

ブラックホールと宇宙の進化

嶺重 慎 (京大院理)

目次

1. ブラックホール(BH)とは？

ブラックホールって何？／連星系BH／銀河核BH

2. ブラックホールの見え方

×線で見えたブラックホール／なぜ光る？／時間変動

3. ブラックホールのウソとホント

中は高密度？／本当に真っ黒？／もし吸い込まれたら？

4. 最近の話題から

つくり方／銀河と共進化／ブラックホールを直接みる！

5. 京大の望遠鏡計画

1 : ブラックホールとは？

- **それは18世紀に遡る** (Michell)
 - **ロケットで天体の外に飛び出すには、大きな運動エネルギー(初速度)が必要。**
 - **地球脱出には 11 km/s の初速度が必要**
 - **太陽脱出には $\sim 600 \text{ km/s}$ の初速度が必要**
- **もっと半径を小さくすると、光速でも脱出できなくなる。**
 - ⇒ **これがブラックホール**
- **どれくらい小さくすればブラックホールに？**
 - ⇒ **太陽なら 3 km ($1/20$ 万)、地球なら 1 cm ($1/6$ 億)**

チャンドラセカール・エディントン論争

白色矮星の上限質量について

(~1930)

- **チャンドラセカール:**

白色矮星の質量に上限質量がある。
超すと崩壊してブラックホールが誕生

- **エディントン:**

そんな馬鹿なことを防ぐ物理法則があるはずだ

→ **中性子の発見** (チャドウィック 1932)

→ **中性子星の予言** (ツビッキー 1933)

はくちょう座X-1:最初のブラックホール

(1970)



はくちょう座X-1
(Cyg X-1)



特集：小田稔先生の思い出

近接連星系ブラックホール (予想されたブラックホール)

- **ふつうの星と
ブラックホール
からなる連星系**

- **お互いのまわりを
くるくる回る**

周期～1日程度

間隔～太陽半径の数倍

(地球半径～6000km, 太陽半径～100×地球半径)

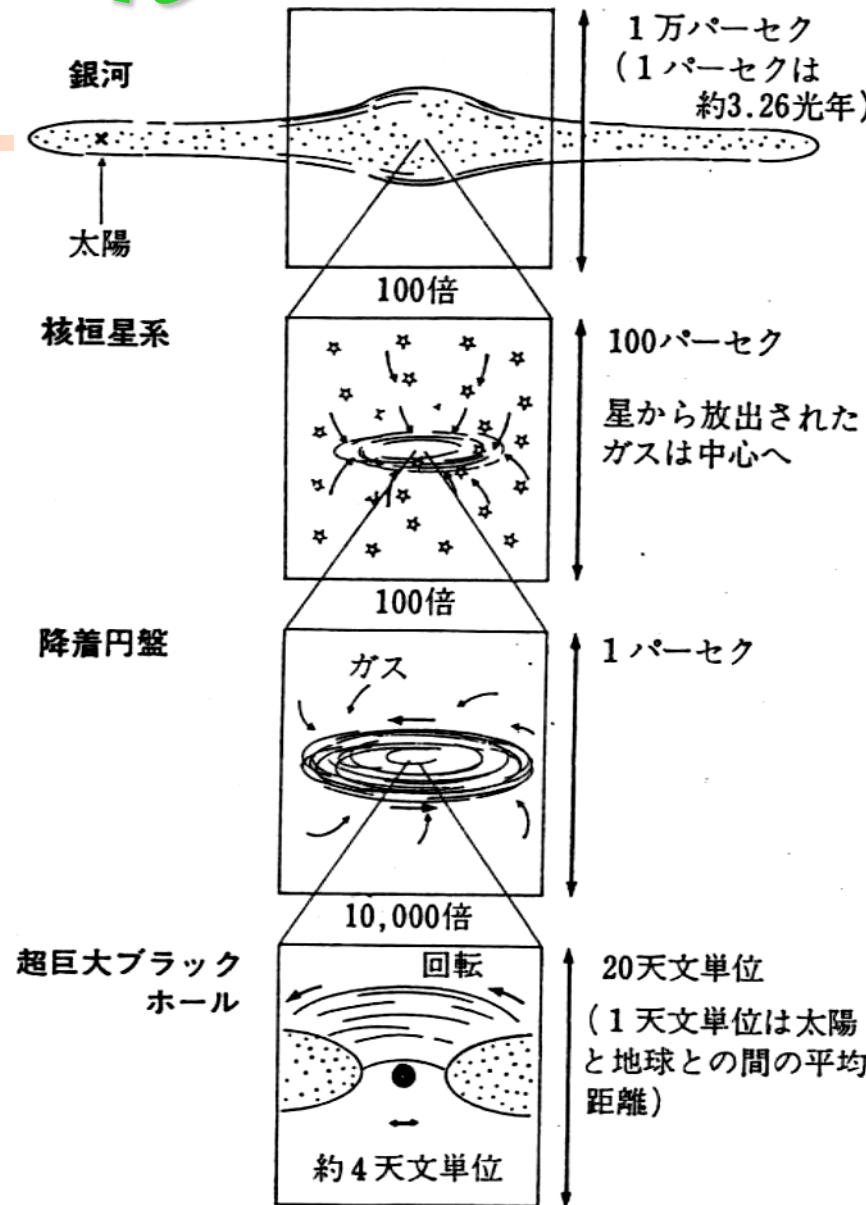
- **現在、数十個発見**

銀河中心ブラックホール (予想外のブラックホール)

- 全ての銀河の中心には
巨大ブラックホール!



- ブラックホールは光らないが、ブラックホールの周りのガス円盤は明るく光る

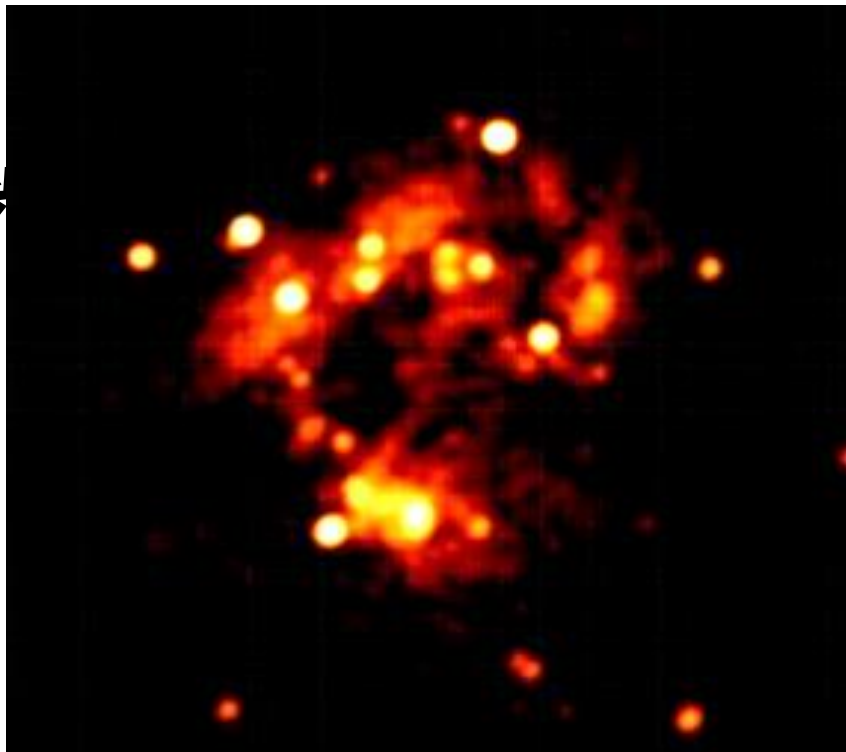


活動銀河の中心核へ (福江1988)

