

ブラックホール 候補天体

銀河中心巨大BH周りの
恒星運動や重力理論

浅田秀樹

(弘前大 理工 物理)

Today's Menu

- 1) これまでの重力テスト
- 2) ブラックホール
の一意性定理
- 3) 観測的検証に向けて
- 4) 理論的な課題

1) イントロ

「重力」

ニュートン

遠隔力



万有引力

アインシュタイン

時空の力学



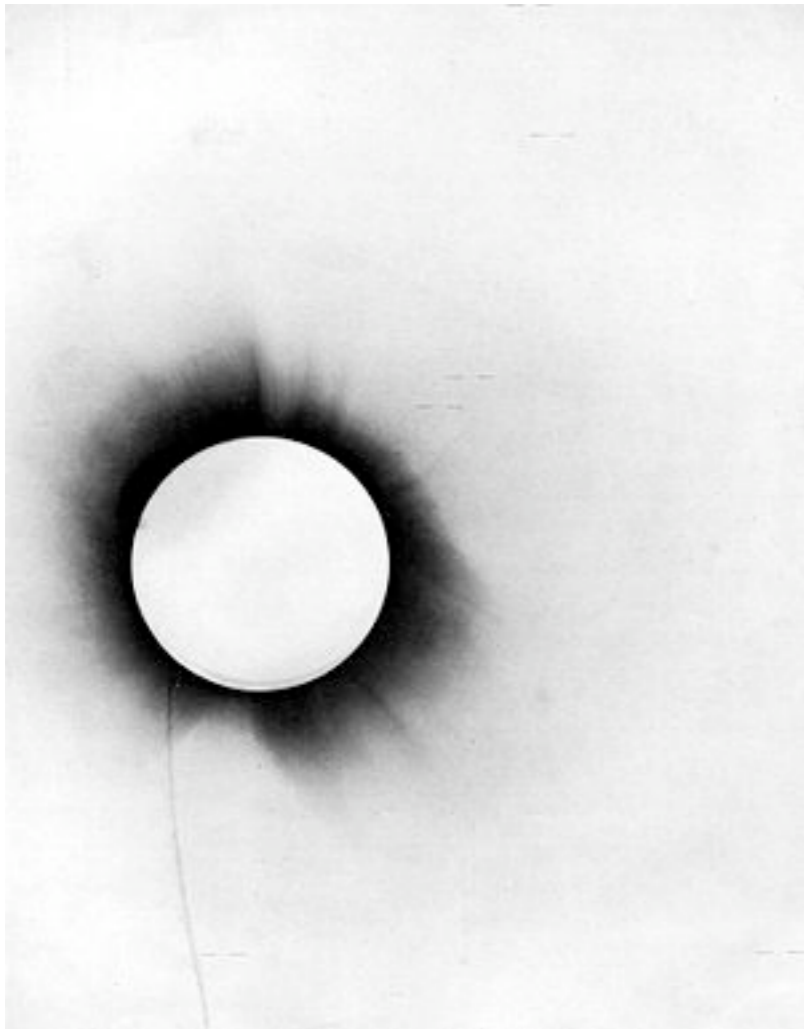
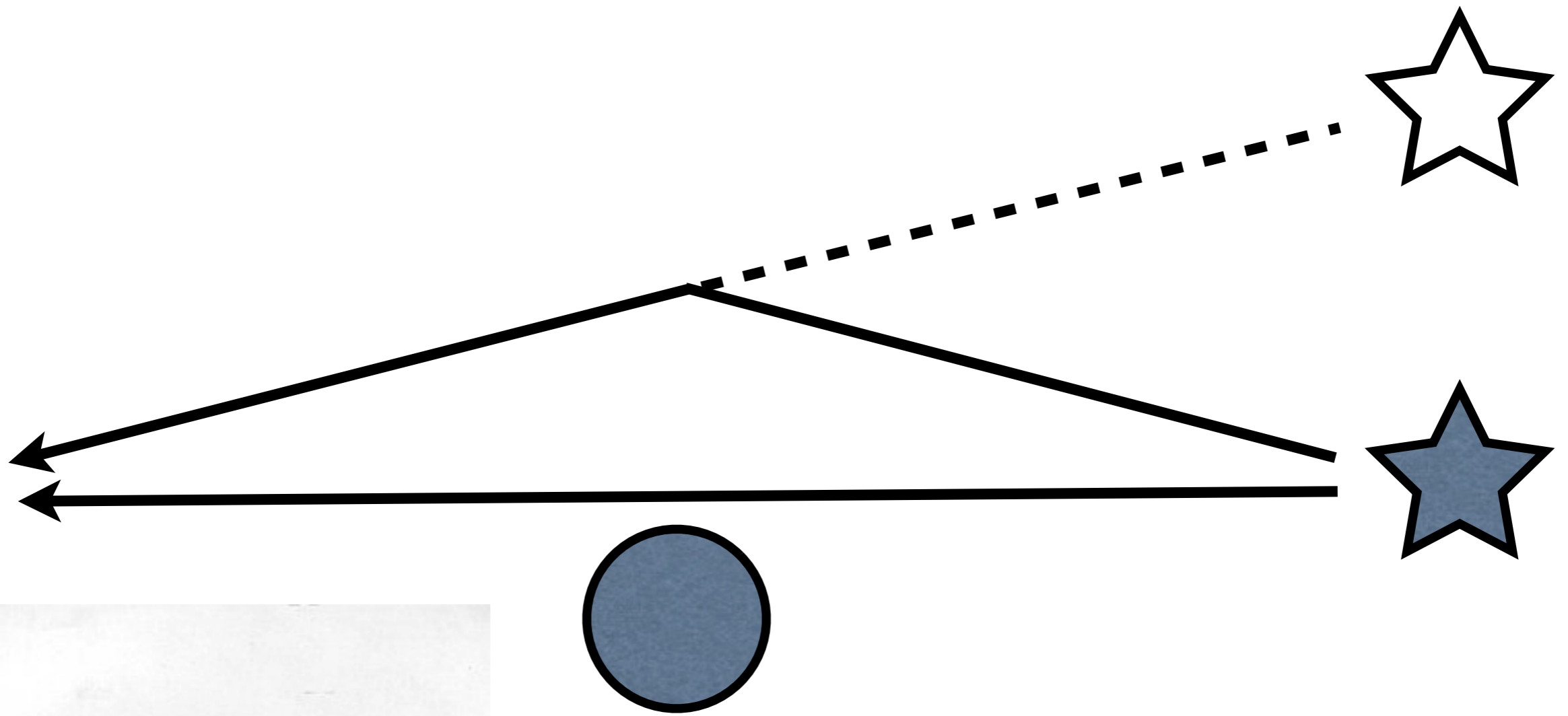
一般相対性理論

Who?

