



ブラックホールシャドウ ブラックホールジェット

*Black-Hole Shadow
and Black-Hole Jets*

福江純(大阪教育大学)



アインシュタインの科学遺産

－ 相対論 －

が宇宙の謎を解明するのに どう使われているか





ブラックホール活動天体

ブラックホールシャドーとジェット

ブラックホール活動天体

- 1 活動銀河とクエーサー☆**monsterブラックホール**
- 2 X線星とマイクロクエーサー☆**ブラックホール連星**
- 3 ガンマ線バースト☆**宇宙最大の爆発現象**

ブラックホールシャドー(影)とブラックホールジェット

- 4 **ブラックホールエンジン**☆**エネルギー源の正体**
- 5 **ブラックホールシャドー** ☆**見えないモノを視る**
- 6 **ブラックホールジェット**☆**黒い穴からのプラズマ噴流**



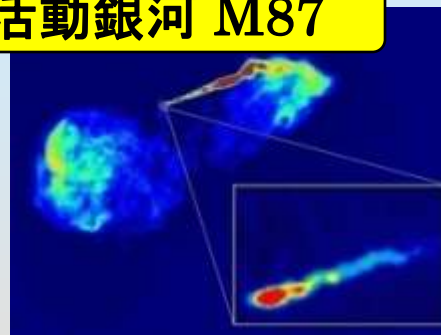


ブラックホール活動天体

ブラックホール活動天体
(black-hole active objects)

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

活動銀河 M87



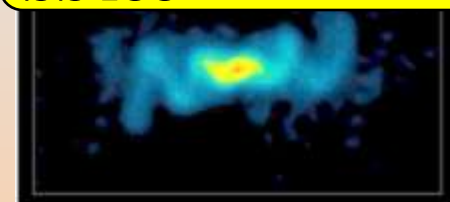
クェーサー 3C273



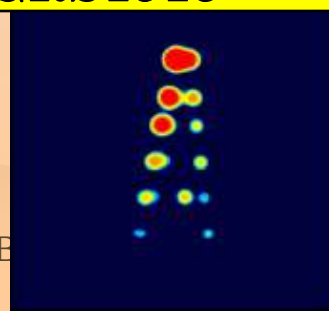
X線星 Cyg X-1



マイクロクェーサー
SS433



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

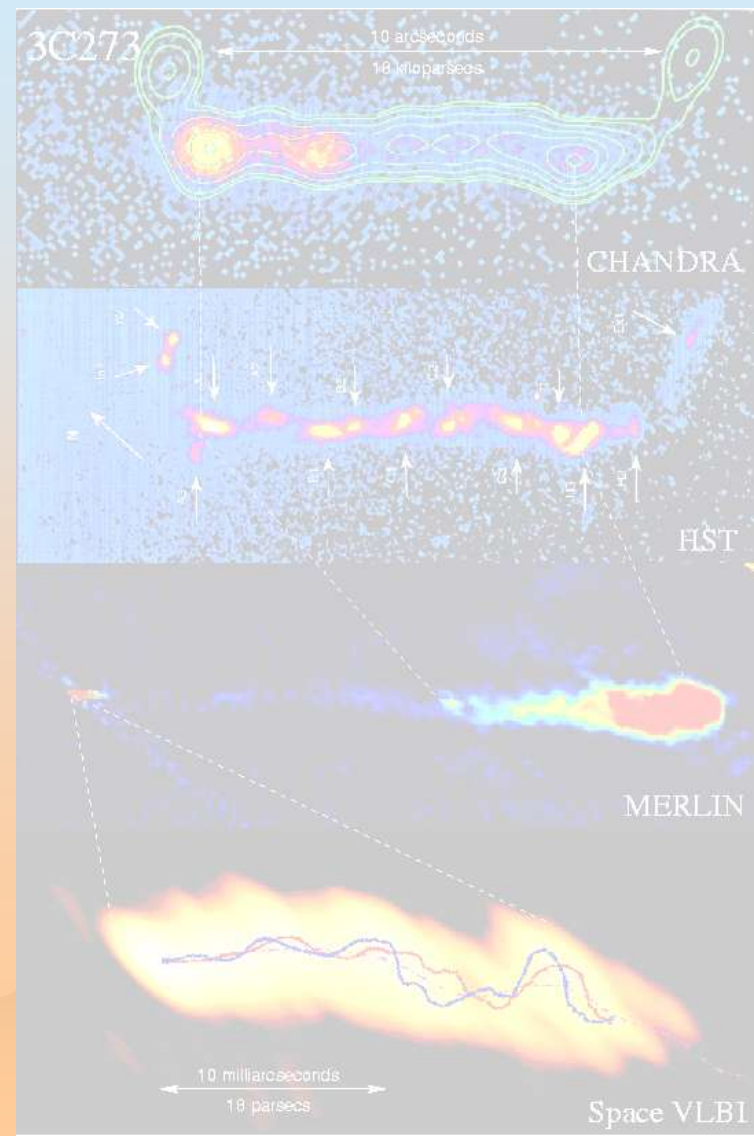


クェーサー3C273の発見



3C273: 第3ケンブリッジカタログ
273番登録天体

3C273=13等の‘星’
(Hazard et al. 1962)

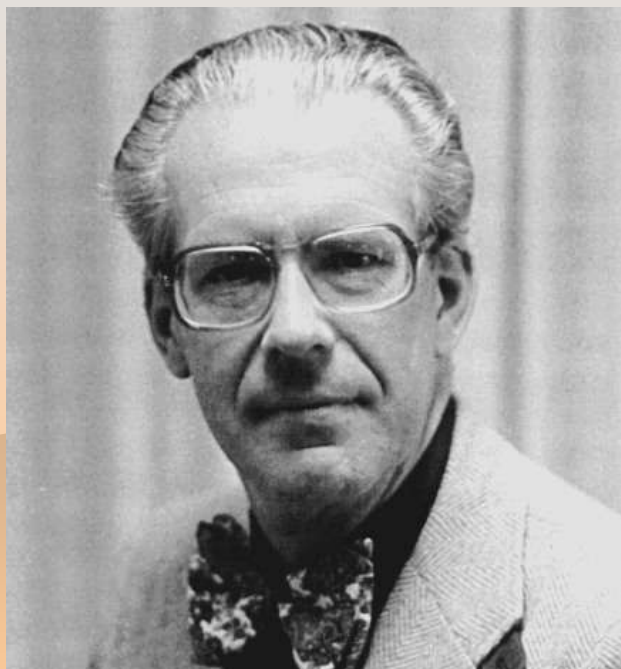
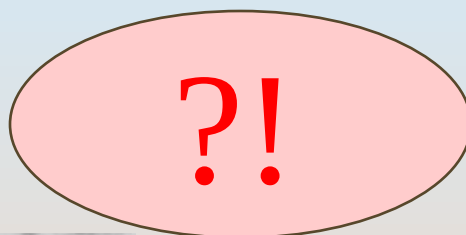




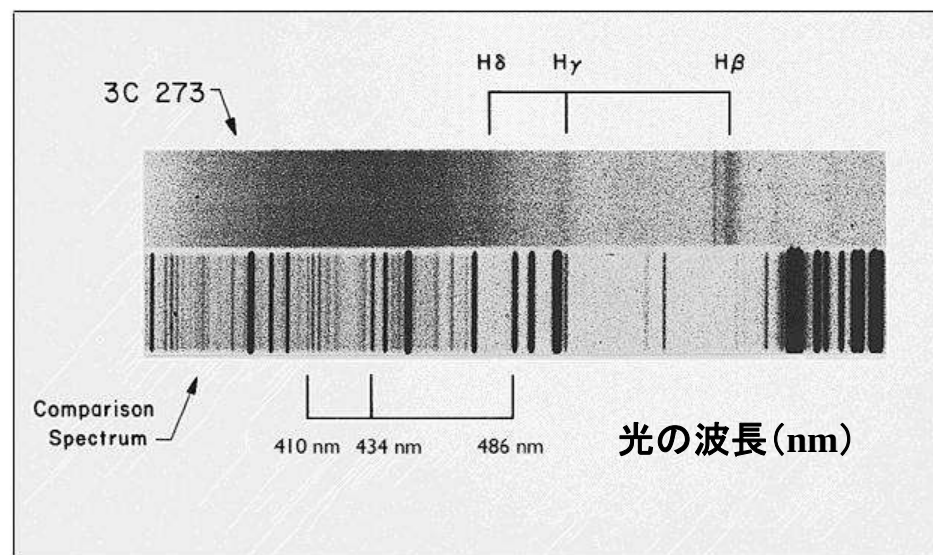
クエーサー3C273 スペクトル



3C273 (1963)
シュミット



Maarten Schmidt (1929-)
in 1992



シャドーと



光のスペクトル

X線



可視光



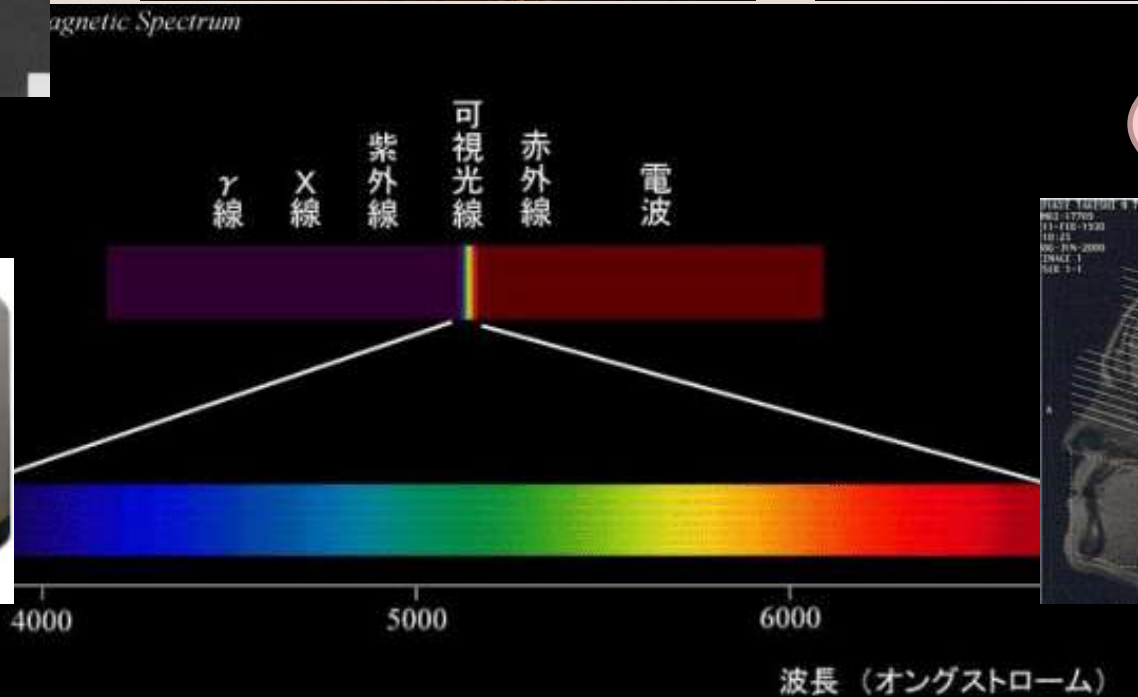
赤外線



ガンマ線



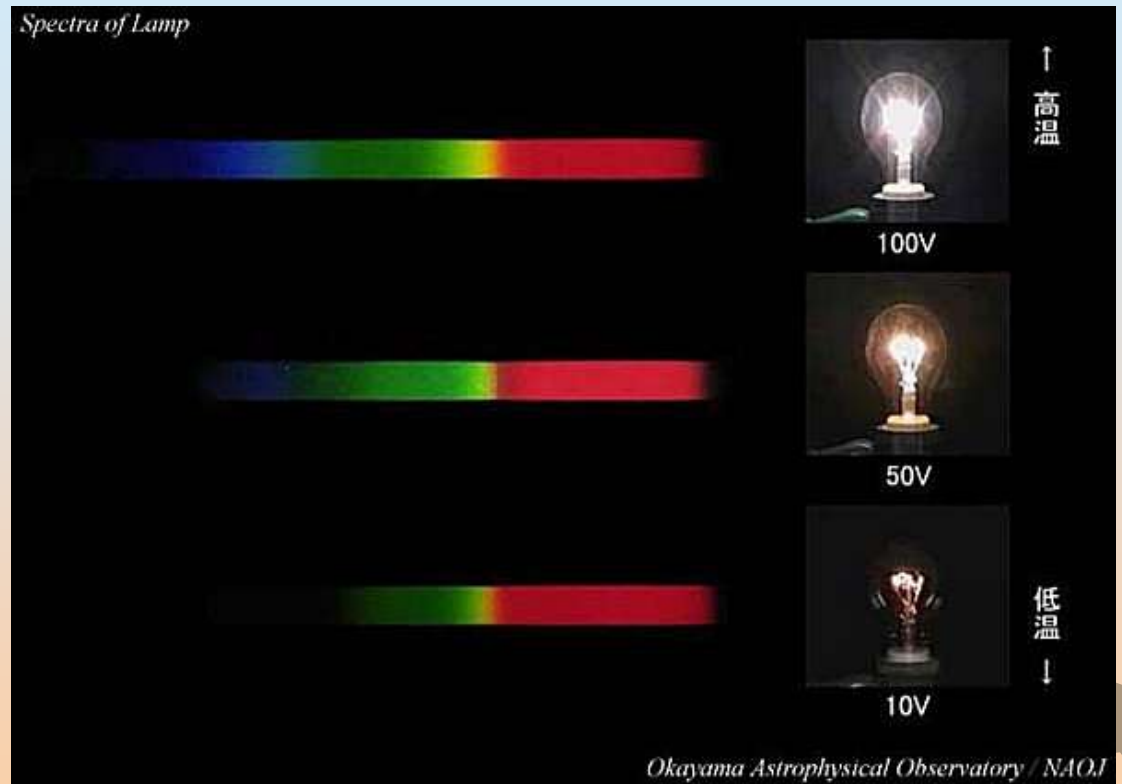
電波





連続スペクトル

- ❁ 白熱電球
- ❁ ホタル



2006/6/26

北斗星と北斗星

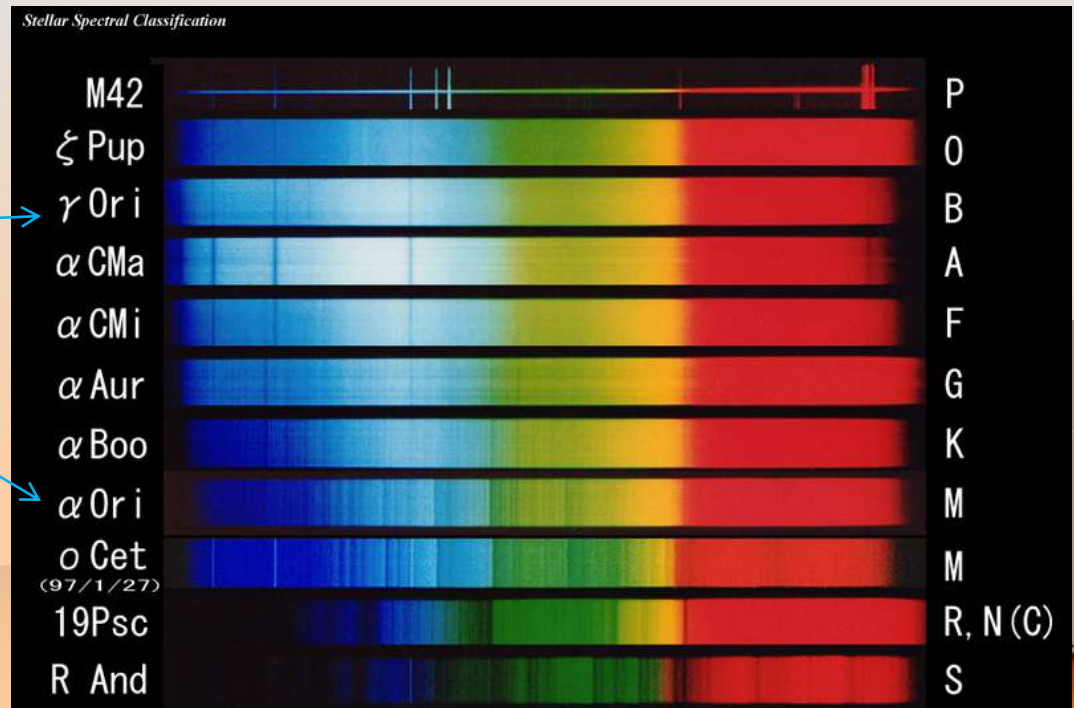
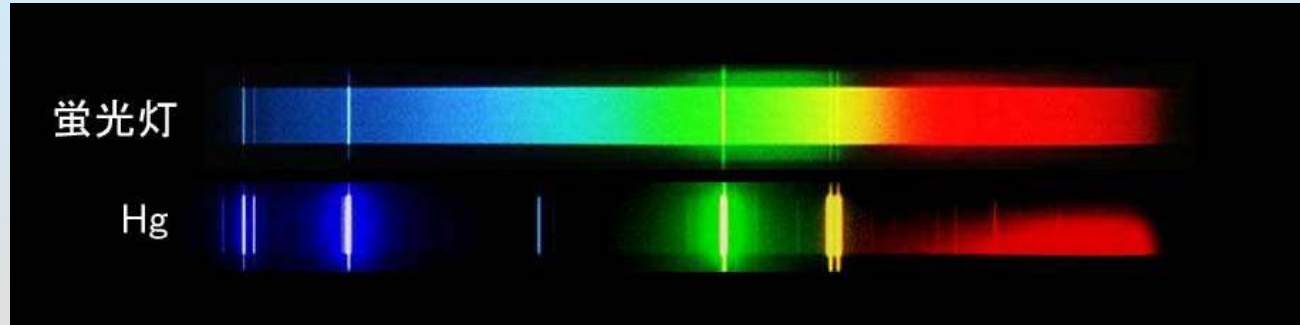
5





輝線スペクトル

- ❁ 蛍光灯
- ❁ 星





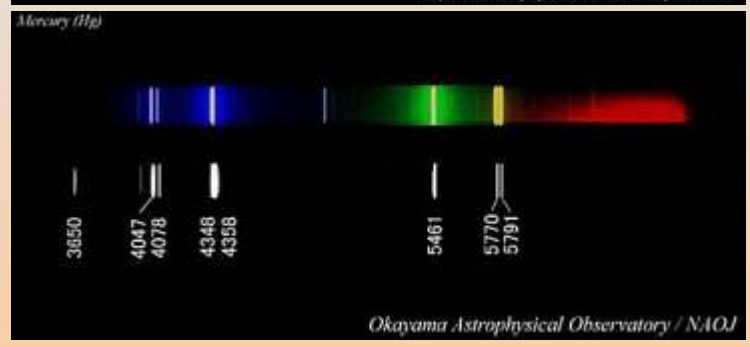
水素バルマー線

原子は固有の波長で光を放射する

水素



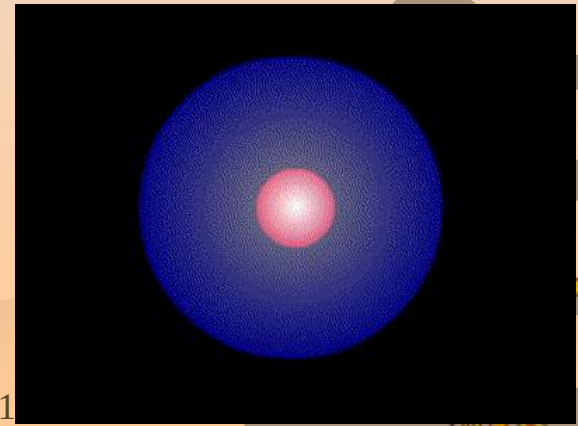
水銀



ナトリウム



水素ガスが赤い光を出しているバラ星雲



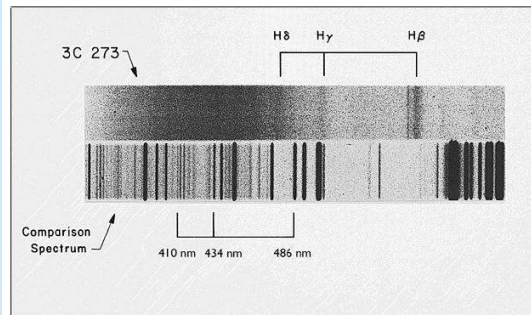
2008/

光の波長 (nm)

