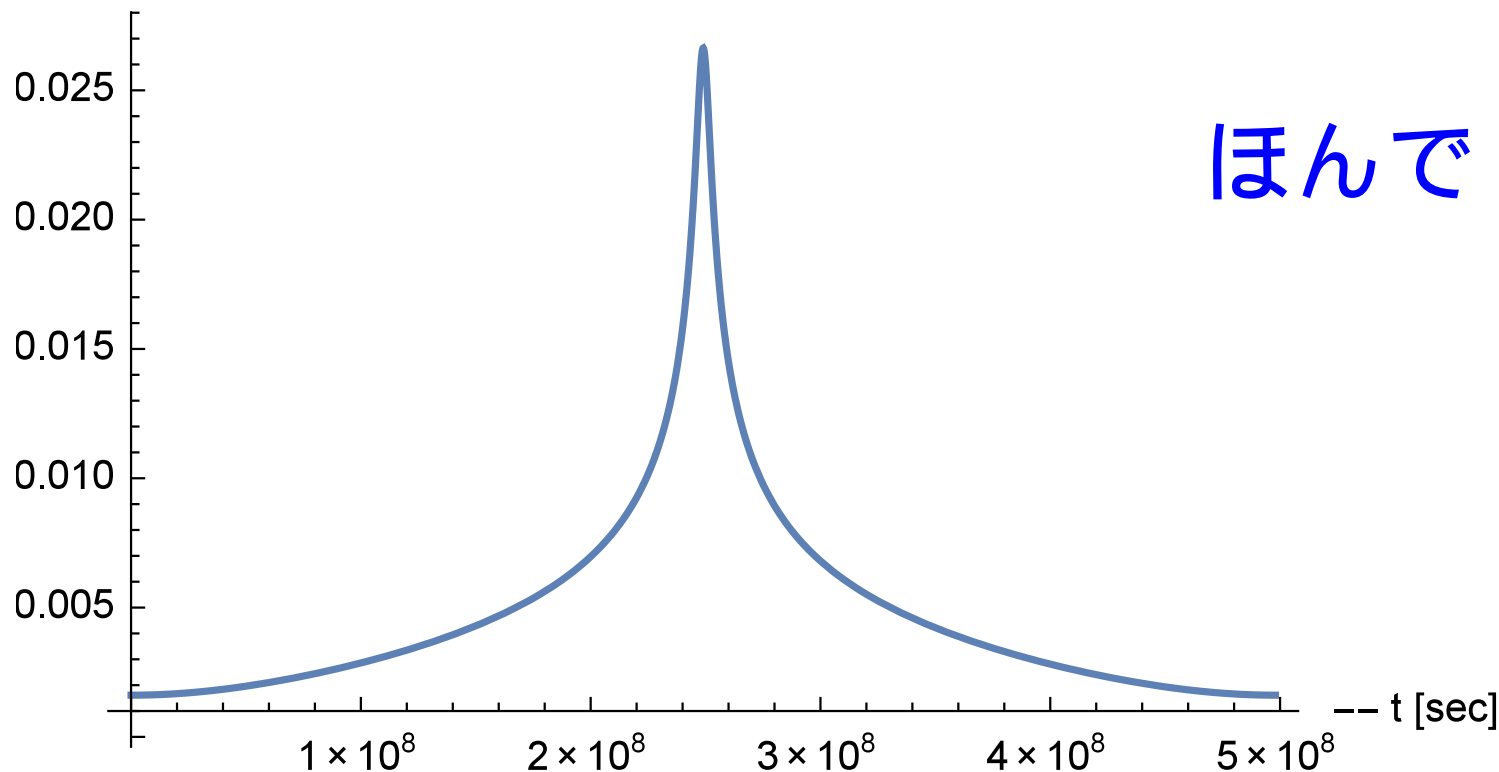


◇ 時間設定：遠日点で $t = 0$ [s]

◇ 近日点： $\frac{|v|}{c} = 0.026$ ($\simeq 7800$ [km/s])

$$\text{ratio } \frac{|v|}{c}$$

(c : 光速)