時空 + 量子



?? (未完成)



1919年、皆既日食

一般相対性理論の方が正しい証拠

光の曲がり（重力レンズ）

水星の近日点移動

シャピロの時間の遅れ（レーダー）

連星パルサー

（上の3個＋公転周期の減少）

THE PARAMETER $(1+\gamma)/2$

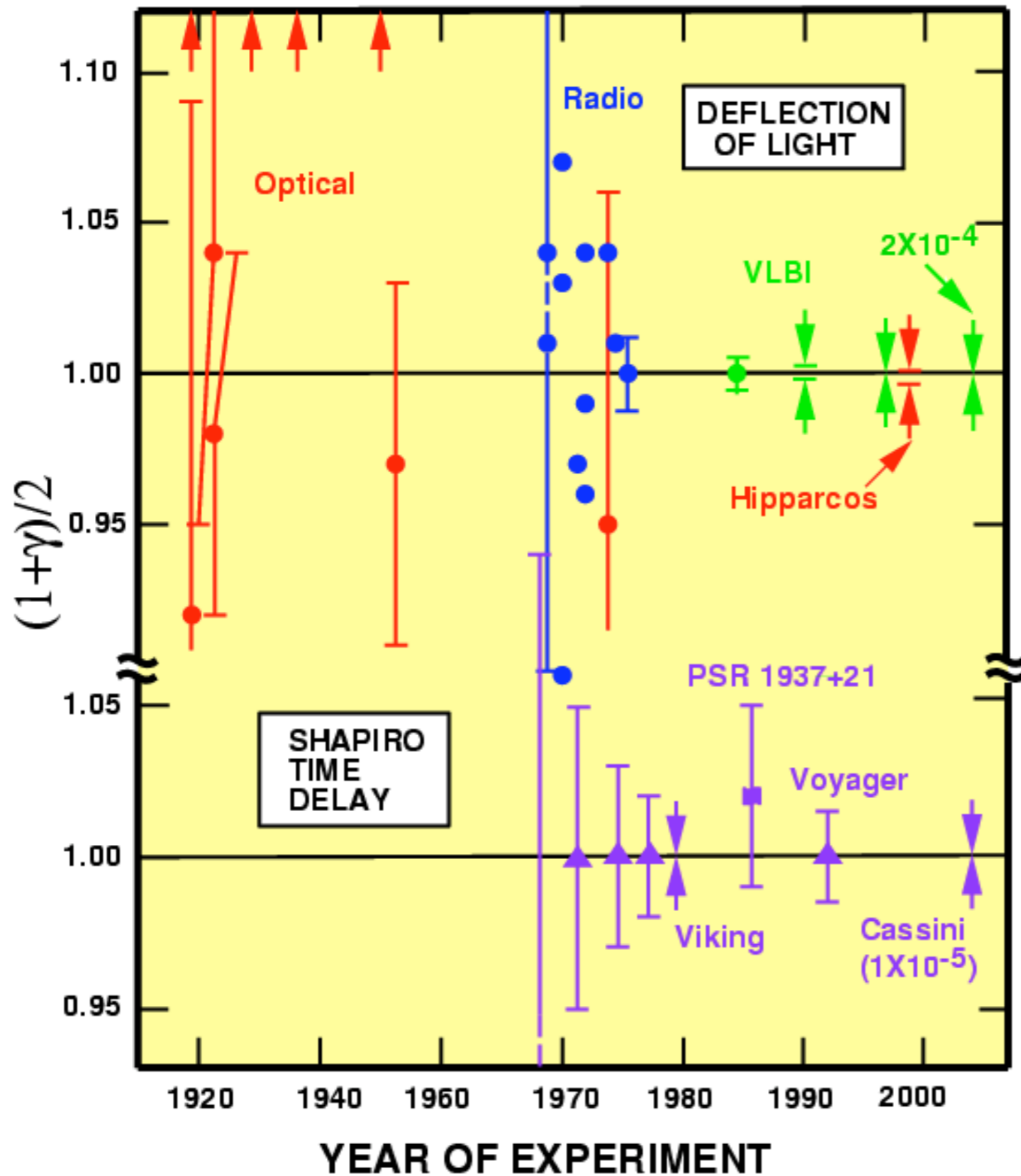


Figure 5: Measurements of the coefficient $(1 + \gamma)/2$ from light deflection and time delay measurements. Its GR value is unity. The arrows at the top denote anomalously large values from early eclipse expeditions. The Shapiro time-delay measurements using the Cassini spacecraft yielded an agreement with GR to 10^{-3} percent, and VLBI light deflection measurements have reached 0.02 percent. Hipparcos denotes the optical astrometry satellite, which reached 0.1 percent.

Will, LRR (06)