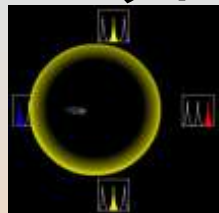
1



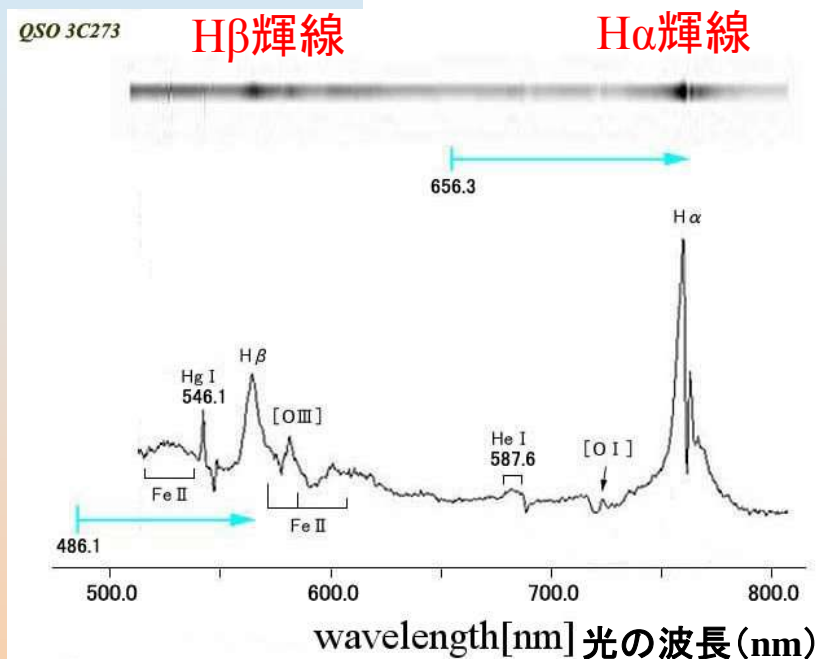
クェーサー3C273 赤方偏移



奇妙なスペクトル線
特別な原子？ No!!
水素のスペクトル線だ！



ただし
16 %の赤方偏移(ずれ)
→光速の約16%の速度



クェーサー3C273の可視域スペクトル。水素バルマー線の一つH α 線の実験室における波長は656.3nmだが、クェーサー3C273のスペクトル上ではH α 線は760.0nmに位置している(赤方偏移)。



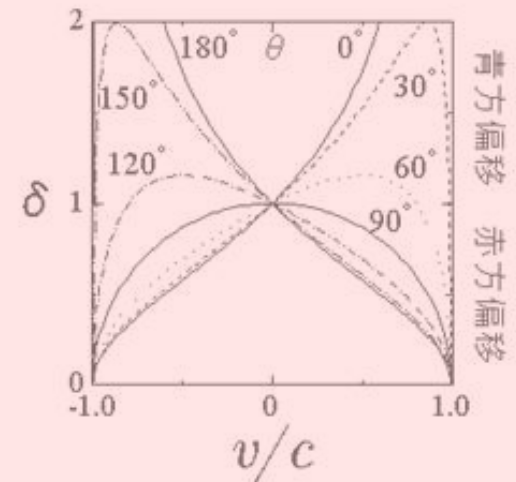
ドップラー効果



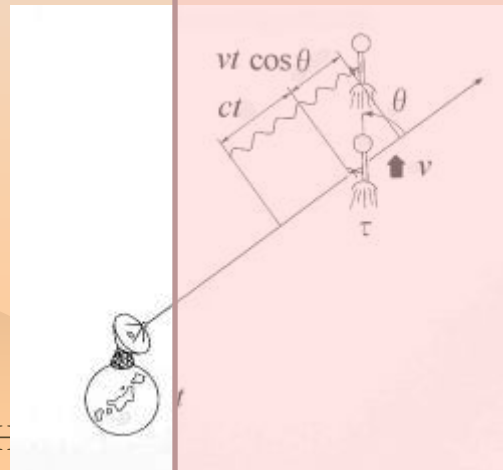
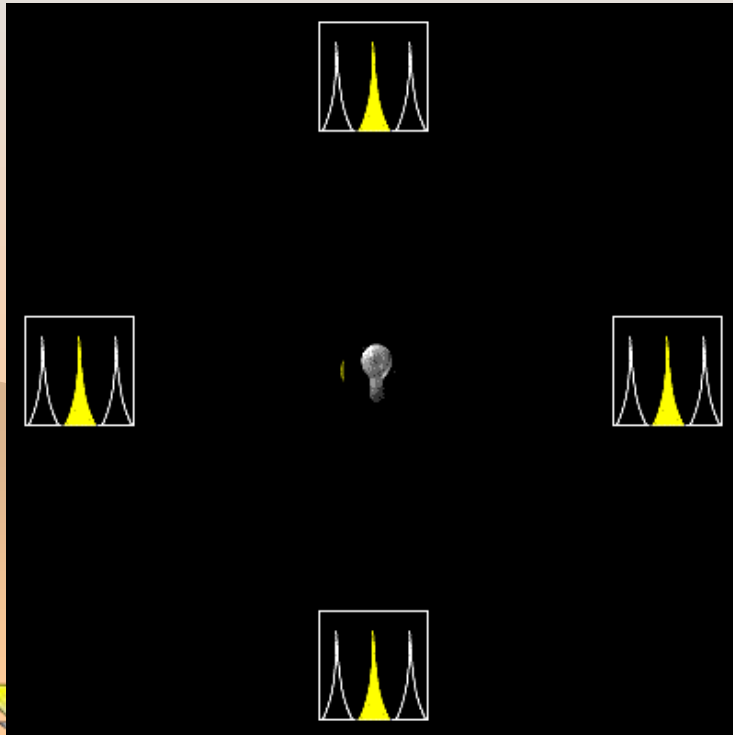
- 光源と観測者の間の相対運動によって、観測される光の波長(振動数)が実験室で測定されるものとずれる現象を光の**ドップラー効果**(Doppler effect)と呼ぶ。

ドップラー効果の度合いは、光源の速度 v と運動方向 θ 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 ν とともとの振動数 ν_0 の比率で定義されるドップラー因子 (Doppler factor) δ 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 θ 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 δ の値。





クエーサー エネルギーの大きさ



❁ 3C273

20億光年

$m=12.8$ 等級

$\rightarrow 10^{40} \text{ W}$

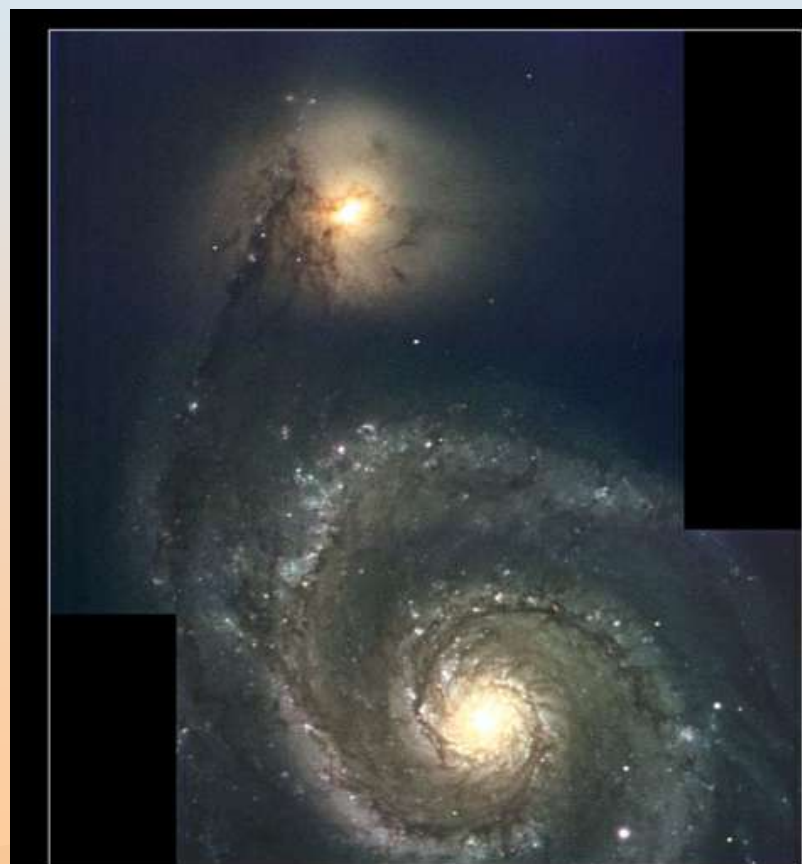
典型的な銀河 10^{37} W

100倍から1000倍明るい



2008/8/26

BHシャドーとBHジェ



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

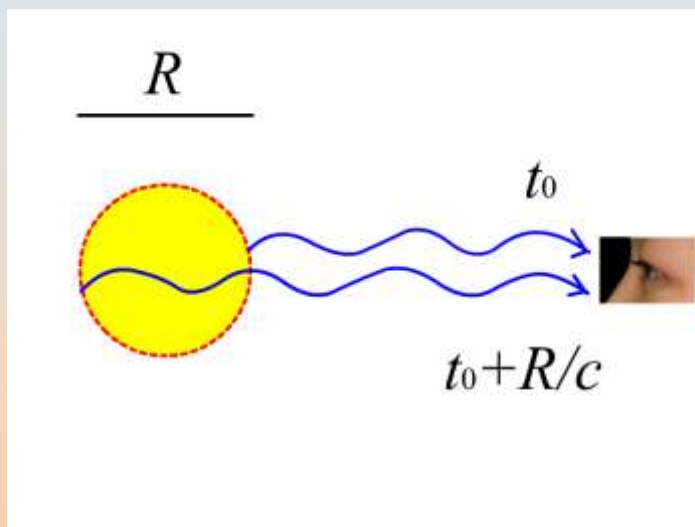
Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

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

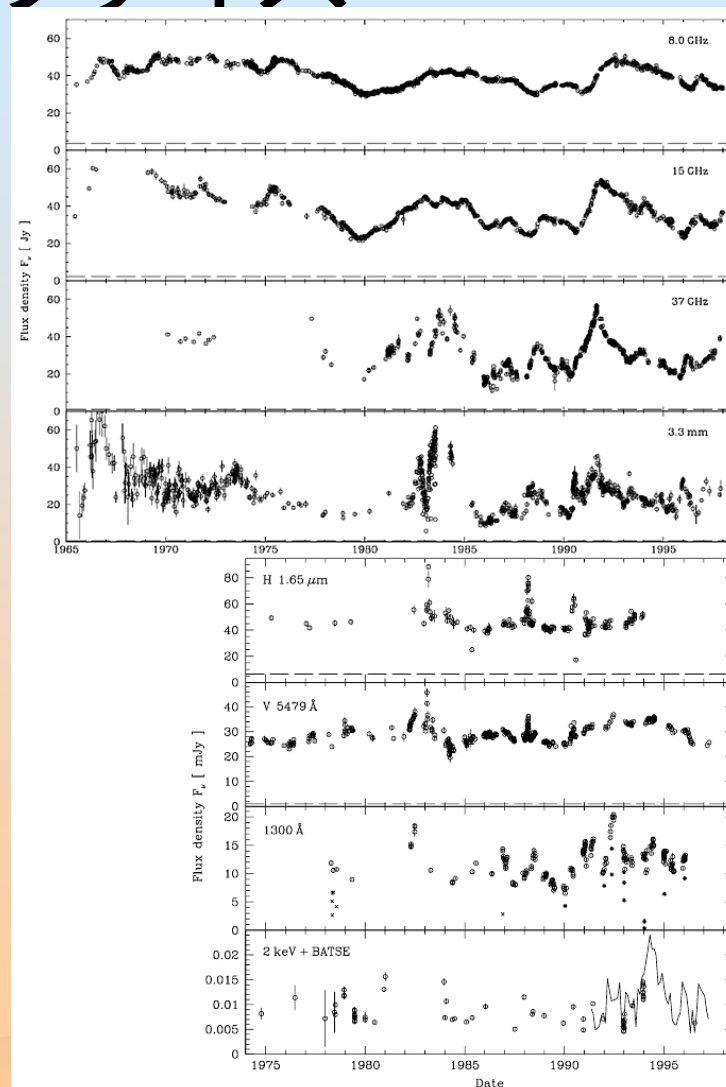


クエーサー エネルギー源のサイズ

- ❁ サイズが大きいと明るさは急に変わらない



- ❁ $R \leq 1 \text{ 光日} \sim 10^{15} \text{ cm}$



30 years of multi-wavelength observations of 3C273
Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 134, 89-101
M. Türlér et al. 1998 July 28 <http://obswww.unige.ch/3c273/>

時間(年)



2008/8/26

BHシャドーとBHジェツ



クエーサー エネルギー源



❁ 核反応

$$E=0.007Mc^2$$

太陽が1億個必要

❁ 重力エネルギー

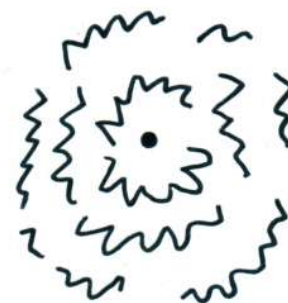
$$E=0.1Mc^2$$

太陽の1億倍のBH

星

人

降着天体



原子核
エネルギー

化学
エネルギー

重力
エネルギー

重力エネルギーが本質的





銀河

❁ 子持ち銀河M51



2008/8/26

BHシャドー

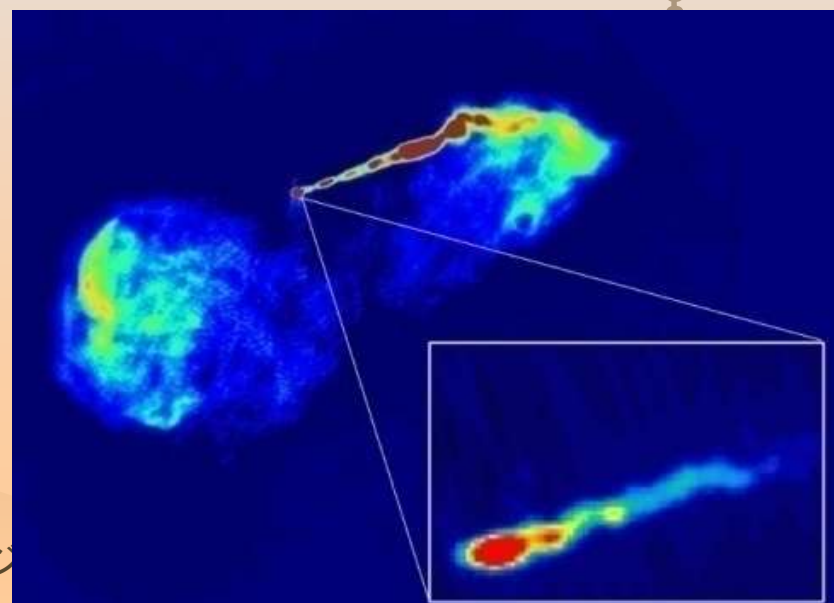
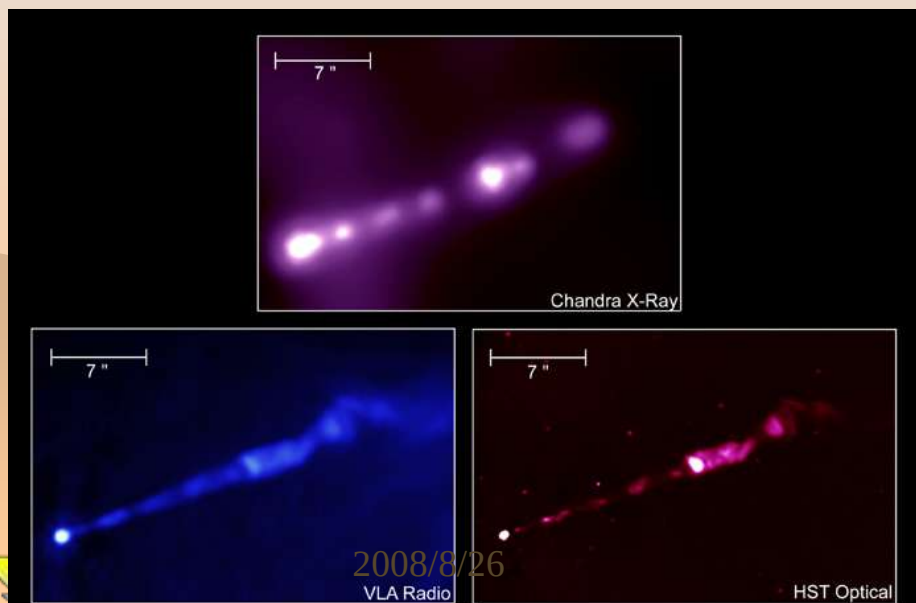
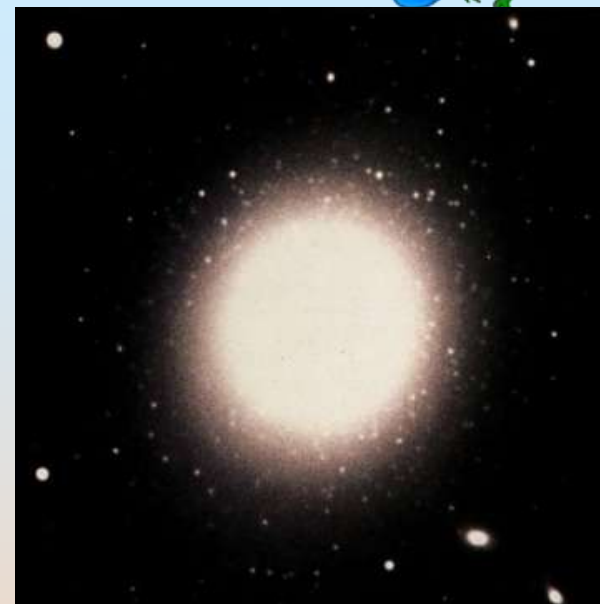


活動銀河



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

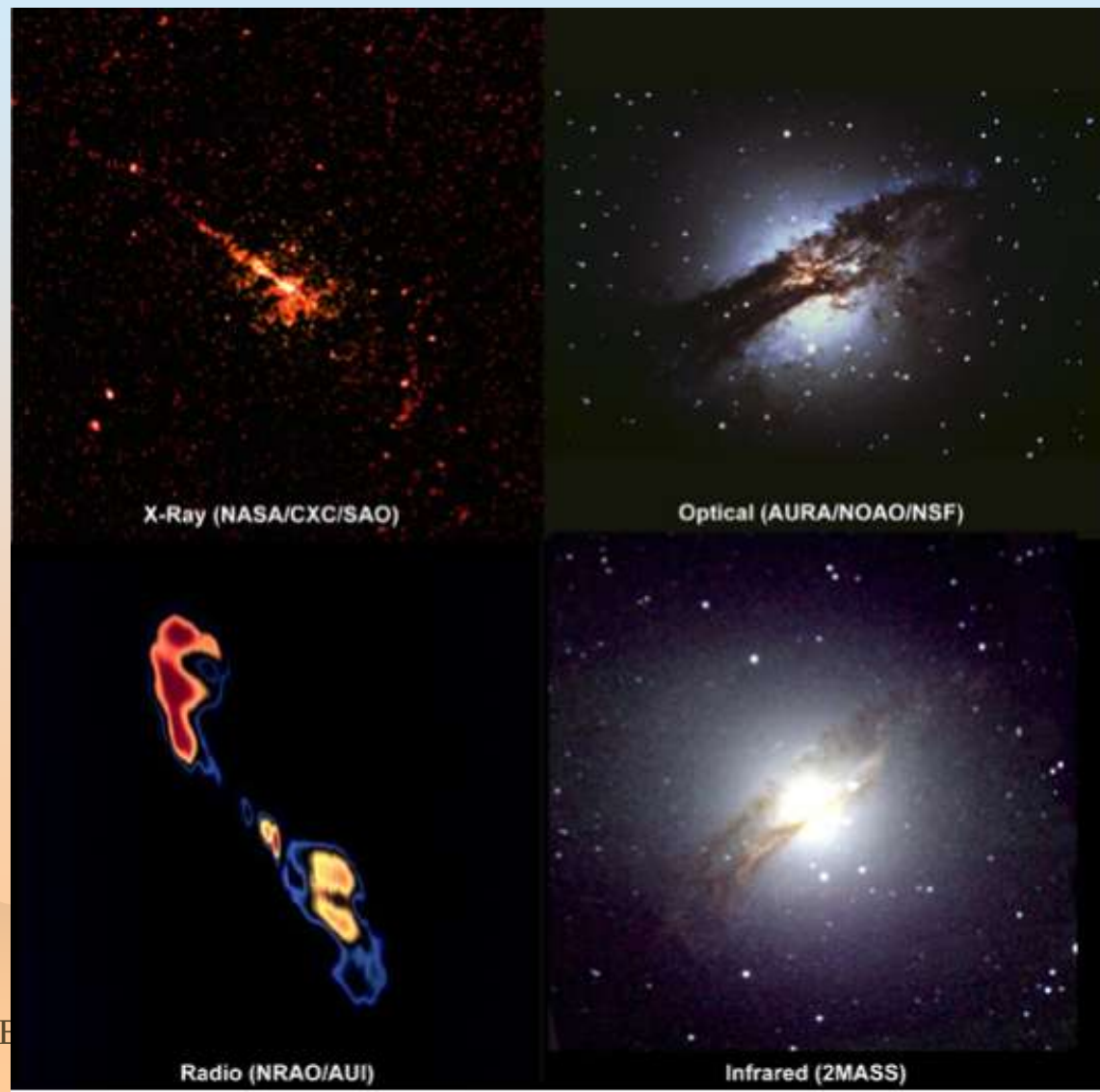
さまざまな波長で見た活動銀河ケンタウルス座A/NGC5128 (<http://physics.gmu.edu/~rms/astro113/myimages/cenacomp.jpg>)。

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みえる。

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。



2008/8/26

E



クエーサー

クエーサー(quasar)

非常に遠方の活動銀河核

多波長で観測したクエーサー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)

