

2010年  
ブラックホール  
への旅

*Black-Hole Tour 2010*

福江純(大阪教育大学)

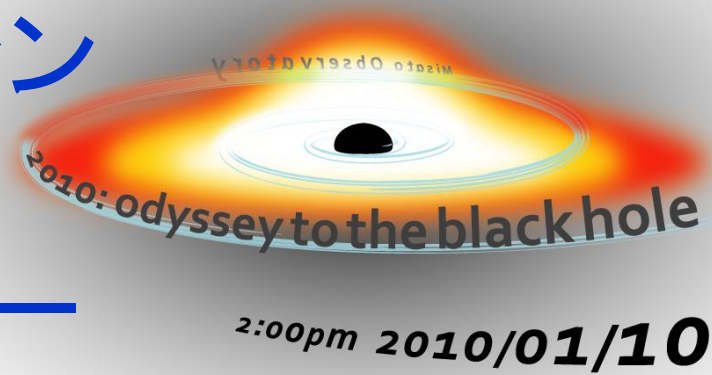




# 2010年 ブラックホールへの旅

- 1 ブラックホールの“常識”
- 2 ブラックホール活動天体
- 3 ブラックホールエンジン
- 4 銀河系中心への旅
- 5 いて座A\*のモンスター
- 6 ブラックホールの性質
- 7 ブラックホールシャドー

みさと天文台 1月の天文教室



2:00pm 2010/01/10



2010/1/11

2010年 ブラックホールへの旅

「2010年ブラックホールへの旅」  
 2010年1月10日(日)午後2時～  
 紀美野町みさと天文台 月の館  
 2  
 参加無料 予約不要



福江 純 (大阪教育大学)  
大阪教育大学教育学部国文学科准教授、  
 修士。専門は理論的宇宙論物理学。  
 天文学者としてだけでなく、SFやアニメ  
 ファンとして、SFのアイデアを天文学の  
 立場から考察した書籍も多数。「トップを  
 ねらえ！」は自身のアニメベスト3の一つ。

みさと天文台 Tel.073-498-0305 URL:http://obs.jp

# ブラックホールの“常識”

❁ 空間の黒い穴？

❁ 何でも吸い込む？

？ ？ ？

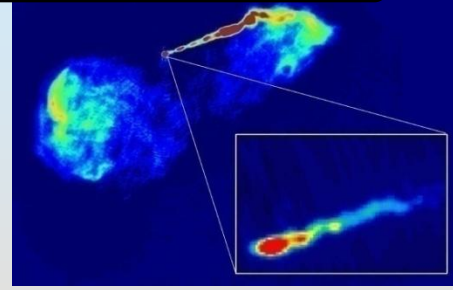




# ブラックホール活動天体

- ✿ ブラックホールは“光る！”
- ✿ ブラックホールは“吹き出す”

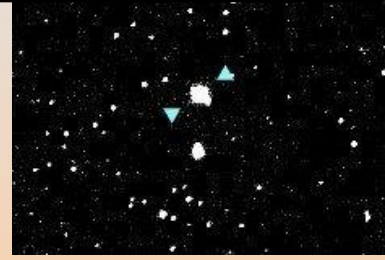
活動銀河 M87



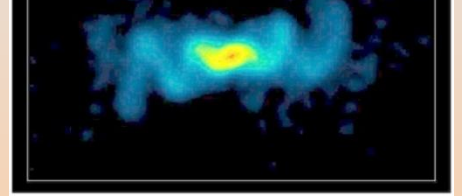
クェーサー 3C273



X線星 Cyg X-1

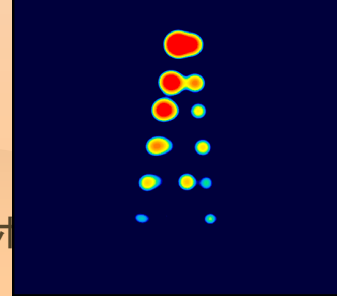


マイクロクェーサー SS433



ブラックホール＝降着円盤システム：電波から可視光さらにX線領域で莫大なエネルギーを放出し、亜光速の高温プラズマ流を吹き出している

マイクロクェーサー GRS1915



ガンマ線バースト



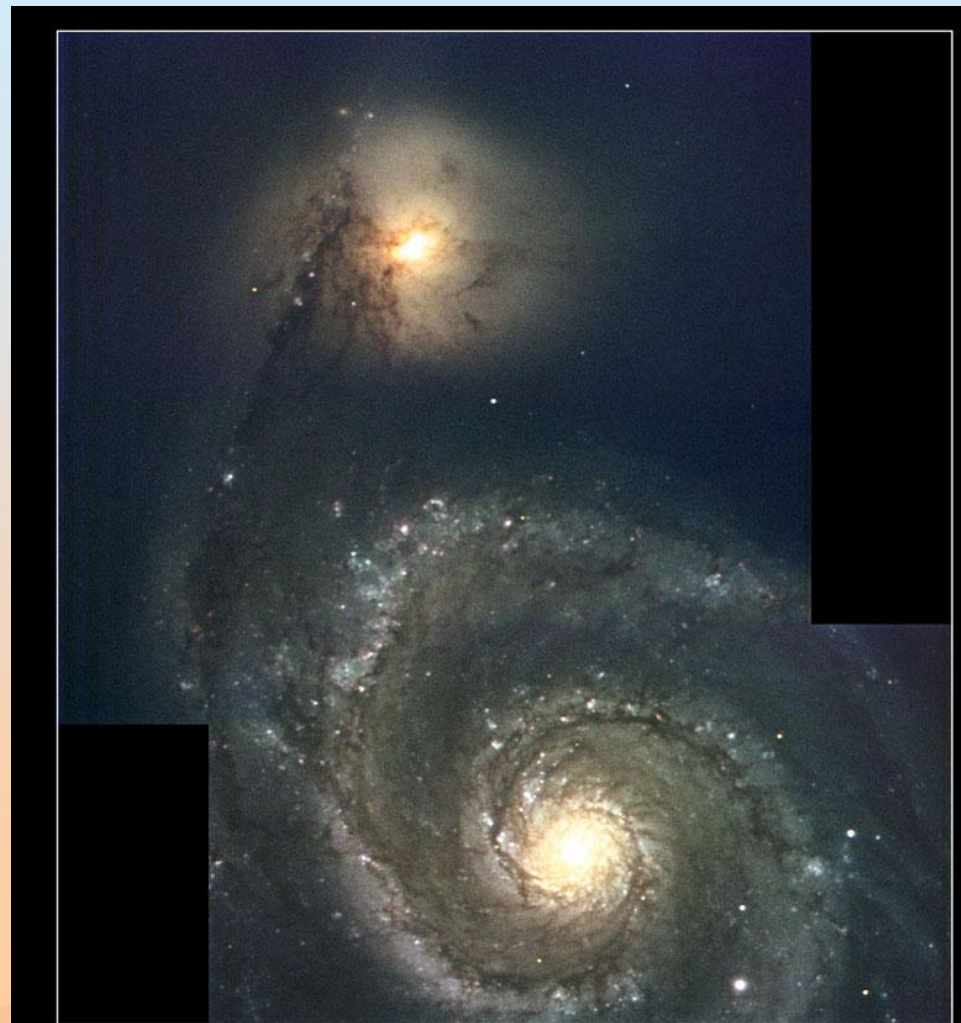


# 活動銀河とクエーサー モンスターブラックホール系



# 銀河

## ❁ 子持ち銀河M51



NGC 5194 ( M 51 ) & NGC 5195  
[ Whirlpool Galaxy ]

Ultra-high-sensitivity HDTV I.I. color camera (NHK)  
Exp. 10 sec. (10 frames coadded) January 16, 1999

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

Copyright © 1999, National Astronomical Observatory of Japan, all rights reserved

2010/1/11

2010年 ブラッ



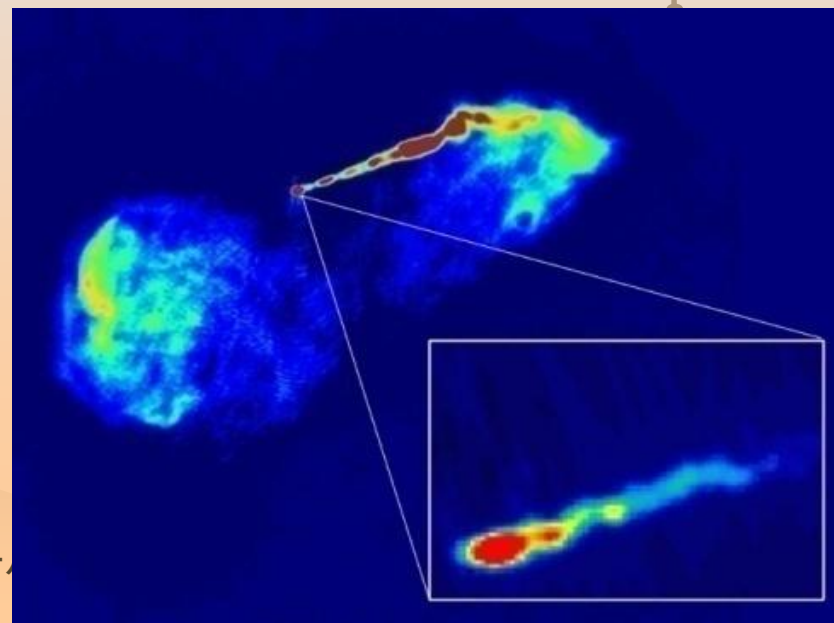
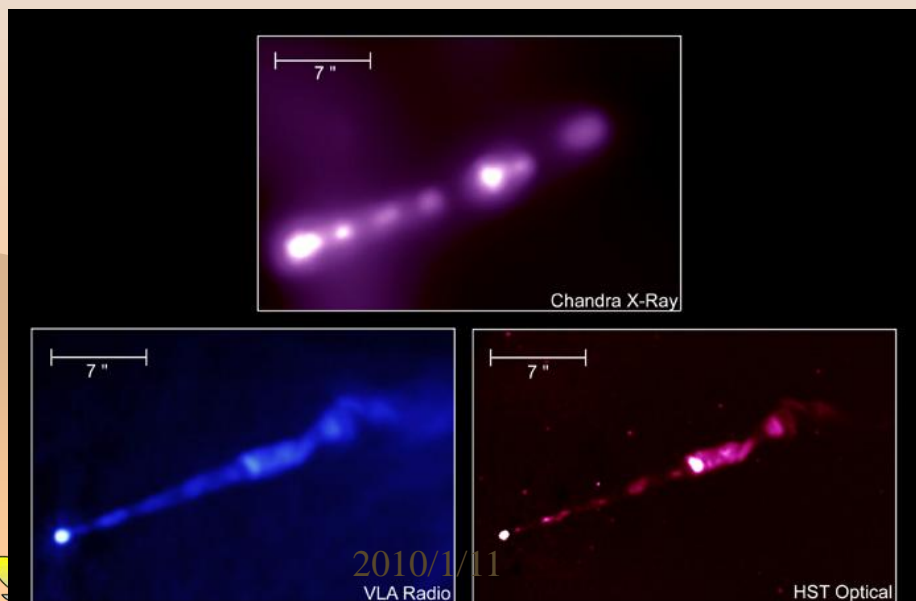
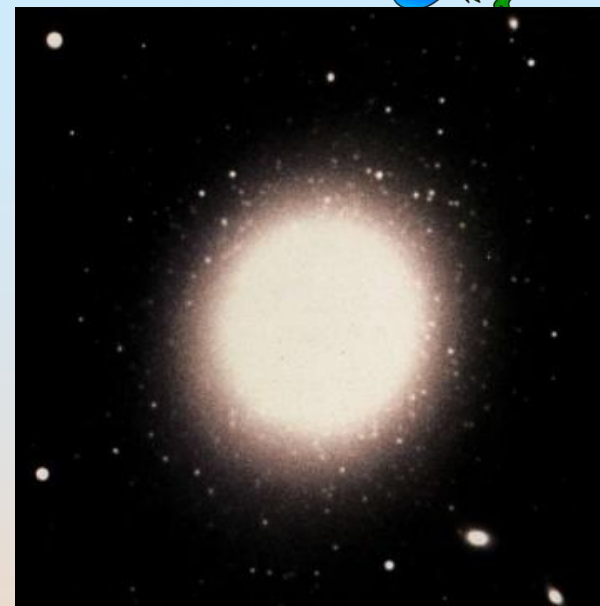




# 活動銀河

活動銀河核 (active galactic nuclei)  
中心核が何らかの活動性を示す銀河

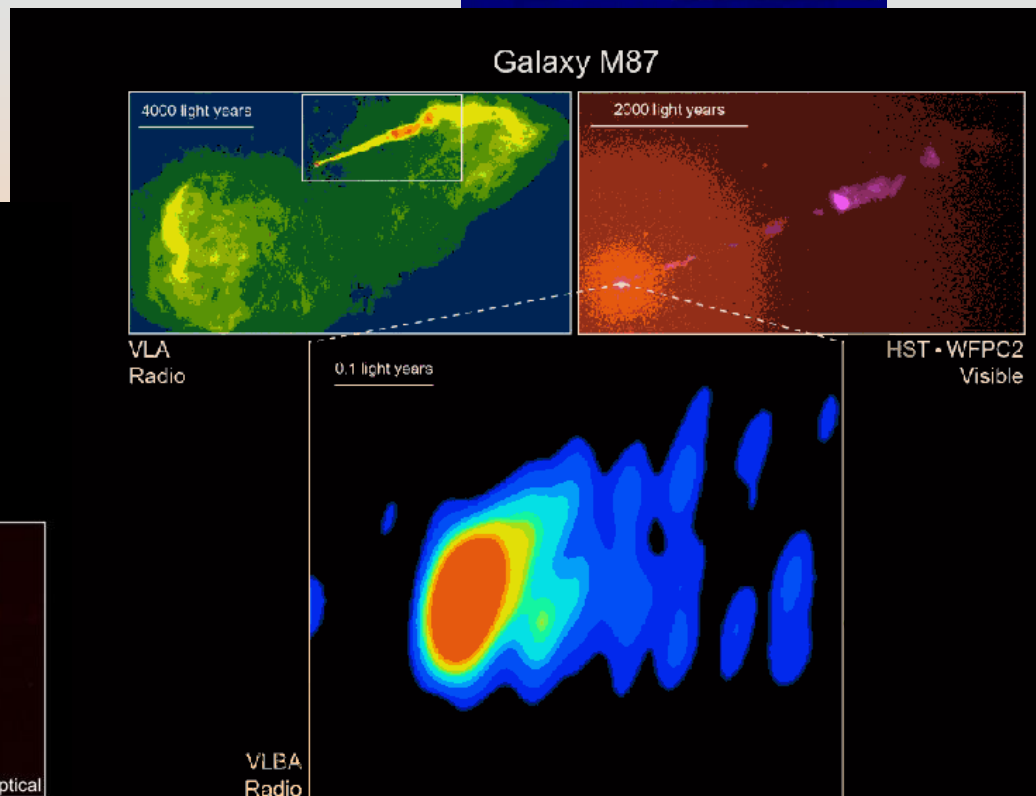
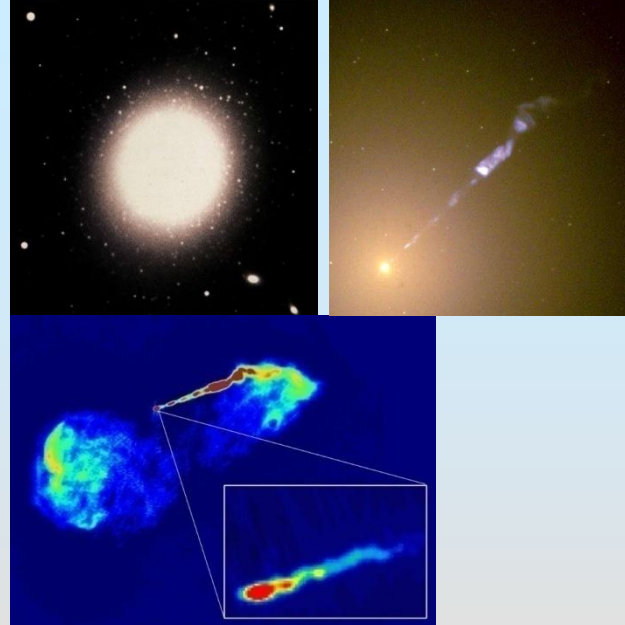
電波銀河 **M87**



# 活動銀河

活動銀河核 (active galactic nuclei)  
中心核が何らかの活動性を示す銀河

電波銀河 **M87**







# 活動銀河

## 電波銀河 Cen A

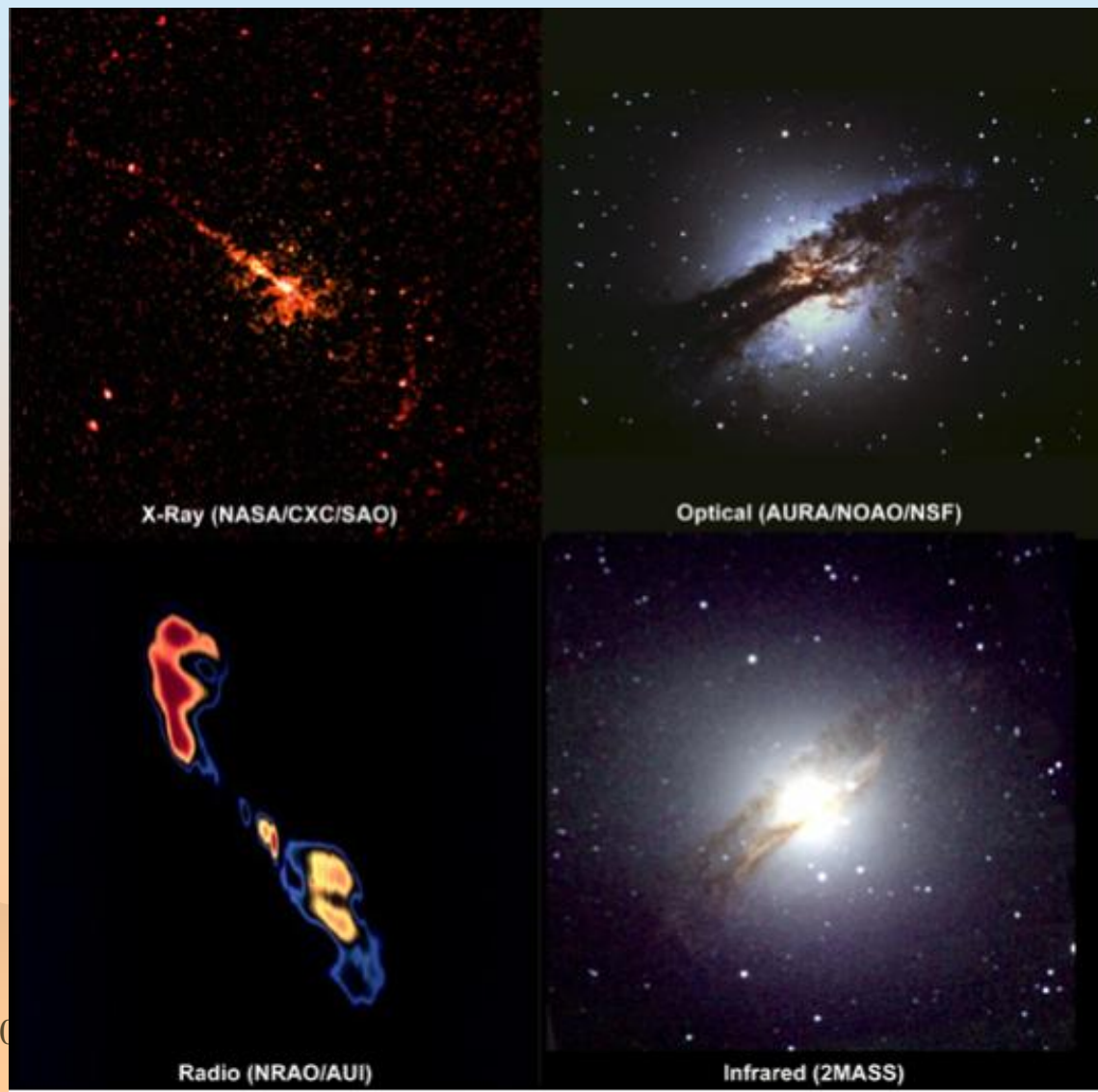
さまざまな波長で見た活動銀河ケンタウルス座A/NGC5128 (<http://physics.gmu.edu/~rms/astro113/myimages/cenacomp.jpg>)。