弱い重力場（太陽系）

$O(10^{-5})$

かなり強い重力場（連星パルサー）

$O(10^{-1})$

の観測的検証はある

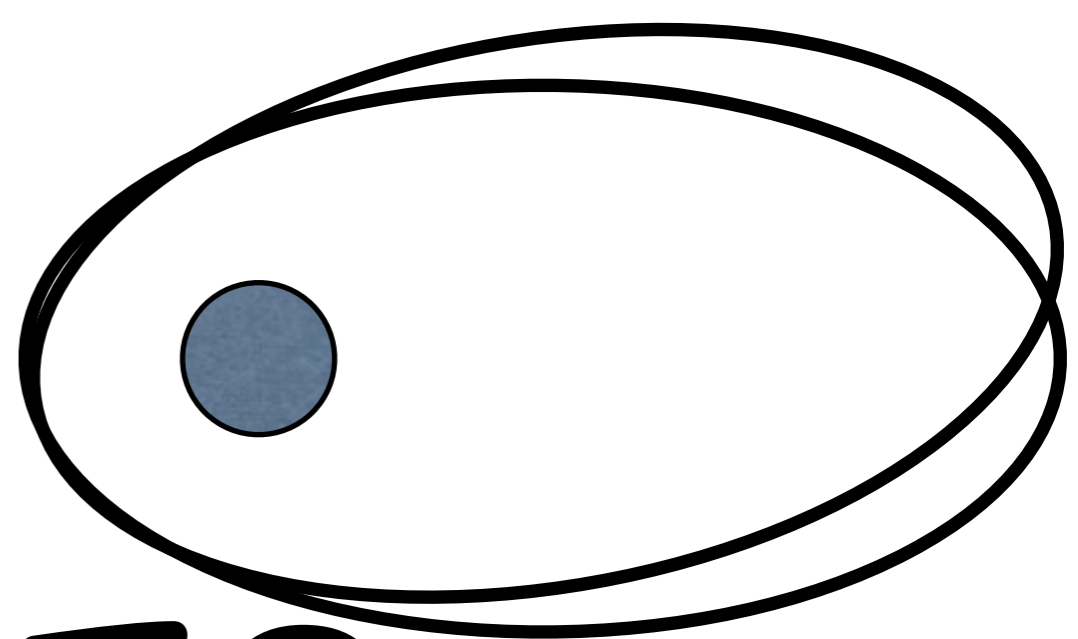
強い重力場極限（ブラックホール）

$O(1)$

でのテストはこれから！！

古い話・・・

水星の近日点移動



ニュートン力学での
他の惑星による影響

531秒角／世紀

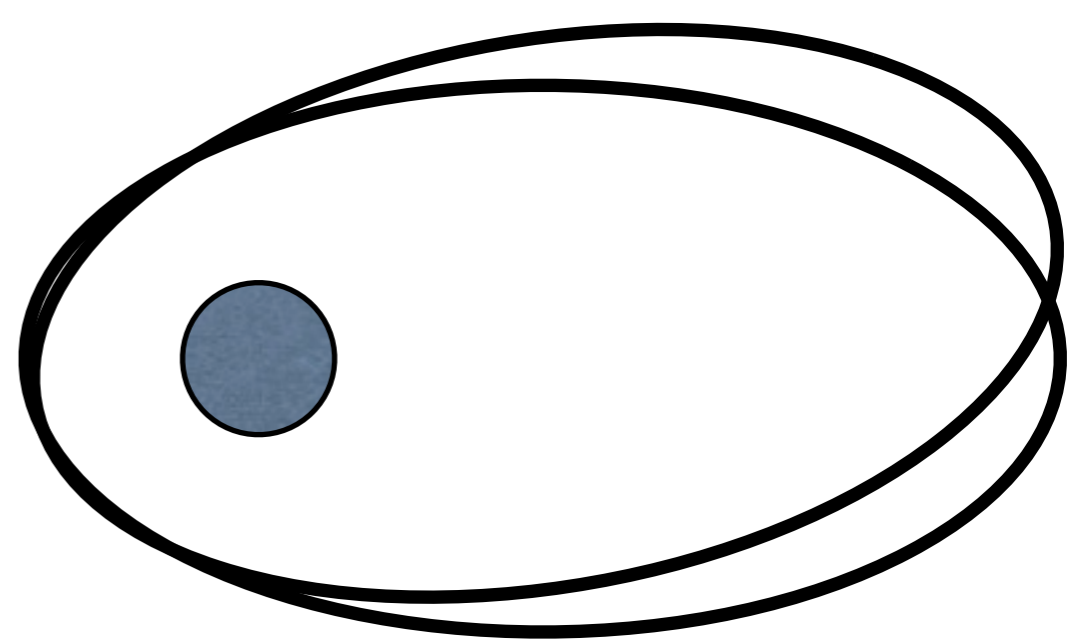
(金星 = 277、木星 = 153)

一般相対論効果

43秒角／世紀

近い将来・・・

強重力場での
「特異」な運動



一般相対論での
— 他天体による影響

= 新しい重力物理の効果

2) ブラックホール

光でさえ脱出できない

強い重力を持つ天体

境界 = ホライズン

の大きさ

$$2GM$$

$$c^2$$

シュバルツシルト半径

一意性定理

仮定

4次元時空

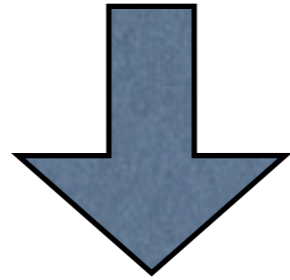
真空 (もしくは電磁場)

定常 (時間的に変化しない)

漸近的に平坦

(遠くに離れれば影響無し)

アインシュタイン方程式の解



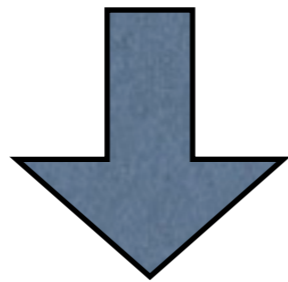
カー解のみ

(M, J)

Israel (1967) Carter (1970)
Hawking (1973) Robinson (1975)

＋電磁場

アインシュタイン方程式の解



カー・ニューマン解のみ

(M, J, Q)

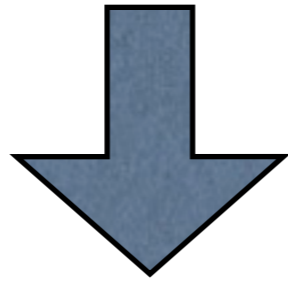
要するに

理論 = **一般相対性理論**

を仮定すれば、
ブラックホールの
「一意性定理」
が**数学的に証明**

裏を返せば、

観測的に 「一意性定理」 を検証



強い重力極限での理論をテスト
一般相対性理

or

新しい重力物理の兆候？

(高次元、新しい場、Horava、)

3) 観測的検証に向けて

- A) 質点 ($s \sim 0$) でプローブ
(星の運動)
- B) 光 ($s=1$) で
(ブラッックホールシャドロー)
- C) 重力波 ($s=2$) で
(固有振動)