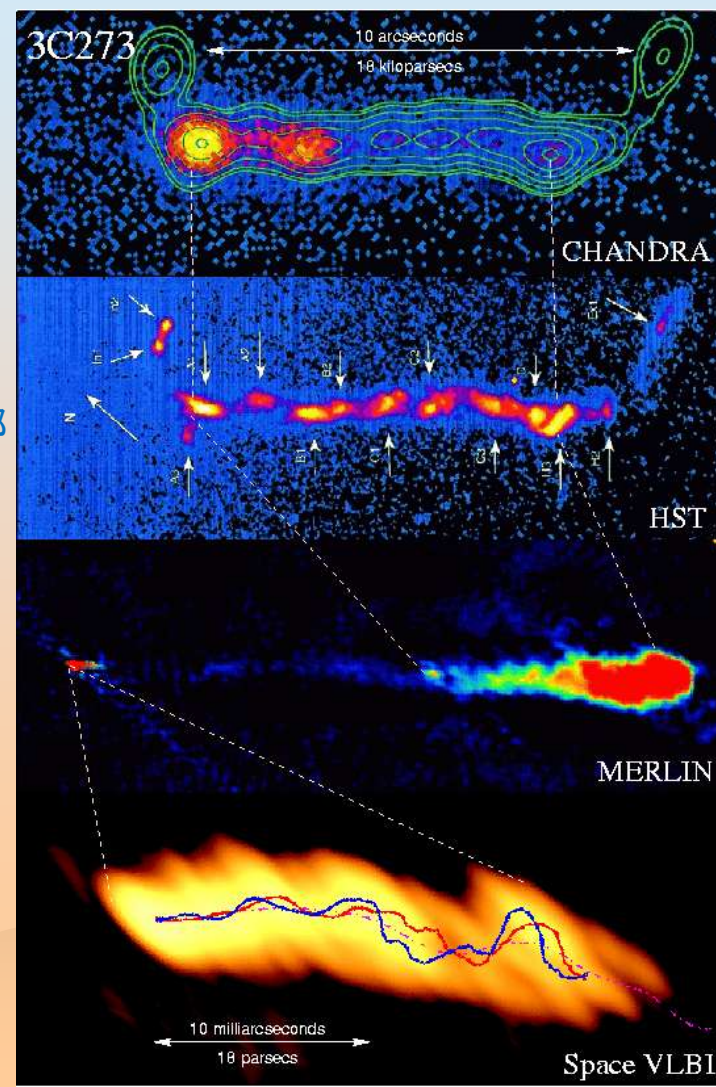
電波(マーリン干渉計)

電波(宇宙電波干渉計はるか)

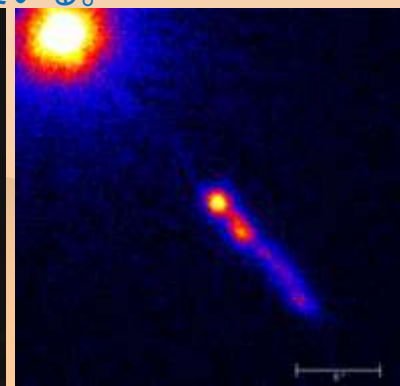
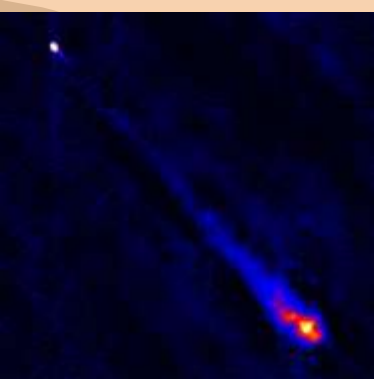
クエーサー

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、数十光年ぐらいの領域がみえている。



電波・光・X線



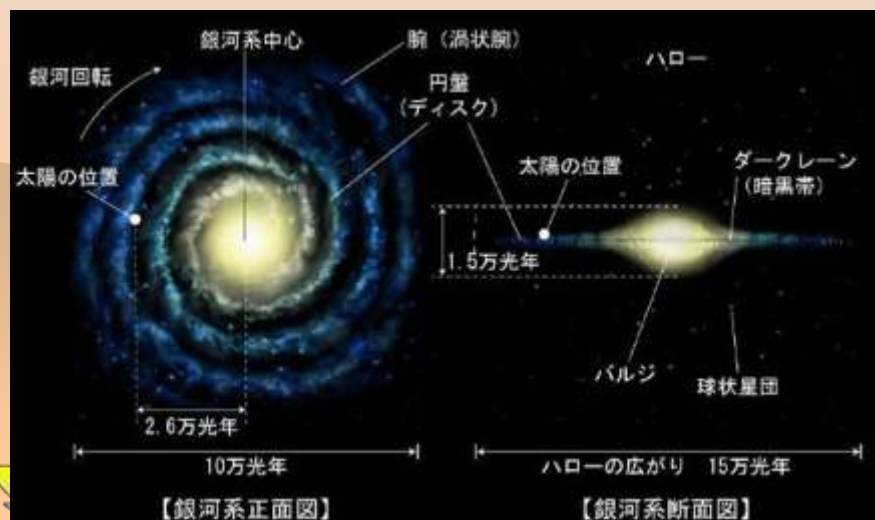


銀河系中心いて座A*

天の川



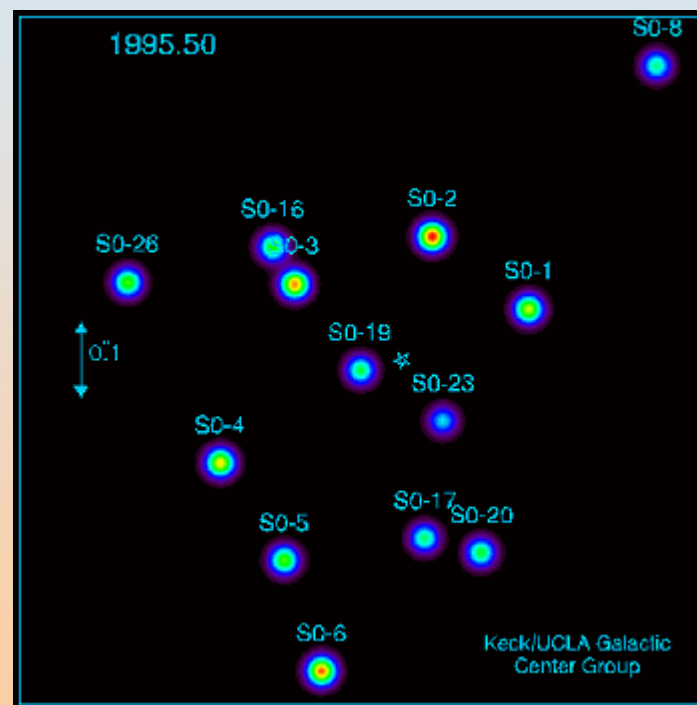
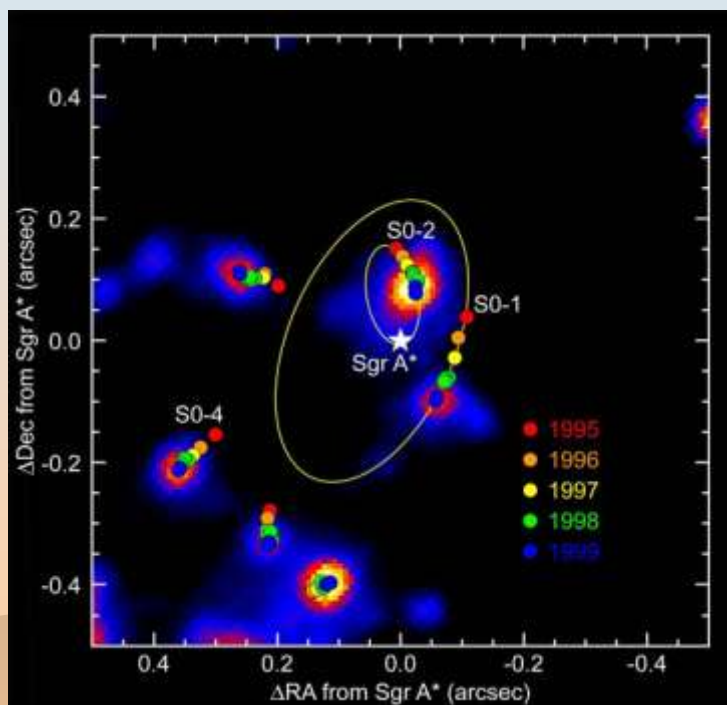
銀河系中心の
赤外線画像





銀河系中心いて座A*

✿ 個々の星の運動 (Sgr A*)



Ghez et al. 2000

2008/8/26

BHシャドーとBHジェット

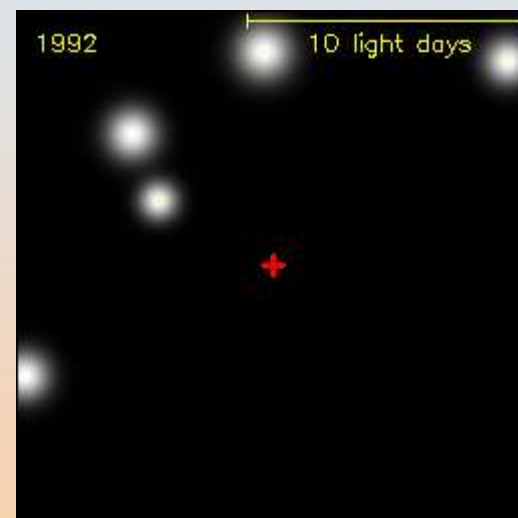
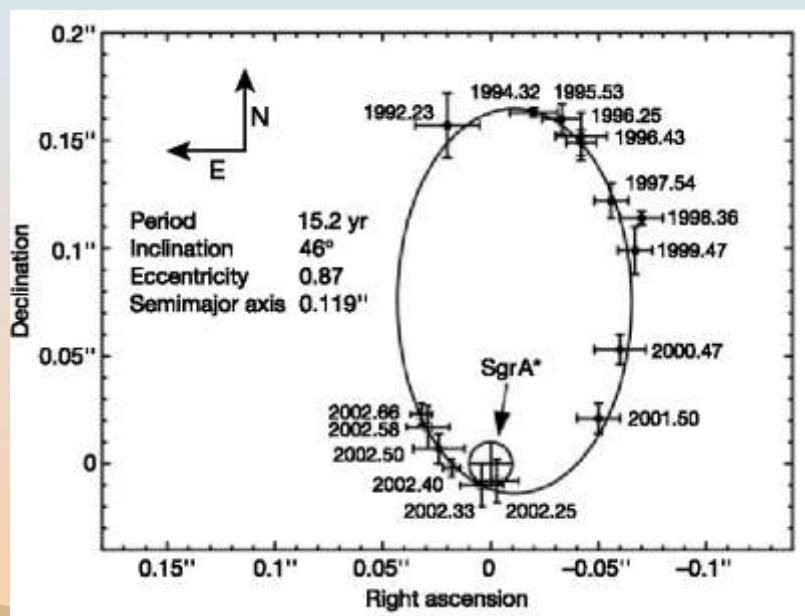
22





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



活動銀河 まとめ



Table 1.6 Supermassive Black Holes.¹³

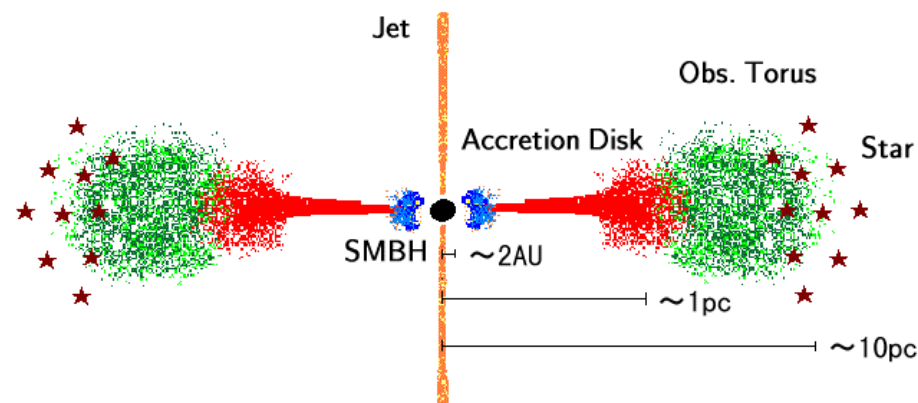
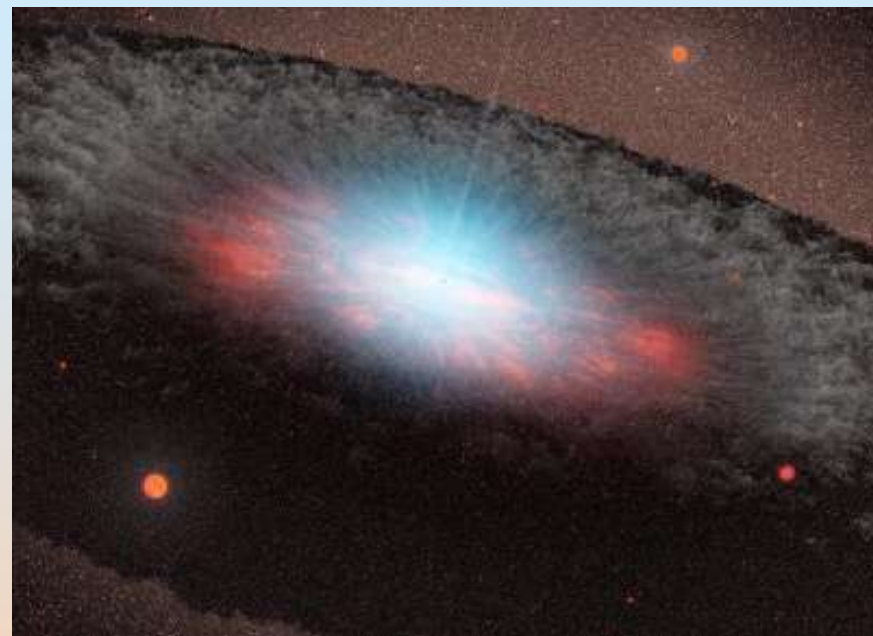
Objects	Type	d	M
stellar dynamics			
Sgr A*/The Galaxy	Sbc	0.0085	3.7×10^6
M 31	Sb	0.7	3×10^7
M 32	dE	0.7	2×10^6
NGC 3115	S0	8.4	1×10^9
NGC 4594	Sa	9.2	5×10^8
NGC 3377	E	9.9	8×10^7
gas dynamics			
M 87	cD	15.3	3×10^9
NGC 4261	E	31.6	5×10^8
water maser			
NGC 4258/M 106	Sbc	7.5	4×10^7
NGC 1068	Sy	16	2×10^7
NGC 4258	Sy	7.2	4×10^7
IC 2560	Sy	38	3×10^6





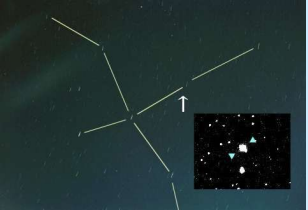
活動銀河の描像

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>





X線星とマイクロウェーサー ブラックホール連星



はくちょう座X-1の発見

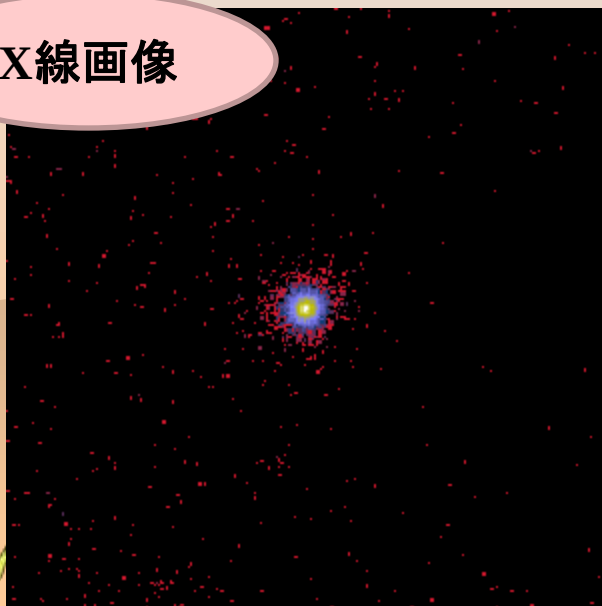


Cygnus X-1 (Cyg X-1): はくちょう座X線源第1番
9等星

ブラックホールだ(1971年)

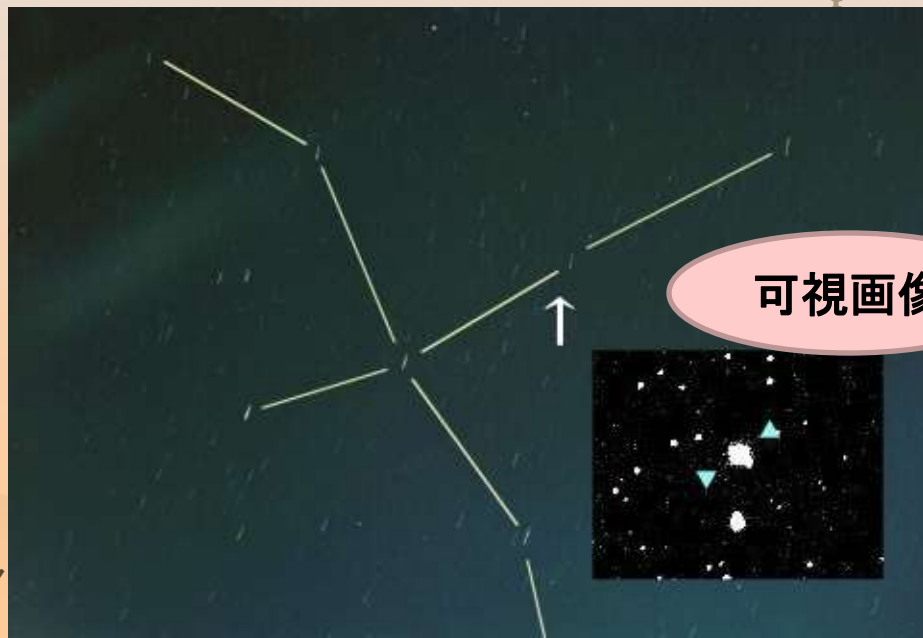
O9Iab型恒星HD226868+ブラックホール

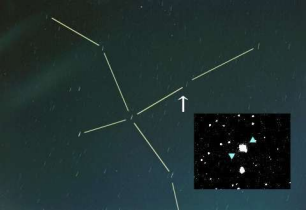
X線画像



BHシャ

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

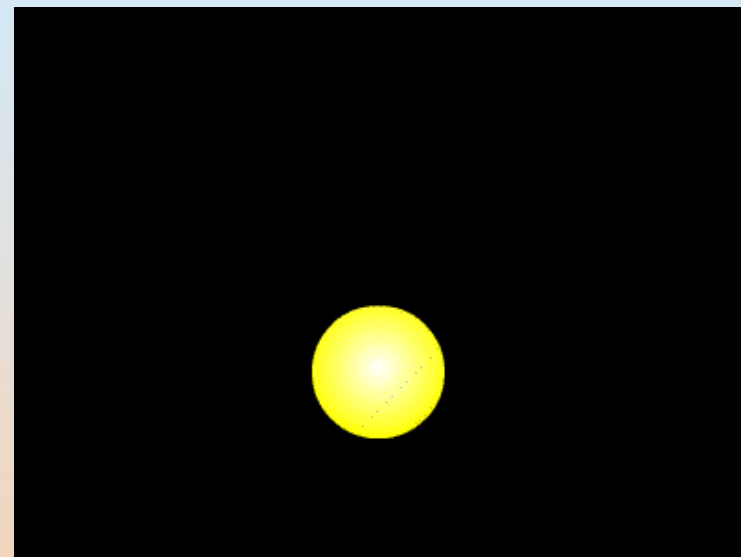


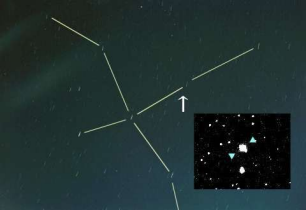
❁ 光では伴星しか見えない

❁ 公転周期=5.6日

❁ 伴星~30太陽質量

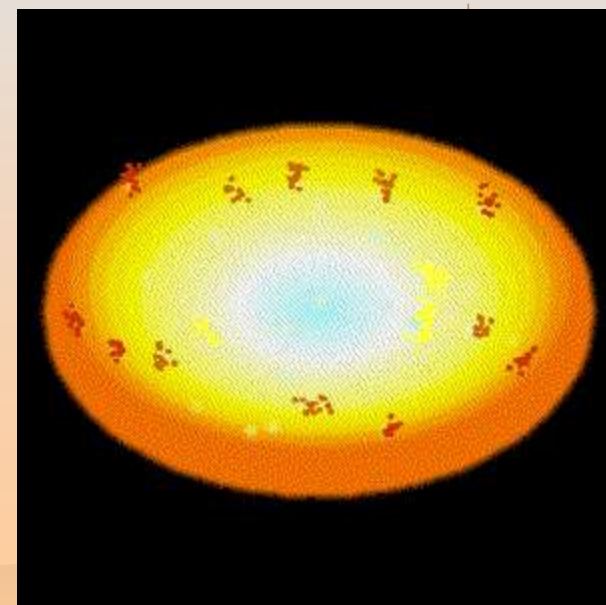
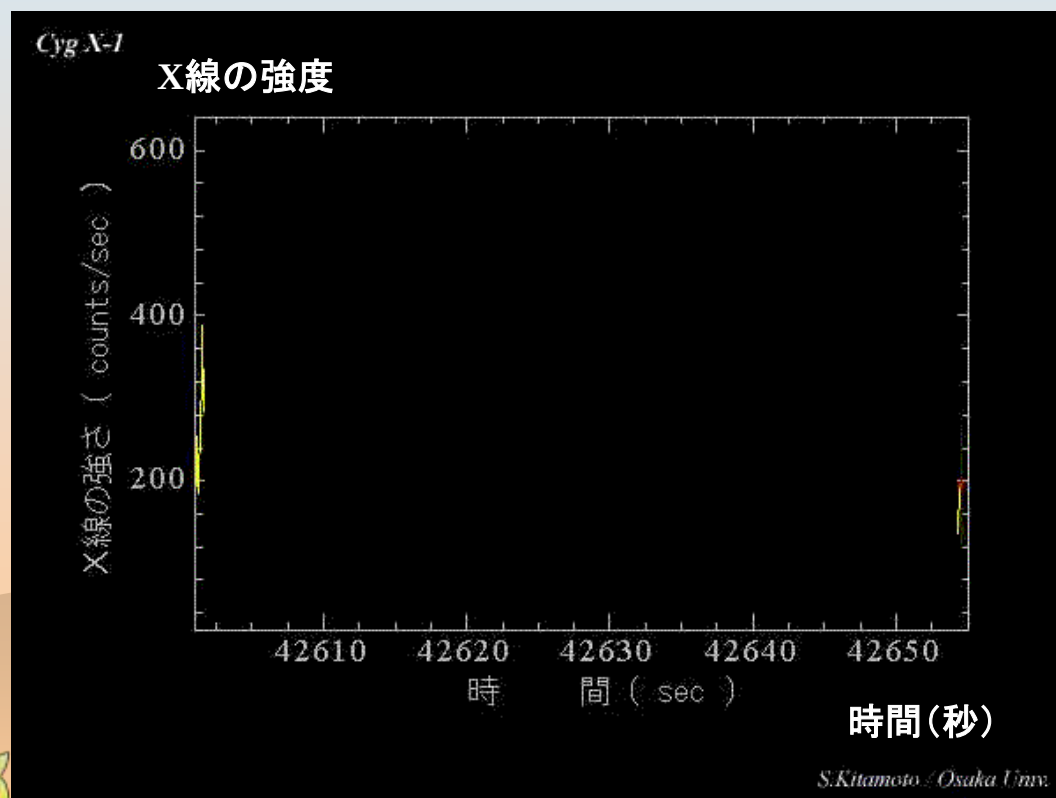
❁ 見えない星~10太陽質量