右上: 可視光では、赤道面が塵の多いガスで隠された楕円銀河のように見える。

右下: 赤外線では、塵の帯を通して中心部が非常に明るく輝いているのがわかる。

左下: 電波では、塵の帯に垂直方向に広がる二つ目玉がわかる。

左上: X線では、二つ目玉の方向に細く伸びるジェットが写っている。





# クェーサー

## クェーサー(quasar)

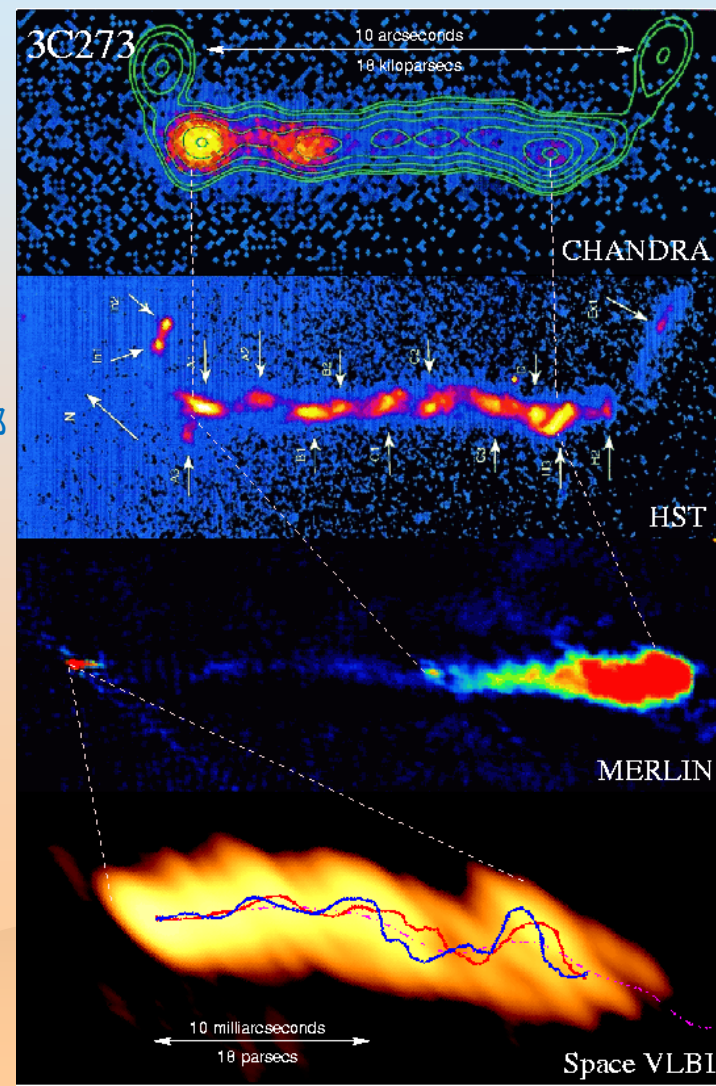
## 非常に遠方の活動銀河核

多波長で観測したクェーサー3C273のジェット。  
 X線(チャンドラ衛星)  
 可視光(ハッブル宇宙望遠鏡)  
 電波(マーリン干渉計)  
 電波(宇宙電波干渉計はるか)

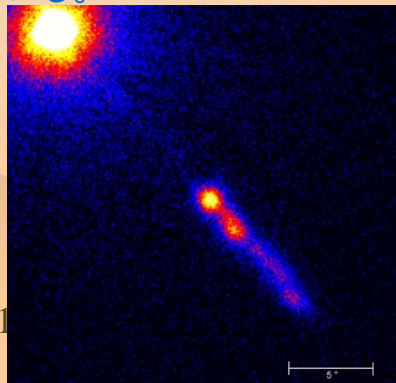
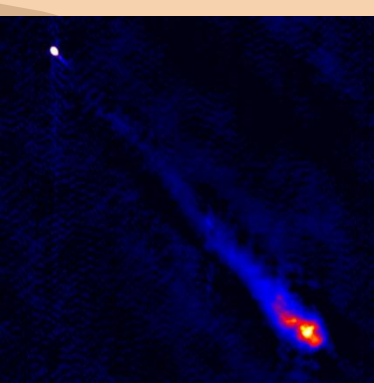
## クェーサー

## 3C273

1番目のチャンドラの画像と2番目のハッブルの画像にはジェットの先端半分程度のほぼ同じ部分が写っている。3番目のマーリンの画像にはだいたいジェットの全体が写っていて、左端の3C273中心核から右方向へジェットが伸びている。一番下のはるか衛星の画像には中心核部分を拡大したものが写っており、数十光年ぐらの領域がみえている。



電波・光・X線



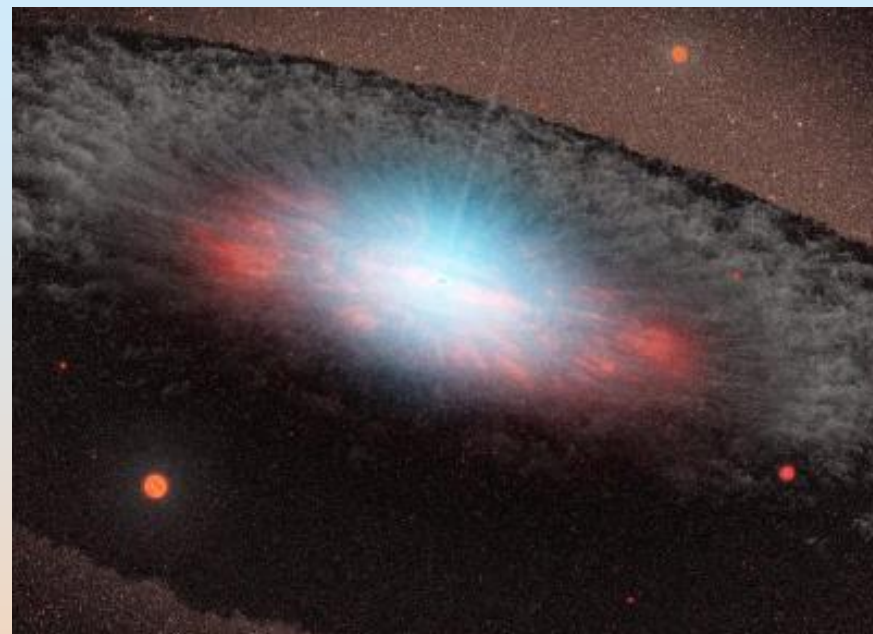
旅

Space VLBI

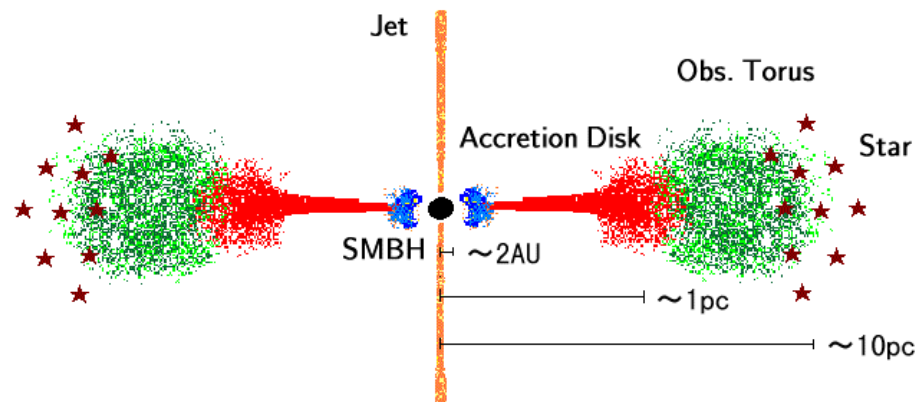


# 活動銀河の描像

1. 超大質量(モンスター)ブラックホールの存在
2. プラズマガスの降着円盤<BHが? 光輝く>
3. 亜光速のBHジェット<BHから? 吹き出す>



クェーサーや活動銀河核に存在するブラックホール=降着円盤の想像図。活動銀河の中心には巨大ブラックホールが存在し、その周囲には光り輝くプラズマガスの円盤(降着円盤)が渦巻いている。ブラックホール近傍からはしばしば、高温プラズマガスのジェットが吹き出ている。図の差し渡しは1光年程度で、ブラックホールの大きさはその10万分の1程度。







# X線星とマイクロクエーサー ブラックホール連星



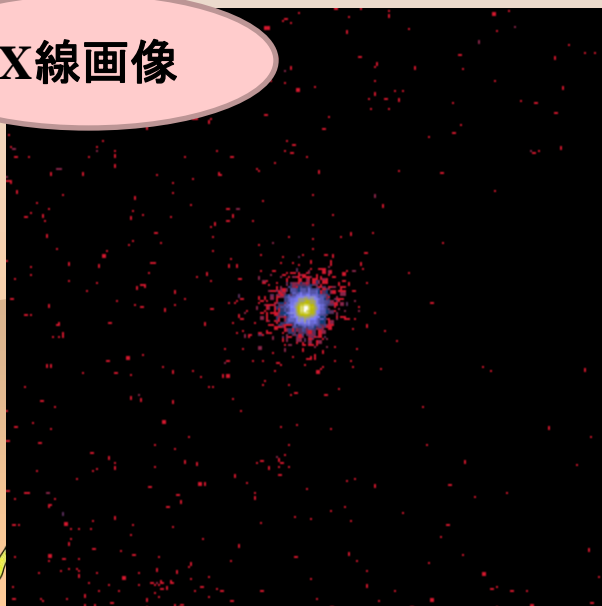
# はくちょう座X-1の発見

**Cygnus X-1 (Cyg X-1)**: はくちょう座X線源第1番  
9等星

ブラックホールと同定(1971年)

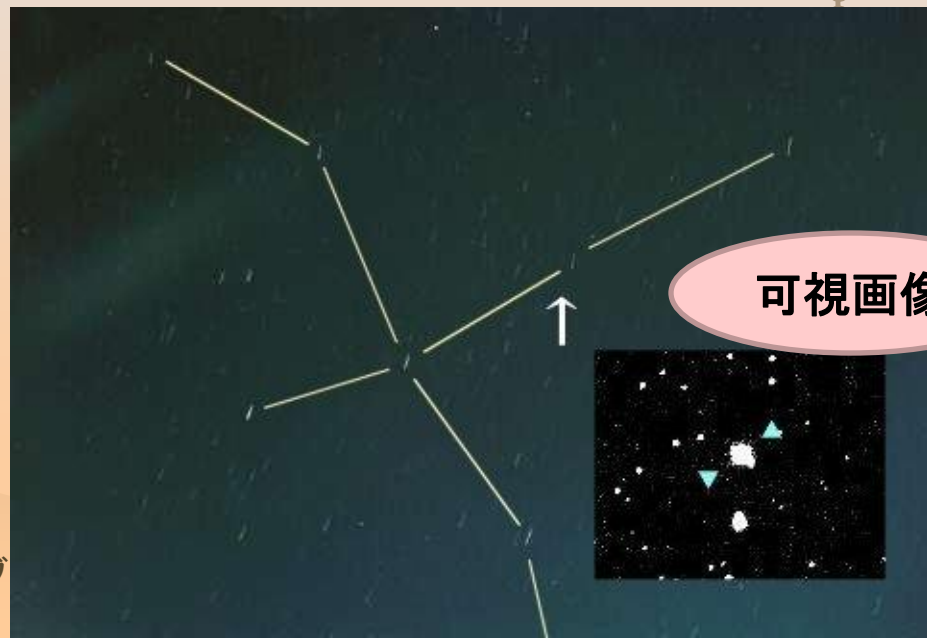
O9Iab型恒星HD226868+ブラックホール

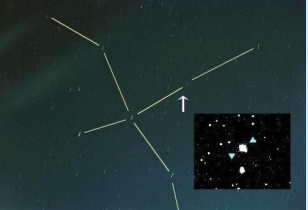
X線画像



0年 ブ

可視画像





# はくちょう座X-1 質量



❁ はくちょう座X-1は連星

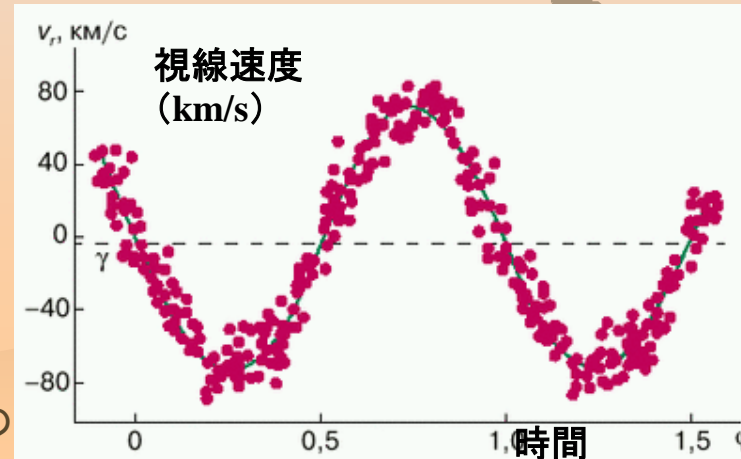
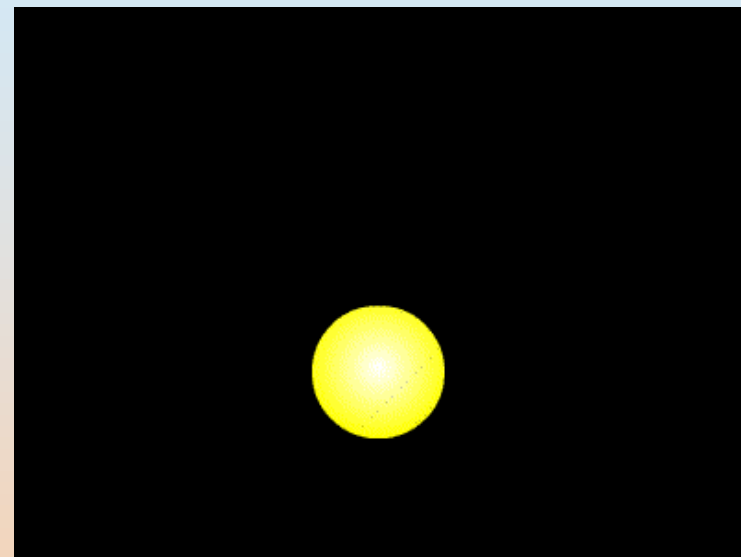


❁ 光では伴星しか見えない

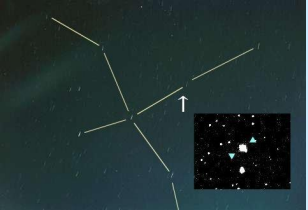
❁ 公転周期=5.6日

❁ 伴星~30太陽質量

**見えない星~10太陽質量**

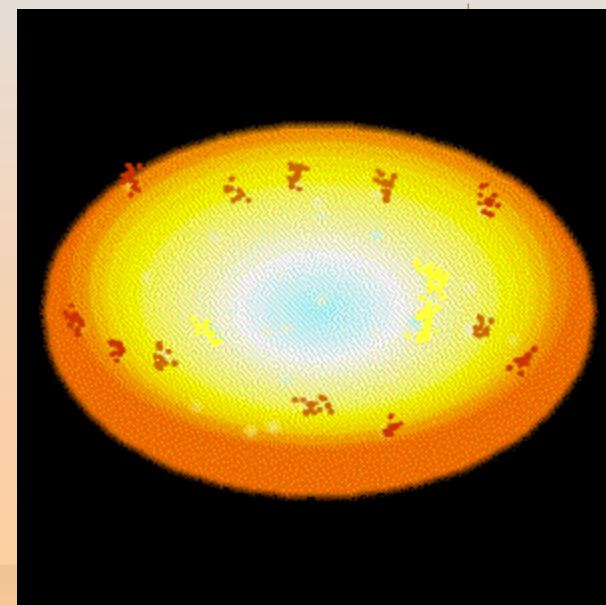
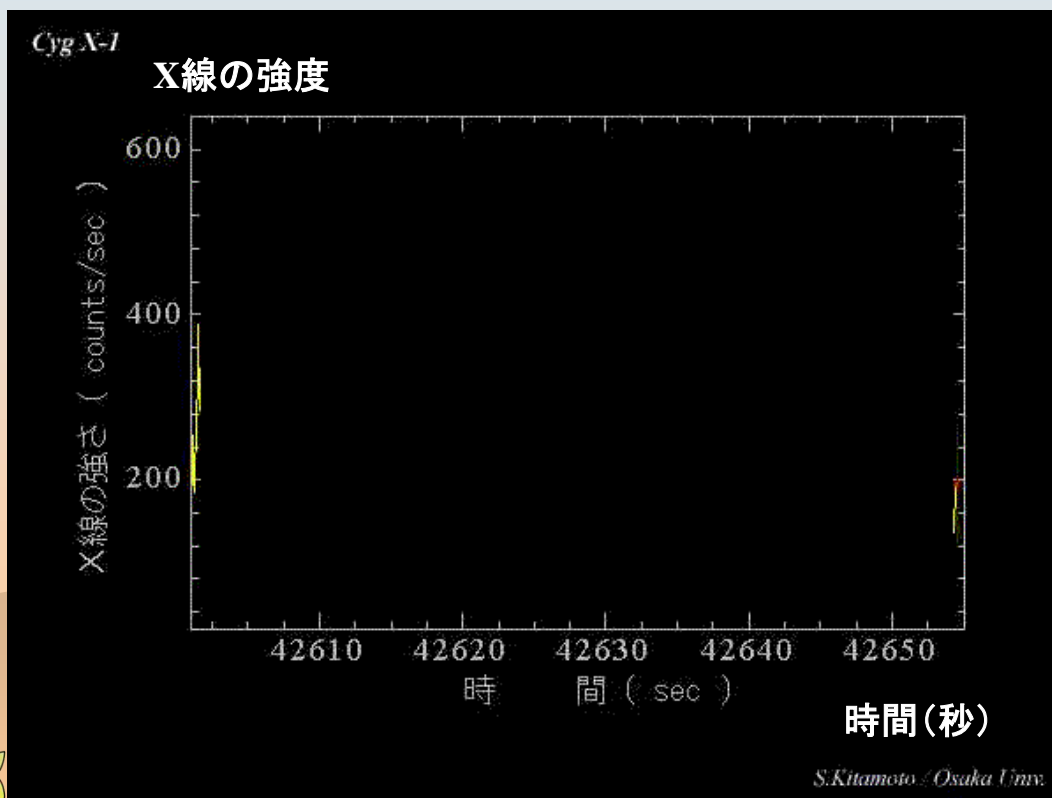


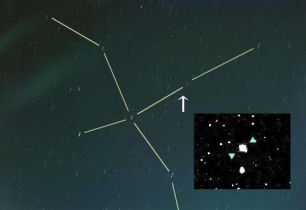




# はくちょう座X-1 X線時間変動

- ❁ 時間変動が不規則でカオス的





# はくちょう座X-1 まとめ



O9Iab型恒星HD226868 (約 $30M_{\odot}$ ) + ブラックホール (約 $10M_{\odot}$ )

❁ ブラックホール (black hole)

Wheelerが命名 (1967)