ポイント

一意性定理により

多重極モーメントは唯一

四重極
(歪み)

$$Q_2 = -\frac{J^2}{M}$$

(注) 通常为天体 \longrightarrow 内部構造
 \longrightarrow 様々な多重極

質点の運動方程式

@PN近似

$$\mathbf{a} = -\frac{M\mathbf{x}}{r^3} + \frac{M\mathbf{x}}{r^3} \left(4\frac{M}{r} - v^2 \right) + 4\frac{M\dot{r}}{r^2} \mathbf{v}$$

$$\mathbf{J} = \frac{2J}{r^3} [2\mathbf{v} \times \hat{\mathbf{J}} - 3\dot{r}\mathbf{n} \times \hat{\mathbf{J}} - 3\mathbf{n}(\mathbf{h} \cdot \hat{\mathbf{J}})/r]$$

$$\mathbf{Q}_2 + \frac{3}{2} \frac{Q_2}{r^4} [5\mathbf{n}(\mathbf{n} \cdot \hat{\mathbf{J}})^2 - 2(\mathbf{n} \cdot \hat{\mathbf{J}})\hat{\mathbf{J}} - \mathbf{n}],$$

軌道角運動量の発展方程式

(コマの歳差との類似)

$$\frac{d\vec{h}}{dt} = \vec{\omega} \times \vec{h}$$

(角度依存性が異なる)

J, Q2

Sagittarius A
(Sgr A、 いて座A)