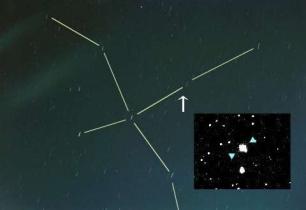




はくちょう座X-1 X線時間変動

❁ 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 $10M_{\odot}$)

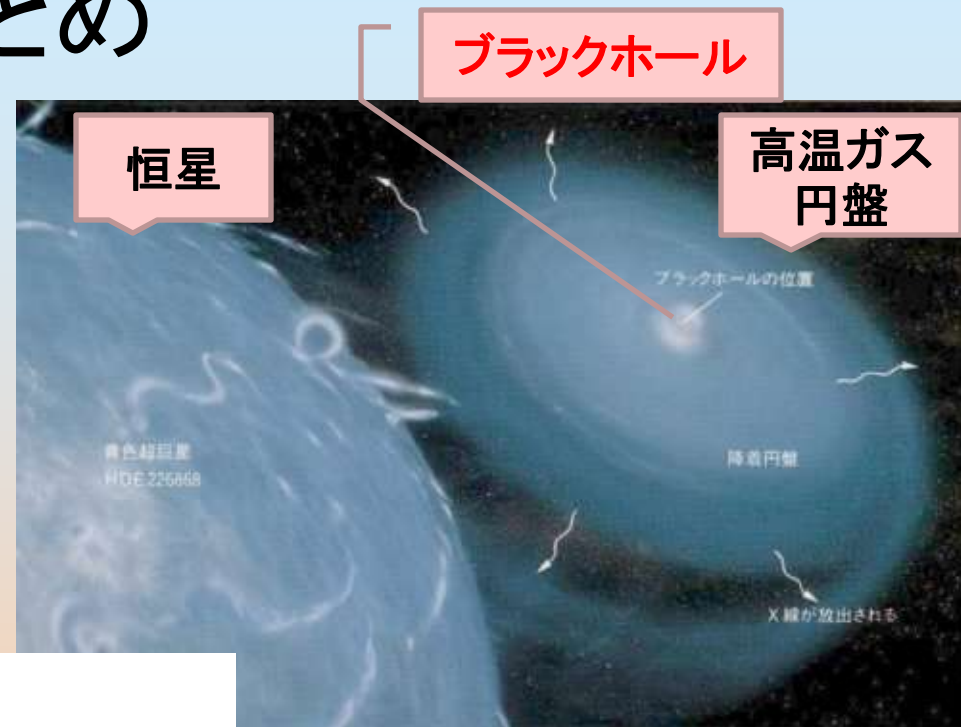
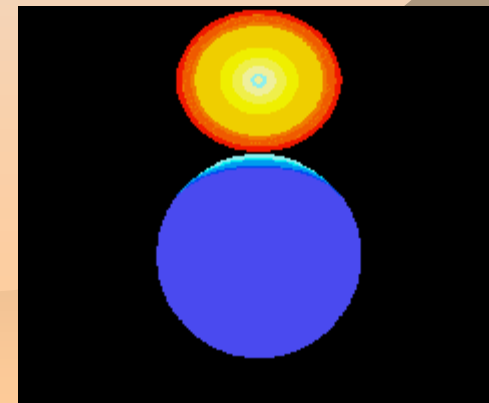


Table 1.4 Elements of Cyg X-1.⁴

Elements	Values	Ref.
Optical counterpart	$V = 9/\text{O9.7Iab}$	
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 km s^{-1}	1
Mass function $f(M)$	$0.241 \pm 0.013 M_{\odot}$	
Inclination angle i	$27^{\circ} - 35^{\circ}$	2
Ellipticity e	< 0.1	3



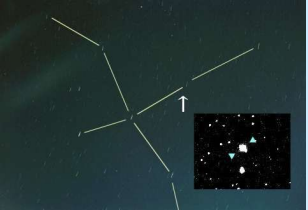


特異星SS433の発見

SS433: Stephenson-Sanduleakカタログ433番
14等星

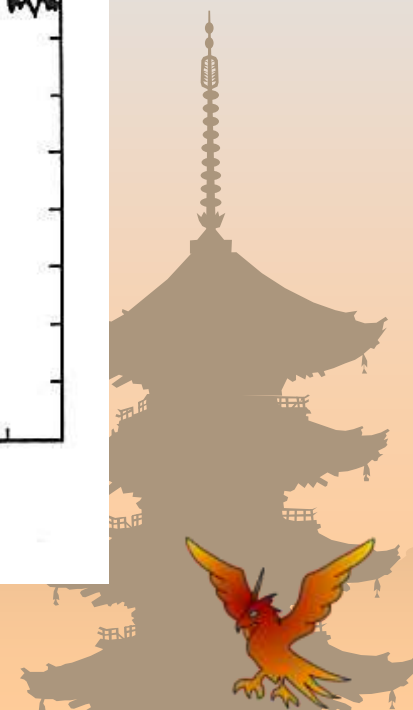
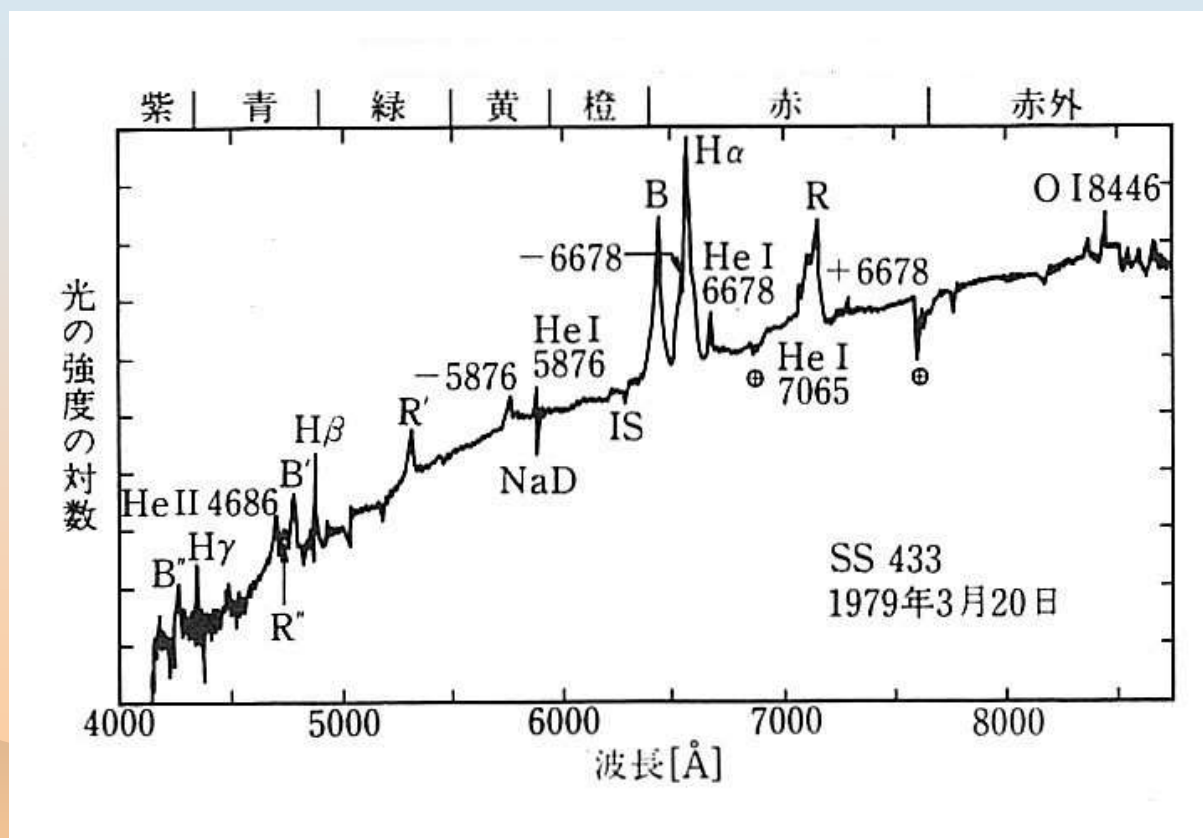
奇妙なスペクトル (Margon et al. 1984)

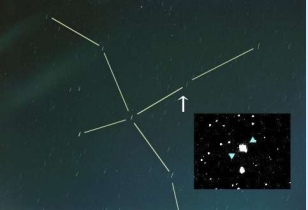




特異星SS433 輝線スペクトル

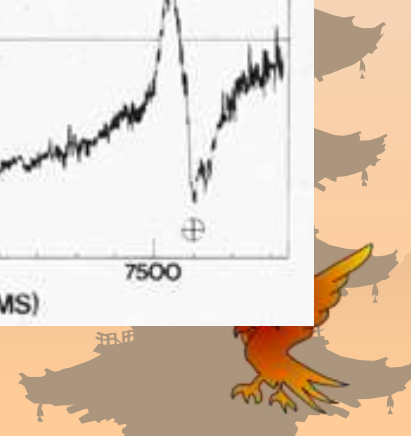
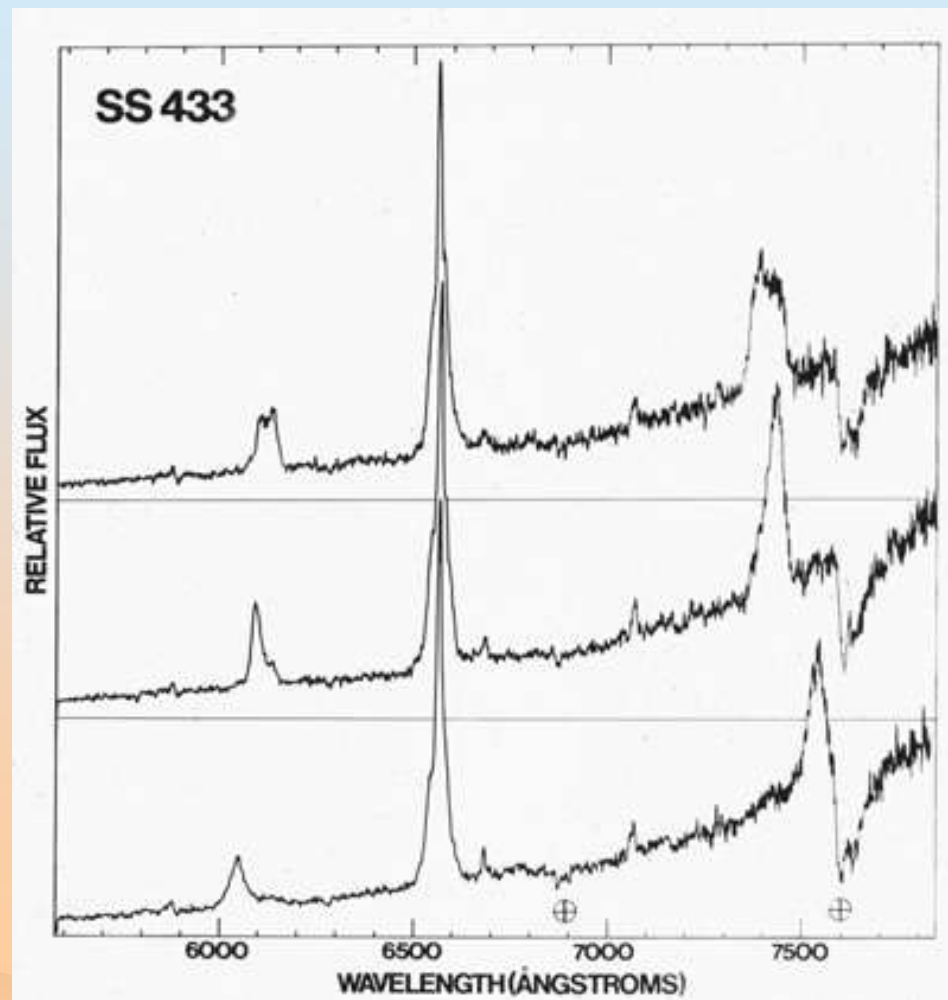
❁ 奇妙なスペクトル線

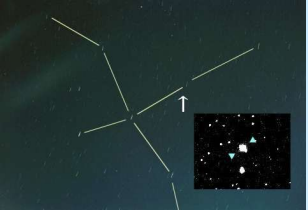




特異星SS433 輝線スペクトル

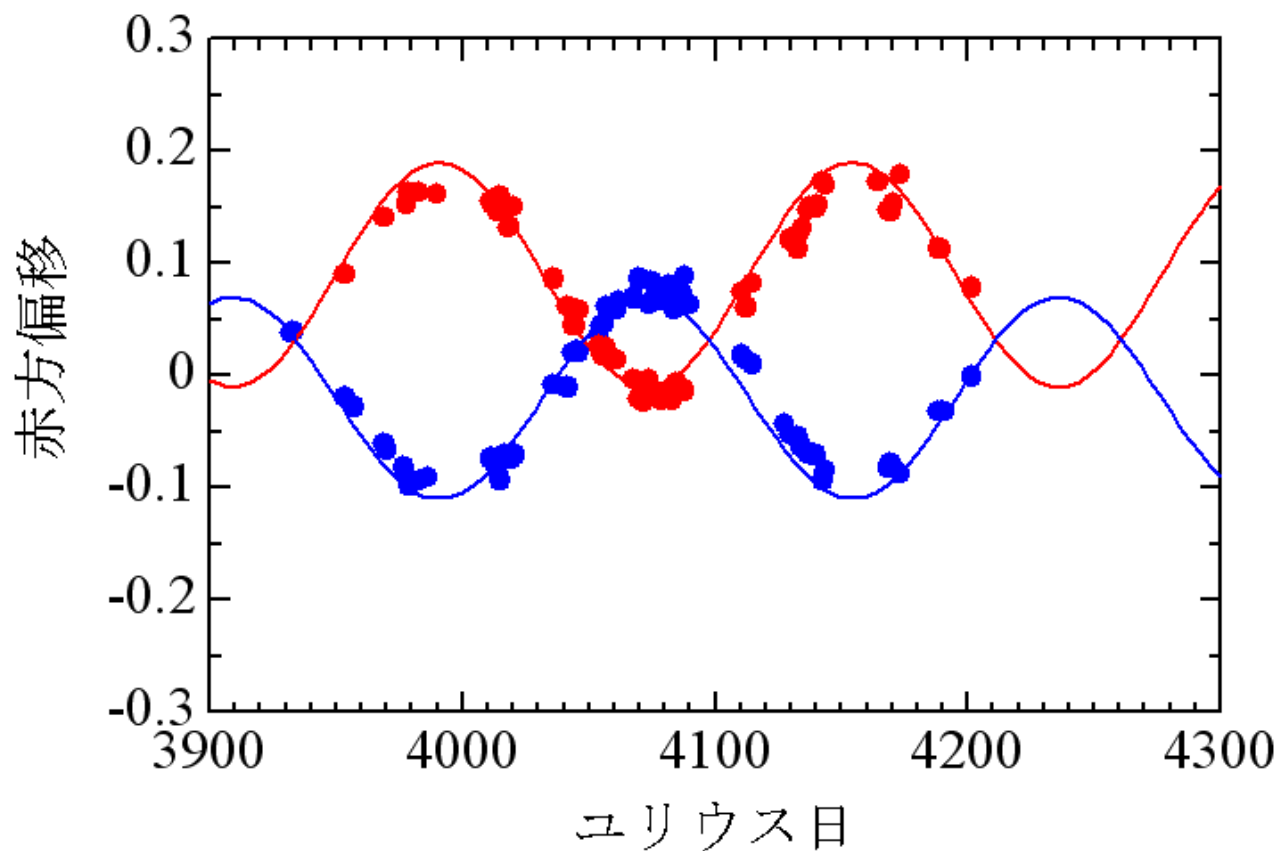
❁ 動くスペクトル線

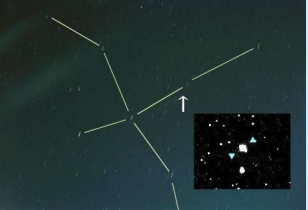




特異星SS433 輝線スペクトル

- ❁ 輝線の位置が周期的に変化する
- ❁ 162日

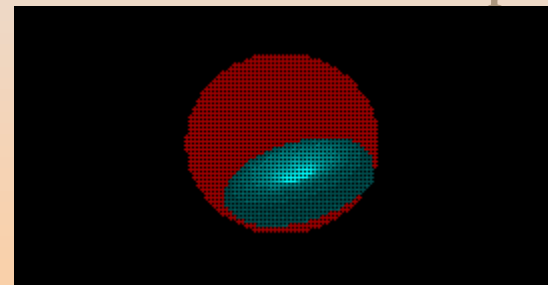
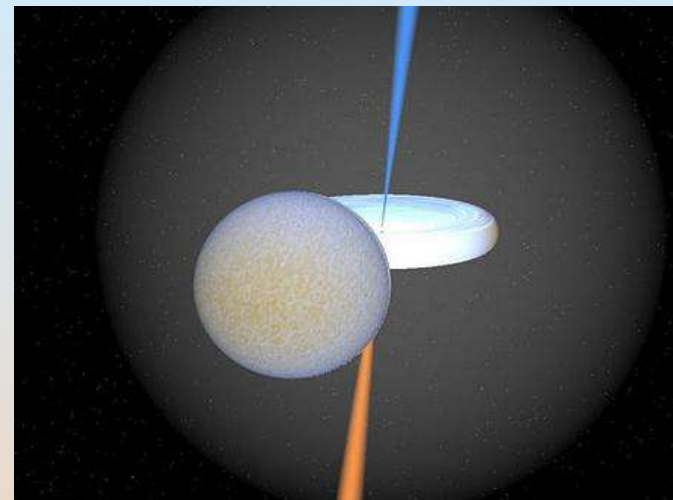
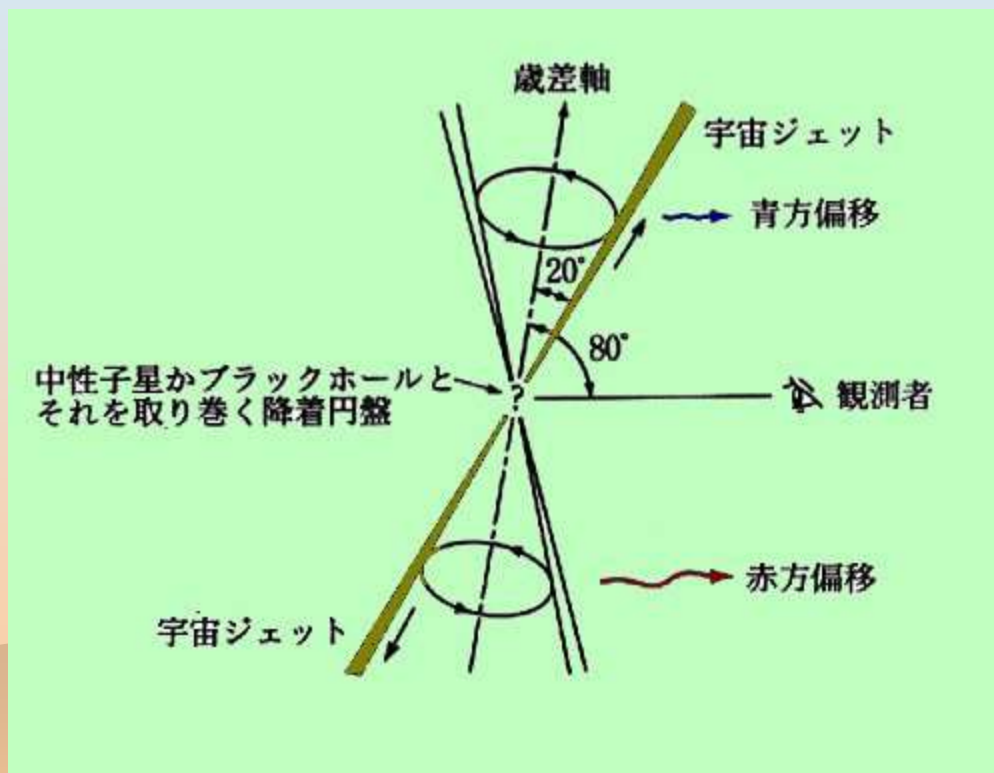