2 : ブラックホールの見え方

ブラックホール近傍は極限世界

高温(一千万度以上)ガスが充満 → X線を放射



近傍銀河のX線画像、

ブラックホール

典型的な明るさ

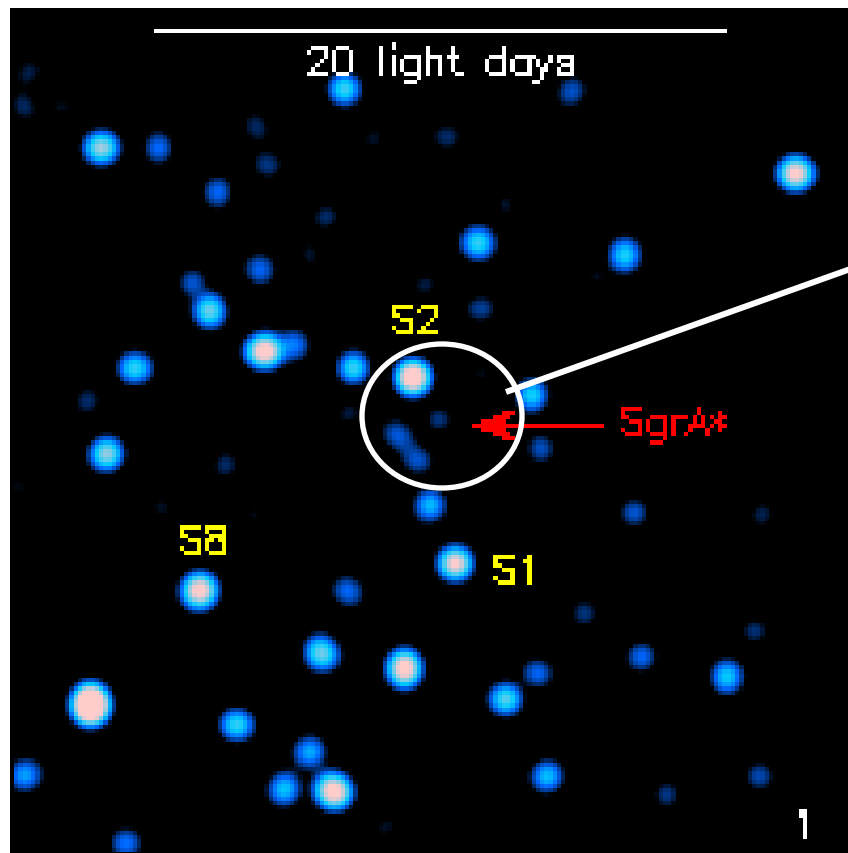
~太陽*の10万倍

(アンテナ銀河 Fabbiano et al. 04)

(注*: 太陽は1秒間で日本の年間発電量の一億倍のエネルギーを放射)

赤外線でみたブラックホール

■ 銀河中心にもブラックホール(Sgr A*)

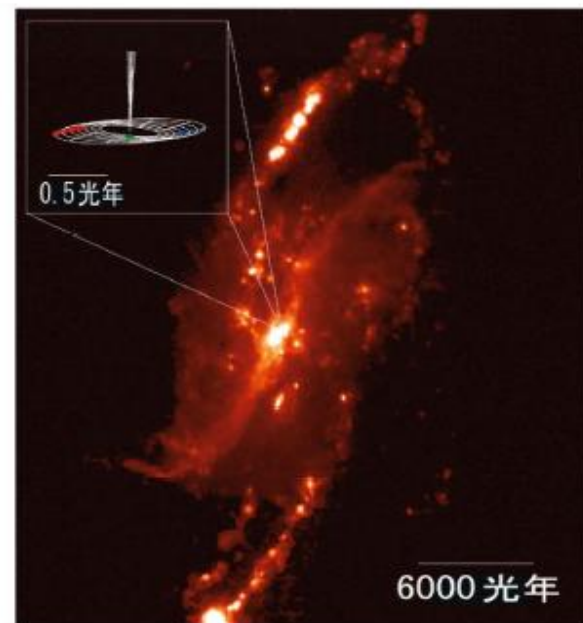
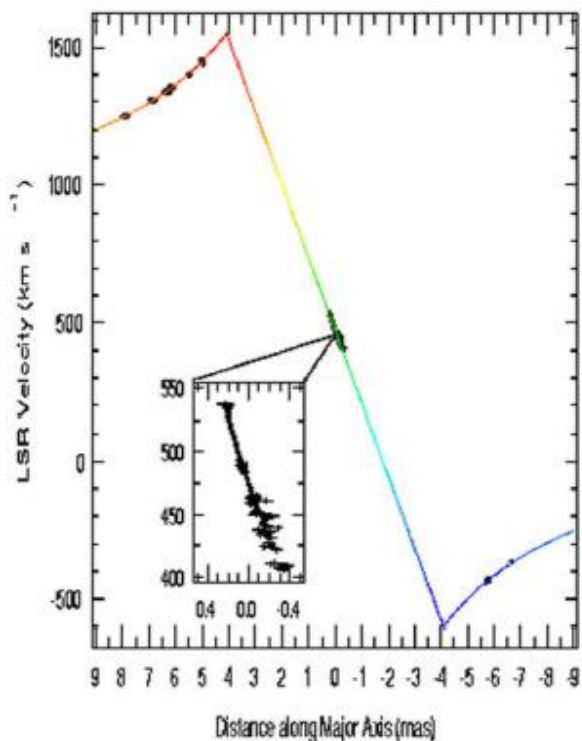
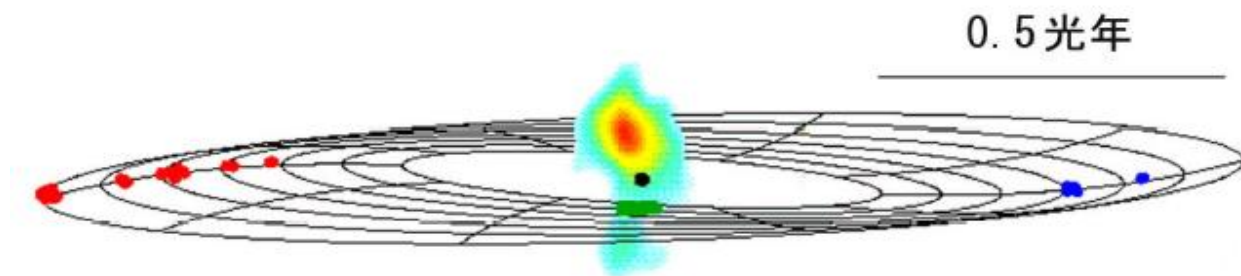


明るくなったり
暗くなったり
しているのが
ブラックホール。

注:赤外線や電
波・X線は銀河系
中心を見通せる。

電波でみたブラックホール

ブラックホール
をとりまく円盤
中のガスが電波
を放射
(NGC4258)



(三好ほか 1995)