**我々の銀河系中心にあ
る複数の電波源**

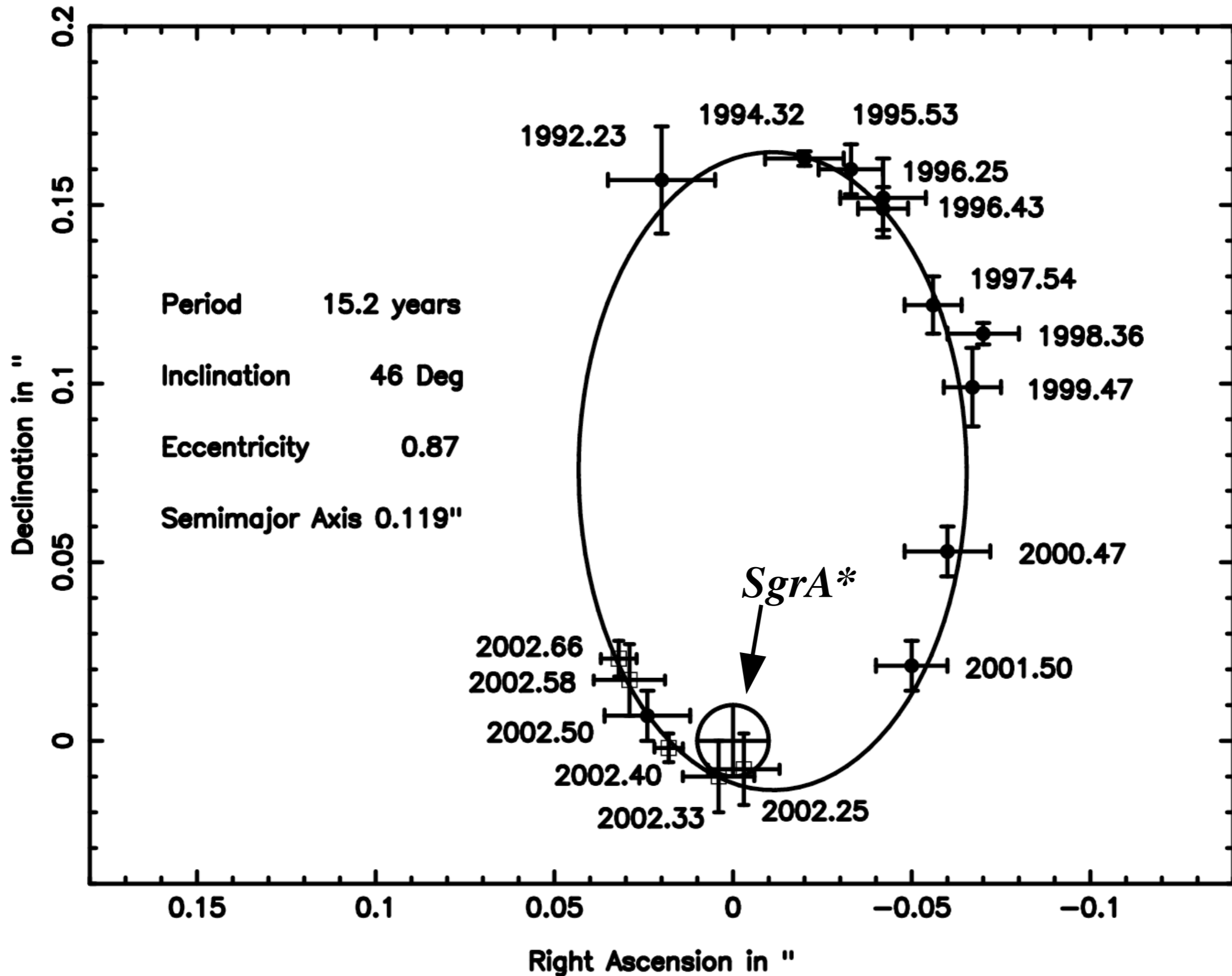
Sgr A*

コンパクトな強い電波源

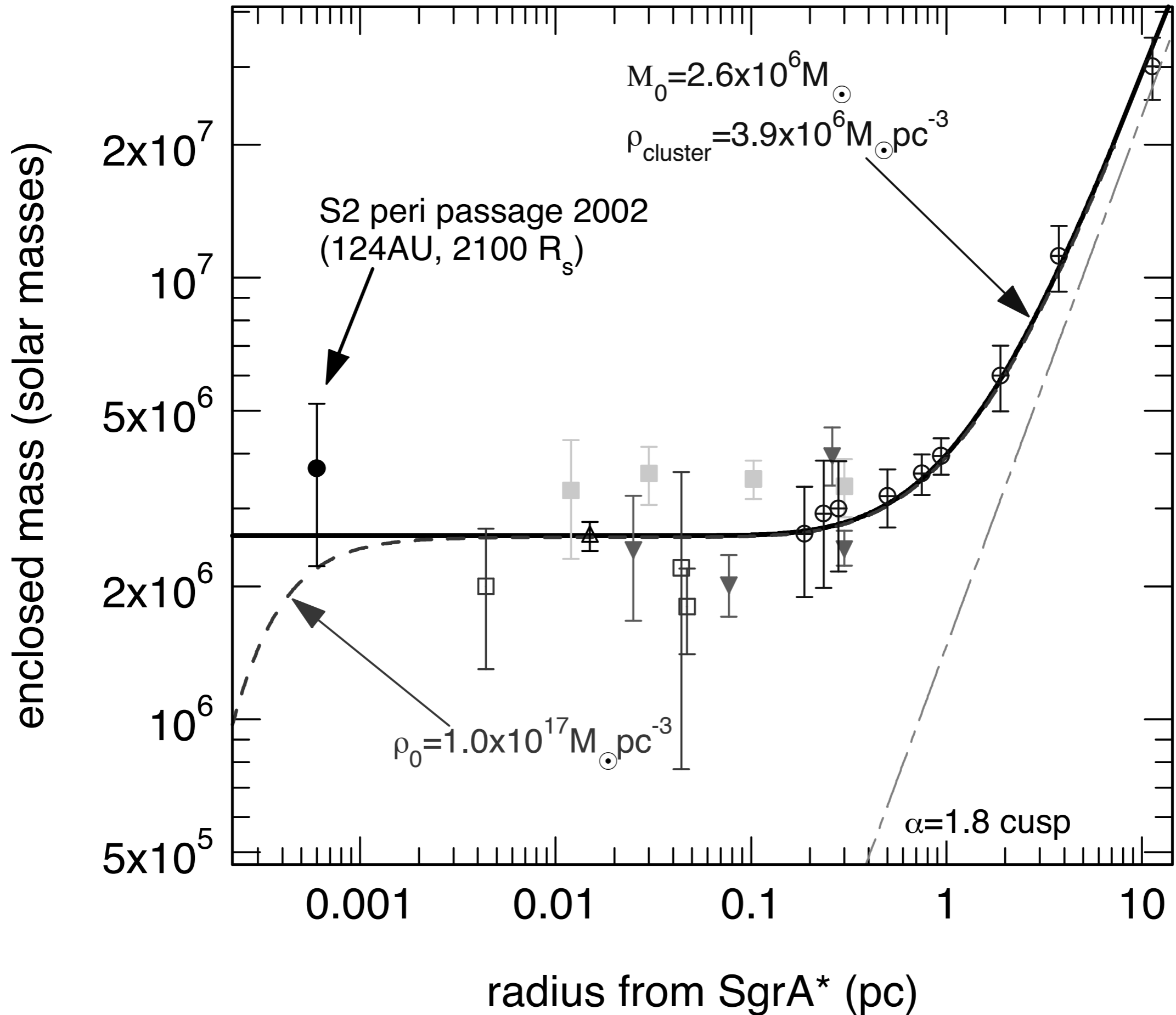
**(天の川銀河中心の
巨大ブラックホールの候補)**

Schoedelt, Nature (2002)

Orbit of S2



Schoedelt, Nature (2002)

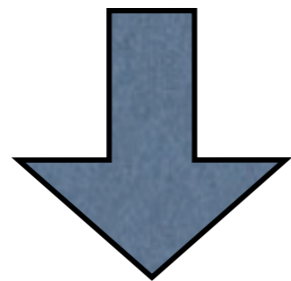


VLBA觀測

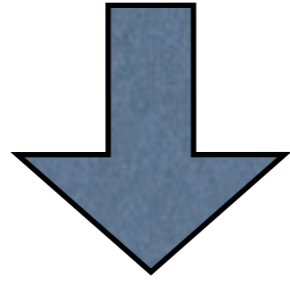
Schoedel et al, Nature (2002)

$T = 15.2$ 年

$a = 17$ 光時 = 120天文單位



$M = (3.7 \pm 1.5)$
 $\times 10^6$ 太陽質量



シュバルツシルト半径

10^7 km

~0.1天文単位

LETTERS

Event-horizon-scale structure in the supermassive black hole candidate at the Galactic Centre

Sheperd S. Doeleman¹, Jonathan Weintraub², Alan E. E. Rogers¹, Richard Plambeck³, Robert Freund⁴, Remo P. J. Tilanus^{5,6}, Per Friberg⁵, Lucy M. Ziurys⁴, James M. Moran², Brian Corey¹, Ken H. Young², Daniel L. Smythe¹, Michael Titus¹, Daniel P. Marrone^{7,8}, Roger J. Cappallo¹, Douglas C.-J. Bock⁹, Geoffrey C. Bower³, Richard Chamberlin¹⁰, Gary R. Davis⁵, Thomas P. Krichbaum¹¹, James Lamb¹², Holly Maness³, Arthur E. Niell¹, Alan Roy¹¹, Peter Strittmatter⁴, Daniel Werthimer¹³, Alan R. Whitney¹ & David Woody¹²

**Pioneering works by
Japanese radio astronomers
Nakai + (1993)
Miyoshi + (1995)**

見かけの歳差の大きさ

$$\dot{\Theta} = \frac{A}{P} \frac{a}{D}$$

A=Precess
a=semimajor
D=distance to GC

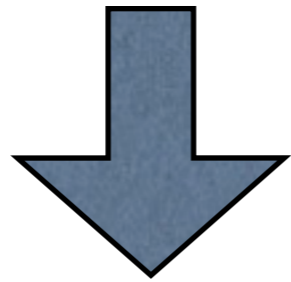
$$\textcircled{a} \quad \chi \equiv \frac{J}{M^2} = 0.7$$

$$\sim 5 \mu\text{as}/\text{yr} = 5 \times 10^{-6} \text{arcsec}/\text{yr} \quad \textcircled{a}_J$$

$$\sim 1 \mu\text{as}/\text{yr} = 1 \times 10^{-6} \text{arcsec}/\text{yr} \quad \textcircled{a}_{Q_2}$$