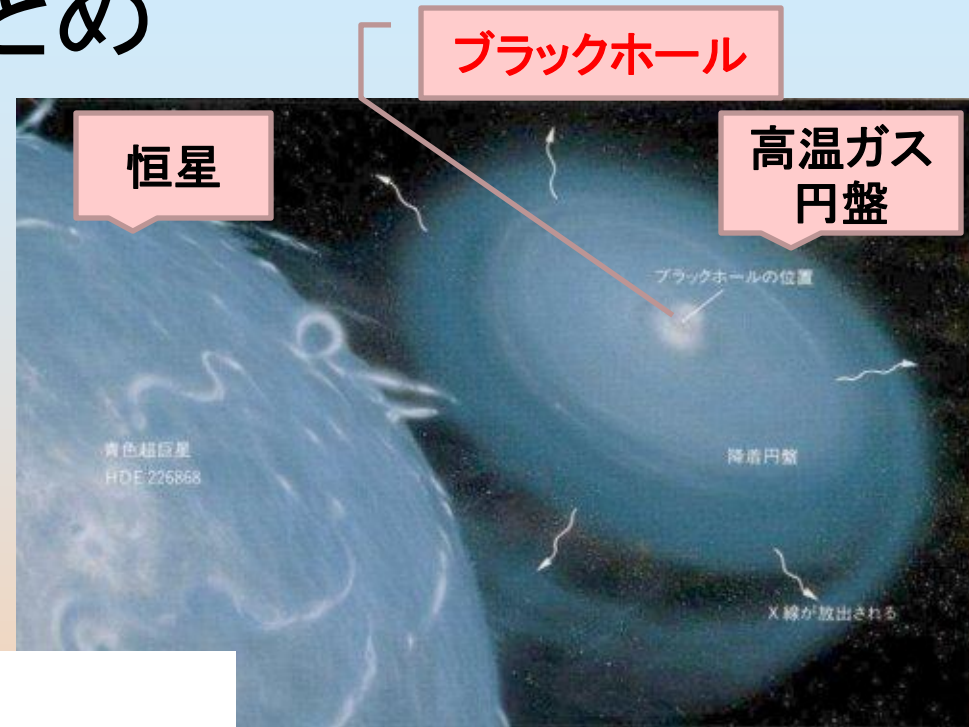
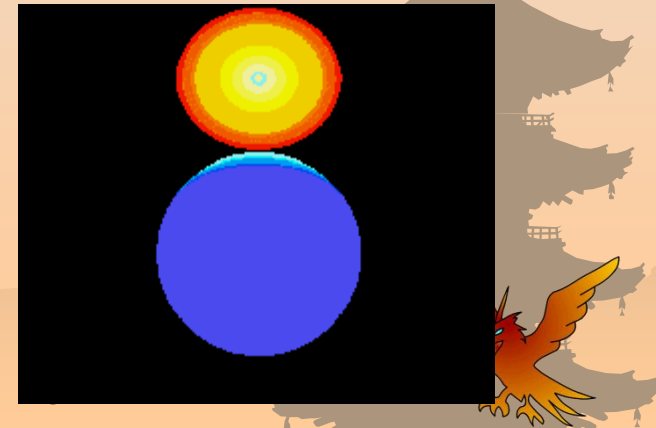
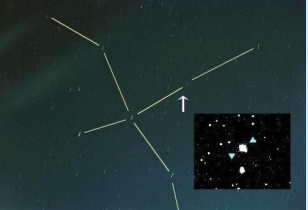


Table 1.4 Elements of Cyg X-1.<sup>4</sup>

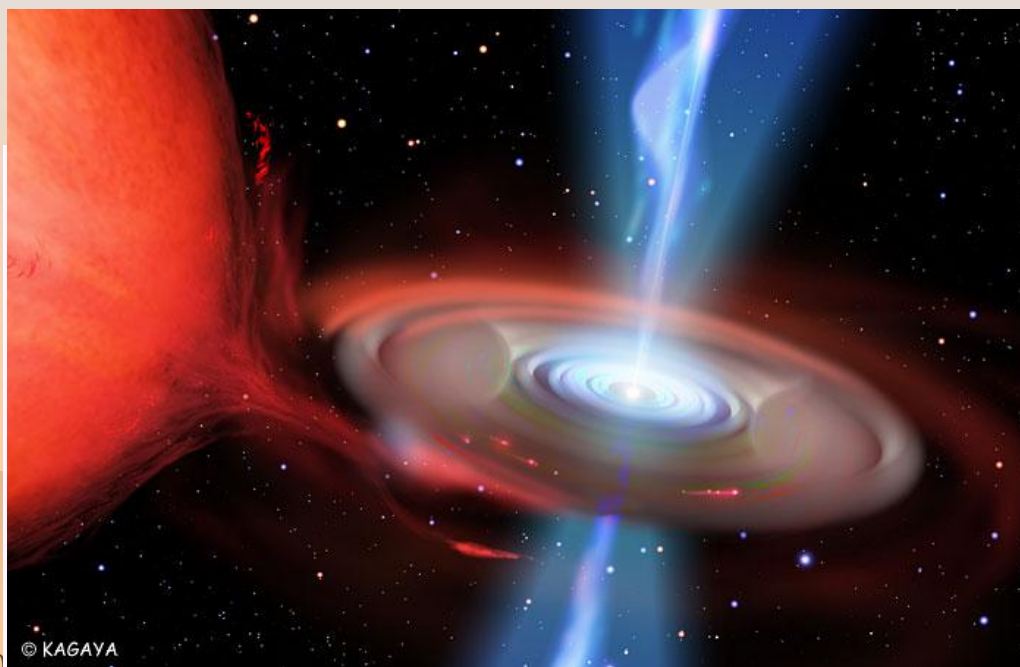
Elements	Values	Ref.
Optical counterpart	$V = 9/O9.7Iab$	
Distance $d$	2 kpc	
Binary period $P$	5.6017 d	1
Ephemeris $T_0$ (2 440 000+)	1869.17 d	1
Semi-amplitude $K$	$75.0 \text{ km s}^{-1}$	1
Mass function $f(M)$	$0.241 \pm 0.013M_{\odot}$	
Inclination angle $i$	$27^{\circ}-35^{\circ}$	2
Ellipticity $e$	$< 0.1$	3





# ブラックホールX線連星

ブラックホールX線連星 (black hole X-ray star)  
ブラックホールを含む連星で  
X線領域で激しく活動をしている




2010

© KAGAYA







ブラックホールエンジン  
重力発電所



# ブラックホールエンジンの提唱

## 観測

- 1918年 “星雲”M87の光の矢(Curtis)
- 1963年 ケーサー3C273の同定(Schmidt)
- 1978年 特異星SS433の発見(Margon)
- 1994年頃 マイクロクエーサーの類別(Mirabel)
- 1997年 ガンマ線バーストの同定(BeppoSAX)



最初に宇宙ジェットが発見された巨大楕円銀河／電波銀河M87



最初に同定されたケーサー3C273

## 理論

- 1969年 超巨大ブラックホールの提唱(Lynden-Bell)
- 1973年 標準降着円盤モデルの構築(Shakura and Sunyaev)
- 1986年 ファイアボールモデルの提案(Paczynski)

リンデン-ベル



スニアエフ@すざく国際会議(2006年12月)

パチンスキー@プリンストン(1996年9月)





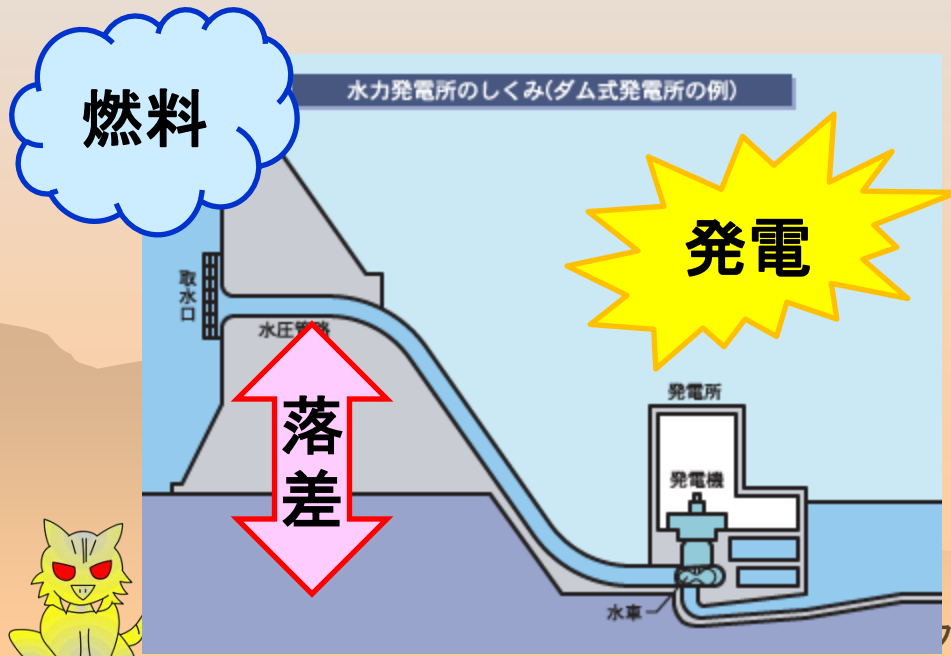
# ブラックホールエンジン 宇宙の重力発電所

## ❁ 地上の水力発電所

1. ダムが落差を作る
2. 水が燃料になる
3. 落差を落ちて発電

## ❁ 宇宙の重力発電所

1. BHが落差を作る
2. 水素ガスが燃料になる
3. 落下でエネルギー発生



ブラックホールへの

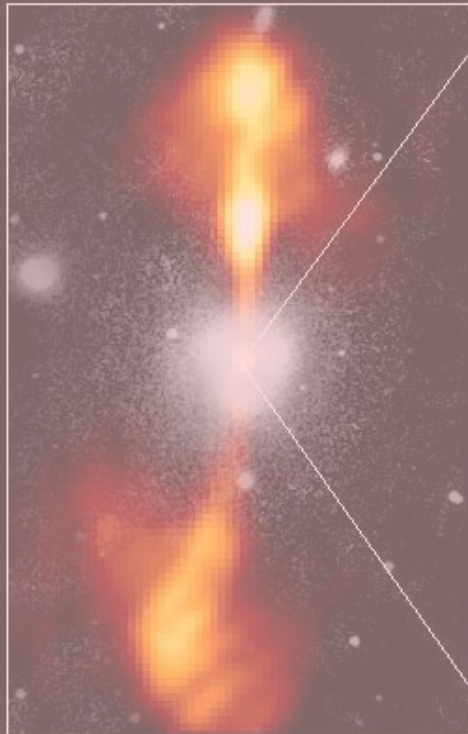


# 降着円盤

## Core of Galaxy NGC 4261

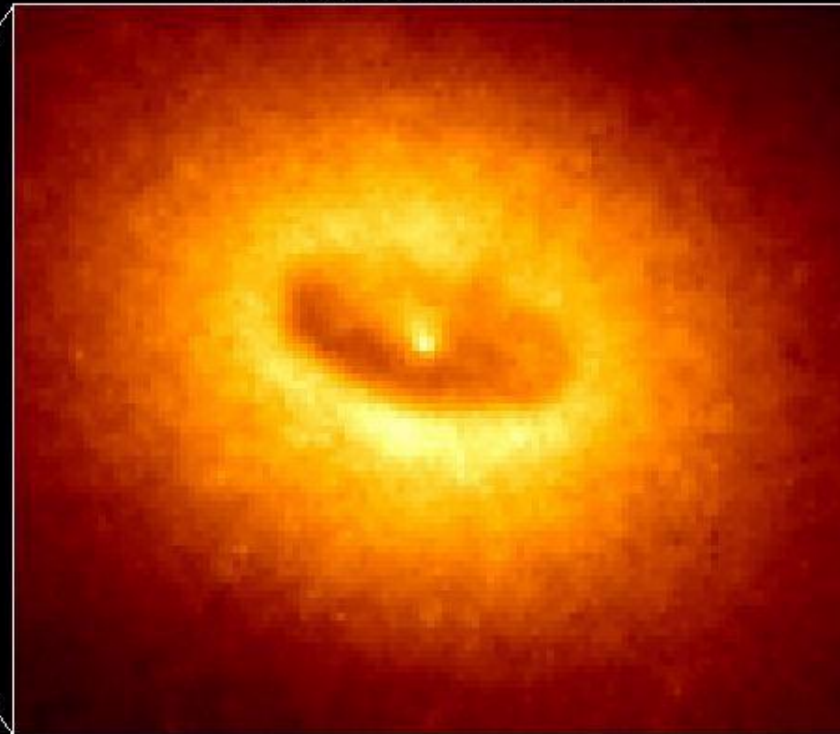
Hubble Space Telescope  
Wide Field / Planetary Camera

Ground-Based Optical/Radio Image



380 Arc Seconds  
88,000 LIGHTYEARS 88000光年

HST Image of a Gas and Dust Disk



17 Arc Seconds  
400 LIGHTYEARS 400光年

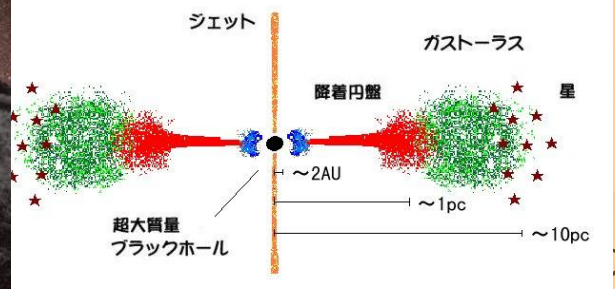
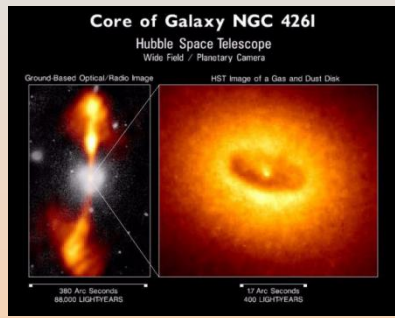
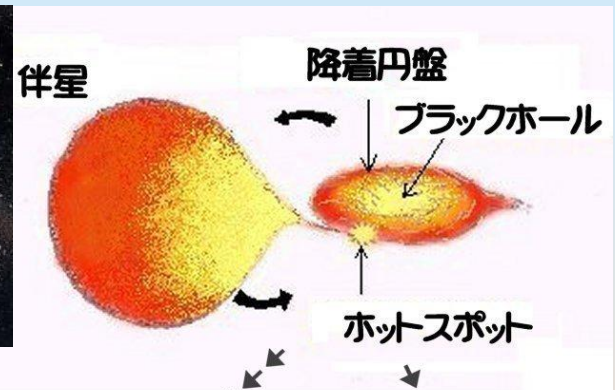
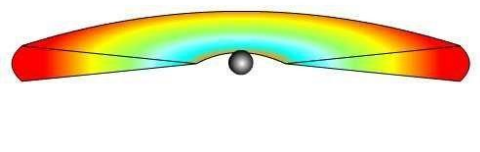
中心部の  
拡大画像  
可視光  
主に星の  
光

黄色～赤  
電波画像  
高温プラズマ  
ジェット

白  
可視光画像  
星の光  
楕円銀河



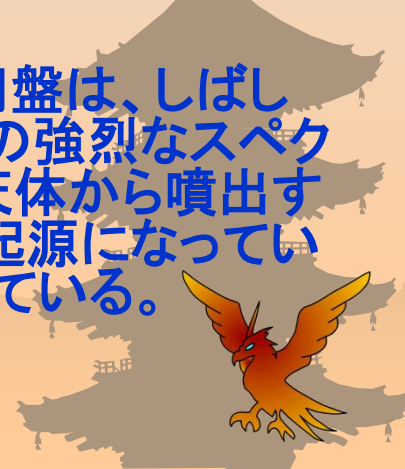
# 降着円盤



原始星・白色矮星・中性子星・ブラックホールさらに超巨大ブラックホールなど、重力天体に周囲から降り積もったガスによって、重力天体のまわりに形成された回転ガス円盤を**降着円盤 (accretion disk)**と呼ぶ。

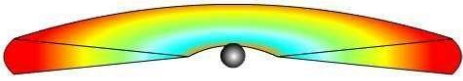
原始惑星系・激変星・X線星・活動銀河など、宇宙における活動的な天体において、その活動の中心的な役割をになっていると考えられている。

そして降着円盤は、しばしば活動天体の強烈なスペクトルや活動天体から噴出するジェットの起源になっていると信じられている。





# 標準降着円盤 定性的描像



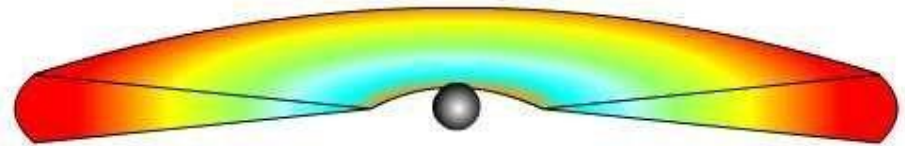
- ❁ 幾何学的に薄い: 平ら
- ❁ 光学的に厚い: 不透明

## 平坦な星

- ❁ ケプラー回転
- ❁ 粘性: 角運動量輸送
- ❁ 粘性: 加熱

- ❁ 内縁の存在  
(相対論的効果)

$$r_{in} \cong r_{ms} = 3r_g,$$



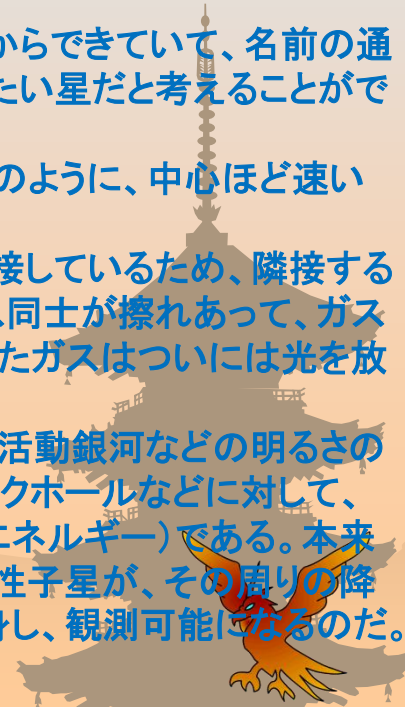
ブラックホール降着円盤の描像。  
中心近傍ほど温度が高い。

降着円盤は、一般に電離した水素ガスからできていて、名前の通り円盤状で不透明であり、直感的には平たい星だと考えることができる。

ガスは降着円盤の中を、太陽系の惑星のように、中心ほど速い回転角速度で回っている。

降着円盤の中では、ガス同士が互いに接しているため、隣接するガス層の間で摩擦が働く。その結果、ガス同士が擦れあって、ガスは激しく加熱される。さらに、高温になったガスはついには光を放射して輝き始める。

この降着円盤からの強烈な電磁放射が活動銀河などの明るさの根源だ。このエネルギーは、中心のブラックホールなどに対して、ガスが持っていた位置エネルギー(重力エネルギー)である。本来は非常に暗いはずのブラックホールや中性子星が、その周りの降着円盤の存在で非常に明るい天体に変身し、観測可能になるのだ。



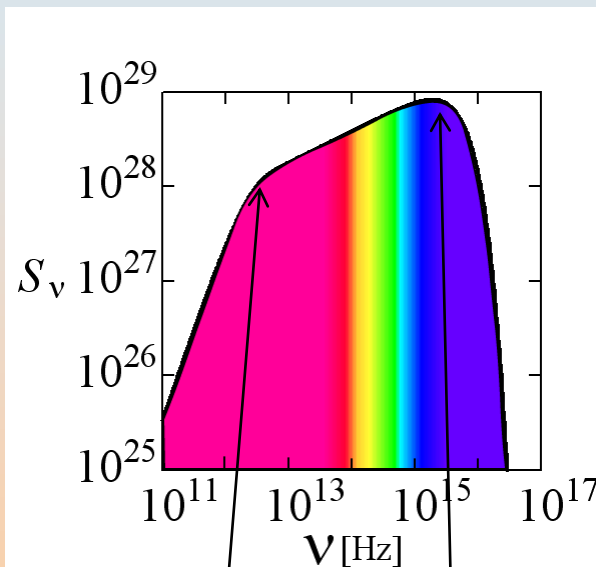
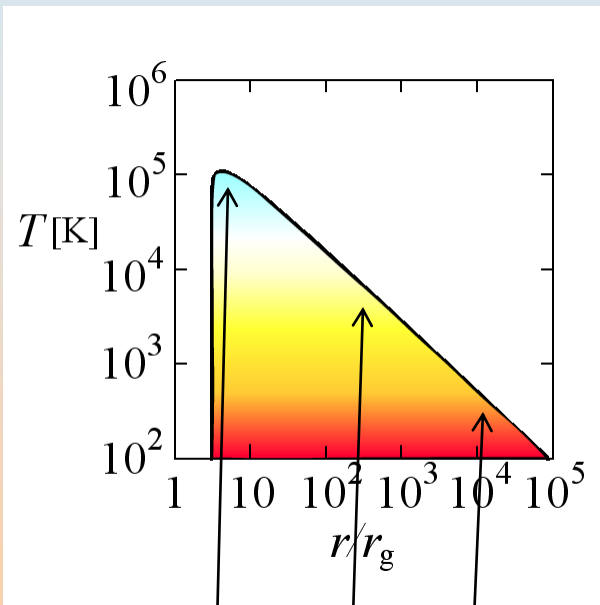