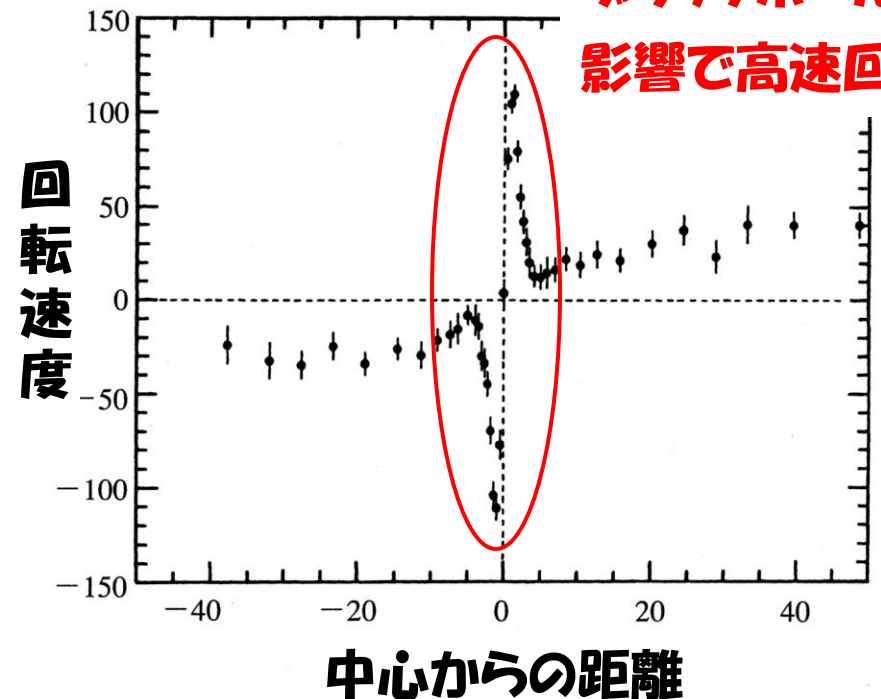
ブラックホール周囲の運動で見る

ブラックホールが作る重力が天体の運動に影響



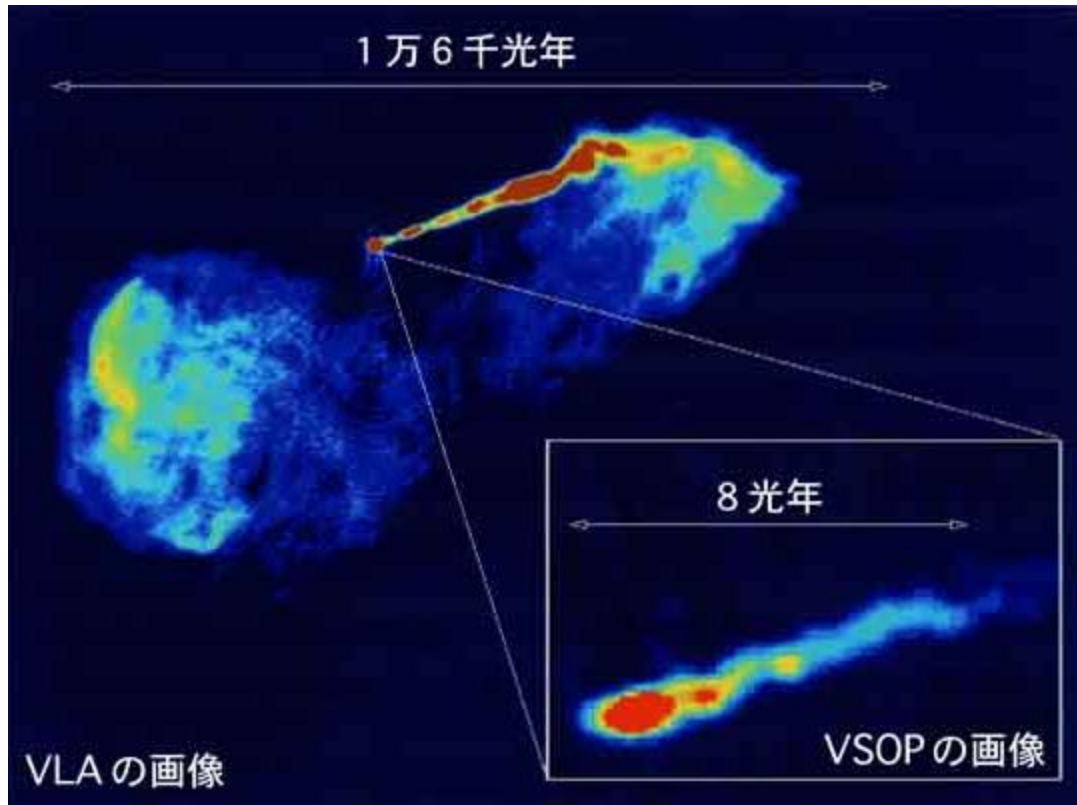
← 銀河系中心
↓ M31 中心の星の運動

ブラックホールの
影響で高速回転



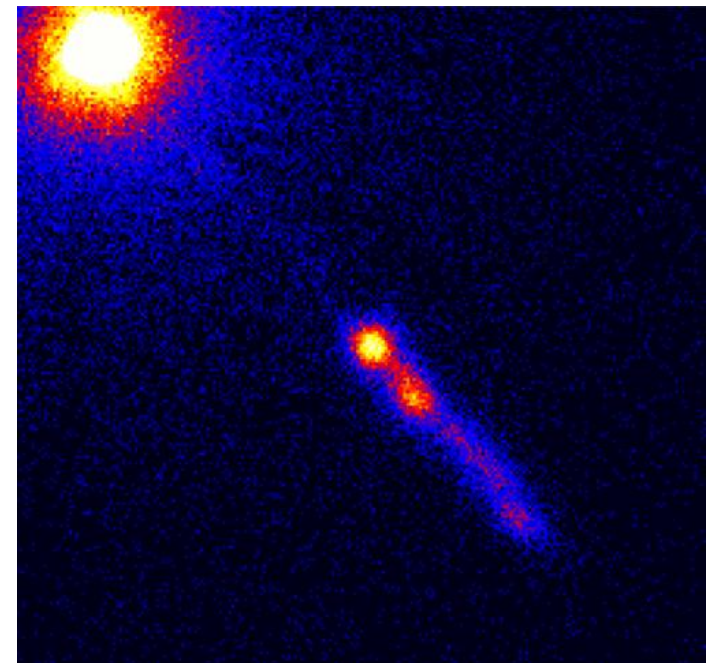
ブラックホールから噴き出すもので見る

宇宙ジェットとは：高速で飛び出るガスの流れ



← 電波 (VLA)

↓ 可視光線 (HST)