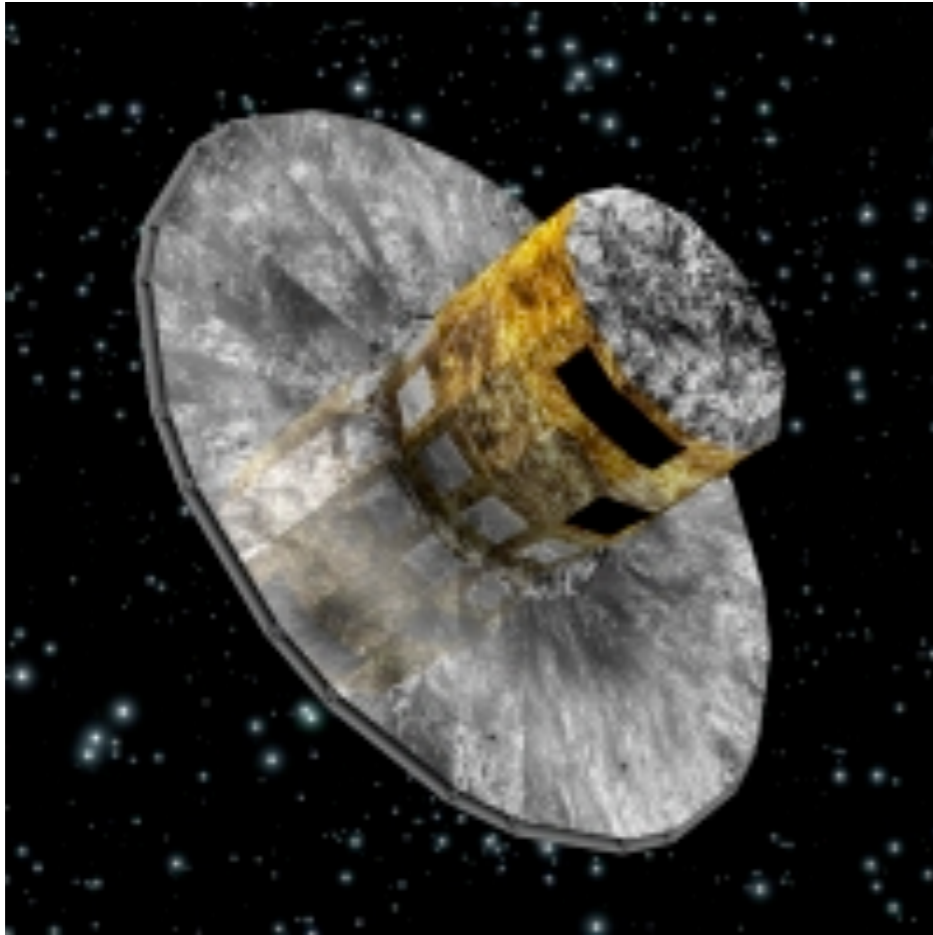
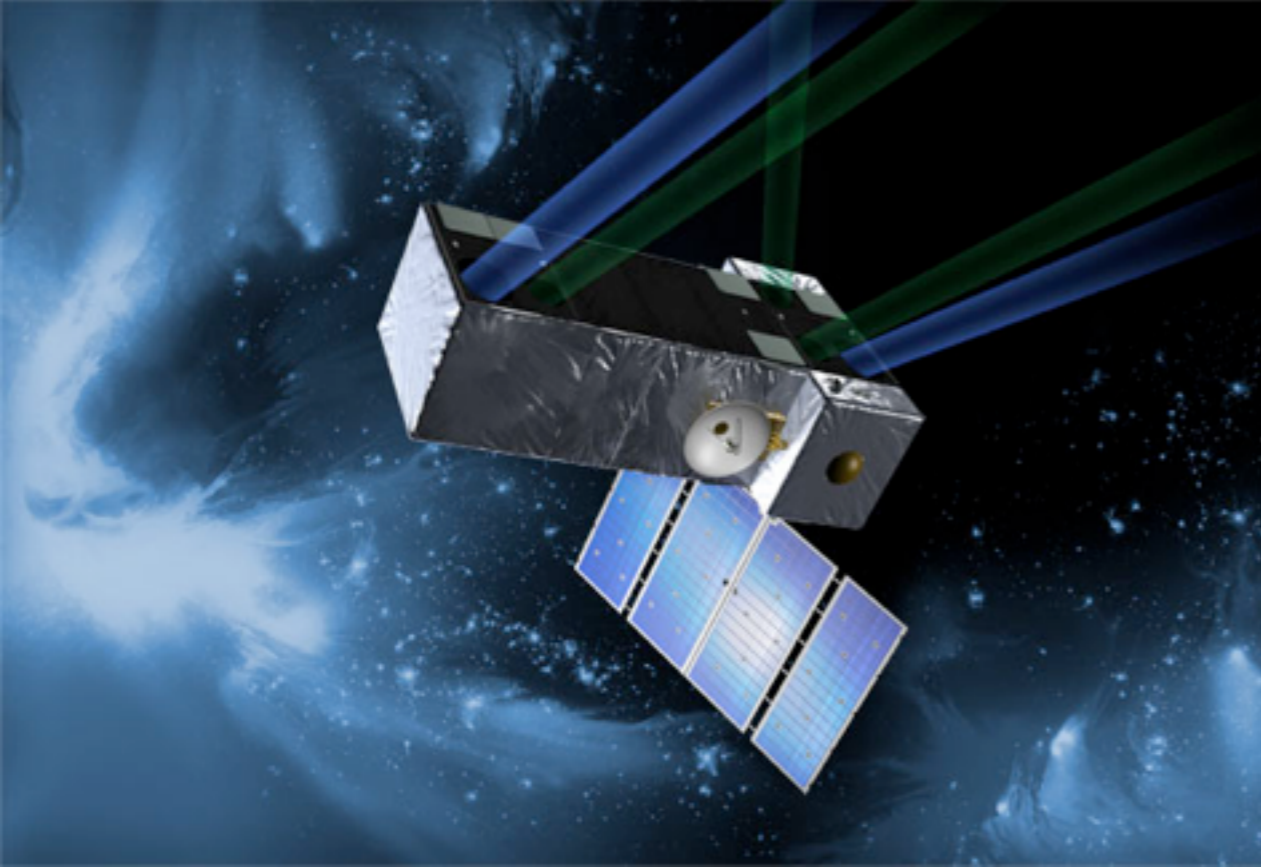
観測精度 (2次元位置決定)