# 標準降着円盤

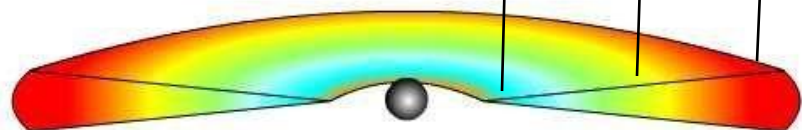
## 光の出方 (1億太陽質量, 1太陽質量/年)

❁ 温度分布  $T$

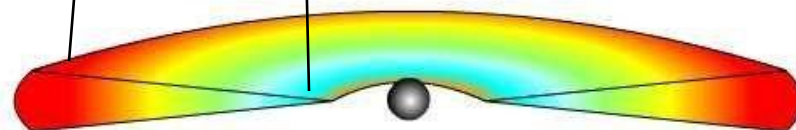
❁ 放射スペクトル  $\nu S_\nu$



降着円盤の中では、ガス同士が互いに接しているため、隣接するガス層の間で摩擦が働く。その結果、ガス同士が擦れあって、ガスは激しく加熱される。さらに、高温になったガスはついには光を放射して輝き始める。

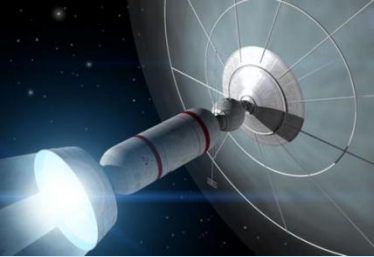


内縁



ブラックホール

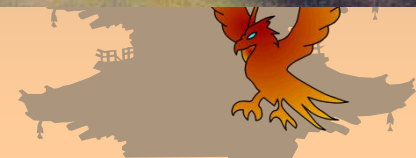
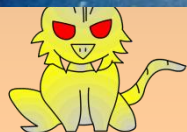


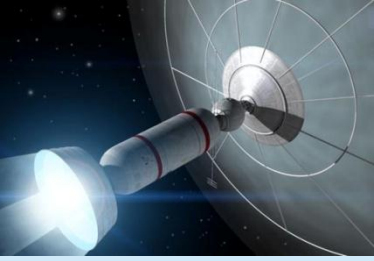


# 銀河系中心への旅

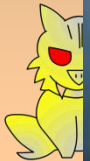
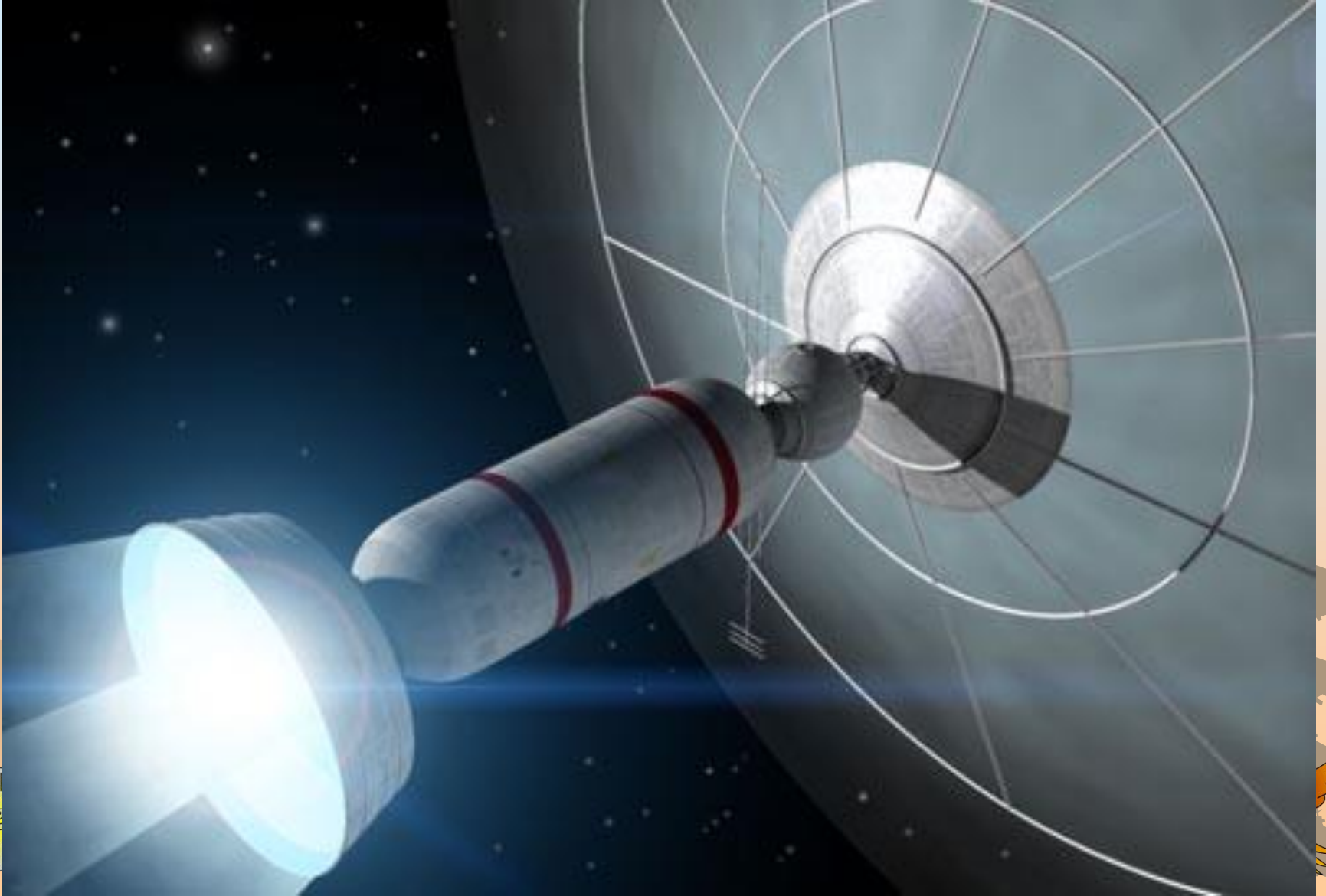