ブラックホールはなぜ光る？

- 光るのはブラックホールでなく、周りの落ち込むガス
- エネルギーの流れが大事

ブラックホールは底なしの井戸 ⇒ 元は重力エネルギー

重力エネルギー

→ **運動エネルギー**

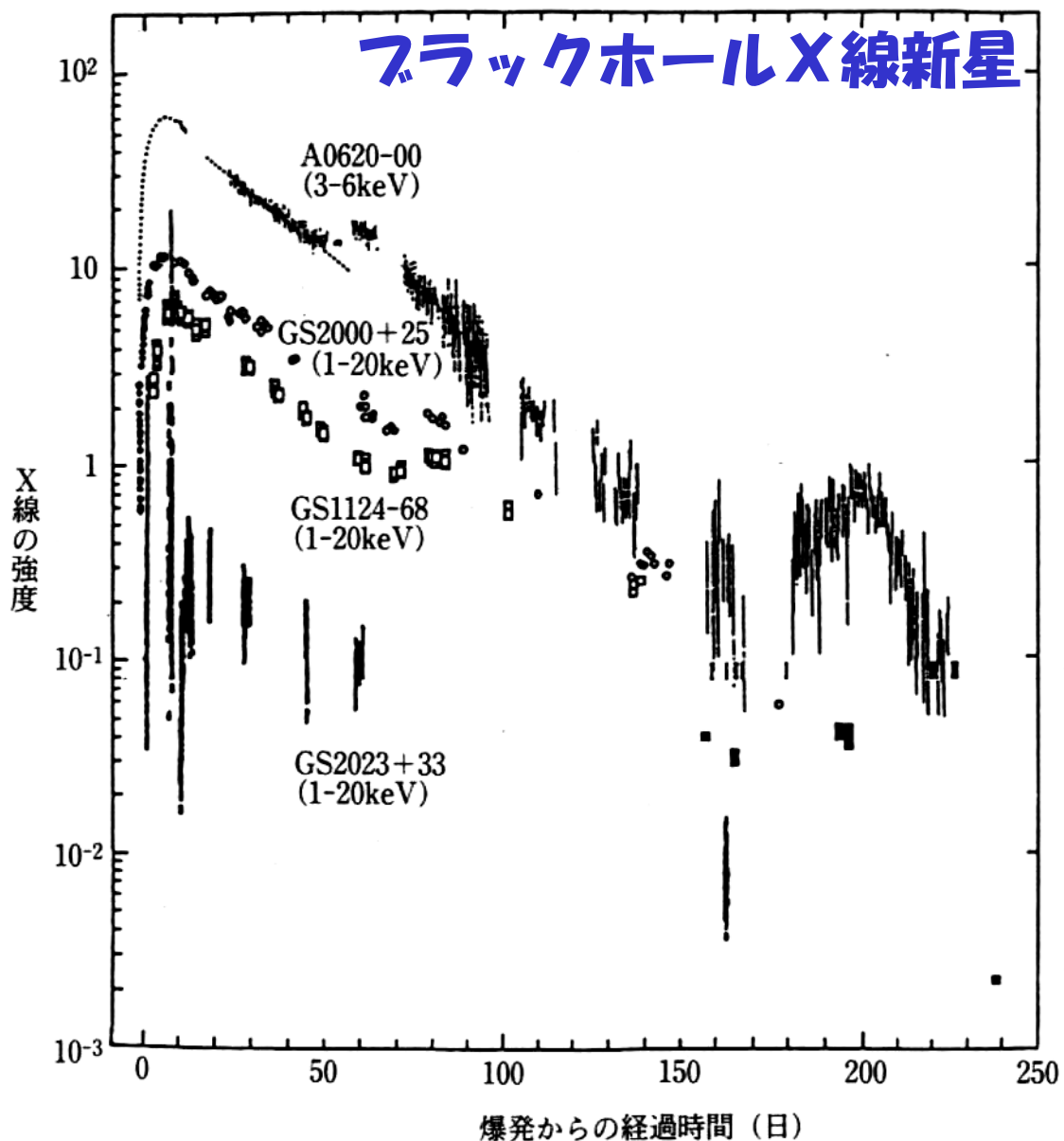
まさつ → **熱エネルギー**

→ **放射エネルギー**

この関係から温度

(10^7 度) が出てくる。

突然光るブラックホール



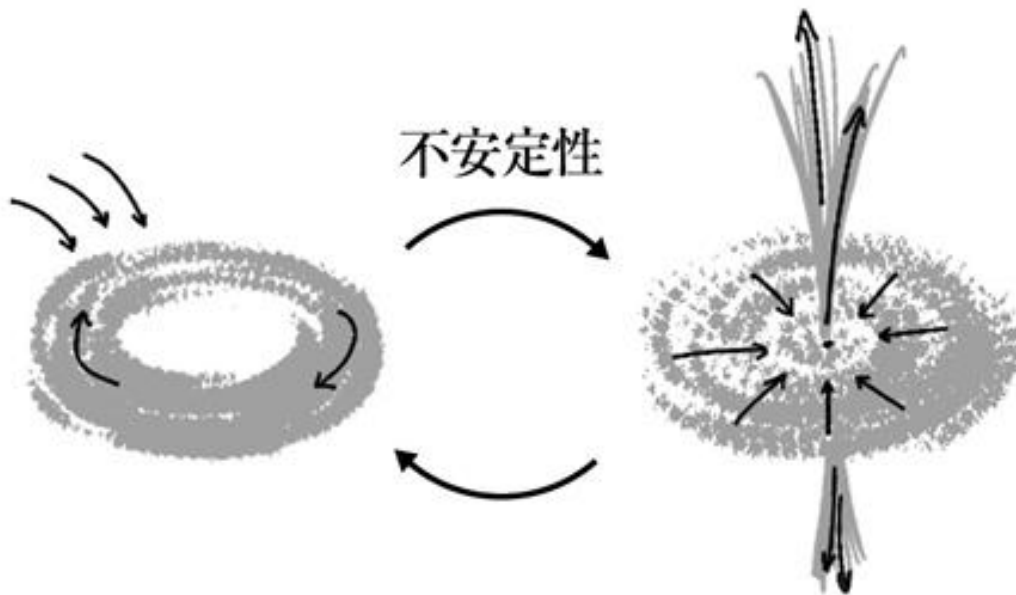
- **ぎんが衛星最大の成果の一つ。**

- **ブラックホールは数十年に一度、大増光する！**

- **今も多くのブラックホールが気づかれずに眠っている。**

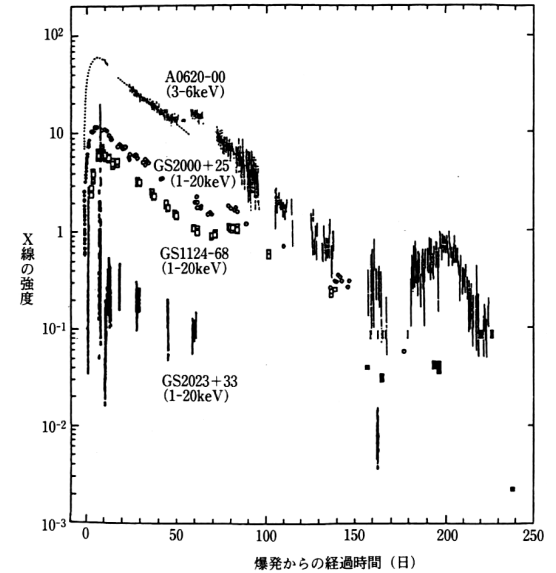
X線新星の円盤不安定モデル

ブラックホールの周りの降着円盤は、
二つの異なる状態間を行き来する。



ガスをためる暗い
状態（静穏状態）

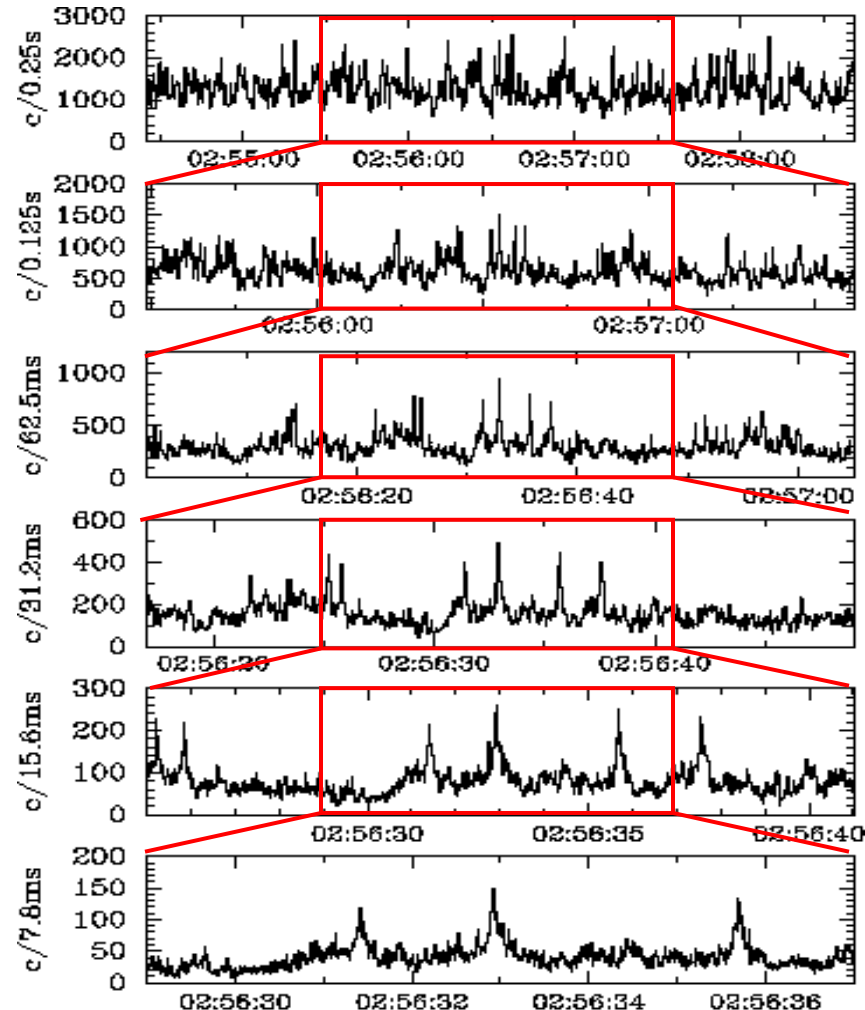
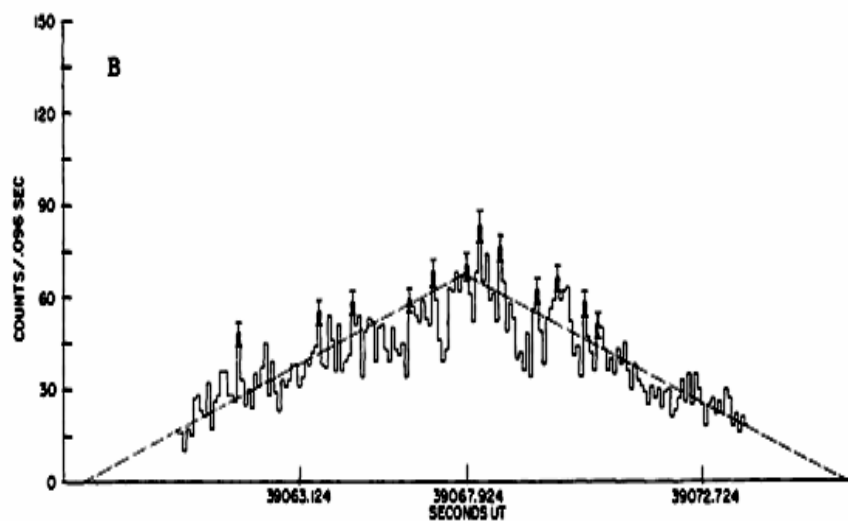
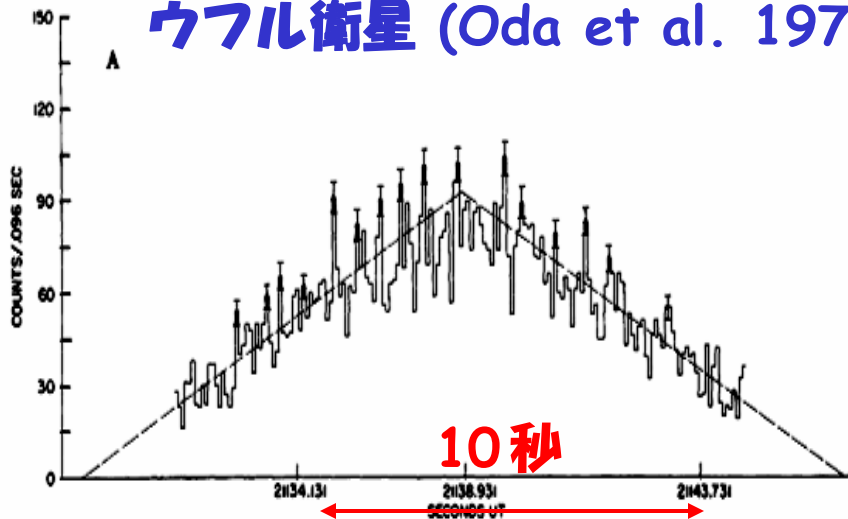
ガスを落として明るく
光る状態（爆発状態）