ほんで、何が良いの？

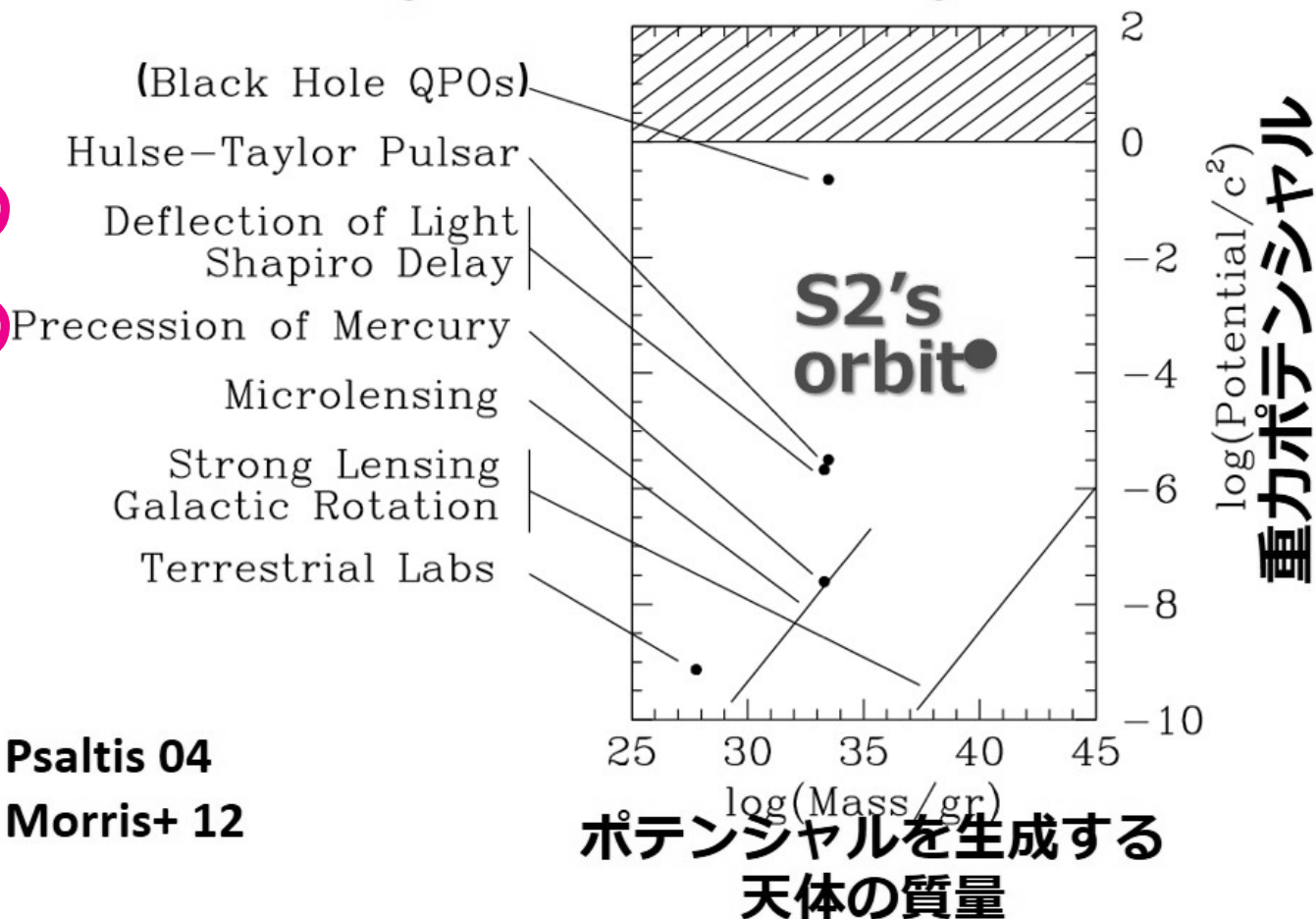
2.2 重力ポテンシャル

- S2に近似点で作用する重力は、識別可能な天体の観測史上で最強の**はず**。

◇ 図の QPO は、もしも QPO が予想通りの天体であれば、この強度の重力が作用しているはず、という参考値（だと思ふ）。

Psaltis 04
Morris+ 12

SMBH Sgr A and Orbiting Star S2* 8/2



(↑ 西山さんのトラペから ↑)

3. S2観測で重力理論に迫る

3.1 何をどう考えるか？

- S2の観測で**少なくとも**これは出来るはず：

『一般相対論は，S2に作用する程度の強度の重力をどの程度の精度で記述できるか』の定量的判断。

- ◇ 『重力は曲がった時空の曲率で表される』という前提あり。

- 定量的議論の基礎として採用する理論：

PPN形式 (Parametrized Post-Newtonian formalism)

PPNパラメータの一つ

パラメータ γ : 空間曲率が一般相対論 ($\gamma = 1$) からどれだけズレるかを表す。

→ 漸近平坦な状況で計量の空間成分は、

$$\underline{\text{時空計量} : } g_{ij} = (1 + 2\gamma U) \delta_{ij}$$

$\left\{ \begin{array}{l} U : \text{ニュートン極限のポテンシャル} \\ \text{座標} : \text{ニュートン極限でデカルト的} \end{array} \right.$

→ 観測的に γ の値に制限をつければよい！

3.2 やりたいこと（齊田の課題）

西山さんPIのS2観測計画（すばる）における
重力・BHの理論屋としての考え：

- 既存の実験・観測による γ の制限の整理
（先行研究の調査・整理）
- PPNパラメータとS2視線速度（すばる望遠鏡の
観測量）の関係の整理
- PPN以外の重力理論ネタを考える

おわり