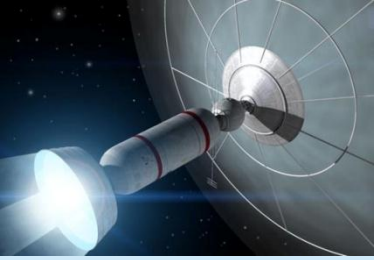
銀河系中心  
2万8000光年（地球）  
20光年（宇宙船内）



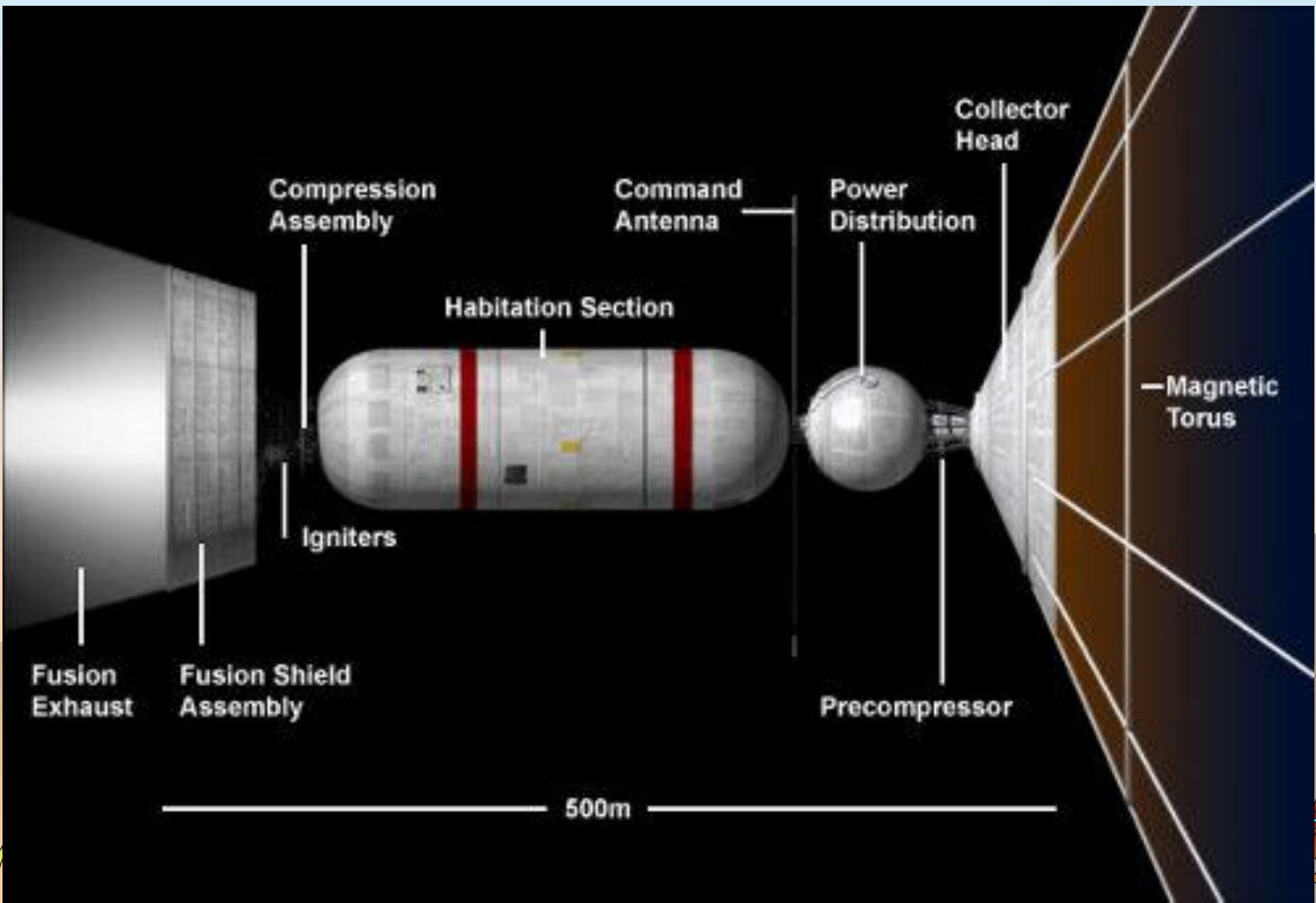


# 星間ラムシップ

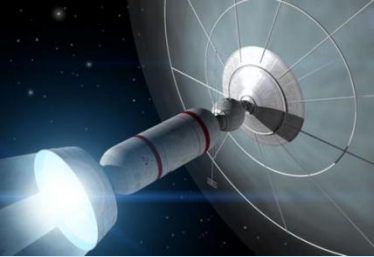




# 星間ラムシップ

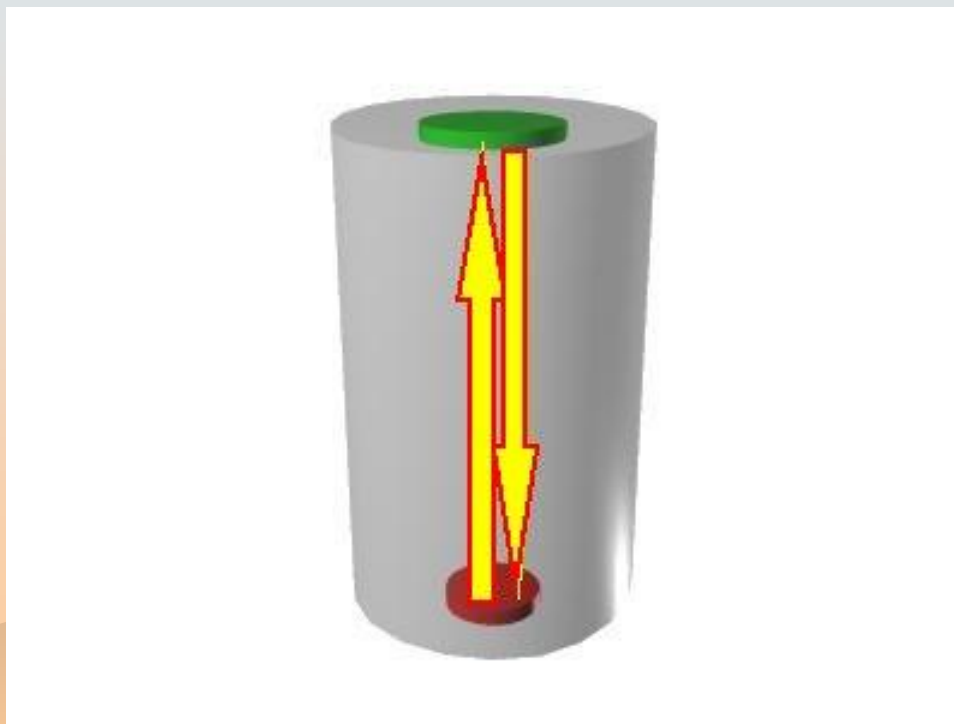




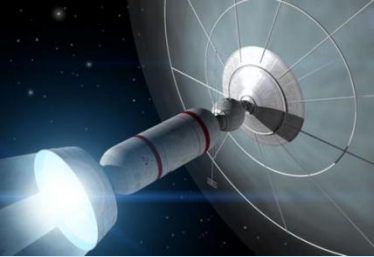


# 光時計

- ❁ 光が往復して1秒かかる



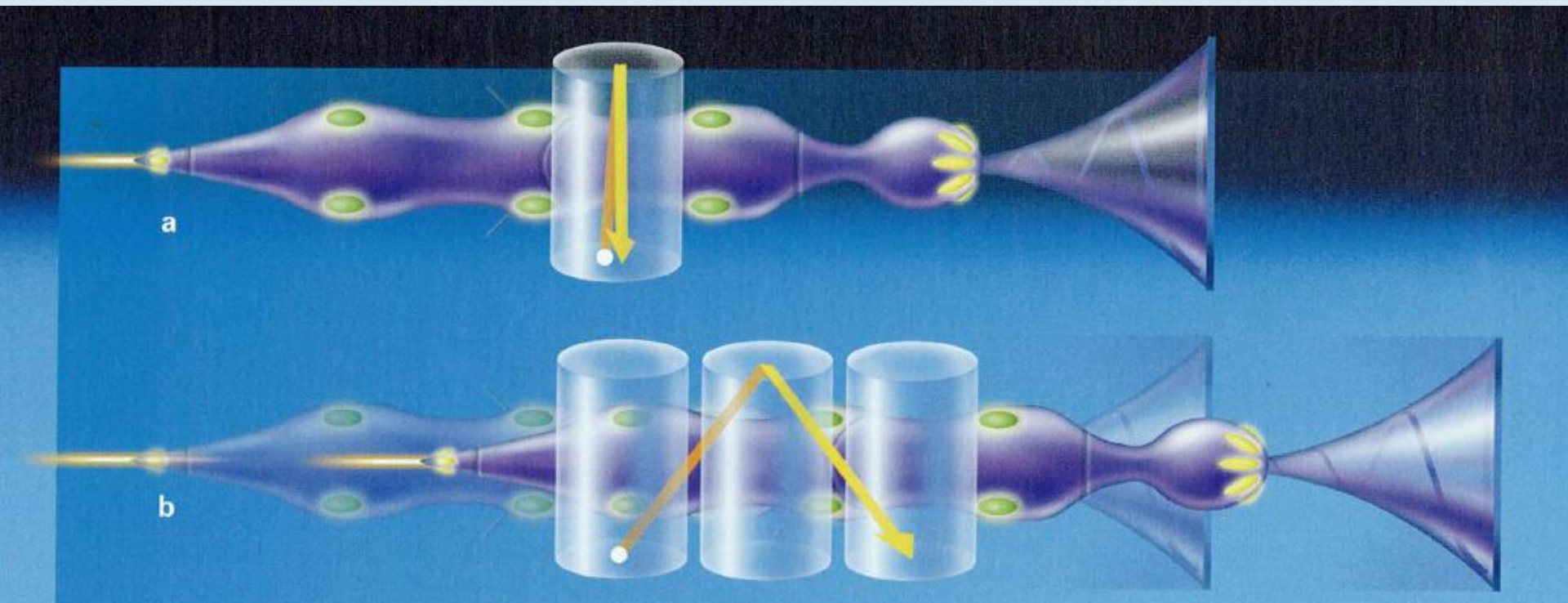




# 亜光速での時間の遅れ

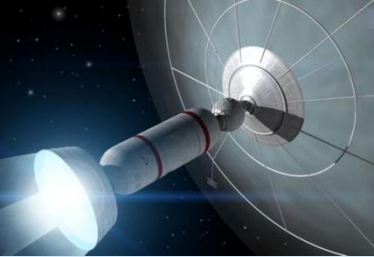


## 宇宙船内での1秒

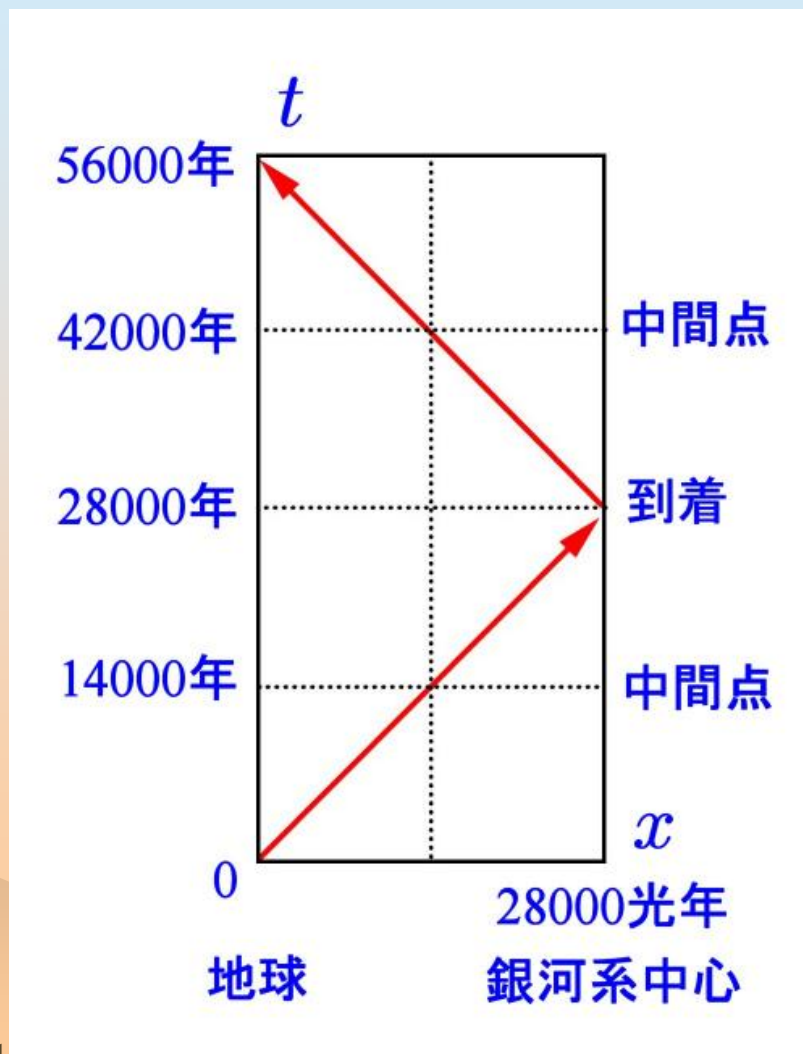


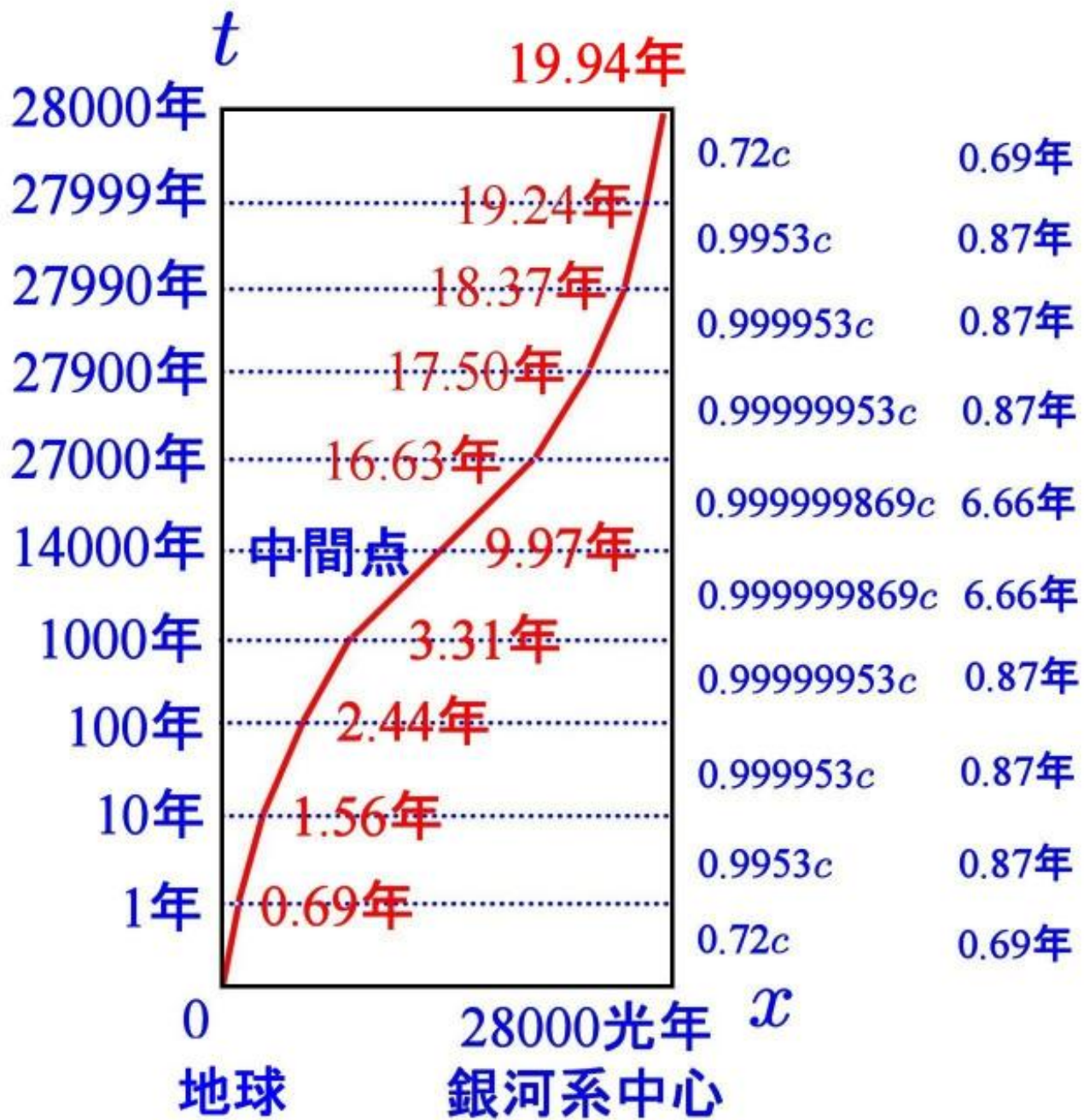
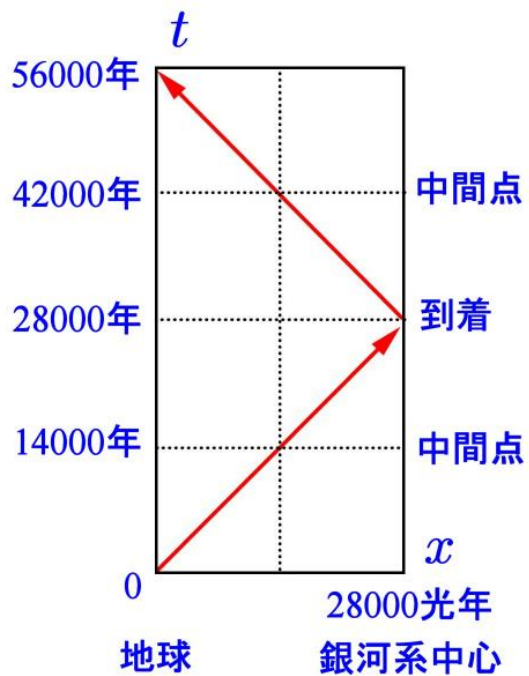
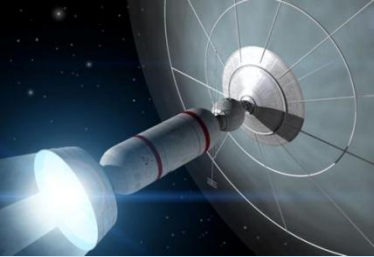
## 宇宙船外では???





# 時空図









# 旅行プラン

**Einstein Space Travel** **STANDARD** 標準プラン

★中間点まで1Gで加速，中間点からは1Gで減速する。

The Earth 地球 → 1Gで加速 → Halfway Point 中間点 → 1Gで減速 → The Center of Galaxy 銀河系中心

所要地球時間 **2万8000年**      所要船内時間 **19.78年**

◀ ご乗船券

**Einstein Space Travel** **ONE WAY** 片道プラン

★1Gの一定加速で銀河系中心まで到達する。

The Earth 地球 → 1Gで加速 → The Center of Galaxy 銀河系中心

所要地球時間 **2万8000年**      所要船内時間 **10.64年**

◀ ご乗船券

**Einstein Space Travel** **DELUXE** 安全快適プラン

★光速の90%で等速運動する区間をはさむ。

The Earth 地球 → 1Gで加速 → 光速の90%で等速運動 → 1Gで減速 → The Center of Galaxy 銀河系中心

所要地球時間 **3万1000年**      所要船内時間 **3万1000年**

◀ ご乗船券

**Einstein Space Travel** **SUPER EXPRESS** 超特急プラン

★中間点まで10Gで加速，中間点からは10Gで減速する。

The Earth 地球 → 10Gで加速 → Halfway Point 中間点 → 10Gで減速 → The Center of Galaxy 銀河系中心

所要地球時間 **2万8000年**      所要船内時間 **2.4年**

◀ ご乗船券 Boarding Pass      Flight **1B 2300**      Seat **1999 A**      Einstein Ship

地球から銀河系中心までの旅行プランは、宇宙船の速度によっていろいろと考えられる。ここでは四つのケースについて考えてみた。1Gは地球の重力と同じである。加速度がきついほど、宇宙船に乗った人にとっては時間の経過が短くなる。いずれの場合も、地球では3万年前後の時間が経過してしまう。





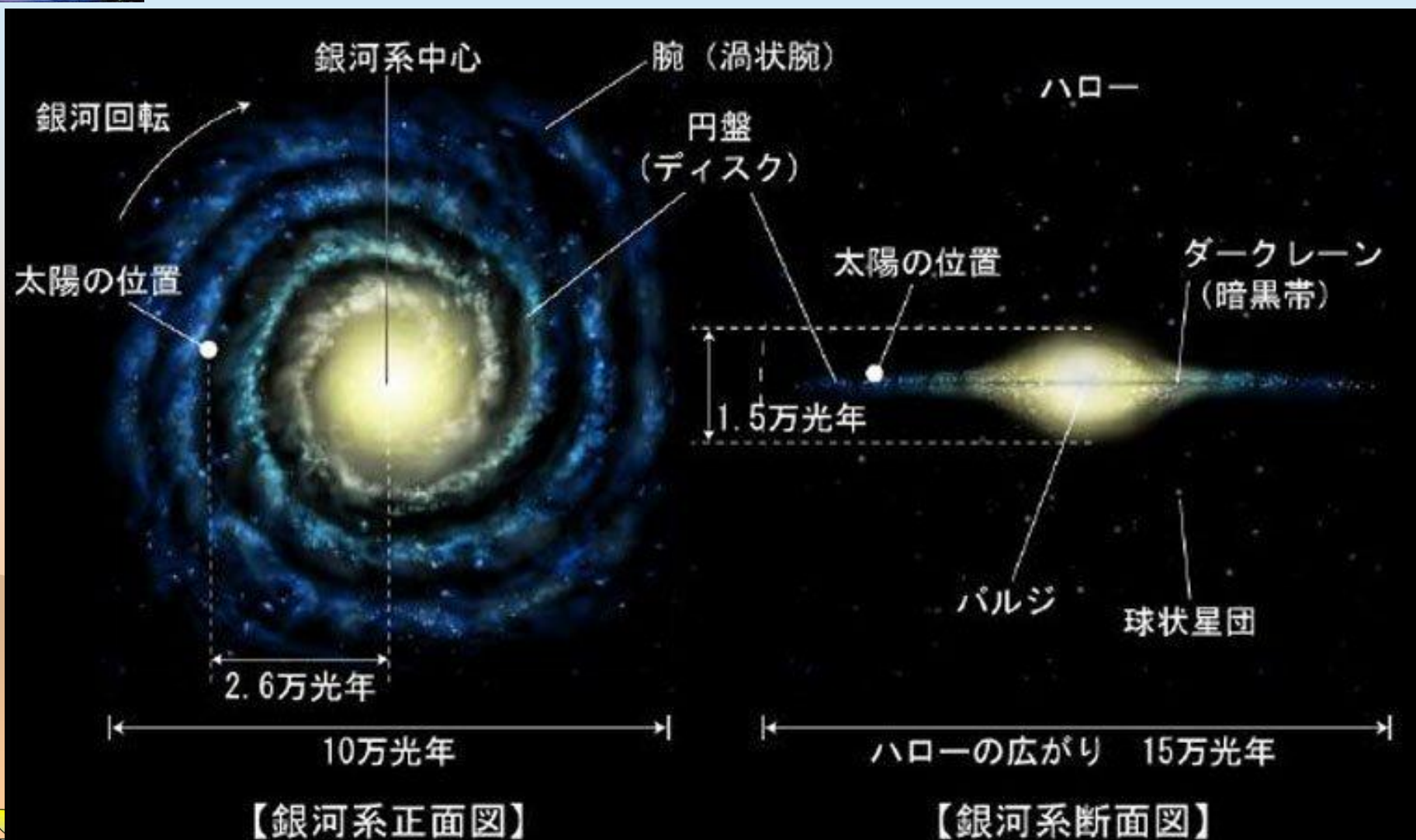


# 天の川(わし座付近)





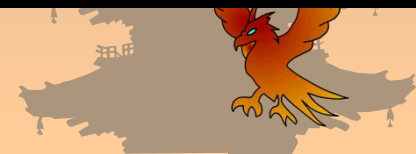
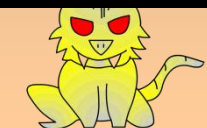
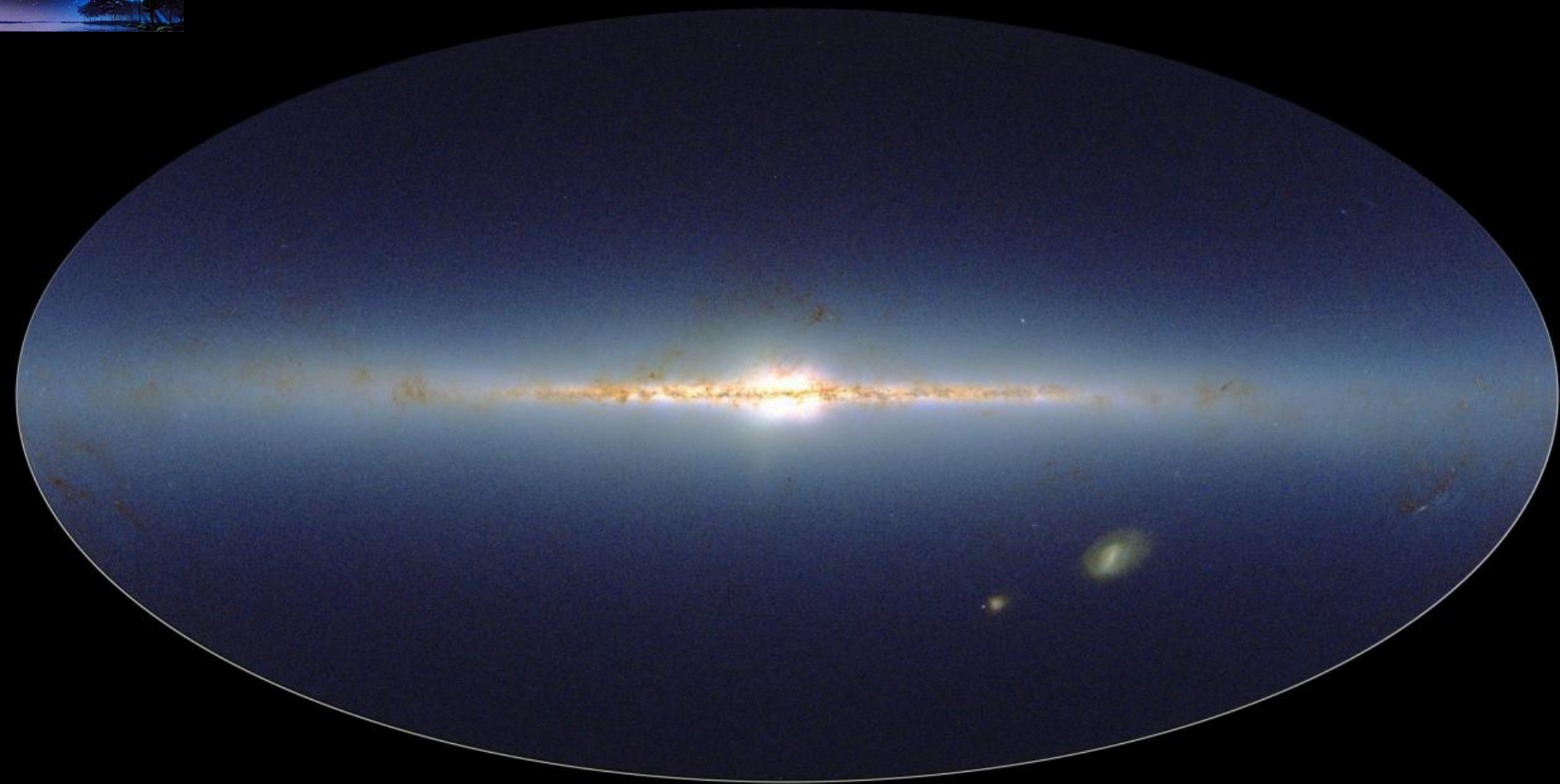
# 天の川(銀河系)のかたち







# 赤外線でみた天の川

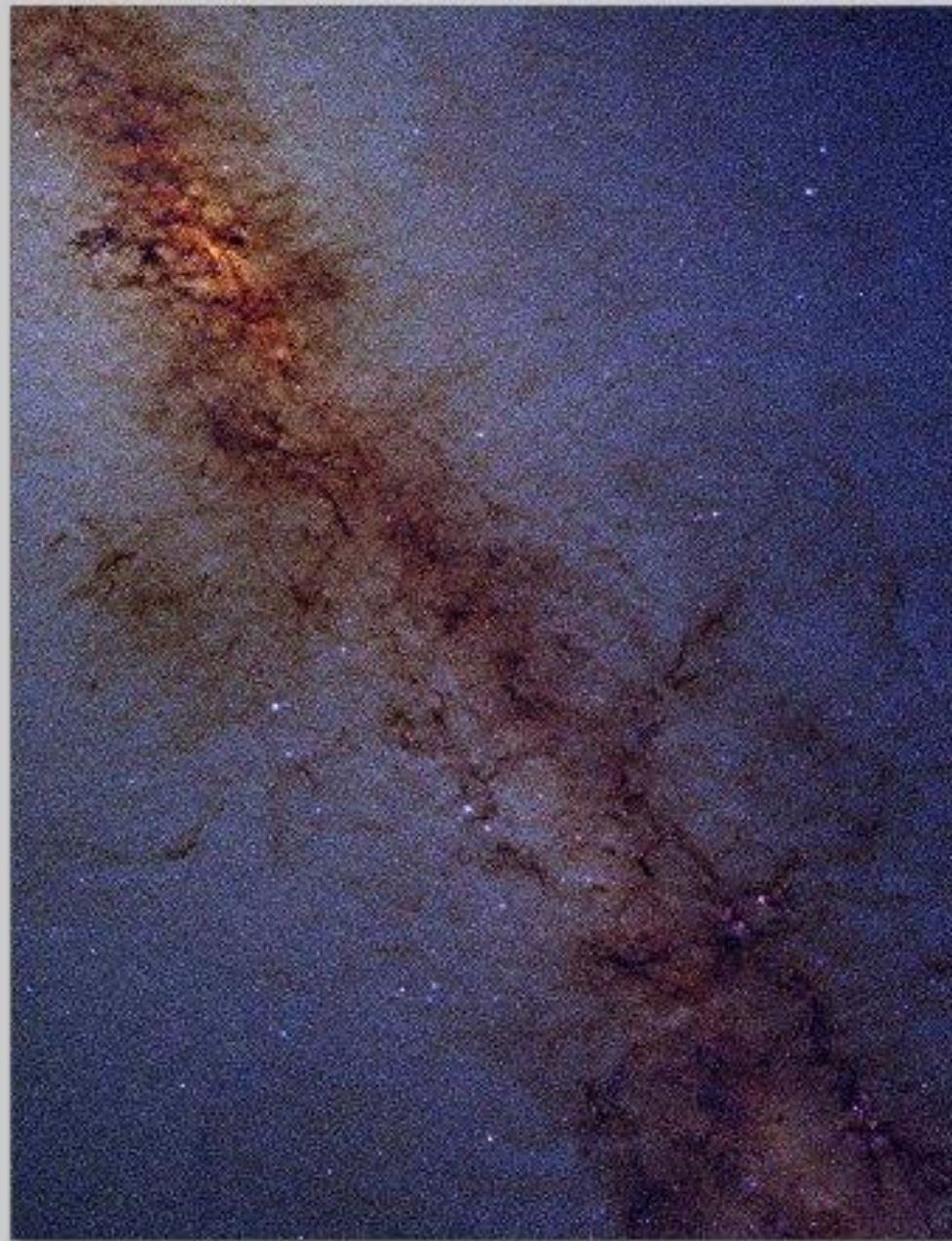






# 銀河系

## ✿ 銀河系中心 (可視光)



2MASS Showcase

The Galactic Center Infrared view penetrating to the central star cluster of the Galaxy

Two Micron All Sky Survey Image Mosaic: Infrared Processing and Analysis Center/Caltech & University of Massachusetts

2010/1/11

201





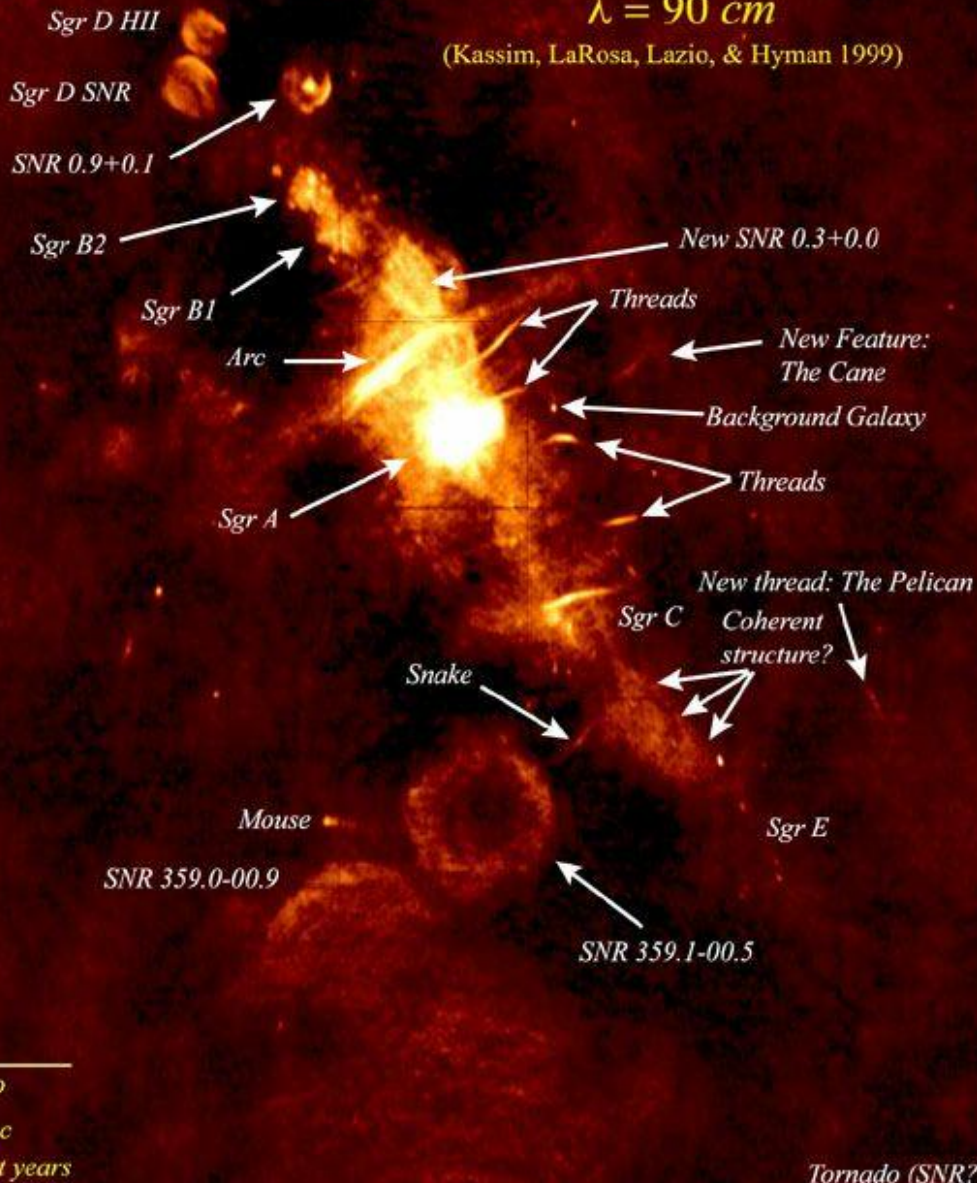
# 銀河系

## 銀河系中心 (電波)



### Wide-Field Radio Image of the Galactic Center $\lambda = 90 \text{ cm}$

(Kassim, LaRosa, Lazio, & Hyman 1999)