激しい時間変動 (X線)

ウフル衛星 (Oda et al. 1971)

ぎんが衛星 (Negoro 1995)



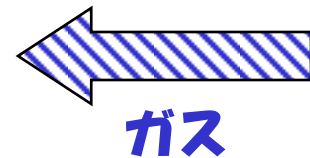
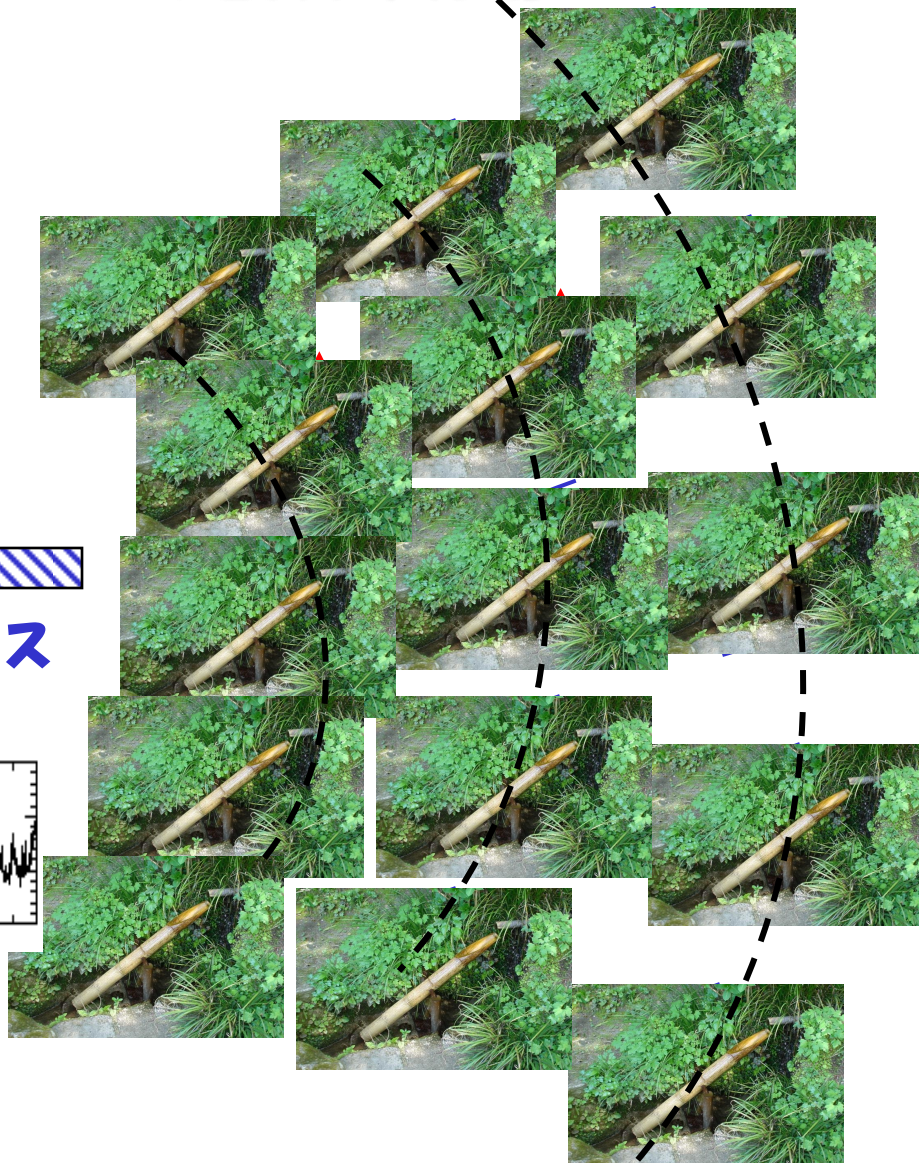
ブラックホール光度変動のモデル



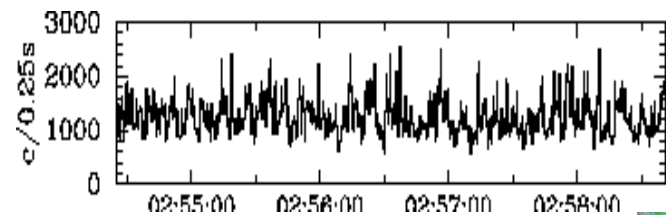
ブラックホール



ガス



ガス



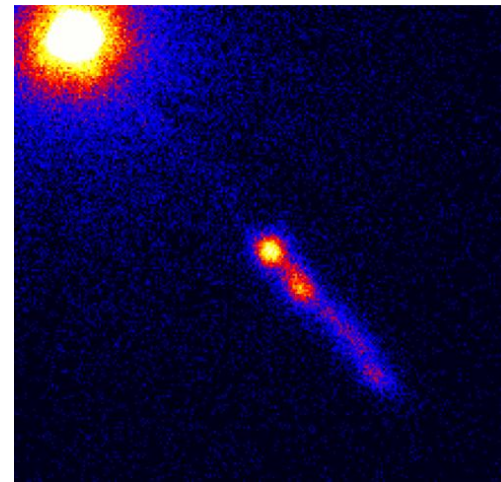
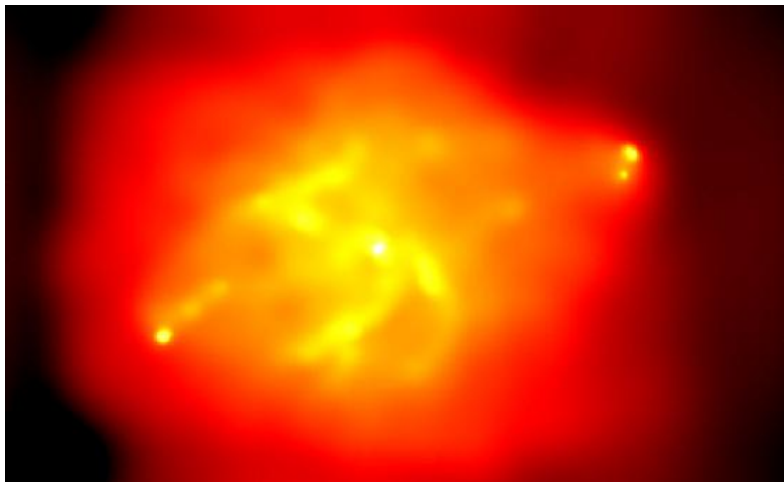
ししおどしを組み合わせると、複雑な光度変動が発生

ブラックホールの特徴

- 「ブラックホールは、底なしの井戸である」は正しい。
- しかし、同時に莫大なエネルギーの供給源でもある。

吸い込んだ物質（エネルギー）のおよそ1割を、
電磁波（光）や高速ガス流（ジェット）の形で放出

- 放出されたガスや光が、宇宙空間にばらまかれ、星をつくり、銀河構造を決定しているのかもしれない。



3 : ブラックホールのウソとホント

■ブラックホールは本当に真っ黒？

- じつはちょっと光っている

■ホーキング放射とは

- うーーん、難しいから省略

■どう光っている？

- 一山程度の質量 ($\sim 10^{12}$ kg) のブラックホールは、ガンマ線を出して蒸発しているはず。
- 見つければ、ノーベル賞、間違いなし!!