> 数十マイクロ秒角

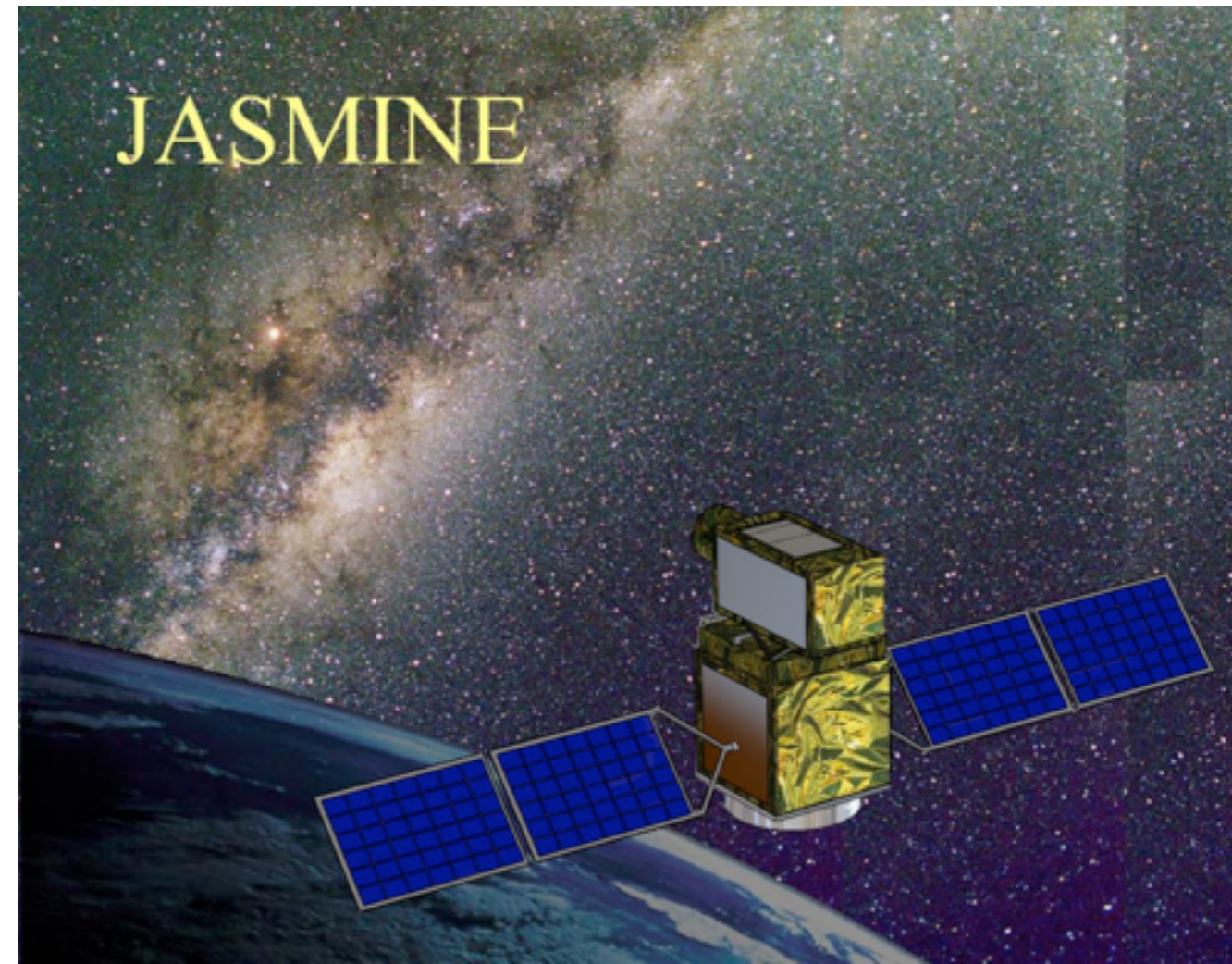


現在は無理..