特異星SS433 モデル

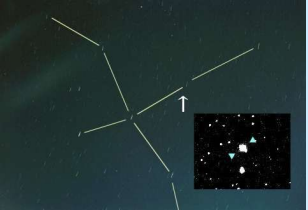


❁ 2本のジェットが振れ動く



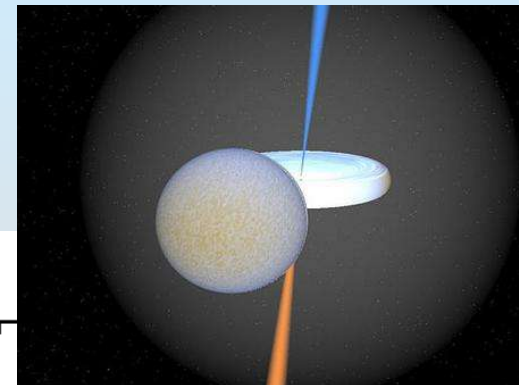
SS433ジェットの
パラメータで作
成したアニメ





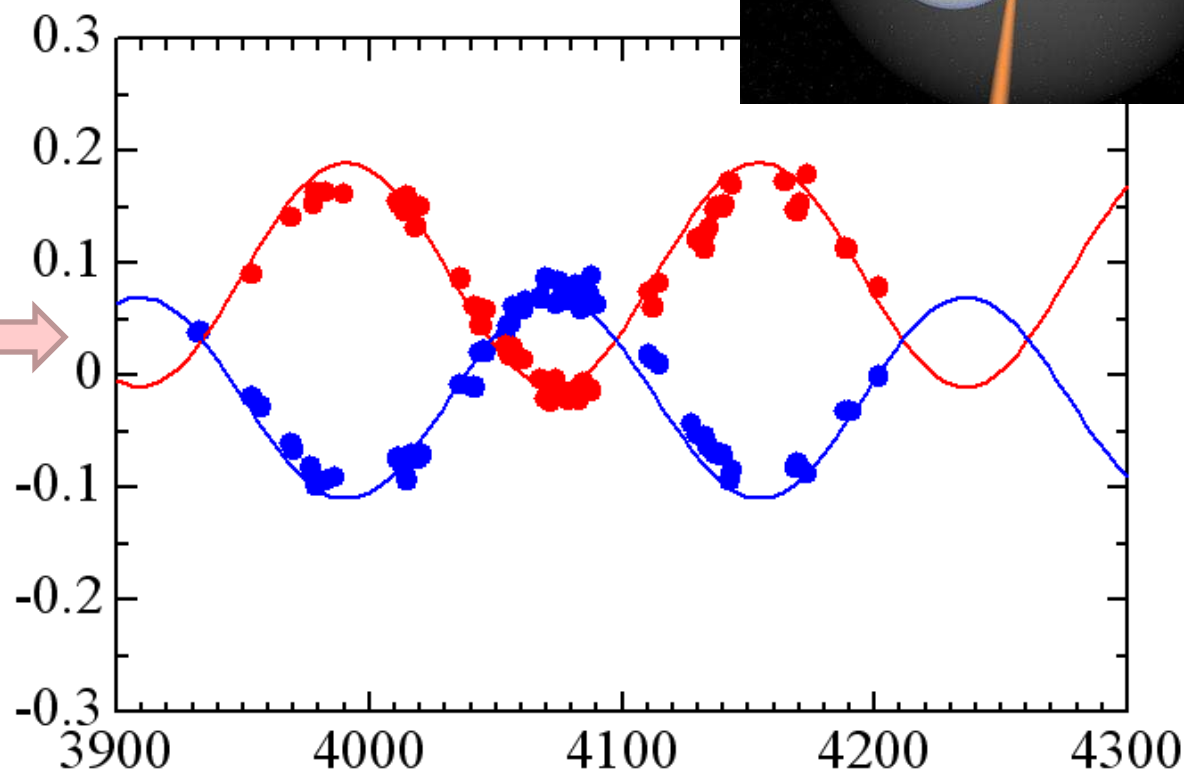
特異星SS433 輝線スペクトル

- ❁ 輝線の位置が周期的に変化する
- ❁ 162日



- ❁ 0ではない
- ❁ 時間の遅れ

赤方偏移



BHシャドーとBHジェット ユリウス日

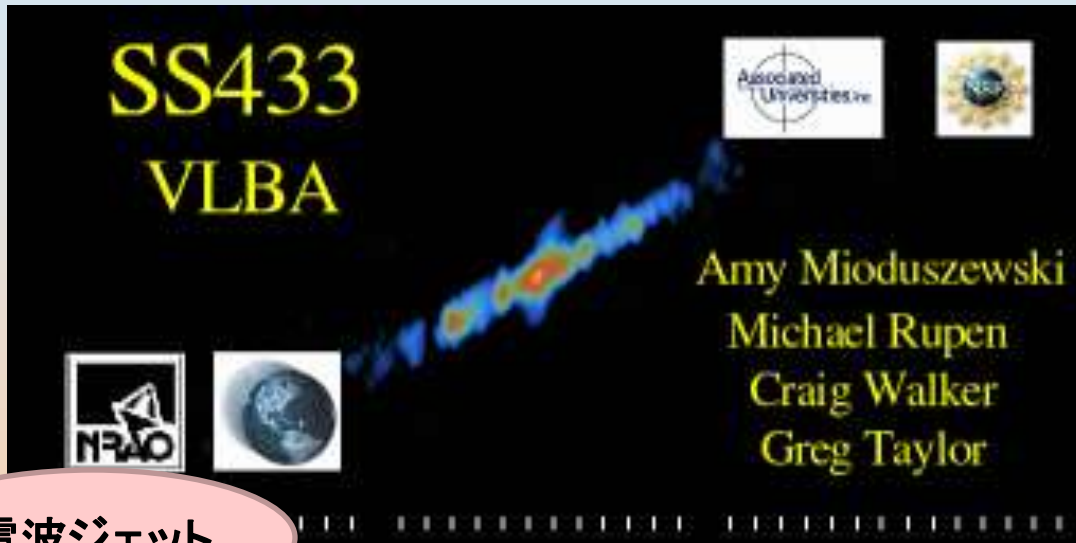
2008/8/26



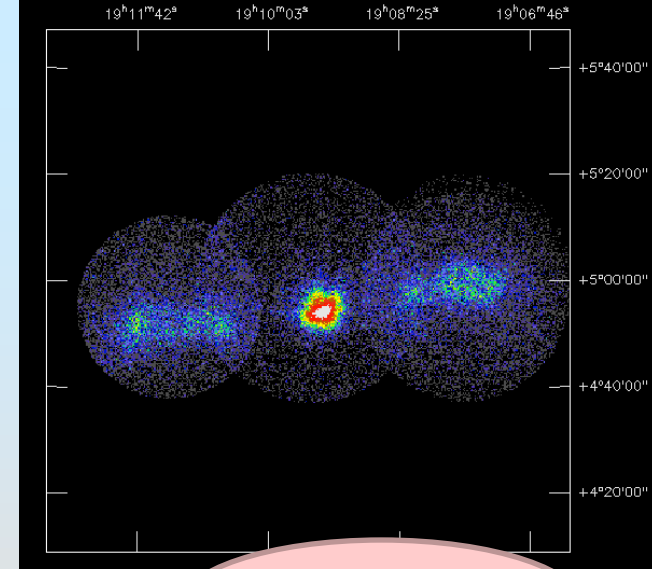


特異星SS433 ジェット

✿ コルク抜きパターン



電波ジェット

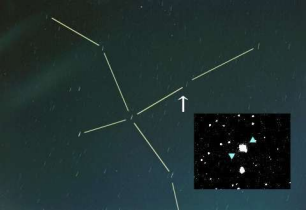


X線ジェット

X線衛星ぎんがの撮像した特異星SS433のジェット (<http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/>)。光速の26%もの速度で星間空間に突入したジェットガスと、星間物質との間の摩擦によって、ガスが高温になりX線を放射していると想像されている。

電波で観測したSS433ジェットの Corkscrew パターン (<http://www.nrao.edu/pr/2004/ss433corkscrew>)。SS433ジェットは、ある固定軸(歳差軸)のまわりを約 20° の頂角をもつ円錐面内で周期163日で、傾いた独楽の軸が振れるような歳差運動をしている。





特異星SS433

まとめ



恒星+ブラックホール
亜光速ジェットをもつ
ジェットの速度は光速の
26% !

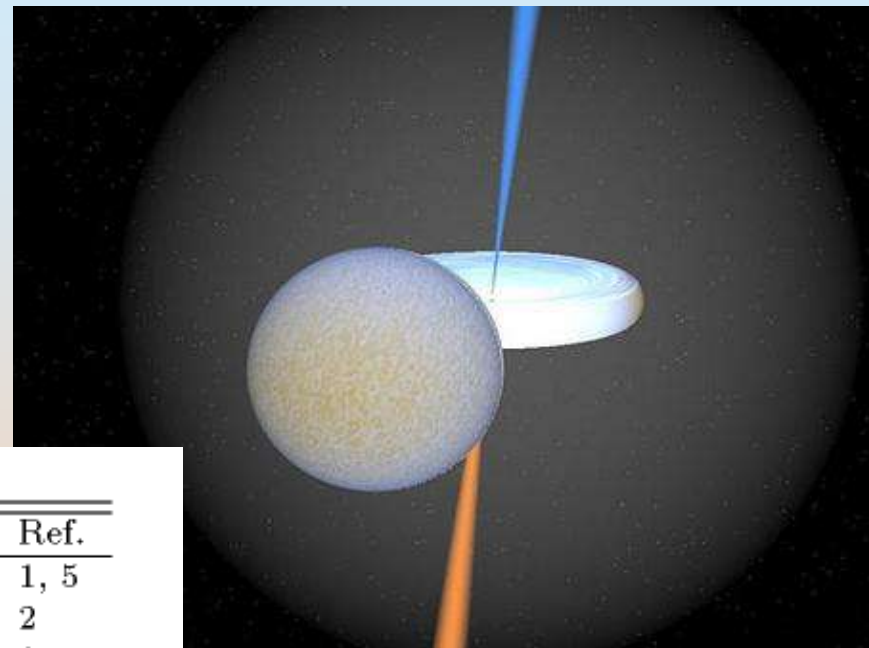
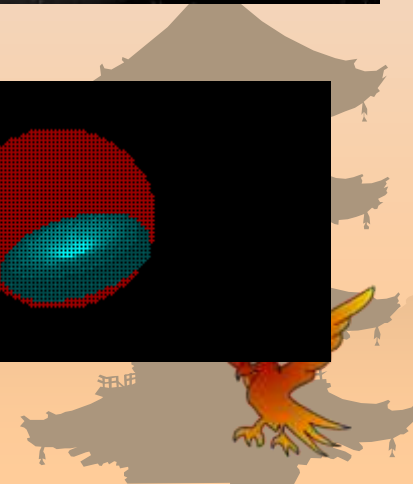
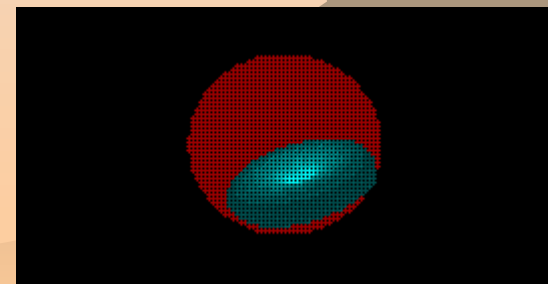
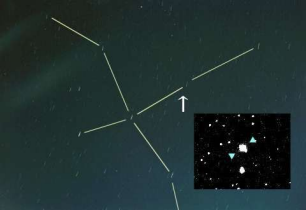


Table 1.5 Elements of SS 433.⁵

Elements	Values	Ref.
Optical counterpart	$V \sim 14/A5-A7I$	1, 5
Distance d	5.0 ± 0.5 kpc	2
Binary period P	13.082 d	1
Binary ephemeris T_0 (2 440 000+)	6596.25 d	3
Semi-amplitude K_2	112 ± 5 km s ⁻¹	4
	132 ± 9 km s ⁻¹	5
Mass function $f(M)$	$2.0 \pm 0.3 M_{\odot}$	4
	$3.0 \pm 0.6 M_{\odot}$	5
Inclination angle i	78°8	1
Precession period	162.5 d	1
Precession ephemeris (2 440 000+)	4483 d	3
Precession angle ψ	19°8	1





マイクロクエーサー

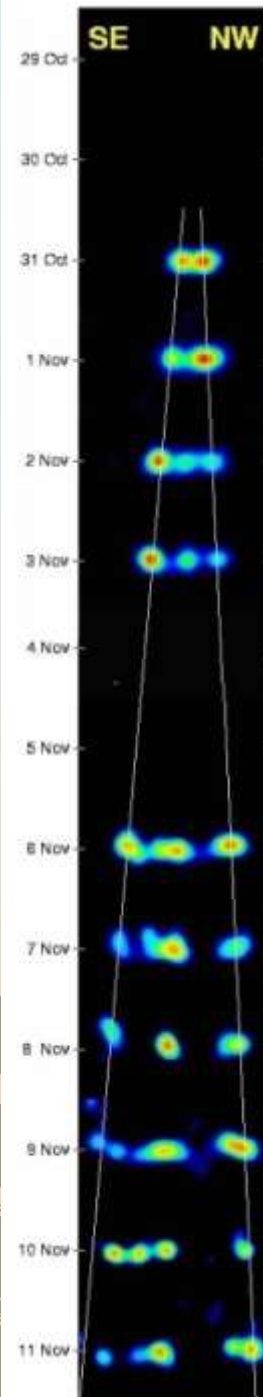
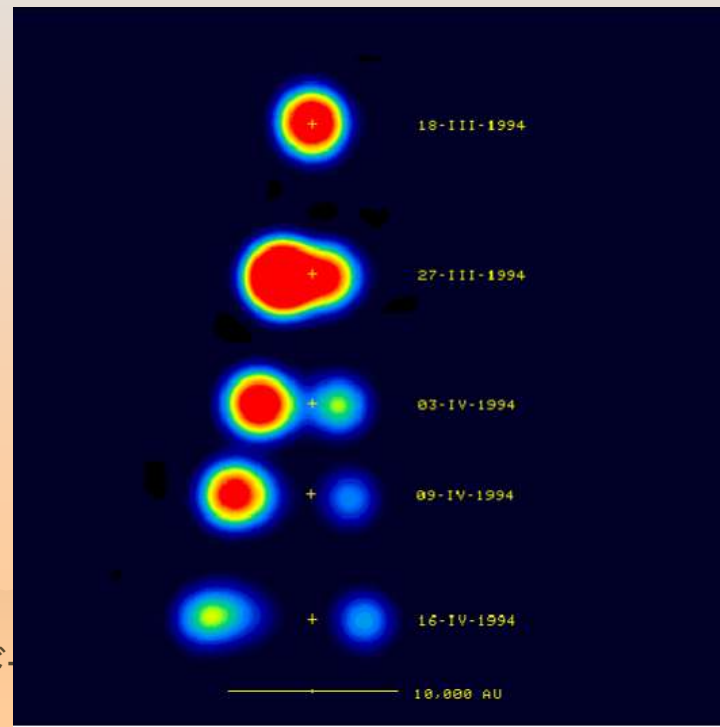
マイクロクエーサー (microquasar)

亜光速ジェットをもったブラックホール連星

GRS1915+105

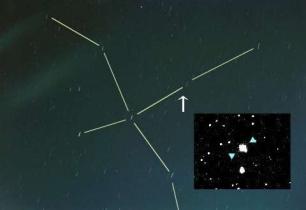
速度は光速の92%！！

電波で撮像したマイクロクエーサー GRS 1915+105
<http://universe-review.ca/I08-17-microquasar.gif>。異なった時期に得られた5つの画像が上から下に並べてある。中心の電波源から図の左右に電波輝点が移動しているのがわかる。



2008/8/26

BHシャド



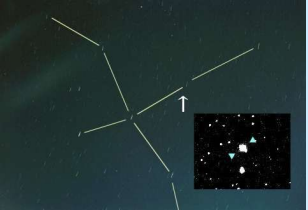
BH連星 + マイクロクエーサー まとめ



Table 1.3 Black Hole Binaries.³

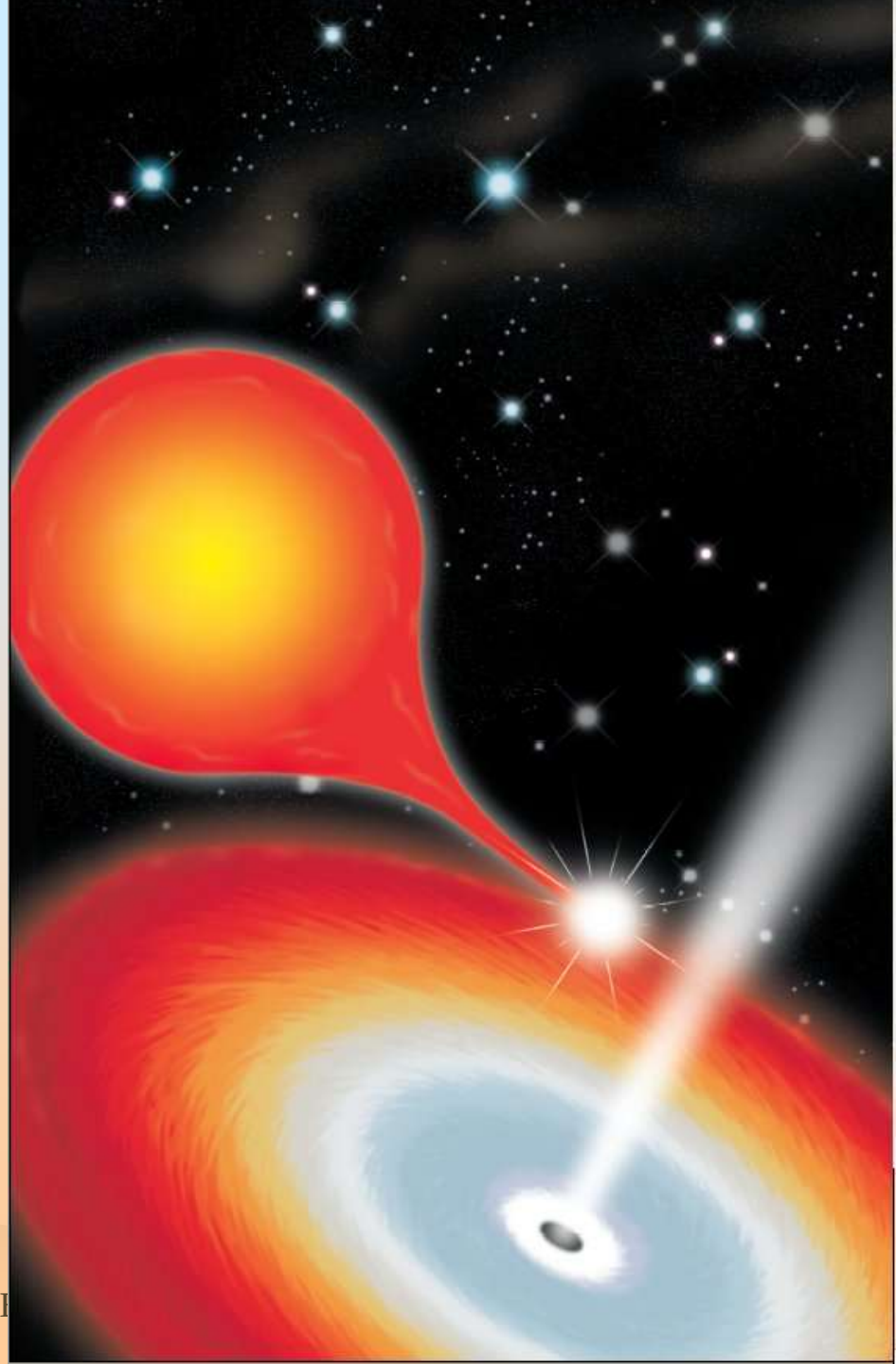
Source	$M_x [M_\odot]$	P [d]	$f(M) [M_\odot]$	d [kpc]	Companion
HMXBs					
Cyg X-1	$\gtrsim 9.5$	5.6	0.244 ± 0.005	2.0 ± 0.1	O9.7Iab
SS 433	~ 9.0	13.1	3.0 ± 0.6	5.0 ± 0.5	A5/A7I
LMC X-3	5.9–9.2	1.70	2.3 ± 0.3	50 ± 2.3	B3V
LMC X-1	4.0–10.0	4.23	0.14 ± 0.05	50 ± 2.3	O7III
LMXBs					
GRO J0422+32	3.2–13.2	0.21	1.19 ± 0.02	2.6 ± 0.7	M2V
A 0620–003 [‡]	8.7–12.9	0.325	2.72 ± 0.06	1.2 ± 0.1	K4V
1009–45	6.3–8.0	0.28	3.17 ± 0.12	5.0 ± 1.3	K7/M0V
1118+480	6.5–7.2	0.17	6.1 ± 0.3	1.8 ± 0.5	K5/M0V
GS 1124–684 [†]	6.5–9.2	0.43	3.01 ± 0.15	5 ± 1.3	K3/K5V
1543+475	7.4–11.4	1.13	0.25 ± 0.01	7.5 ± 0.5	A2V
1550–564	8.4–10.8	1.54	6.86 ± 0.71	5.3 ± 2.3	G8/K8IV
GRO J1655–40	6.0–6.6	2.62	2.73 ± 0.09	3.2 ± 0.2	F3/F5IV
H1705–25	5.6–8.3	0.52	4.86 ± 0.13	8 ± 2	K3/7V
1819–25	6.8–7.4	2.82	3.13 ± 0.13	7.4–12.3	B9III
GRS 1915+105	$\gtrsim 10.0$	33.5	9.5 ± 3.0	11–12	K/MIII
GS 2000+25	7.1–7.8	0.35	5.01 ± 0.12	2.7 ± 0.7	K3/K7V
GS 2023+338 ⁺	10.1–13.4	6.47	6.08 ± 0.06	2.2–3.7	K0III