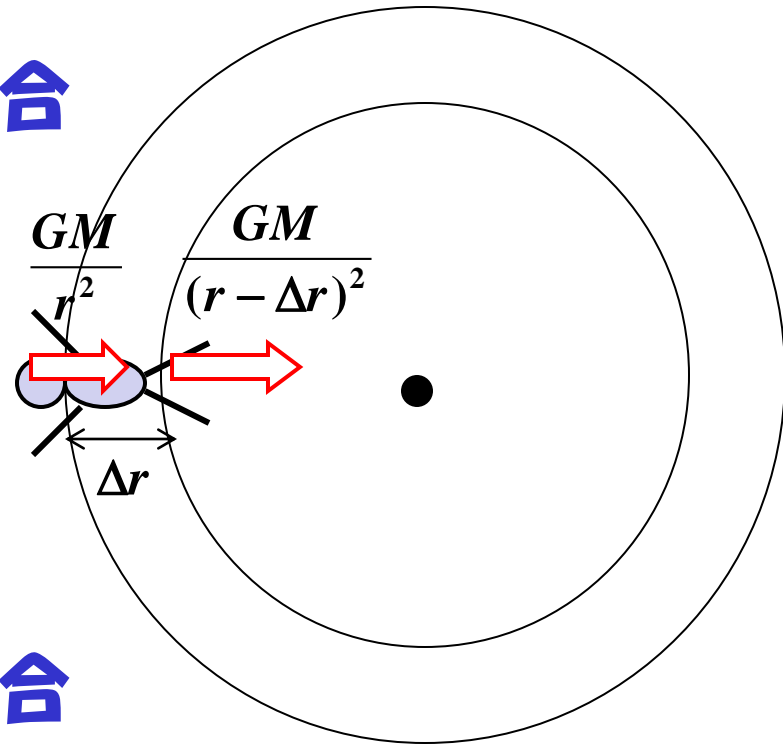
ブラックホールに落ち込むと？

■ 連星系ブラックホールの場合

- 潮汐力 ($> 10^4 G$) でアウト

■ 潮汐力とは

- 頭の先と足の先の重力の差
- 中心までの距離の3乗に反比例



■ 銀河核ブラックホールの場合

- 潮汐力は小さい ($\sim 0.00005 G$)。無傷で入っていけるかも？
- **ブラックホールの中に入れば、ノーベル賞！**

ホワイトホールとワームフ

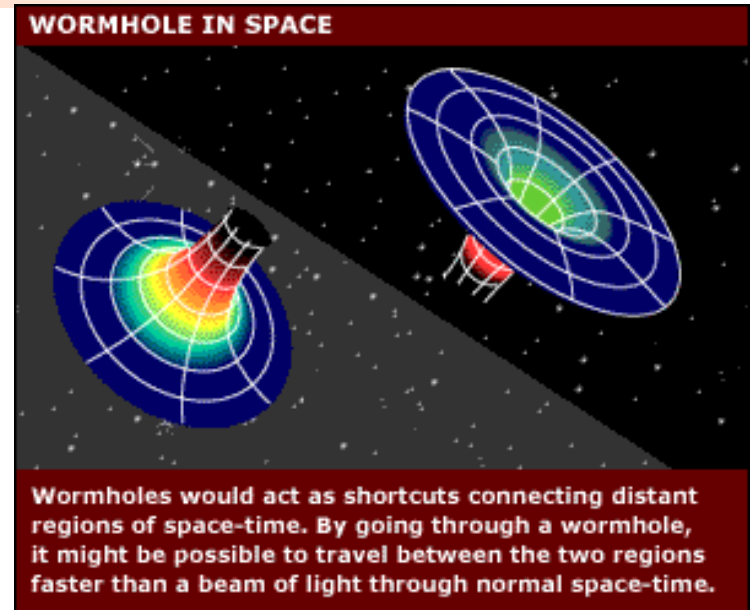
■ ホワイトホールとは

- ブラックホールの反対
- ものを一方的に吐き出す
- 今のところ観測的証拠なし

■ ブラックホールとワームフ！

- SFの話題としてはおもしろい
- しかし、現実問題としてはありえない
(ようだ)

- やはりブラックホールの中に飛び込むのは
やめておこう！



BBC home page

ブラックホールを実験で作る？

- 極小な領域にエネルギーをつぎ込めばできる。
 - でも、建設中の加速器でも10けた以上エネルギーが足りない。
- もし、宇宙が多次元 (> 4 次元) なら・・・
 - 微少な領域ほど重力が強まる ($\because N$ 次元重力 $\propto r^{-(N-2)}$)
 - するとLHC (周囲27kmの大型陽子加速器) でできるかも？
- **ブラックホールができれば、ノーベル賞！**
- **もっとも、できてもすぐホーキング放射で蒸発**
 - それでも、できたことが証明できればノーベル賞

4 : ブラックホールの形成と宇宙進化

ブラックホールの作り方

- 恒星質量ブラックホール
 - 超新星爆発でつくられる
- 超新星爆発とは
 - 星の最後の大爆発
 - 中心部は崩壊し、中性子星やブラックホールを残す。
 - 周りは吹き飛び、超新星残骸として観測される。
- では大質量ブラックホールは？



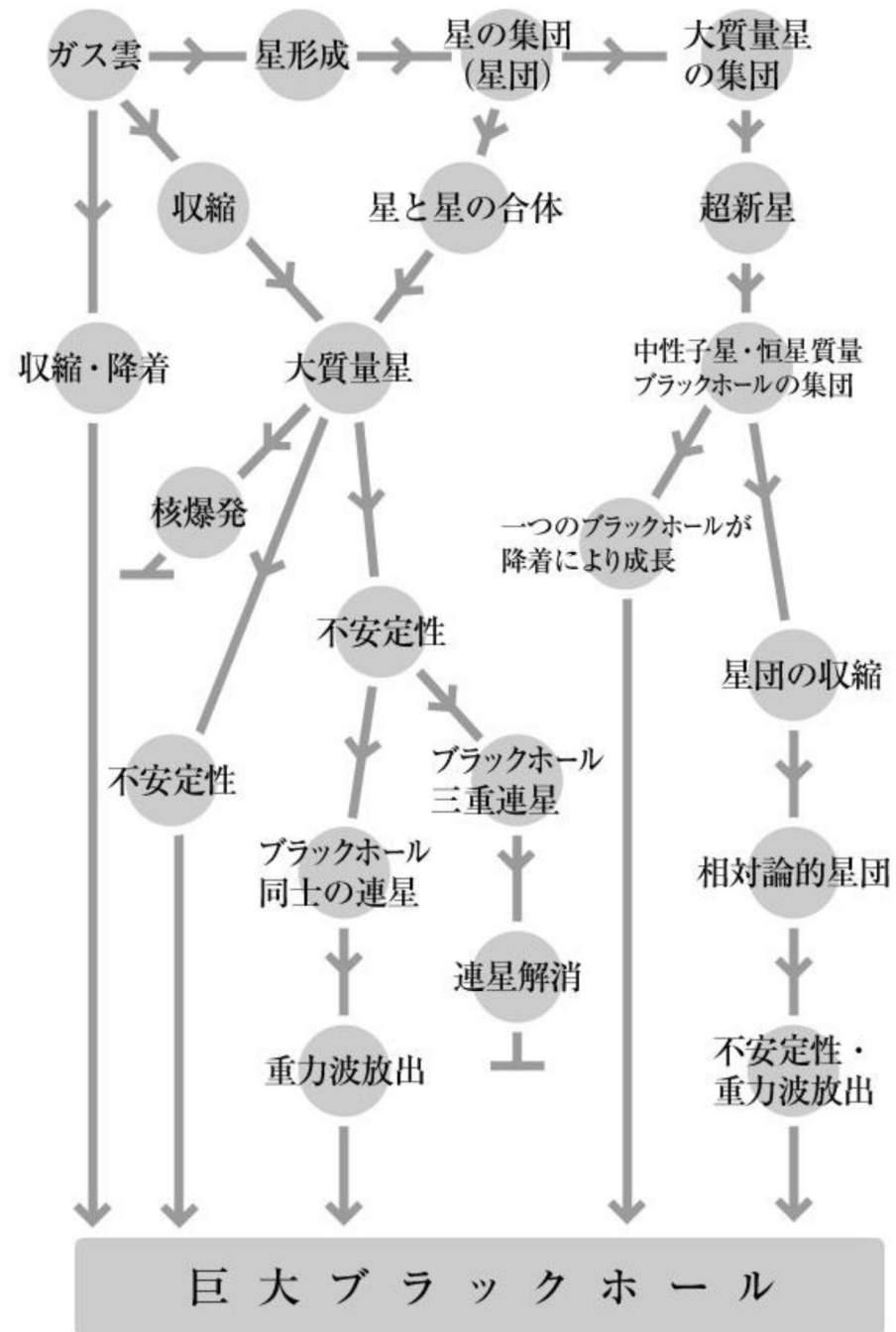
大質量ブラックホール 形成シナリオ

(リース1984)