2010/1/11

201

Image processing at the Naval Research Laboratory using DoD High Performance Computing Resources  
Produced by N.E. Kassim, D.S. Briggs, T.J.W. Lazio, T.N. LaRosa, J. Imanura, & S.D. Hyman  
Original data from the NRAO Very Large Array courtesy of A. Podlar, K. Anantharamiah, M. Goos, & B. Flors





# 銀河系

## ✿ 銀河系中心 (X線)



2010/1/11

2010





銀河系中心の  
赤外線画像

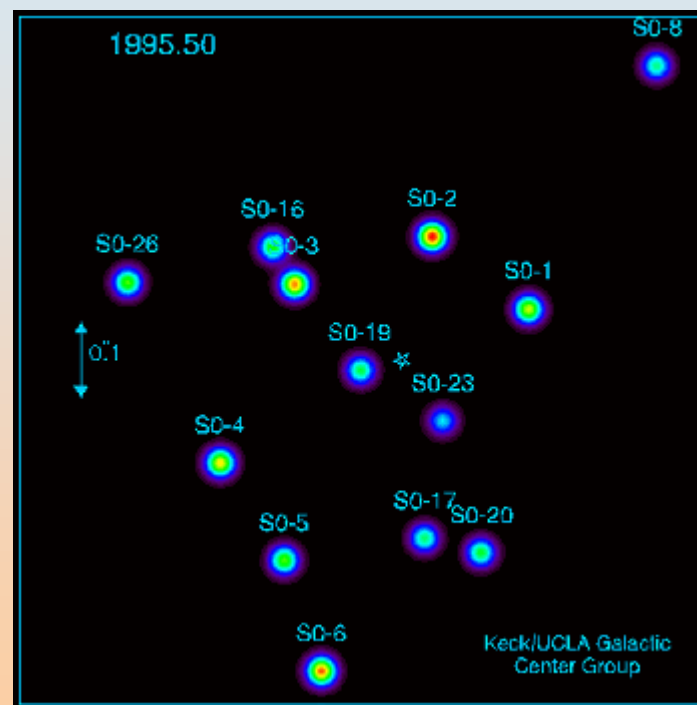
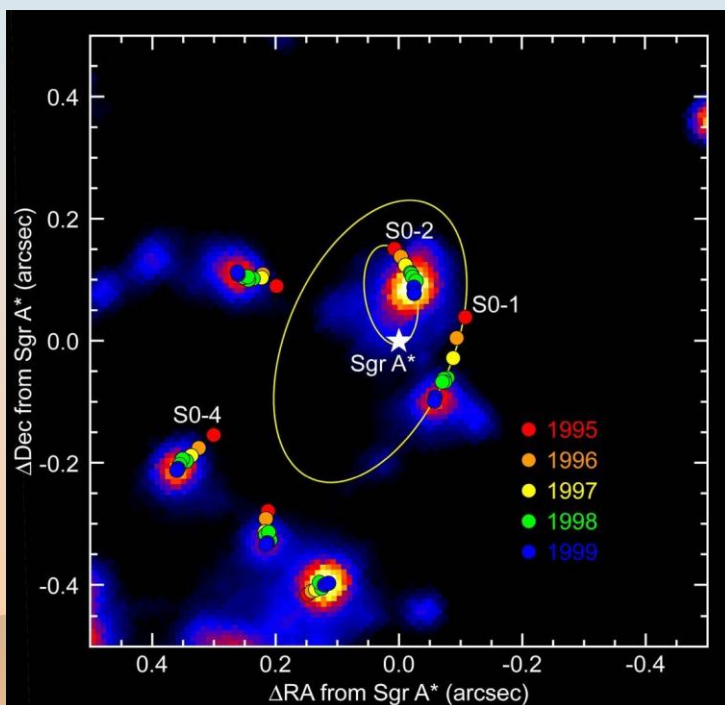
いて座A\*  
(スター)





# 銀河系中心いて座A\*

## 個々の星の運動 (Sgr A\*)



Ghez et al. 2000

2010/1/11

2010年 ブラックホールへの旅

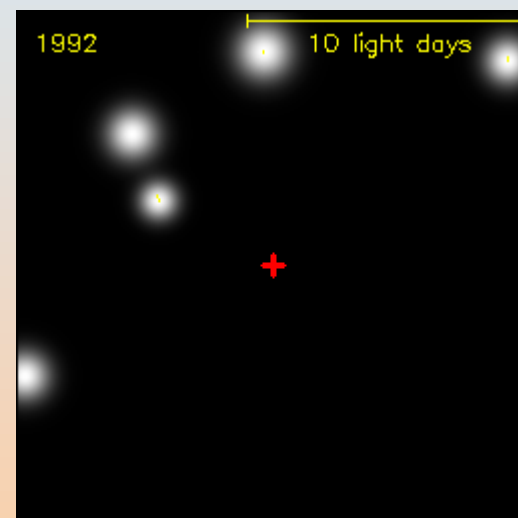
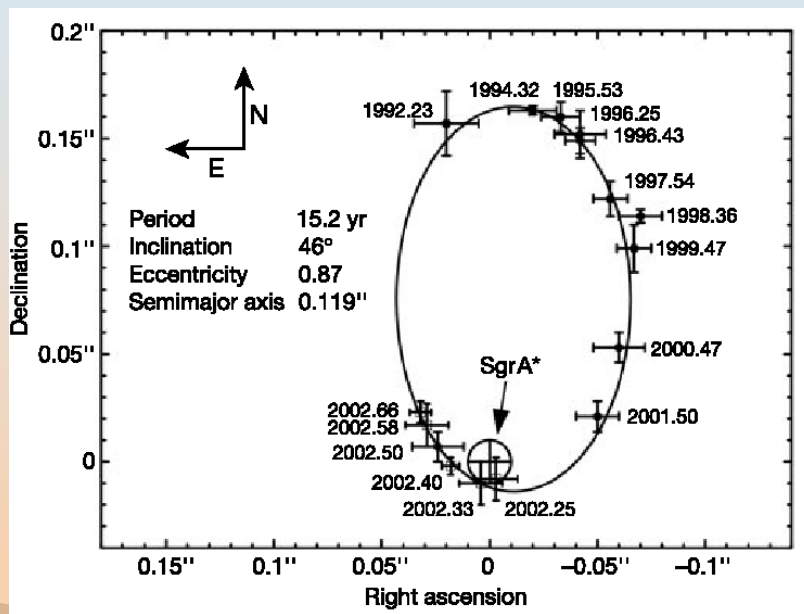
41





# 銀河系中心いて座A\*

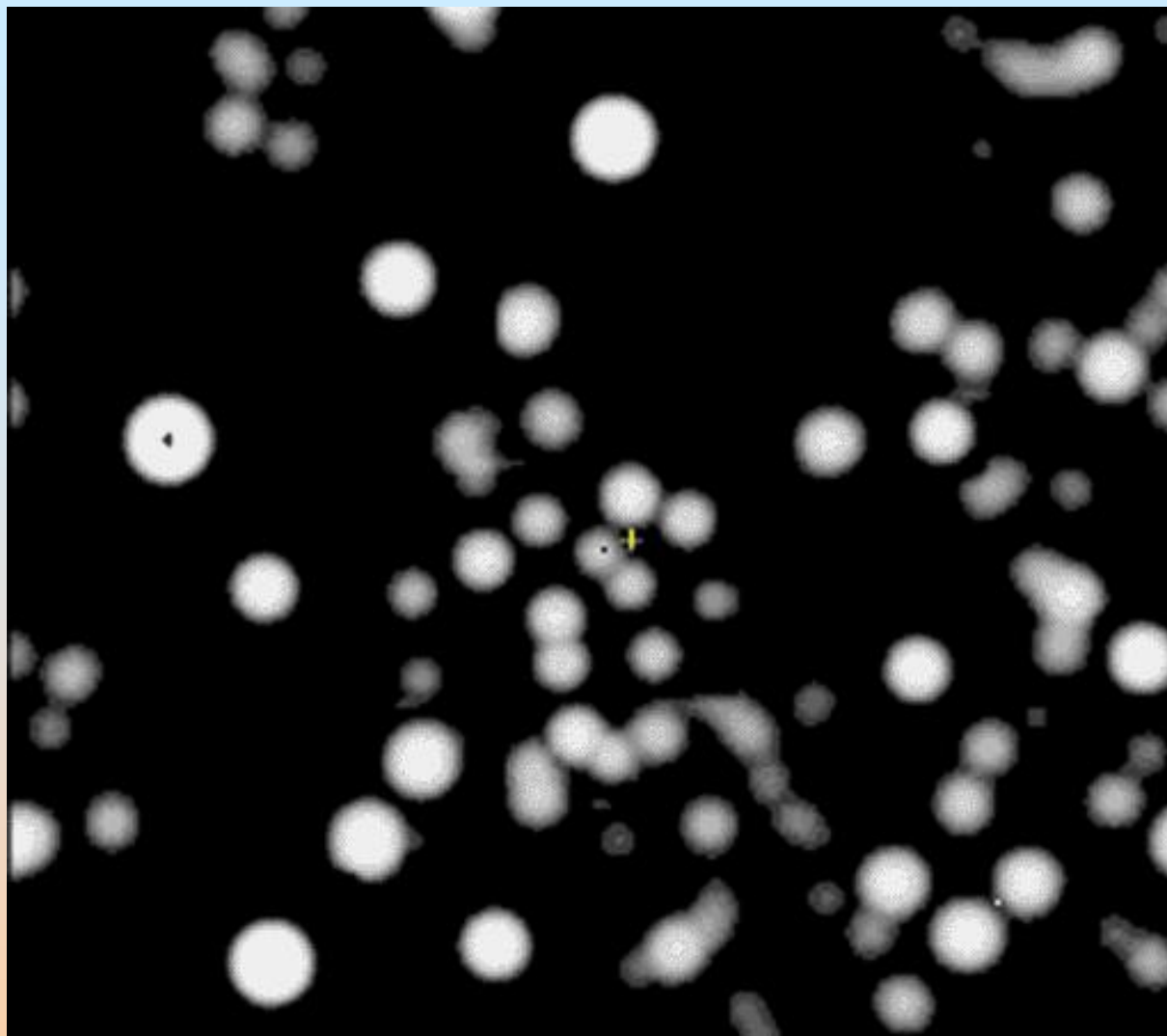
## 個々の星の運動 (Sgr A\*)



太陽の370万倍の質量をもった  
モンスターブラックホールの存在







太陽の450万倍の質量をもった  
モンスターブラックホールが存在



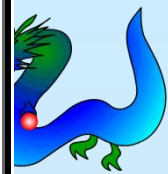
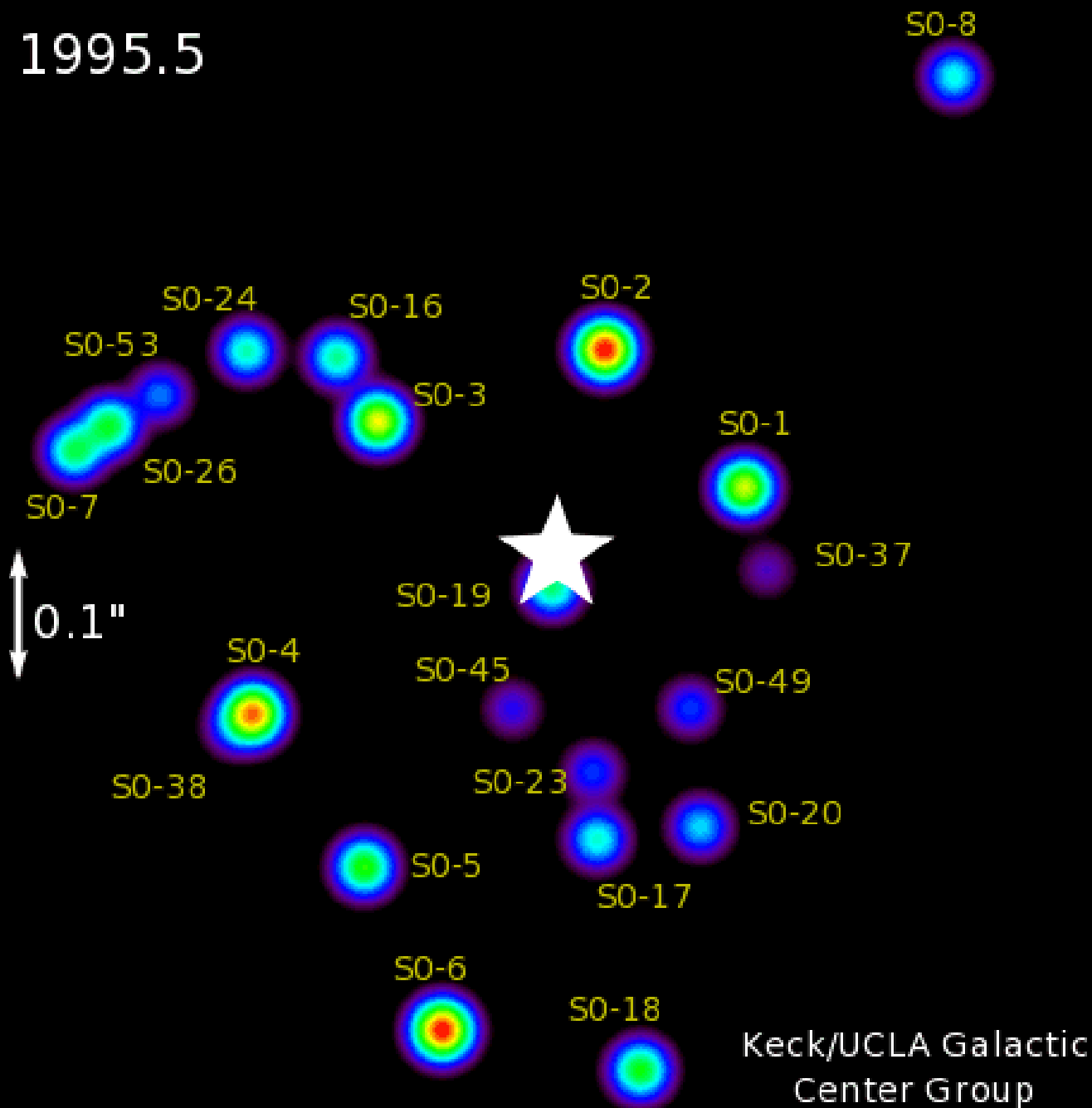
2010/1/11

2010年 1月 11日



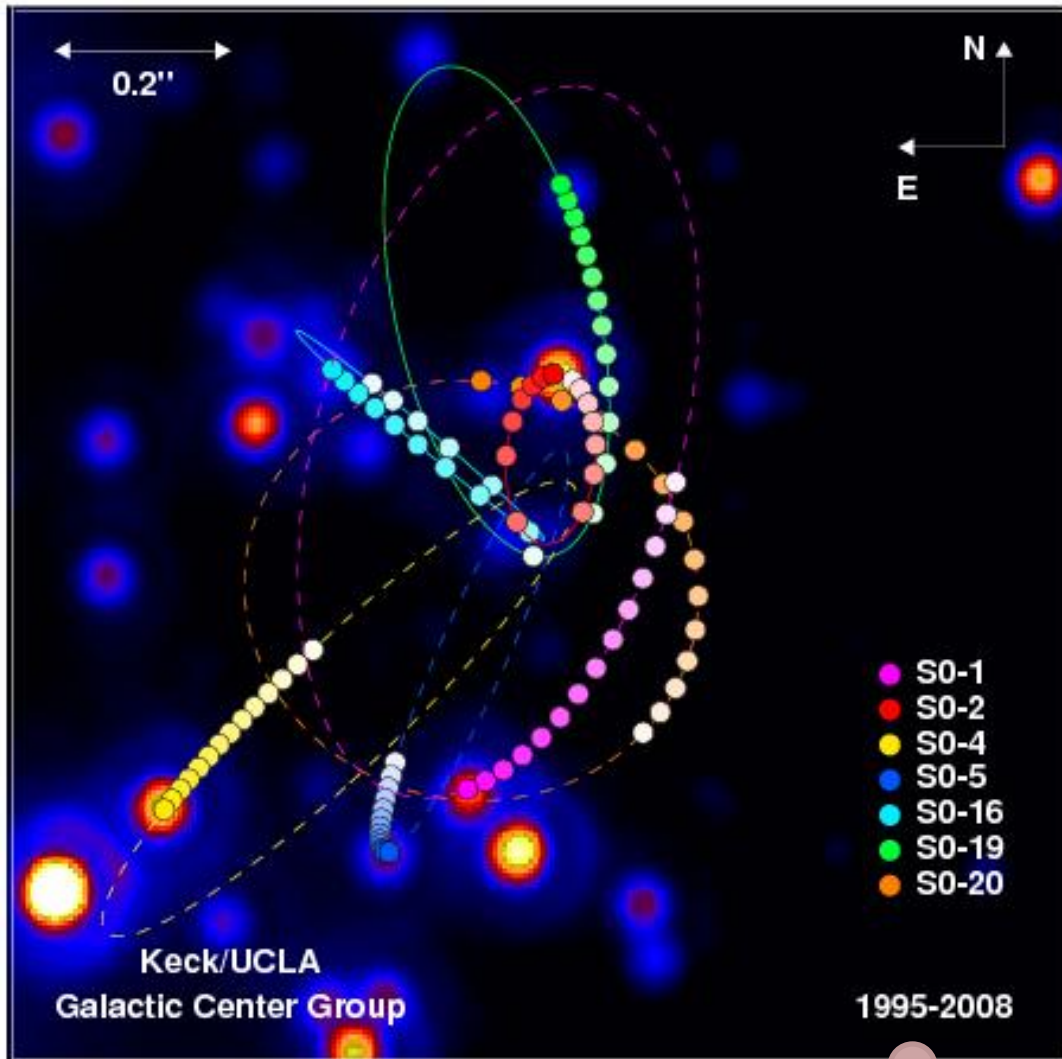
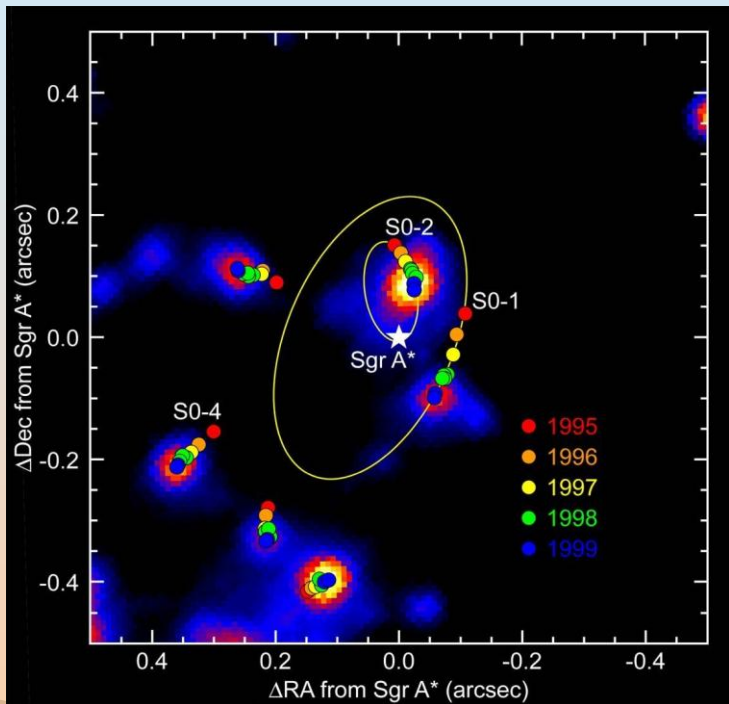