ブラックホールX線 星の描像

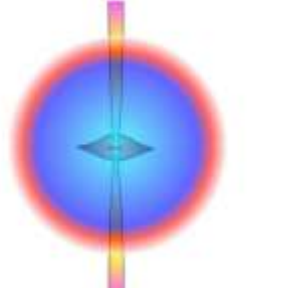
1. 恒星ブラックホール
2. プラズマガスの降着円盤<BHが？光輝く>
3. 亜光速のBHジェット<BHから？吹き出す>





ガンマ線バースト

宇宙最大の爆発現象



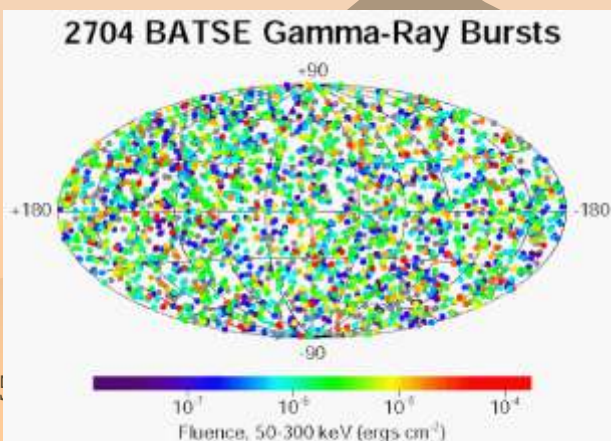
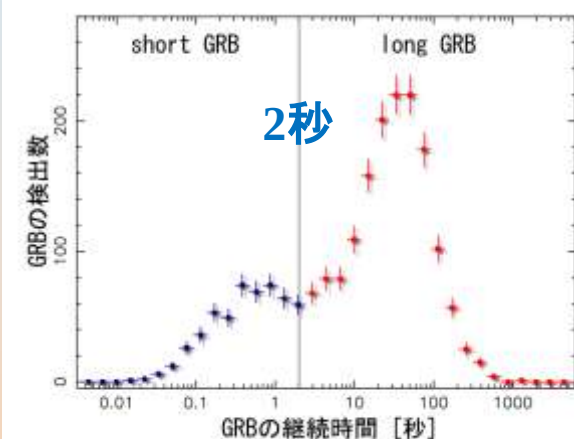
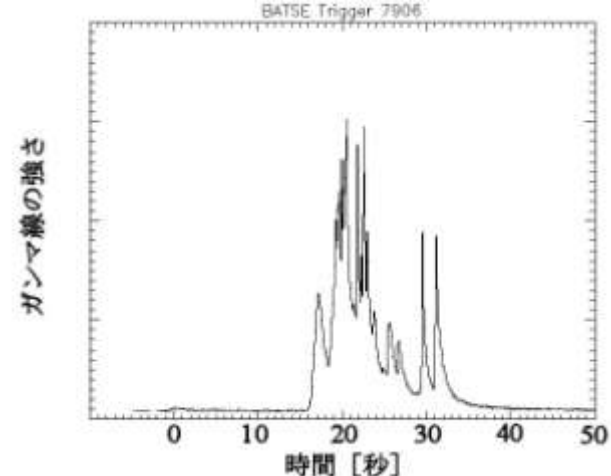
ガンマ線バースト

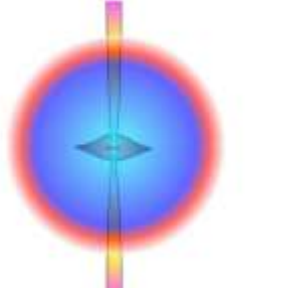
ガンマ線バースト (gamma-ray burst)
数十秒にわたり、強いガンマ線を放つ
宇宙最大の高エネルギー天体現象

Short GRB/Long GRBの2種類

宇宙論的天体 (1991年)
 10^{45} Jを超えるエネルギー

コンプトン衛星／
BATSEで検出した
数千例のGRB
(NASA)。赤ほど明
るく青ほど暗いが、
どれも全天で一様に
分布している。





ガンマ線バースト

残光の発見(1997年)

可視光の追観測

～100億光年

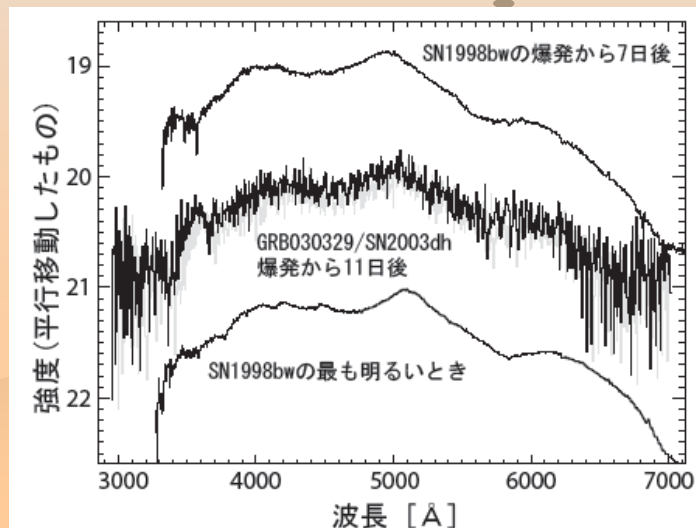
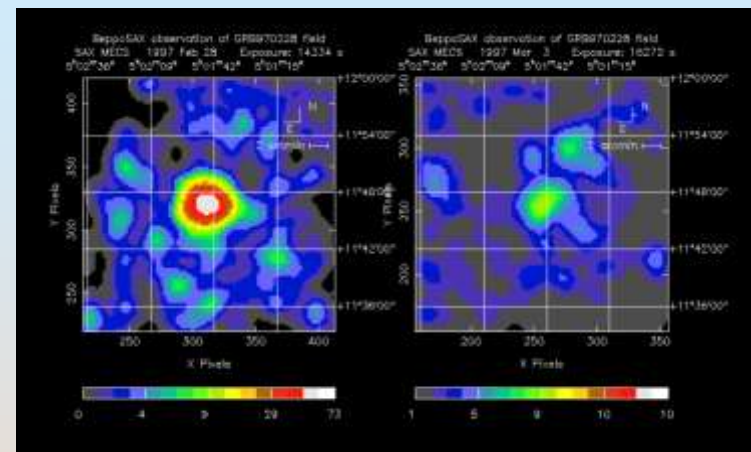
GRB970508は70億光年

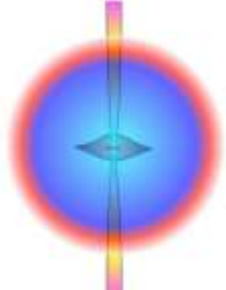
極超新星との関連(2003年)

GRB030329/ SN2003dh

SN2003dhとSN1998bwを比較したスペクトル。GRB030329の残光を連続観測している中で出現してきたので、GRB030329と超新星SN2003dhの関係が明白に示された。

BeppoSAX衛星がX線で捉えたオリオン座のガンマ線バーストGRB970228の残光 (<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/objects/grbs/grb970228.html>)。左は1997年2月28日のバースト時で、右は3月3日で随分と暗くなっている。





ガンマ線バースト



コンパクトネス問題
相対論的火の玉の膨張
(Rees&Meszaros 1992年)

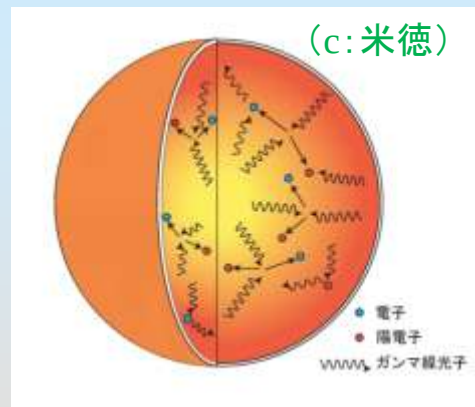
ファイアボールエンジン
(Paczynski 1986年)

速度は光速の99.99%！！

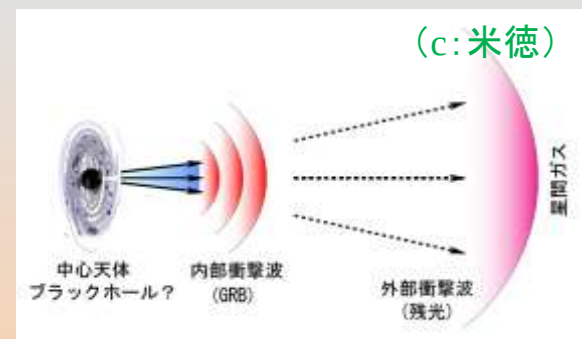
大質量星の崩壊に伴い、ほぼ光速で膨張
するファイアボールが吹き出す

初期の輻射のエネルギー密度がバリオン
のエネルギー密度の γ 倍あれば、最終
的なローレンツ因子も γ となる。

大量のガンマ線光子を狭い領域に閉じ込めると、電子・陽電子対を作り出す。ガンマ線は電子や陽電子に衝突して散乱し、外部へ抜け出せない。



超高速の放射体ー
相対論的火の玉ー
がX線を出している。
相対論的效果のため
に、観測者は早い
時間変動をするガン
マ線として検出する。



ブラックホール近傍で
できたファイアボール
が非球対称に膨張し、
重力崩壊する星の外
層を貫いて、光速の
99.99%のジェットが吹
き出している(NASA)。



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 マイクロケーサーの類別(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)

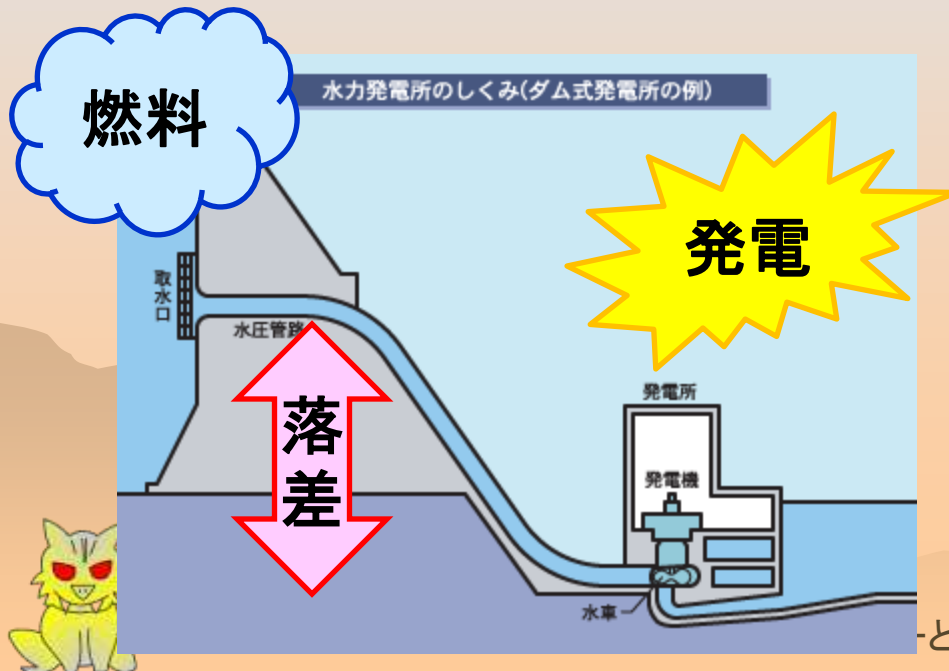




ブラックホールエンジン 宇宙の重力発電所

❁ 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. エネルギー発生



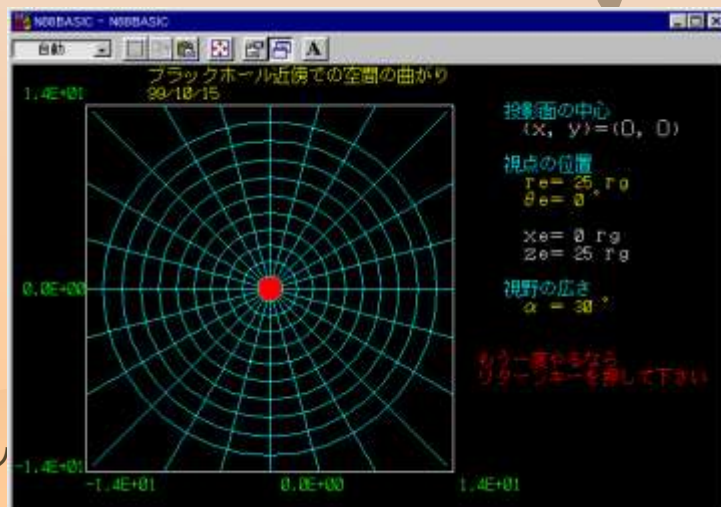
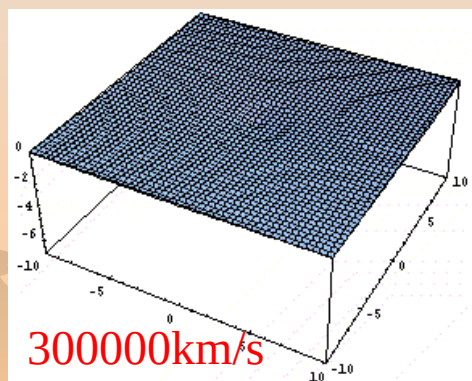
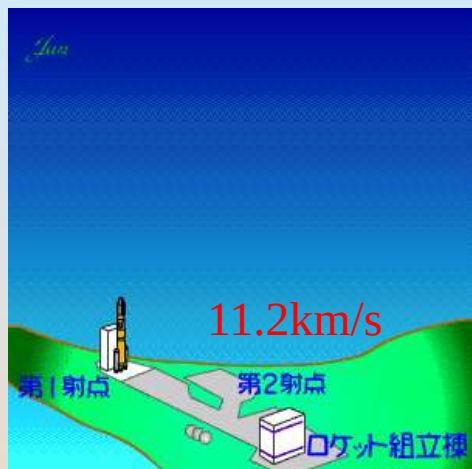
ブラックホール

● 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。





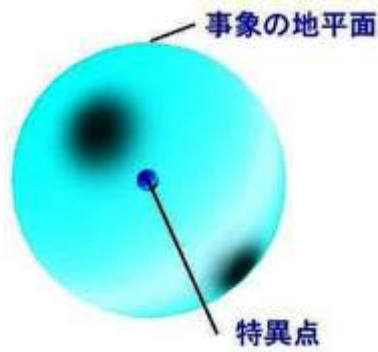
ブラックホールの構造

- ❁ 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



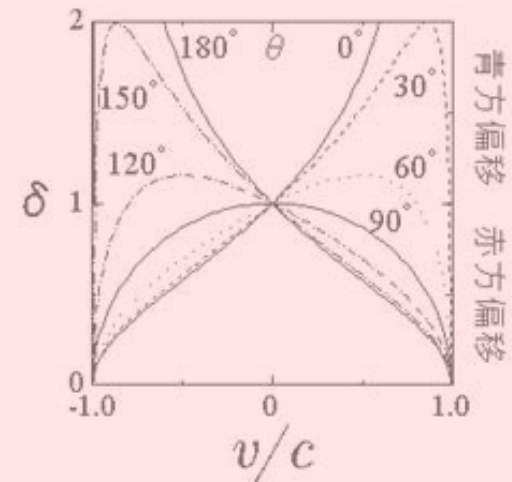
ドップラー効果



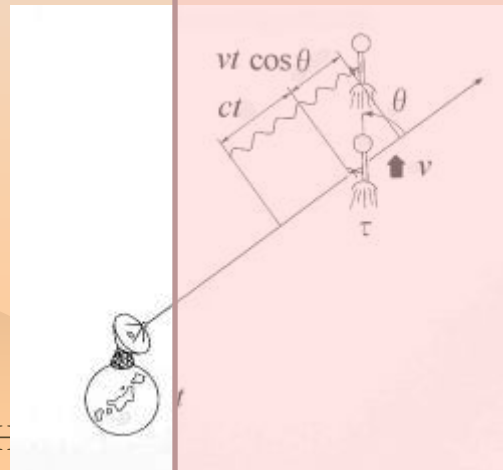
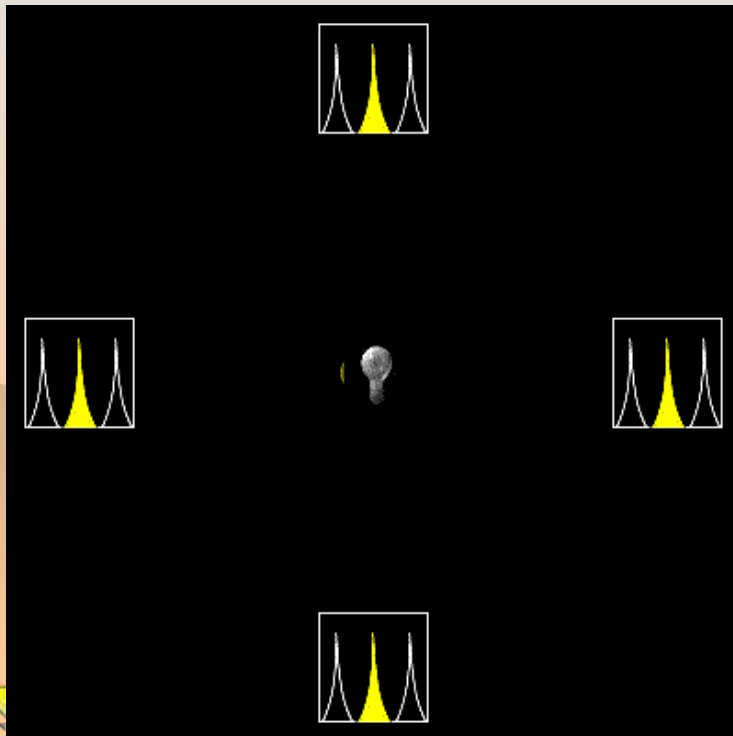
- 光源と観測者の間の相対運動によって、観測される光の波長(振動数)が実験室で測定されるものとずれる現象を光の**ドップラー効果**(Doppler effect)と呼ぶ。

ドップラー効果の度合いは、光源の速度 v と運動方向 θ 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 ν とともとの振動数 ν_0 の比率で定義されるドップラー因子 (Doppler factor) δ 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 θ 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 δ の値。



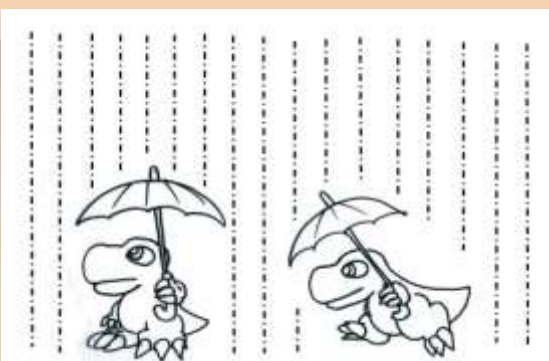
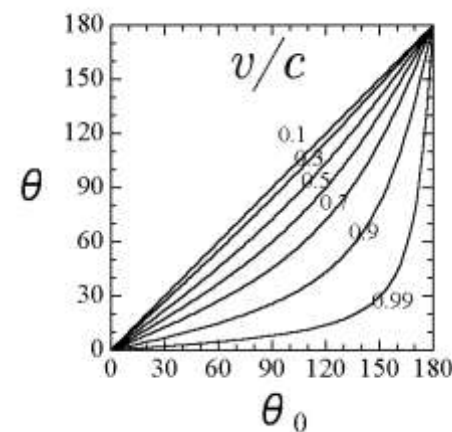