出所 <http://www.ast.cam.ac.uk/~mjr/>

- ・ 大きい天体を
まず作るか
- ・ 星団を作ってから
合成するか



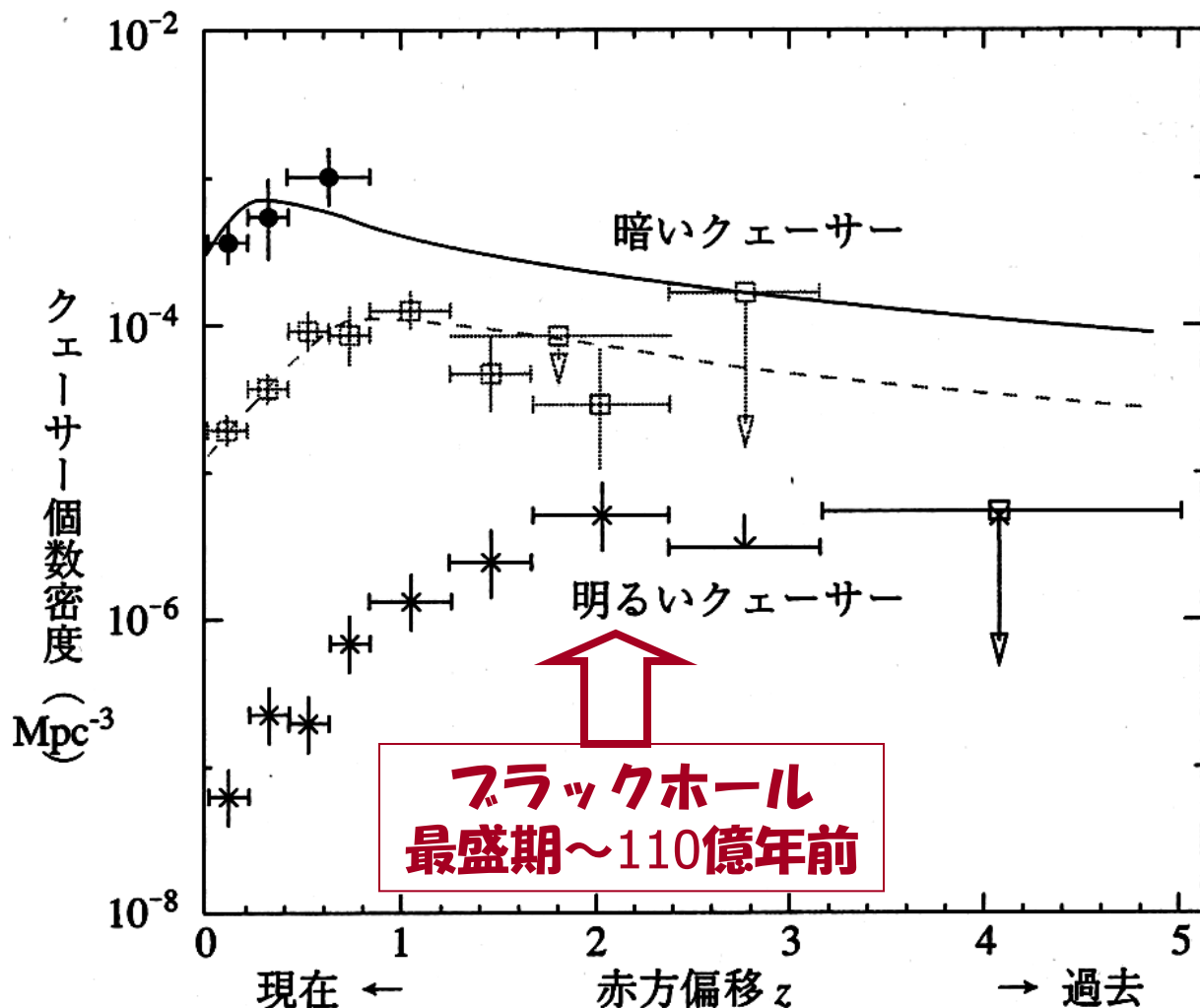
ブラックホールの宇宙論的進化

(上田ほか 2003)

明るい活動銀河核
(大質量ブラック
ホール) ほど、よ
り昔に多くできた

⇒ 銀河形成のボト
ムアップシナリオ
に矛盾?

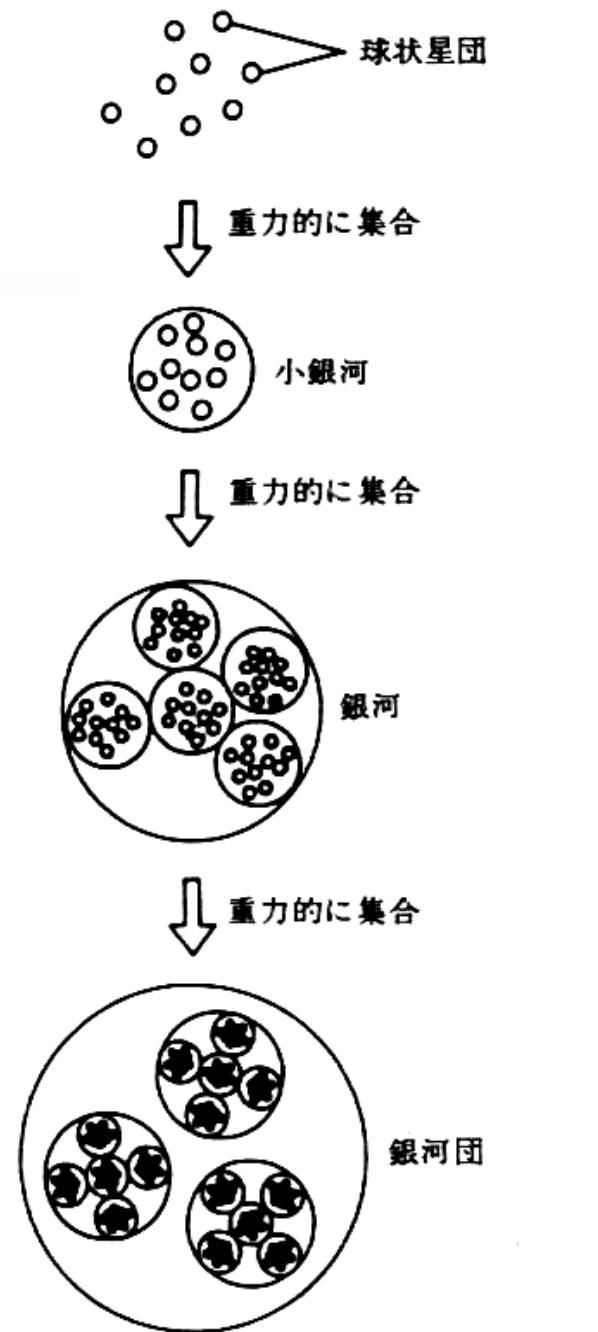
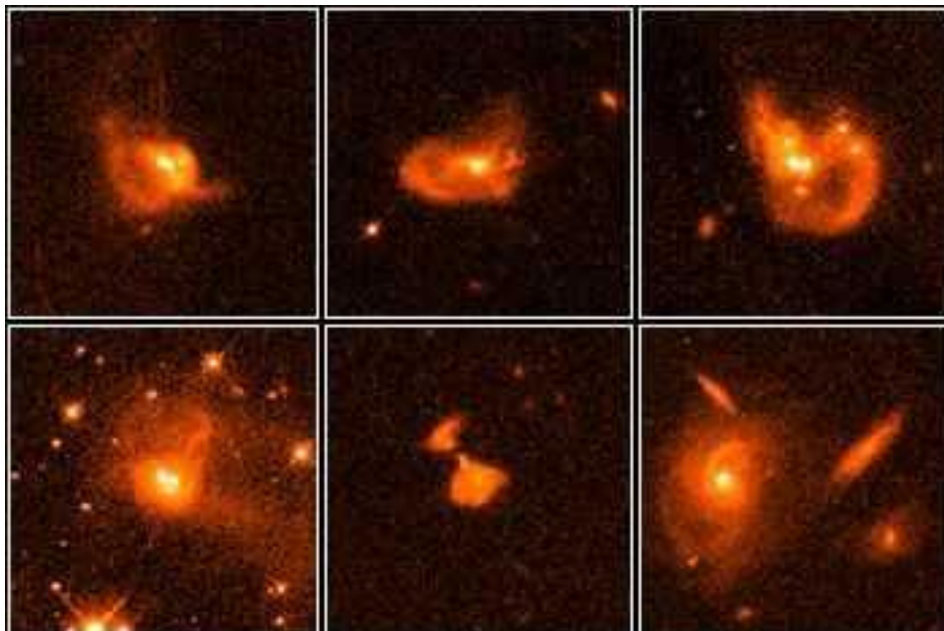
(今もって謎)