1995.5





# 銀河系

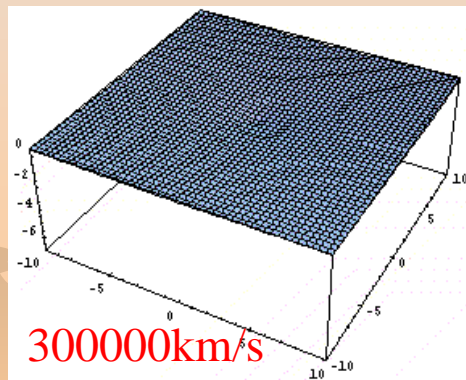
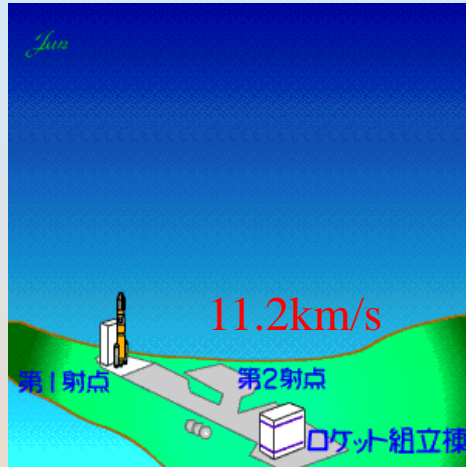
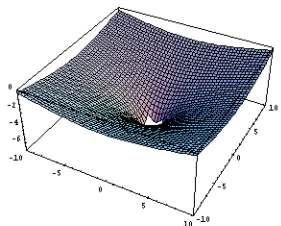
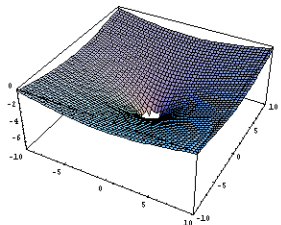
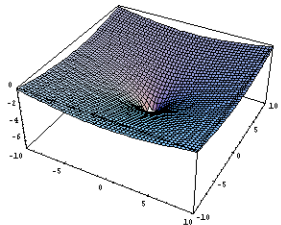
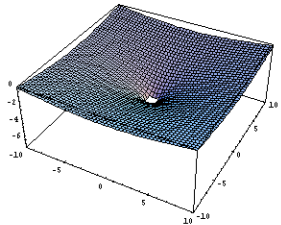
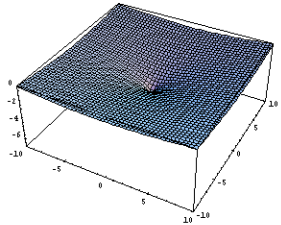
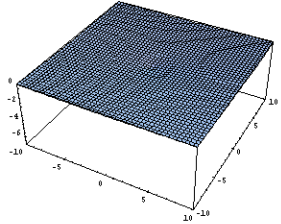


太陽の450万倍の質量をもった  
モンスターブラックホールの存在





# ブラックホール

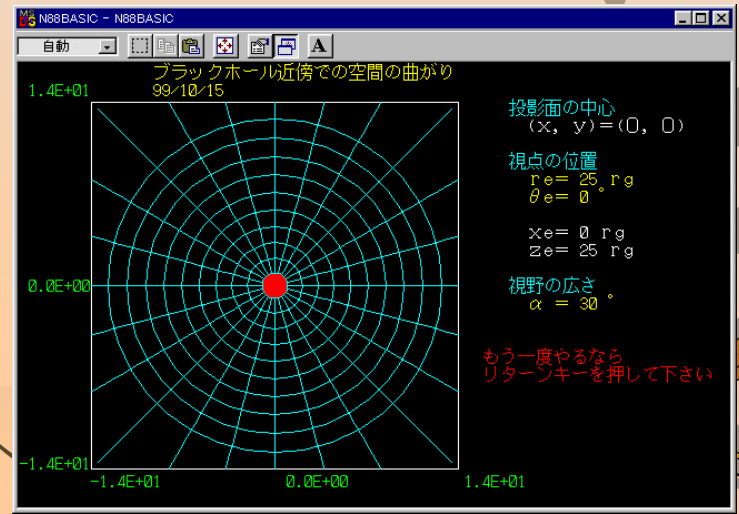


## ● ニュートン力学

→天体の脱出速度が光速を超えてしまい、光でさえ出て来られなくなった天体。

## ● 一般相対論

→天体の重力が強すぎて空間の曲がりが大きくなり、光でさえ空間の曲がりの中に閉じ込められるようになった天体。





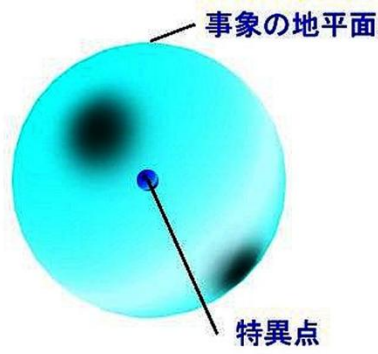
# ブラックホールの構造

- ❁ 事象の地平面 (ブラックホールの境界面)
- ❁ 特異点

たとえば、河を滝に向かって流されている状況を思い浮かべてみると、水の中に沈んで流されている人にとっては、どの場所でも周囲は水(空間)であって、どこからが滝(事象の地平面)だという標識があるわけではない。後戻りできなくなっているのに気づいたときには時すでに遅く、滝壺(特異点)にまっさかさまに落ち込むのみである。

シュバルツシルト・ブラックホールの内部に入ると、その中心では時空の曲率が無限大になり、そこは「特異点(singularity)」と呼ばれている。特異点では古典的な一般相対論は破綻するため、量子重力あるいは新しい物理学を考えなければならない。この特異点は研究者の頭痛の種だが、幸い三途の川(事象の地平面)の彼方にあるために、この世に悪さはしないようだ。

では、特異点と事象の地平面の間には何があるのか？ 実は何もない。いや正確に言えば、時間と空間(真空)と多少のエネルギーはあるだろうが、構造としては何もないと言うべきだろう。つまり、シュバルツシルト・ブラックホールは、地球や太陽などより遥かに単純な、おそらくは宇宙の中でもっとも単純な天体なのである。



宇宙で一番単純な天体



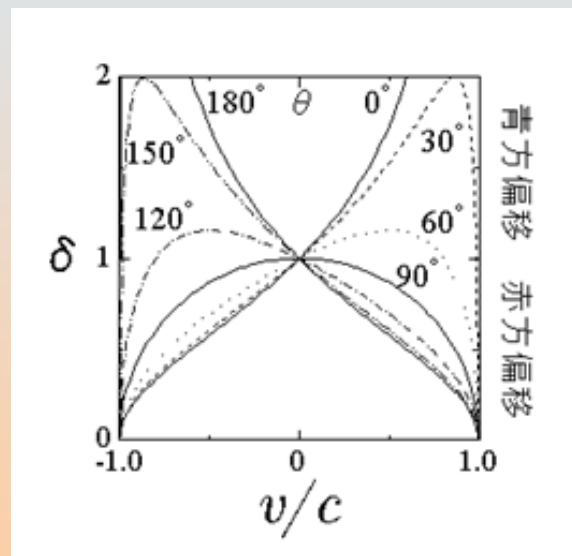
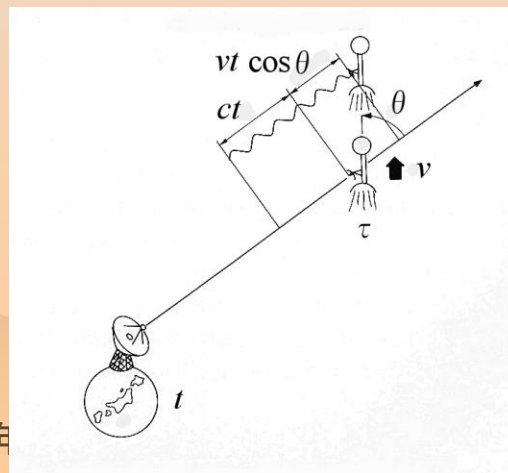
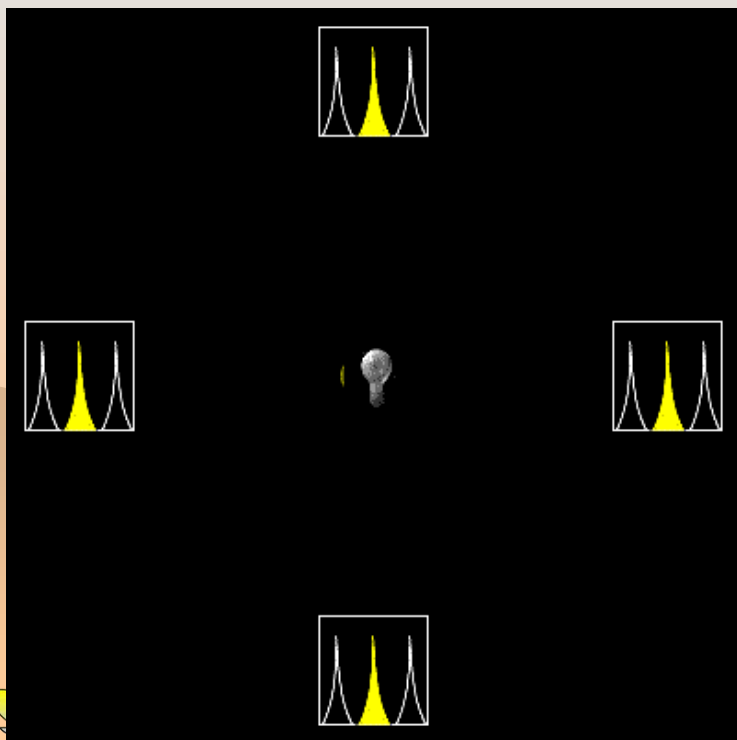


# ドップラー効果

- 光源と観測者の間の相対運動によって、観測される光の波長(振動数)が実験室で測定されるものとずれる現象を光の**ドップラー効果**(Doppler effect)と呼ぶ。

ドップラー効果の度合いは、光源の速度  $v$  と運動方向  $\theta$  に依存する。ドップラー効果の度合いを表す目安として、観測される振動数  $\nu$  とともとの振動数  $\nu_0$  の比率で定義されるドップラー因子(Doppler factor)  $\delta$  を用いる。 $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$  はローレンツ因子である。

$$\delta = \frac{\nu}{\nu_0} = \frac{1}{1+z} = \frac{1}{\gamma \left(1 - \frac{v}{c} \cos \theta\right)}$$



角度  $\theta$  をいろいろ与えたとき、速度  $v$  の関数としてドップラー因子  $\delta$  の値。





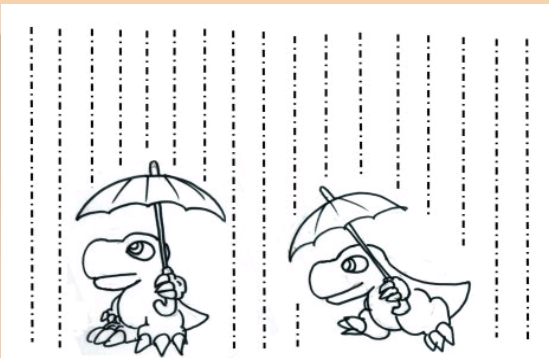
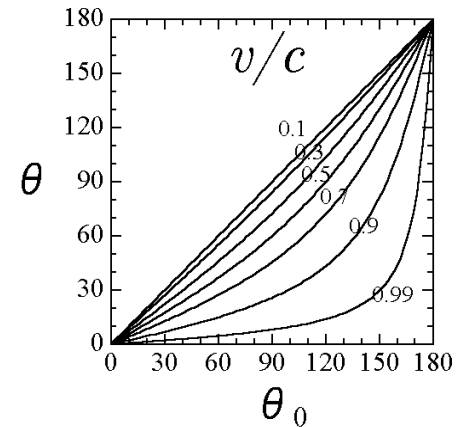


# 光行差

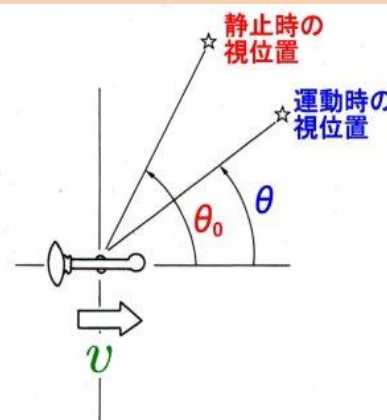
宇宙空間を高速で飛翔している宇宙船から、ある方向に見える天体を観測したとき、光の到来ベクトルは観測者の運動ベクトルの分だけずれてしまい、天体の見える方向は(本来の方向よりも)宇宙船の運動方向前方に少し移動して見える。このような、天体の視位置が宇宙船の進行方向前方に移動して見える現象を**光行差(aberration)**という。

速度を $v$ 、静止しているときの前方方向から測った星の視位置の角度を $\theta_0$ 、運動しているときの視位置を $\theta$ としよう。このとき、光行差による見かけの位置は、右式で与えられる。ただしこれらの式で、 $\beta=v/c$ は光速を単位とした速度であり、 $\gamma=1/\sqrt{1-\beta^2}$ はローレンツ因子である。

$$\cos\theta = \frac{\cos\theta_0 + \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}\cos\theta_0}$$



年



最初の到来方向 $\theta_0$ と観測される到来方向 $\theta$ の関係。速度 $v$ が0なら $\theta=\theta_0$ だが、 $v$ が大きくなるにつれ $\theta$ は $\theta_0$ より小さく観測される。

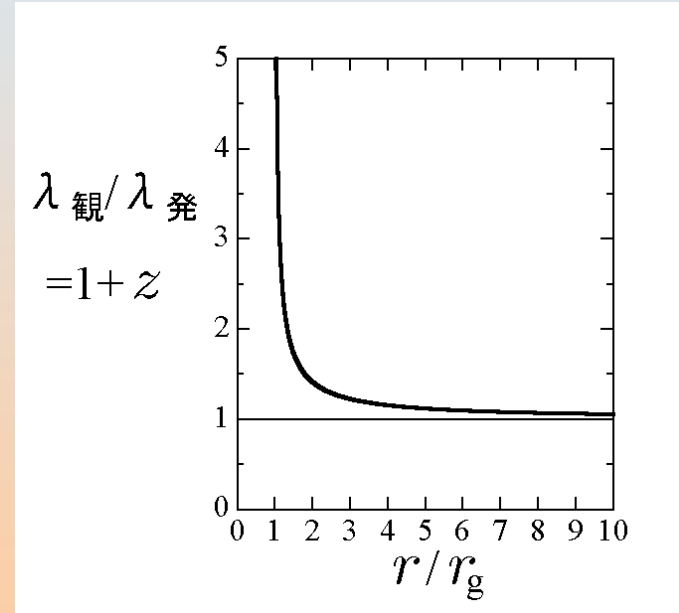
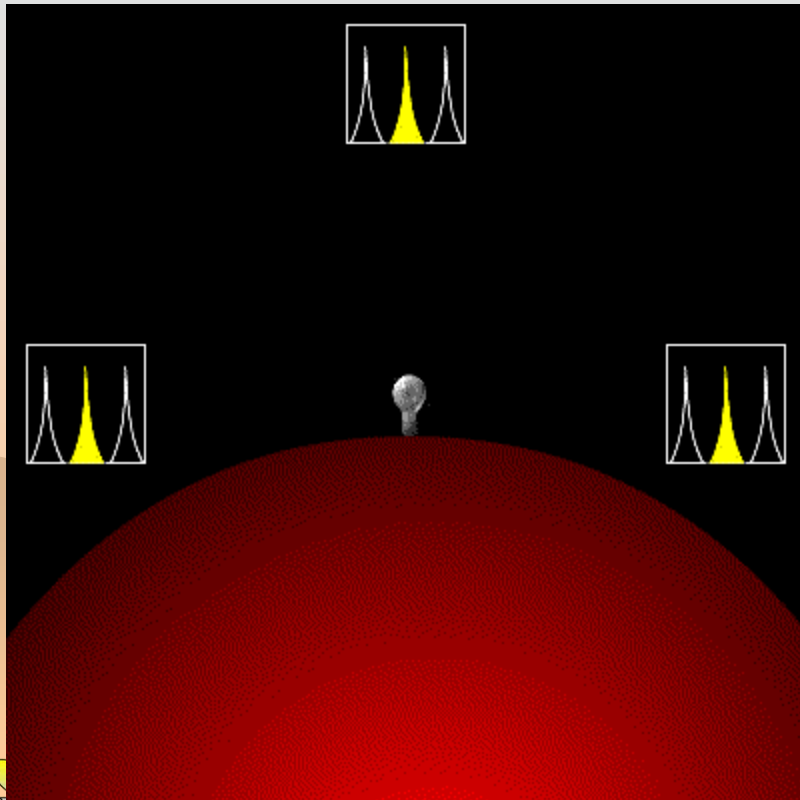




# 重力赤方偏移

- 重力場中から発した光が赤方偏移する現象を**重力赤方偏移**(gravitational redshift)と呼ぶ。

$$1 + z \equiv \frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{\nu_0}{\nu} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{r_g}{r}}}$$