光行差

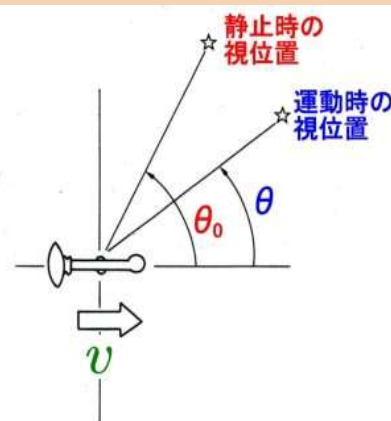
- 宇宙空間を高速で飛翔している宇宙船から、ある方向に見える天体を観測したとき、光の到来ベクトルは観測者の運動ベクトルの分だけずれてしまい、天体の見える方向は(本来の方向よりも)宇宙船の運動方向前方に少し移動して見える。このような、天体の視位置が宇宙船の進行方向前方に移動して見える現象を**光行差(aberration)**という。

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 θ_0 、運動しているときの視位置を θ 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。

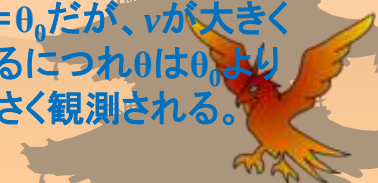
$$\cos \theta = \frac{\cos \theta_0 + \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c} \cos \theta_0}$$



Hシ



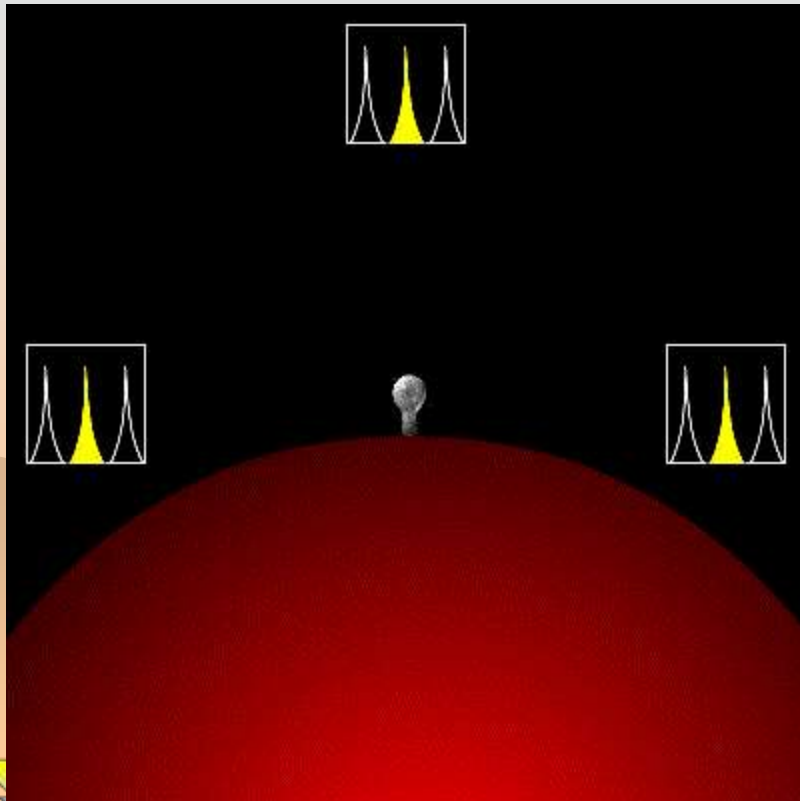
最初の到来方向 θ_0 と観測される到来方向 θ の関係。速度 v が0なら $\theta = \theta_0$ だが、 v が大きくなるにつれ θ は θ_0 より小さく観測される。



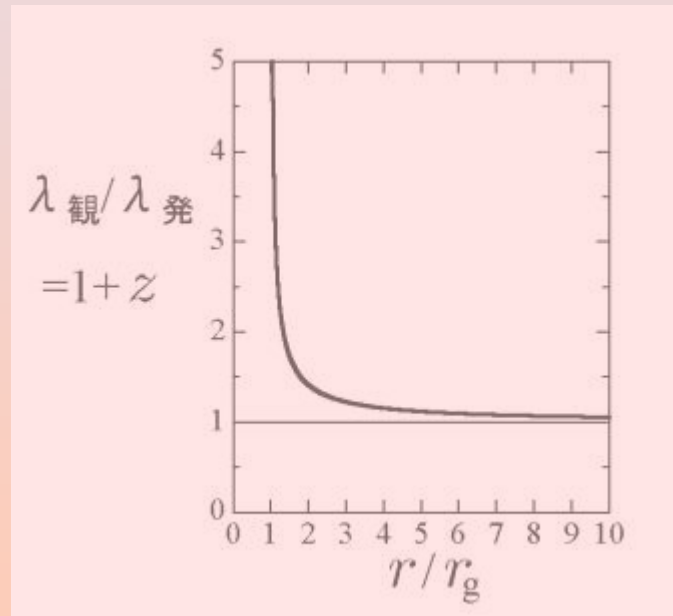
重力赤方偏移



- 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。

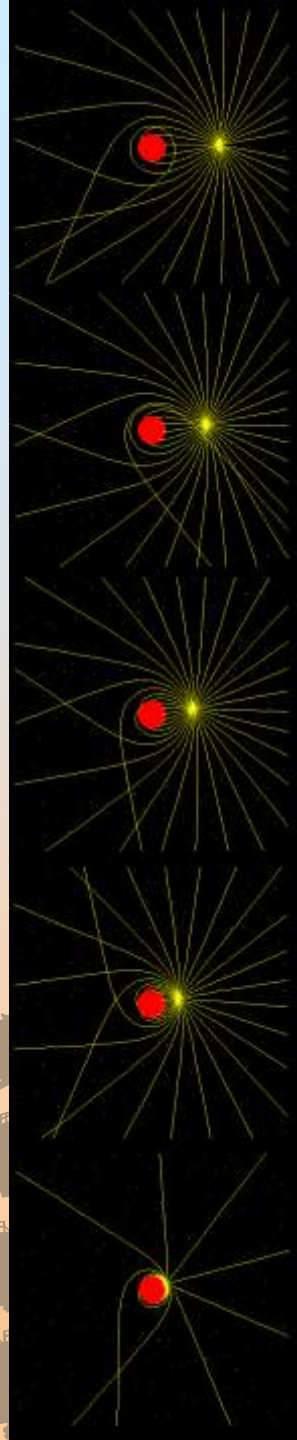
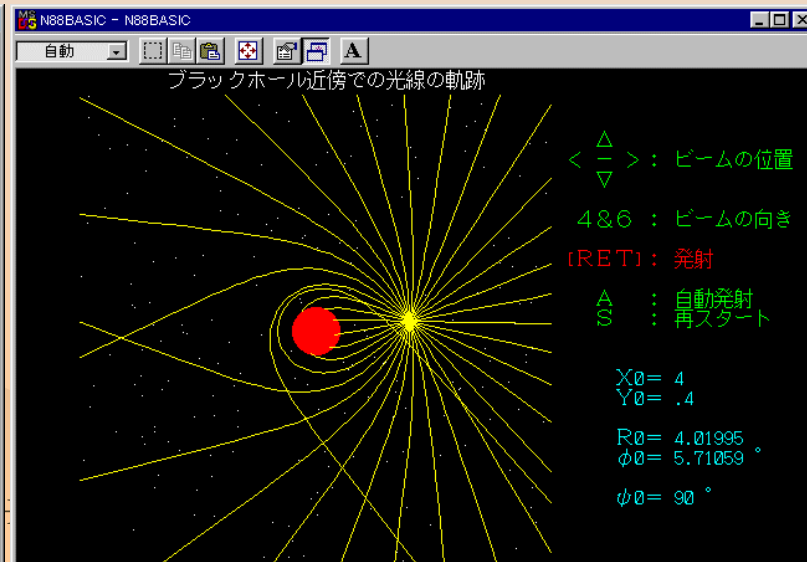
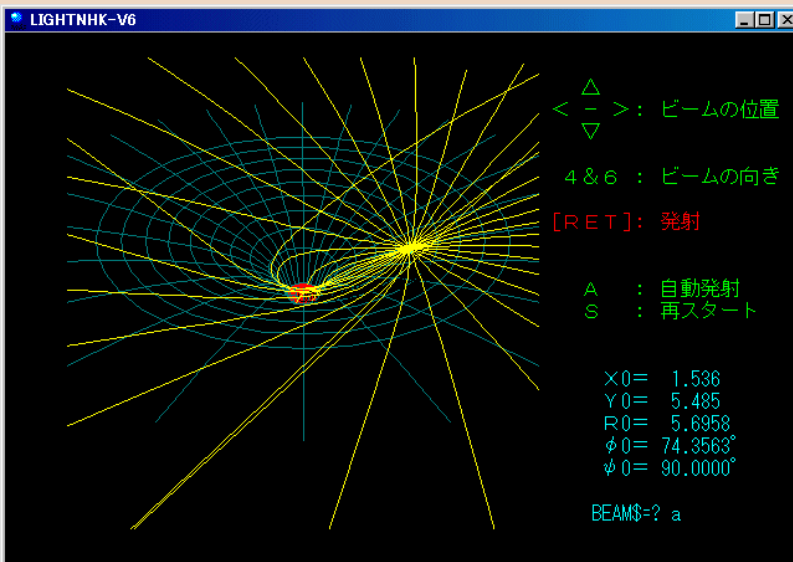
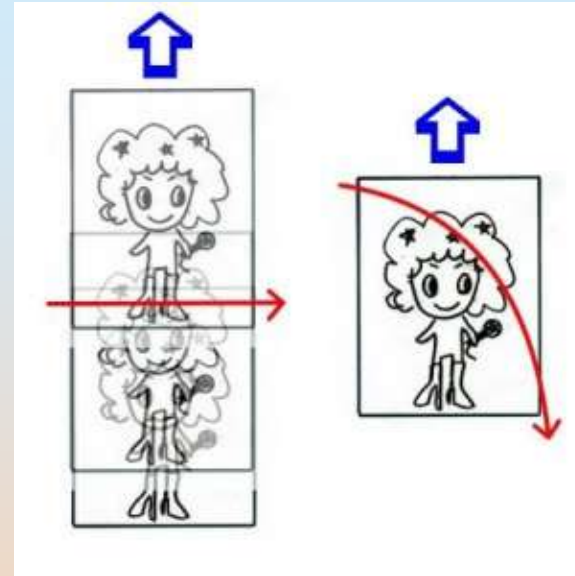


光線の曲がり

- 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。

- 等価原理

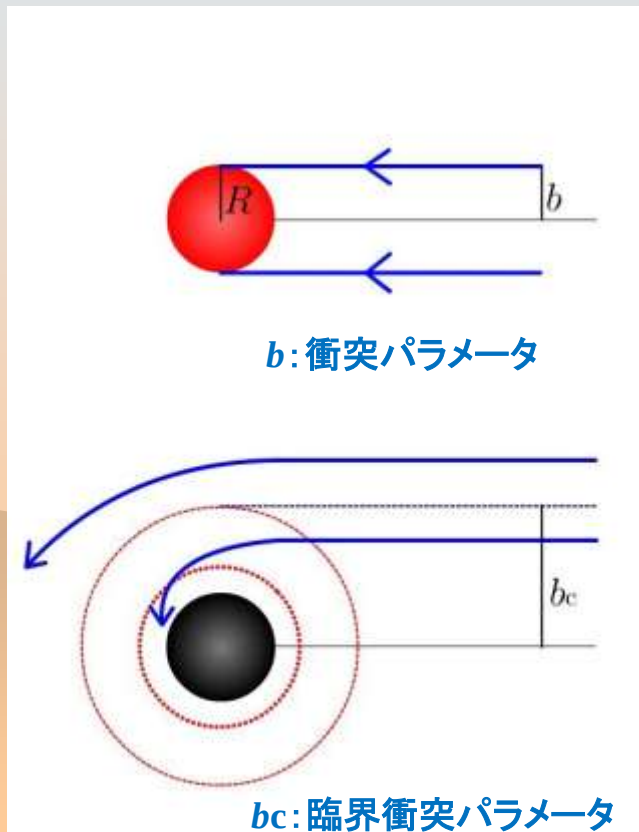
加速するエレベータの中では、光線は曲がって見える。



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見える。☆見た目が10割！



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、

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

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。

$$b_c \sim 2.6 r_g$$

ドーとBHシ

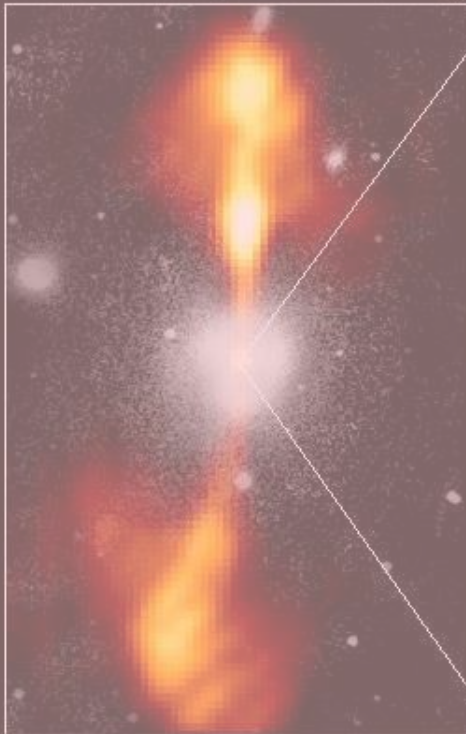


降着円盤

Core of Galaxy NGC 4261

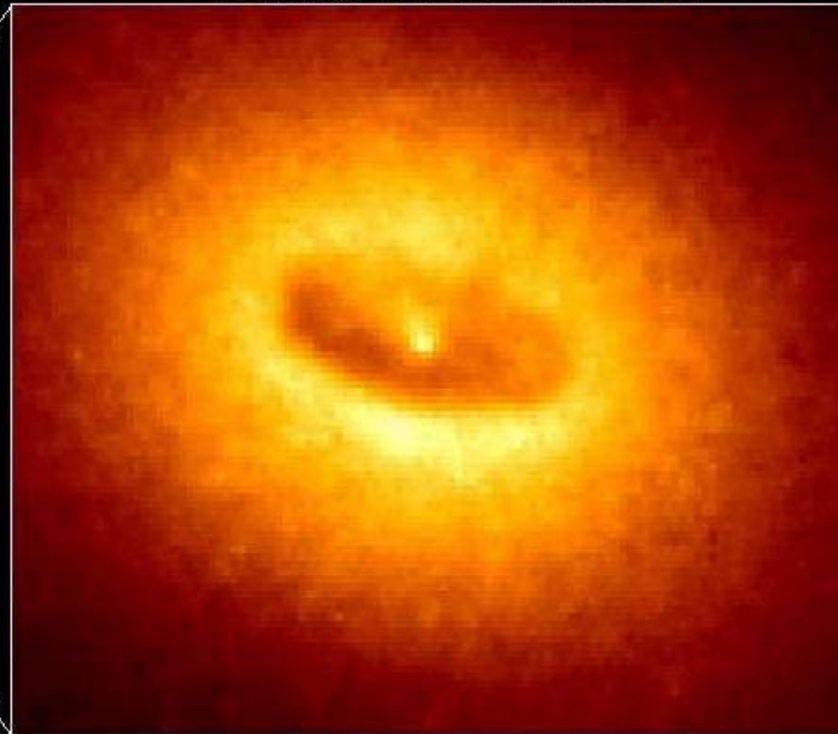
Hubble Space Telescope
Wide Field / Planetary Camera

Ground-Based Optical/Radio Image



380 Arc Seconds
88,000 LIGHTYEARS 88000光年

HST Image of a Gas and Dust Disk



1.7 Arc Seconds
400 LIGHTYEARS 400光年

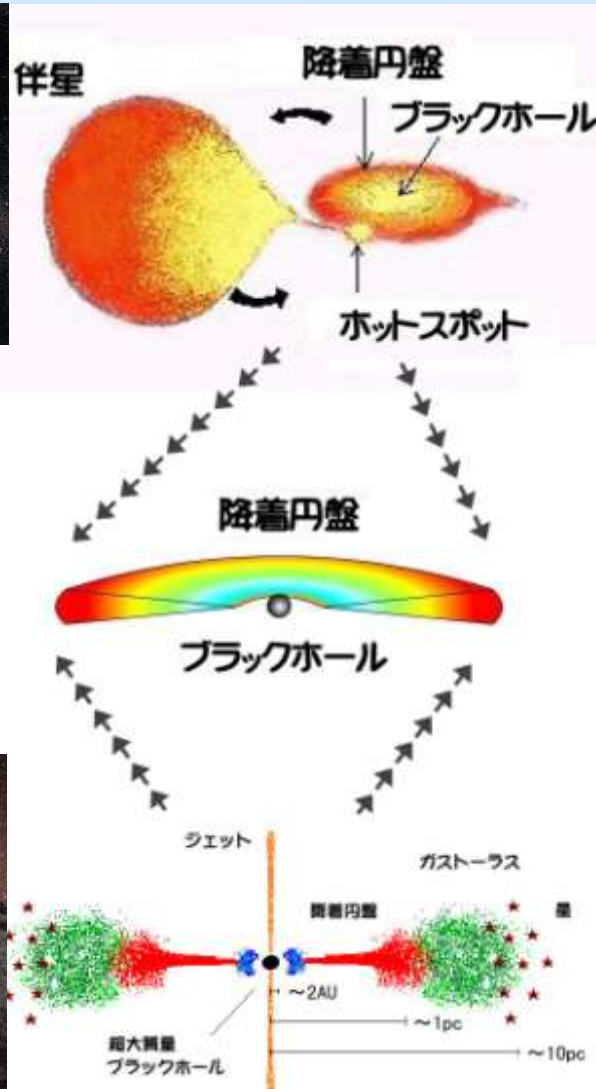
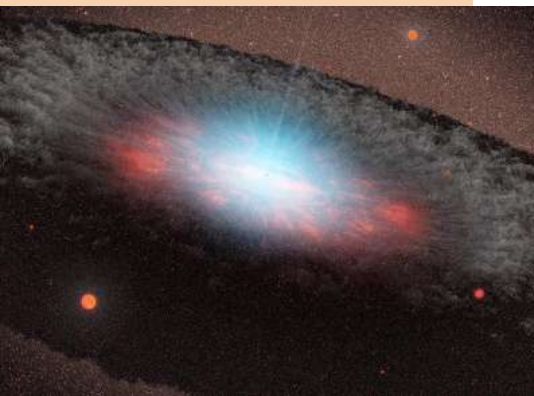
中心部の
拡大画像
可視光
主に星の
光

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



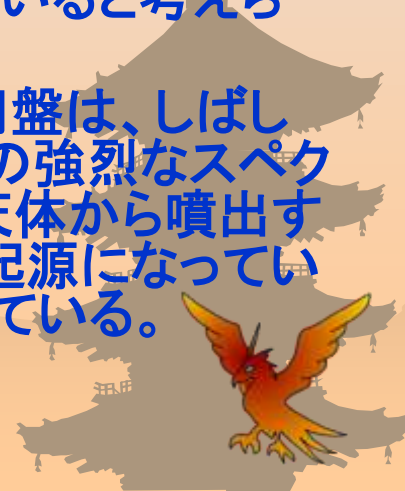
降着円盤

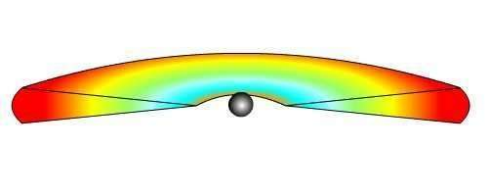


原始星・白色矮星・中性子星・ブラックホールさらに超巨大ブラックホールなど、重力天体に周囲から降り積もったガスによって、重力天体のまわりに形成された回転ガス円盤を**降着円盤 (accretion disk)**と呼ぶ。

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

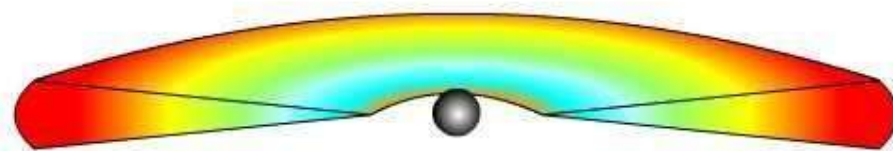
- ❁ 幾何学的に薄い: 平ら
- ❁ 光学的に厚い: 不透明

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)

$$r_{\text{in}} \cong r_{\text{ms}} = 3r_{\text{g}},$$



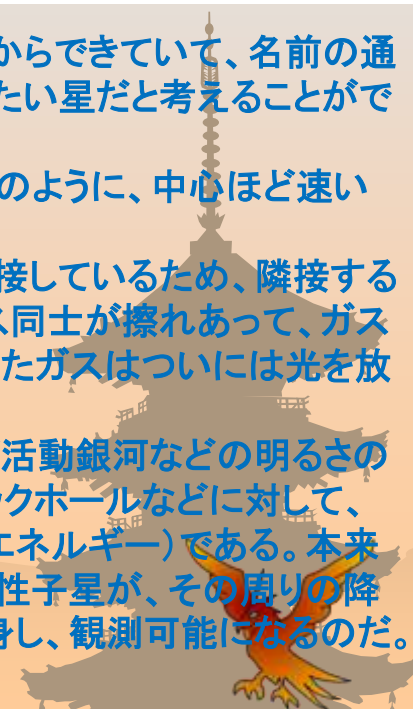
ブラックホール降着円盤の描像。
中心近傍ほど温度が高い。

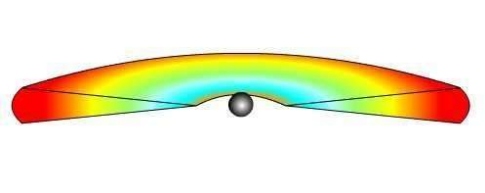
降着円盤は、一般に電離した水素ガスからできていて、名前の通り円盤状で不透明であり、直感的には平たい星だと考えることができる。