SIM Lite



GAIA



SIM (米) 202X < **GAIA**

数マイクロ秒角

しかし、銀河中心方向は×

JASMINE (日) 202X

近赤 = > 銀河中心方向も○

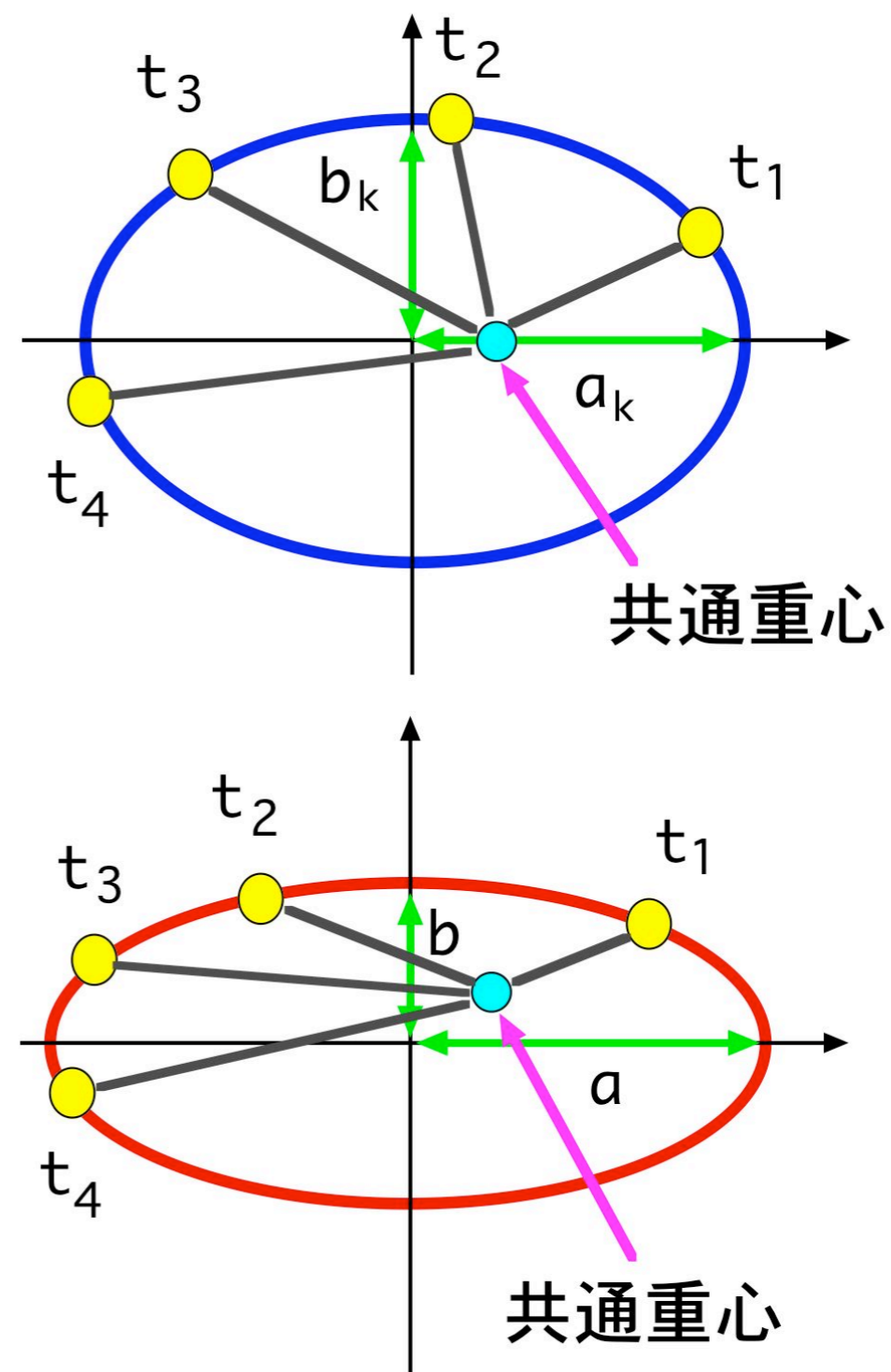
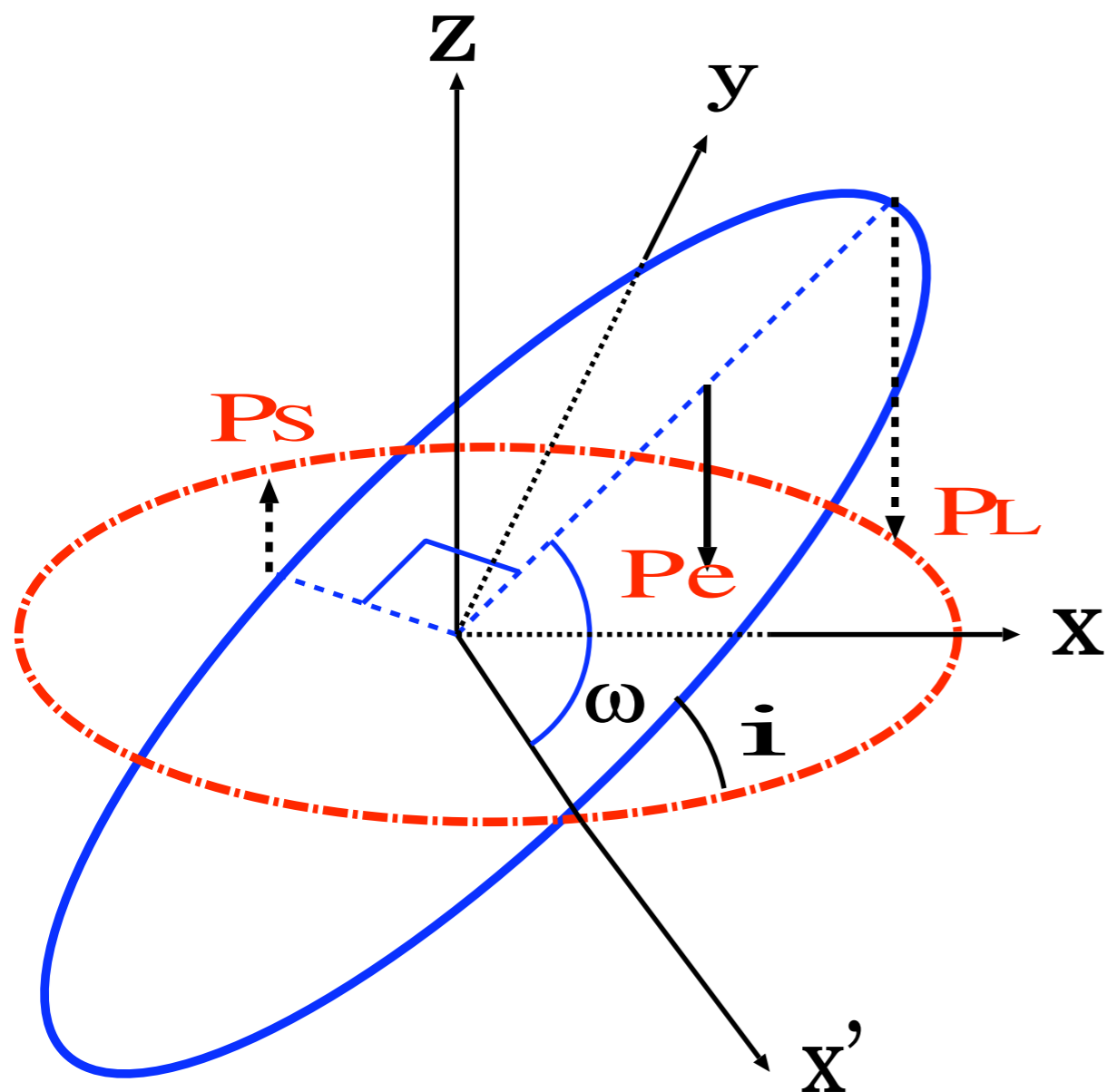
> 10マイクロ秒角

“Ultimate JASMINE” 203X

1マイクロ秒角

4) 理論的な課題

1. 軌道決定法



浅田, 「観測的2体問題の進展」
日本物理学会誌 8月号(2006)

ニュートン重力では

逆問題の解法 + **唯一性**

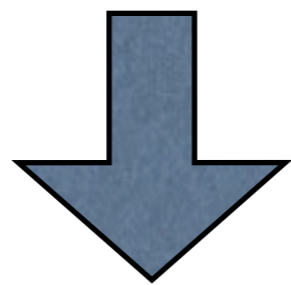
(2D位置データから)

実視連星

Savary, Thiele-Innes, etc

位置天文的連星

Asada, Akasaka, Kasai (2004)



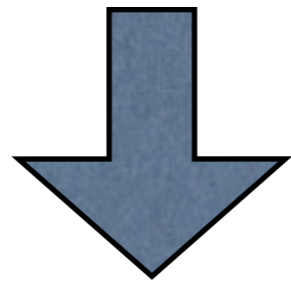
GR (or PPN)へ拡張

強い重力での**多体**効果

一般相対論効果を入れた3体問題

「8の字解」

Imai, Chiba, Asada, PRL(2007)



SgrAなどの強重力天体系での
3体(以上の)GR効果