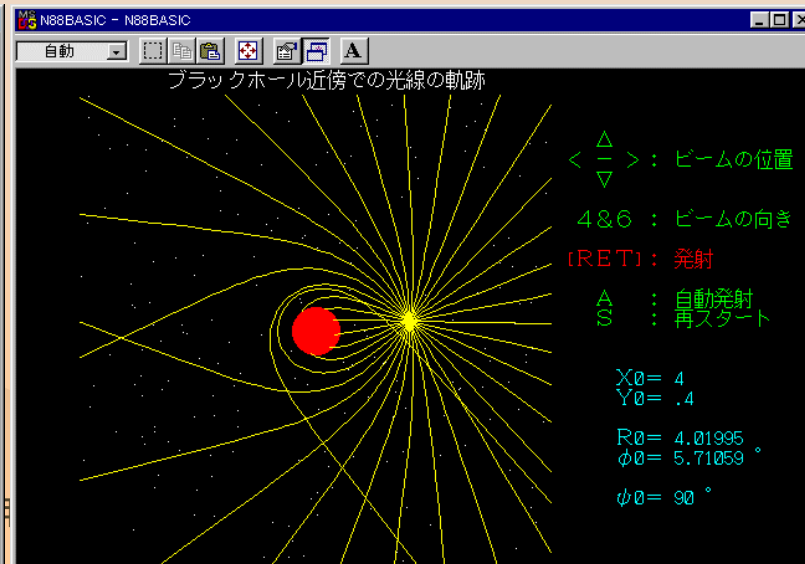
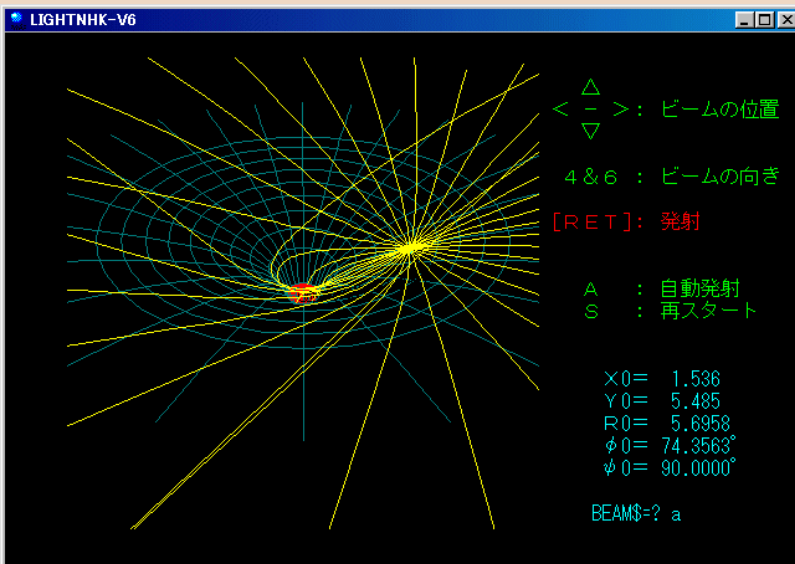
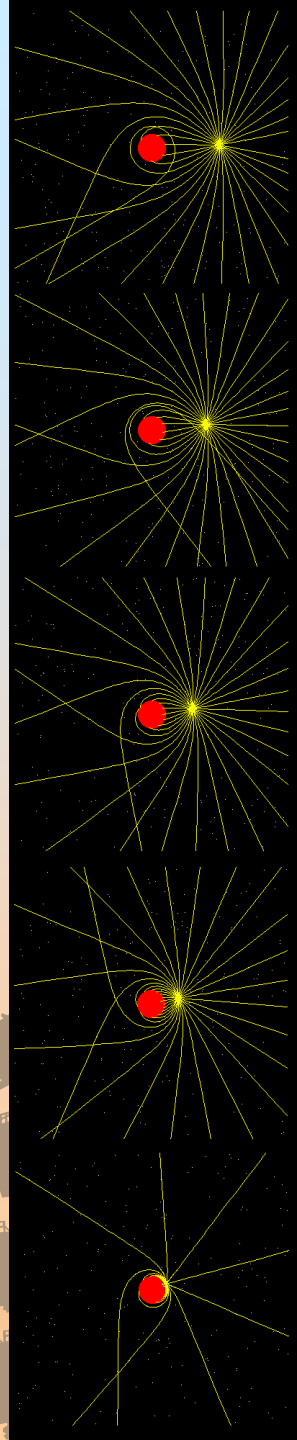
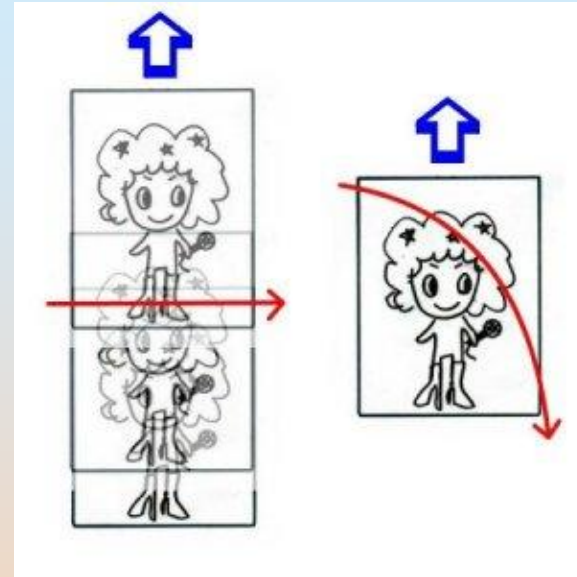
重力赤方偏移の大きさはブラックホールから距離で決まる。ブラックホールに近いほど重力赤方偏移は大きい。



# 光線の曲がり

- 重力場中で光線が曲がる現象を**光線の曲がり**(light bending)と呼ぶ。

加速するエレベータの中では、光線は曲がって見える。

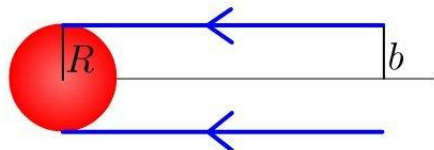




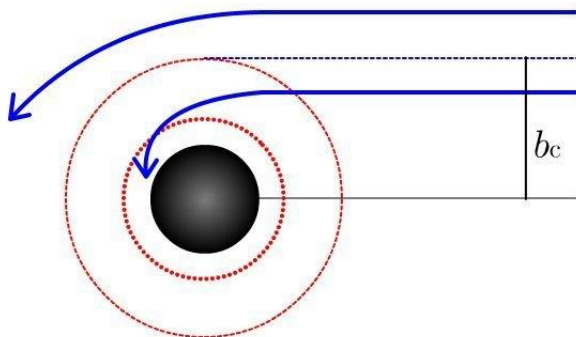
# ブラックホールの見かけの大きさ



- 光線が曲がるとブラックホールの見た目は大きくみえる。☆見た目が10割！



$b$ : 衝突パラメータ



$b_c$ : 臨界衝突パラメータ

光線の曲がりがないければ、無限遠に射影した球の半径 $b$ は、当然ながら、もとの球の半径 $R$ に等しい。無限遠から見た大きさはもとの大きさと変わらない。

ところが、光線が曲がると話は違って来る。衝突パラメータ $b$ が十分大きければ、光線はブラックホールをそれるが、 $b$ が小さくなるにつれてブラックホール近傍での光線の曲がり大きくなり、ついにはある $b$ 以下で光線はブラックホールに吸い込まれるようになる。このときのギリギリの $b$ のときが、ブラックホールから発した光線(というものがあれば)が無限遠に届くときなので、無限遠から眺めたブラックホールの大きさにほかならないわけだ。

このときの衝突パラメータ $b$ の値は、

$$b_c = (3\sqrt{3}/2) r_g \sim 2.60 r_g$$

となる。すなわち、無限遠に射影したブラックホールは、もとのサイズよりも、**2.6倍**も大きく見えるのである。

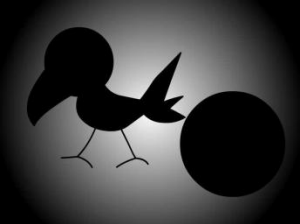
$$b_c \sim 2.6 r_g$$

ブラックホー



# ブラックホールシャドー

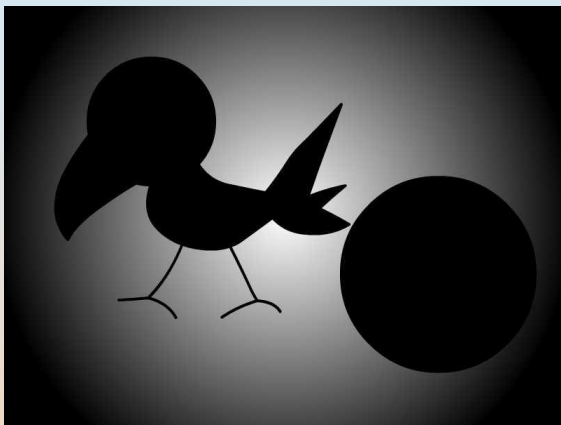
KozuchA



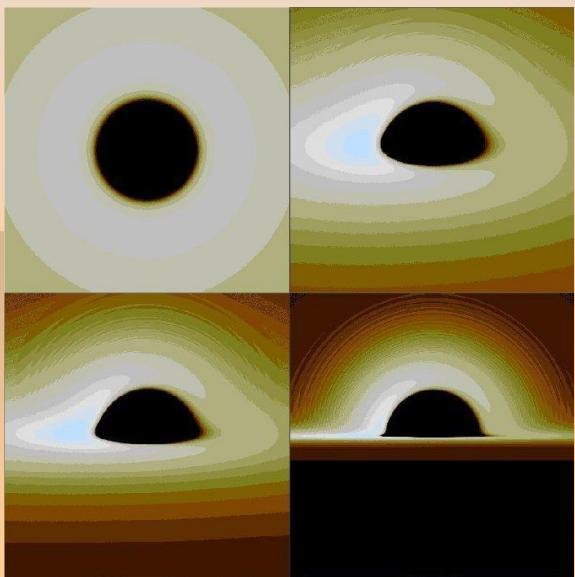
# ブラックホールシャドー 闇夜のカラスを見る方法



## ❁ 闇夜のカラスを見る方法



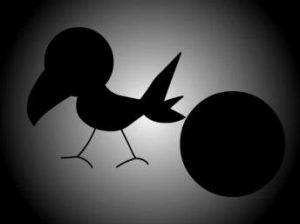
❁ ブラックホールは光でさえ出てこられない天体だ。だから観ることはできないような気がするが、決してそうではない。光り輝く衣を纏うことによって、ブラックホールのシルエットを見ることが可能になる。それを**ブラックホールシャドー (black hole shadow)**と呼ぶことがある。



ブラックホールのシルエット。見る角度が違う。



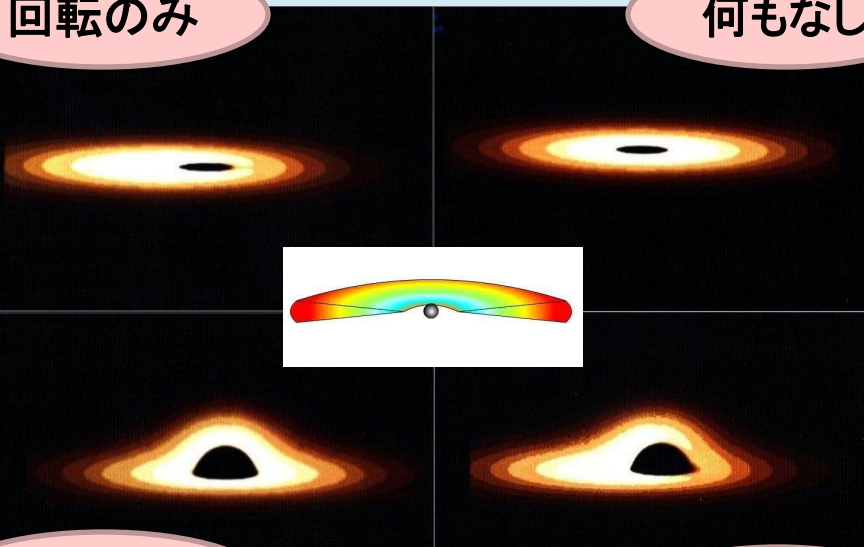




# 歪むシャドー

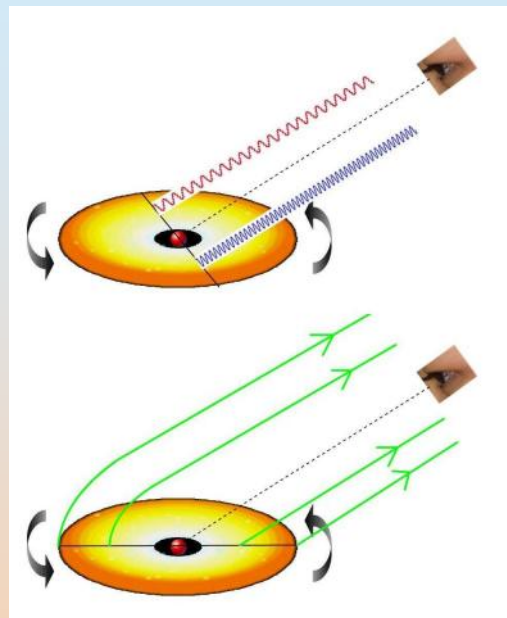
回転のみ

何ものなし



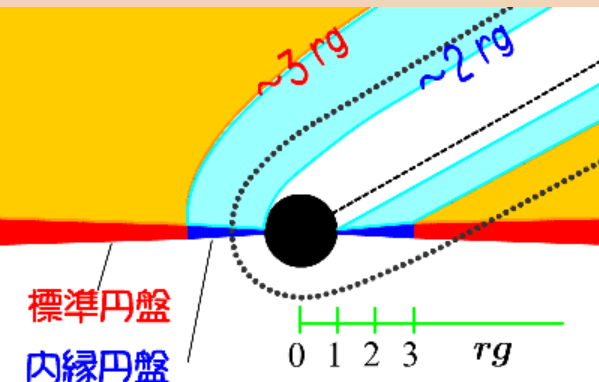
重力のみ

全部

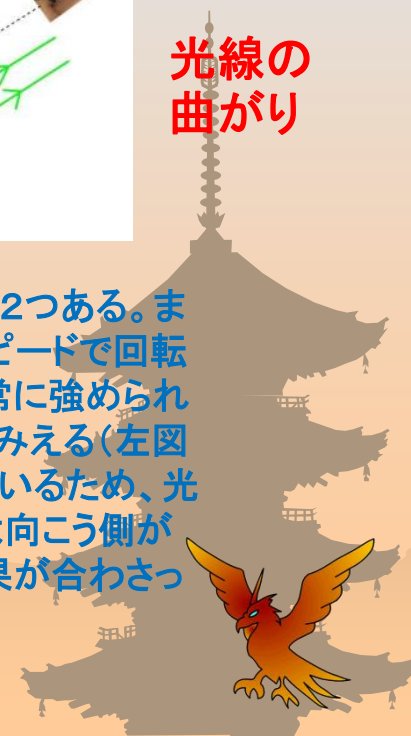


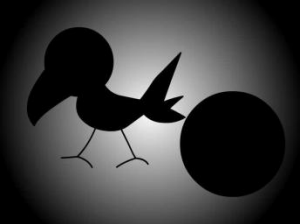
ドップラー効果

光線の曲がり



ブラックホール＝降着円盤の姿が歪んで見える理由は2つある。まず円盤のガスはブラックホール近傍では光速近くのスปีドで回転しているため、手前に近づく側のガスから出た光は非常に強められる(右図の上)。その結果、円盤の画像は左側が明るく見える(左図の左上)。一方、ブラックホール近傍では空間が歪んでいるため、光線が曲げられる(右図の下)。その結果、円盤の画像は向こう側が浮き上がったように見える(左図の左下)。これらの効果が合わさって、いろいろなシルエットになる。

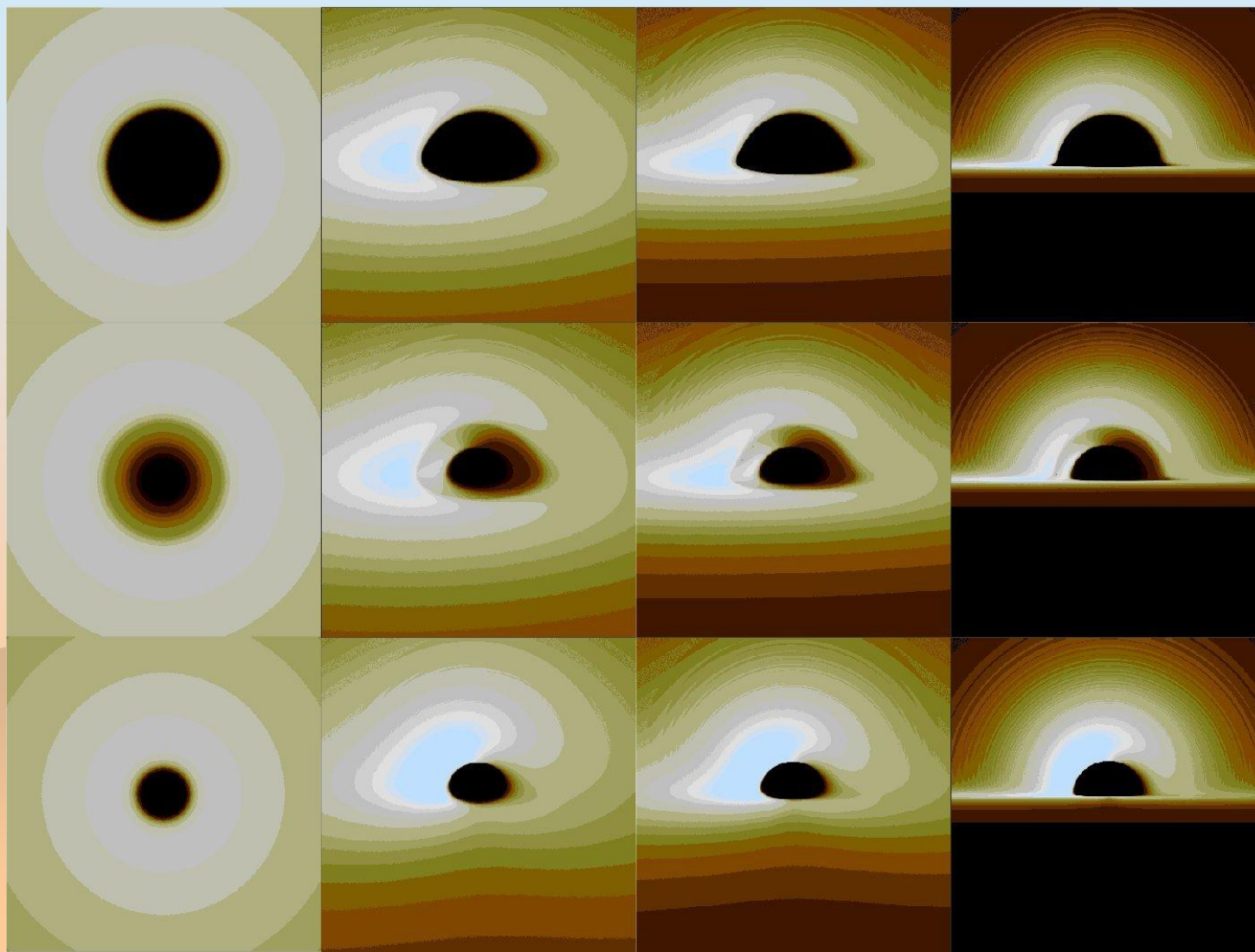


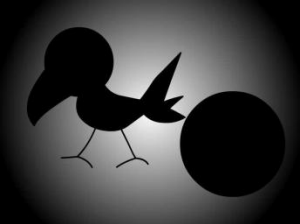


# シャドーあれこれ



俯角  
90°  
20°  
10°  
0°





# ー・ブラックホールのシャドー



標準円盤中での  
回転していないブラックホール

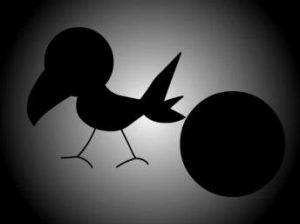


標準円盤中での  
最大回転するブラックホール

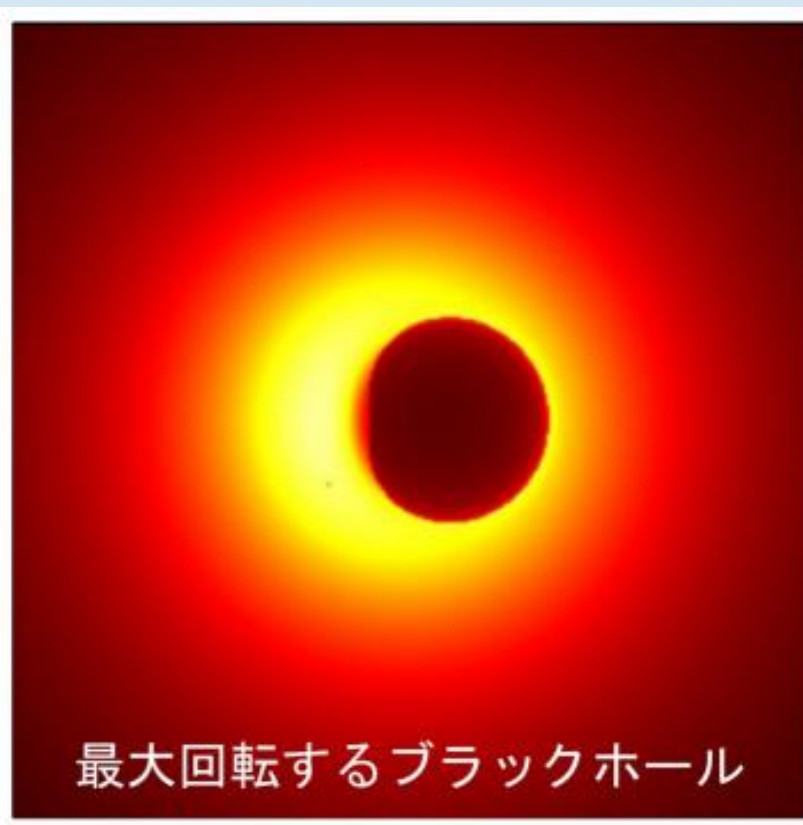
(c:R高橋)





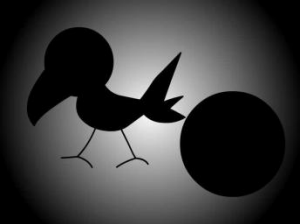


# 薄衣で着膨れているとき



(c:R高橋)





# ブラックホールシャドー まとめ



- ❁ 見えないはずのブラックホールを“見る”方法がある
- ❁ シャドー(影)の形によって、ブラックホール時空の性質がわかる
- ❁ 光る衣の様子によって、ブラックホール降着円盤の性質がわかる