大規模構造形成の ボトムアップシナリオ

宇宙の構造形成は、小さいものから始まり、次第に大きな構造ができていった。 →

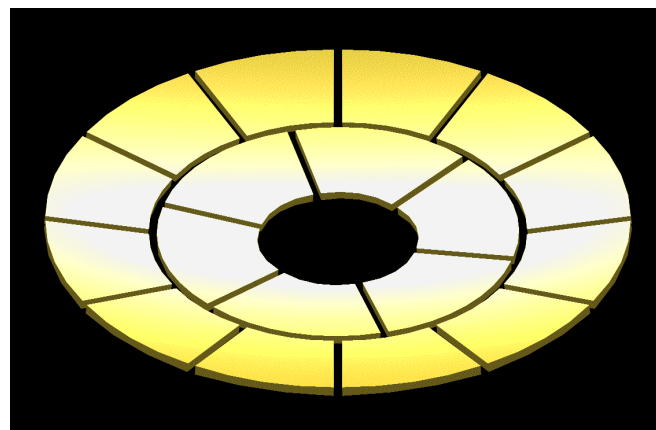
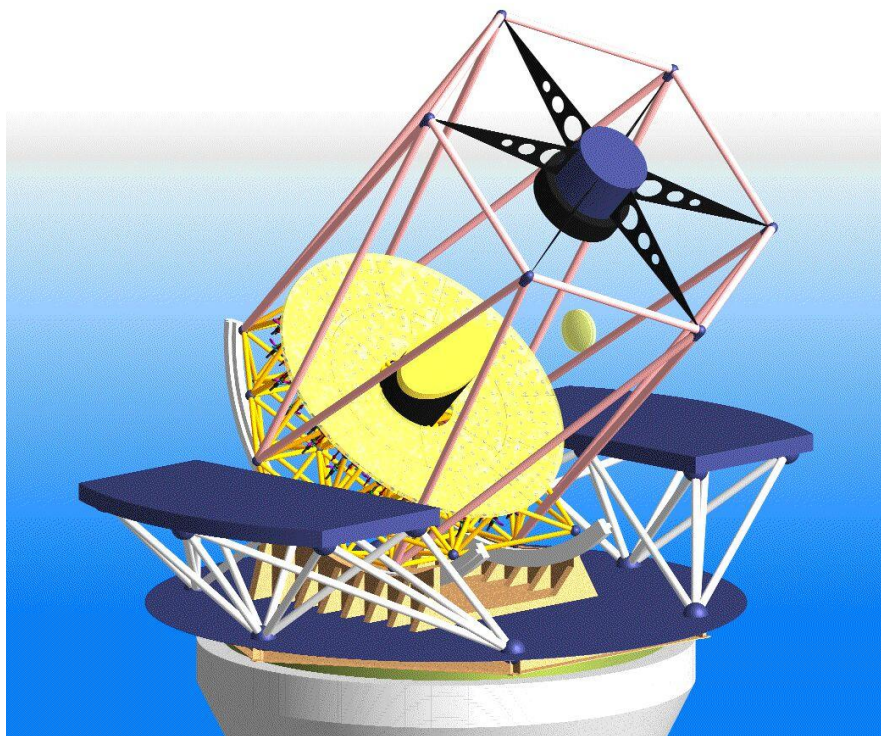
昔の銀河の姿 ↓



(池内了「観測的宇宙論」)

5：近未来のブラックホール観測

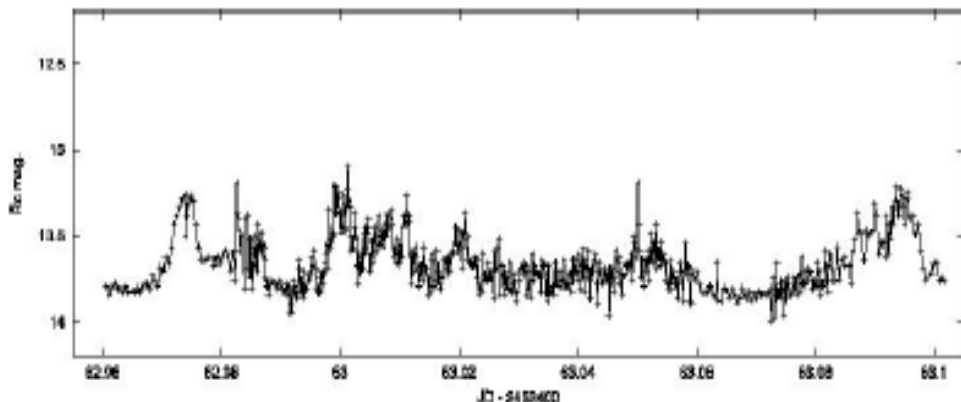
- 京大計画＝口径3.8m、国内初の分割鏡方式望遠鏡
- 岡山観測所内に設置、2012年ファーストライト



分割鏡方式は次世代超大型望遠鏡の基本。
18枚の鏡をナノメートル精度で位置合わせし
一枚の鏡として機能させる。

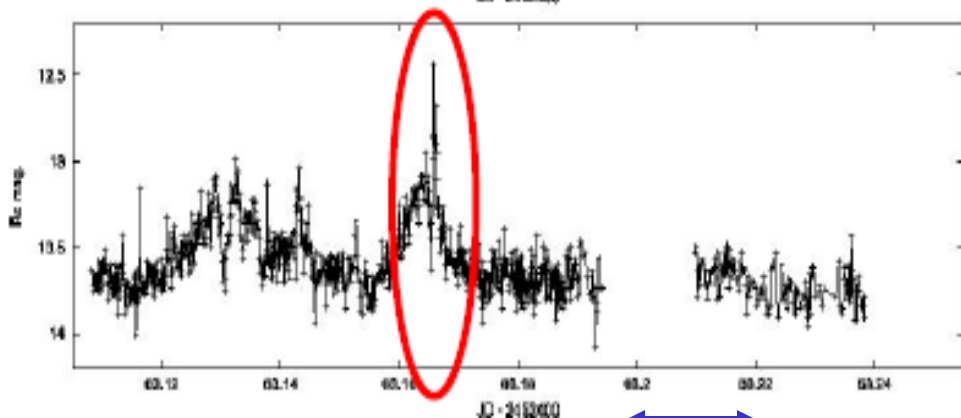
新望遠鏡で何を観る？

■ ブラックホールは可視光でも激しく変動



→ 可視光はブラックホール

→ **ブラックホールを究めるため、可視光観測も有効**



→ **高速測光・分光観測が重要**

ブラックホール半径 ~ 30 km

光の速さ $\sim 3 \times 10^5$ km/秒

→ **最小時間 < 0.1 秒**

30分

で、何がわかる？

- **ブラックホールのまわりは極限状況**
 - **超高温、超高压、超強磁場、超高エネルギー粒子**
- **実験室では得られない極限状況の物理を究める**
 - **極限状況で、物理の基本法則が見えてくる**
 - **粒子加速：粒子にどうエネルギーを注入するか**
 - **磁場のふるまい：時間変動はなぜ起こる**
 - **ジェット（高速噴出流）の起源...**
- **究極の目標はブラックホールの存在証明**

次世代スペース電波干渉計 (VSOP-2)

- **達成角度分解能**
~0.01ミリ秒
(東京から富士山頂
の髪の毛の細さを見こむ
角度に相当)
- **次世代電波干渉計**
(VSOP-2)で達成。

2012年打ち上げ予定

ブラックホールの拡大像



理論計算



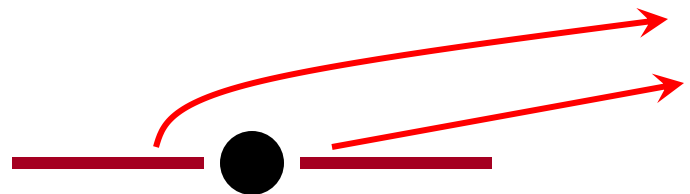
VSOP2

VSOP

相対論的ドップラー
→ 左右非対称な構造

M87の場合 ($M_{\text{BH}} = 2.5 \times 10^9 M_{\text{sun}}$)

重力レンズ
→ ブラックホール背後からも光



まとめ

「ブラックホール天文学」の時代

観測が進み、その存在は確実視されている。
さまざまな現象（時間変動）も見えてきた。

ブラックホールはずっと「構造を破壊するもの」
(鬼っ子)と見られていた。

しかし、近年、ブラックホールは銀河形成に深く
関わっていると考えられ始めている。

ブラックホールも宇宙の大事な構成員

参考文献：

嶺重 慎「ブラックホールを見る！」岩波科学ライブラリー