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。



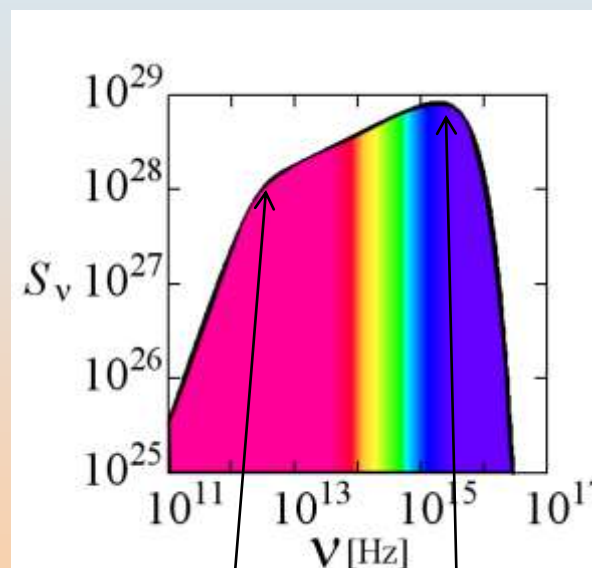
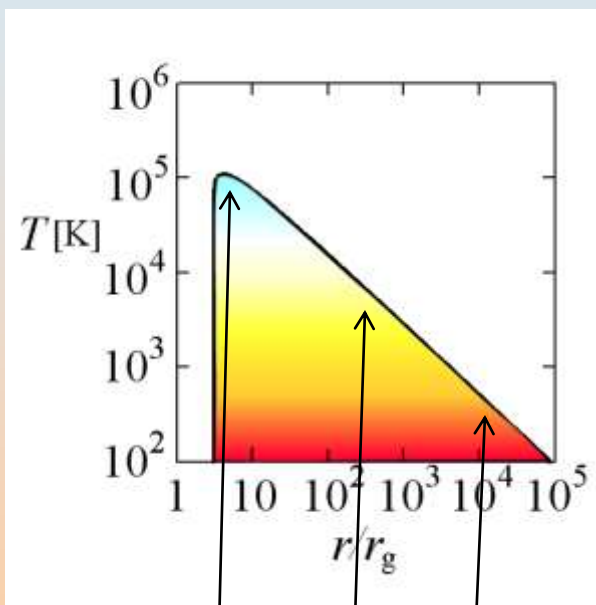


標準降着円盤

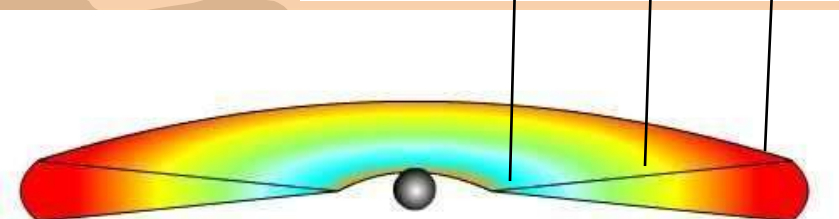
光の出方 (1億太陽質量, 1太陽質量/年)

❁ 温度分布 T

❁ 放射スペクトル νS_ν

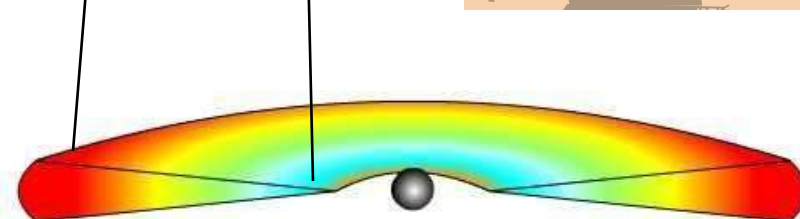


降着円盤の中では、ガス同士が互いに接しているため、隣接するガス層の間で摩擦が働く。その結果、ガス同士が擦れあって、ガスは激しく加熱される。さらに、高温になったガスはついには光を放射して輝き始める。



内縁

プロト星とBHジェ

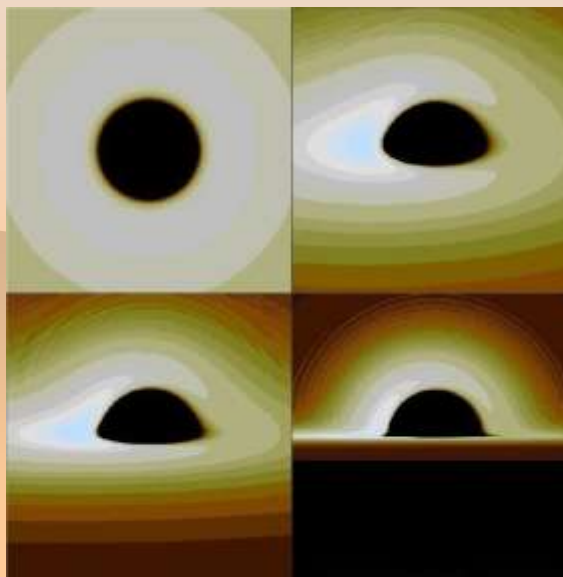
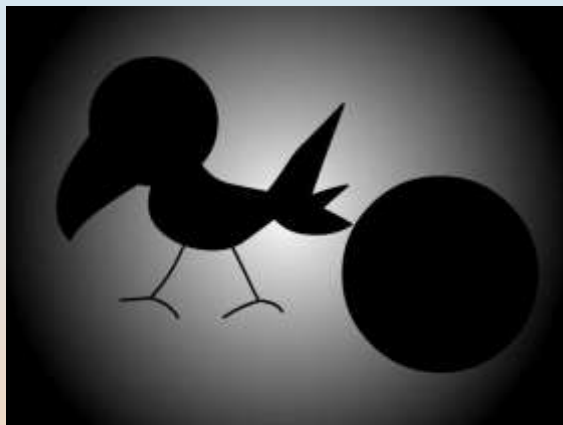


ブラックホールシャドー

KaZuChA



ブラックホールシャドー 闇夜のカラスを視る方法



- ✿ 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。

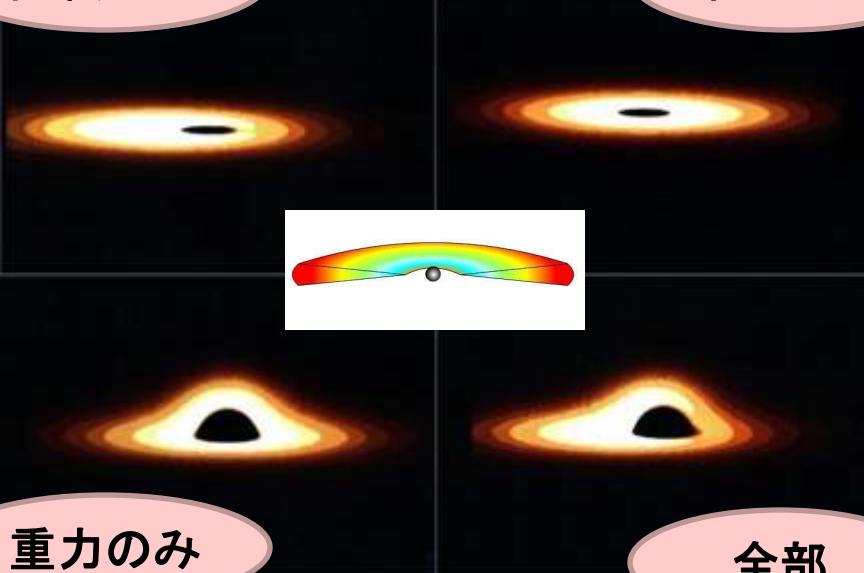




歪むシャドー

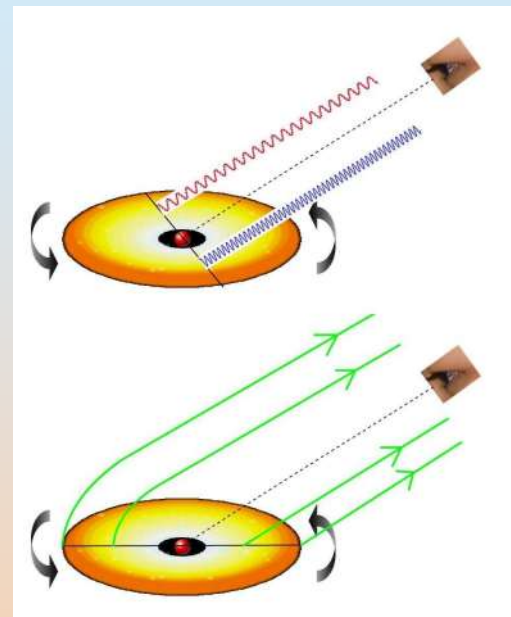
回転のみ

何ものなし



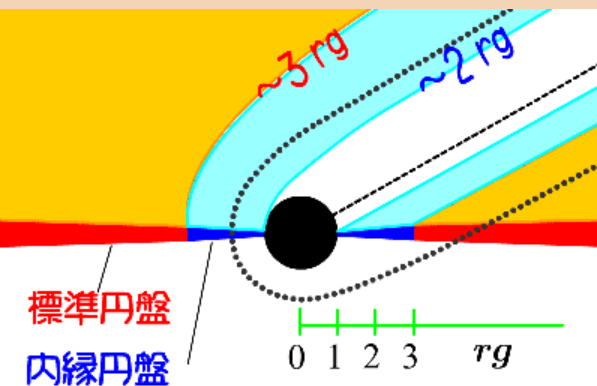
重力のみ

全部



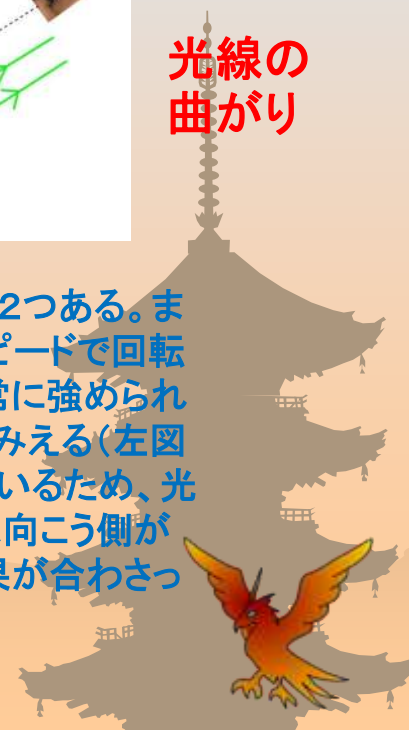
ドップラー効果

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。

BHシャドーとBHジェット

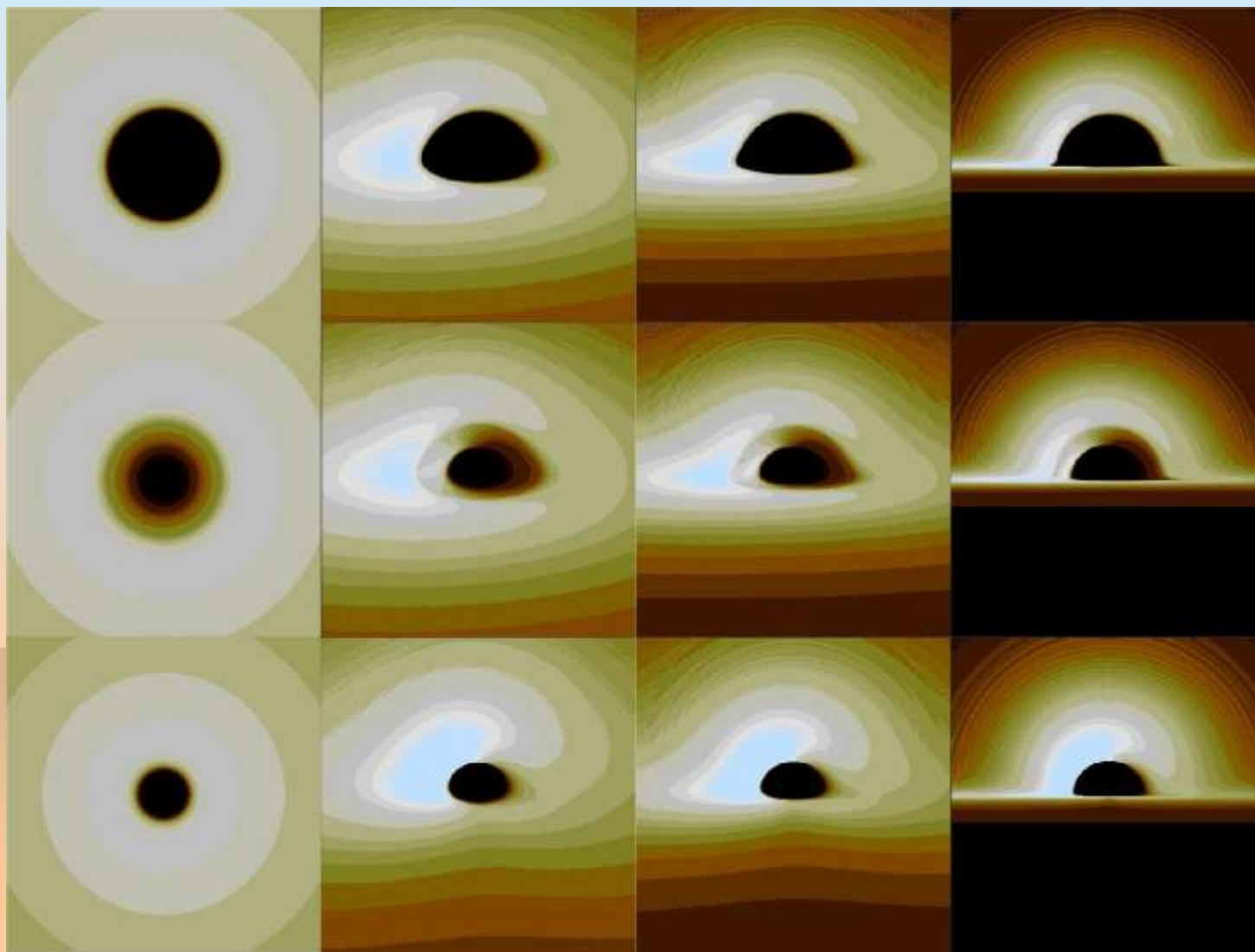




シャドーあれこれ



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



回転していないブラックホール



最大回転するブラックホール

(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



ブラックホールジェット



宇宙ジェット

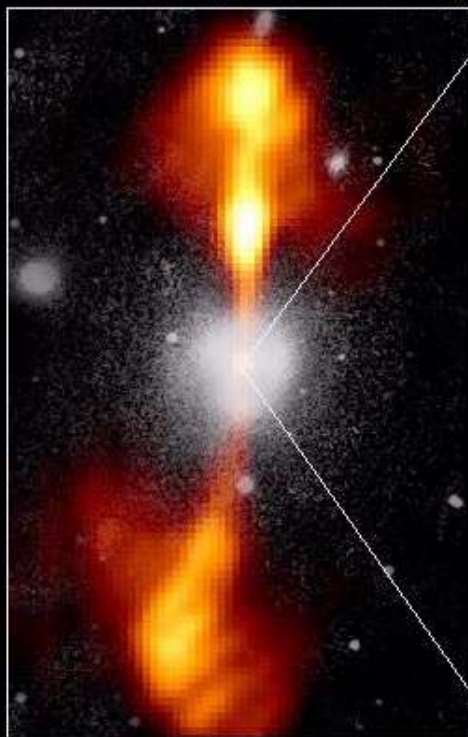
Core of Galaxy NGC 4261

Hubble Space Telescope
Wide Field / Planetary Camera

黄色～赤
電波画像
高温プラズマ
ジェット

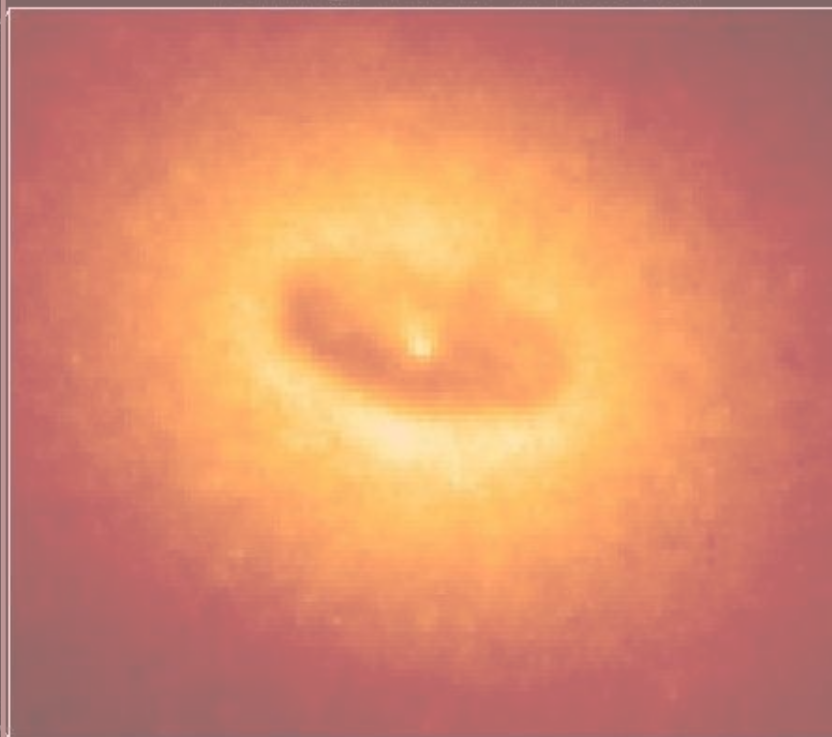
白
可視光画像
星の光
楕円銀河

Ground-Based Optical/Radio Image



380 Arc Seconds
88,000 LIGHT-YEARS 88000光年

HST Image of a Gas and Dust Disk



1.7 Arc Seconds
400 LIGHT-YEARS 400光年

中心部の
拡大画像
可視光
主に星の
光



亜光速宇宙ジェット

宇宙ジェット

(astrophysical jets)

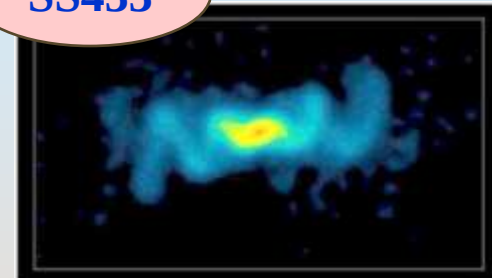
中心の天体から双方向に
吹き出す細く絞られたプ
ラズマの流れ

- ✿ (原始星)
- ✿ 特異星SS 433
- ✿ マイクロクェーサー
- ✿ 活動銀河
- ✿ クェーサー
- ✿ ガンマ線バースト

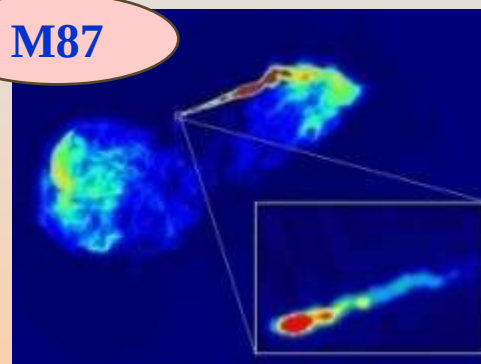
YSO



SS433



M87



GRS1915



3C273



GRB





ブラックホールジェット

胃袋は無限だが喉元は有限

BHの胃袋は底なし

BHの喉元は有限

吸い込みきれないものを
吐き出す→ジェット

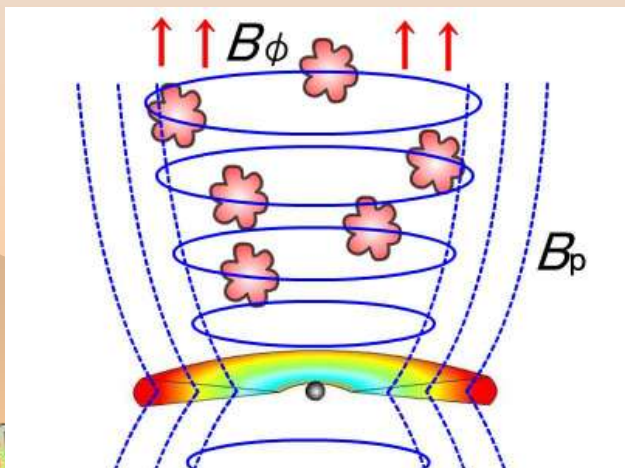
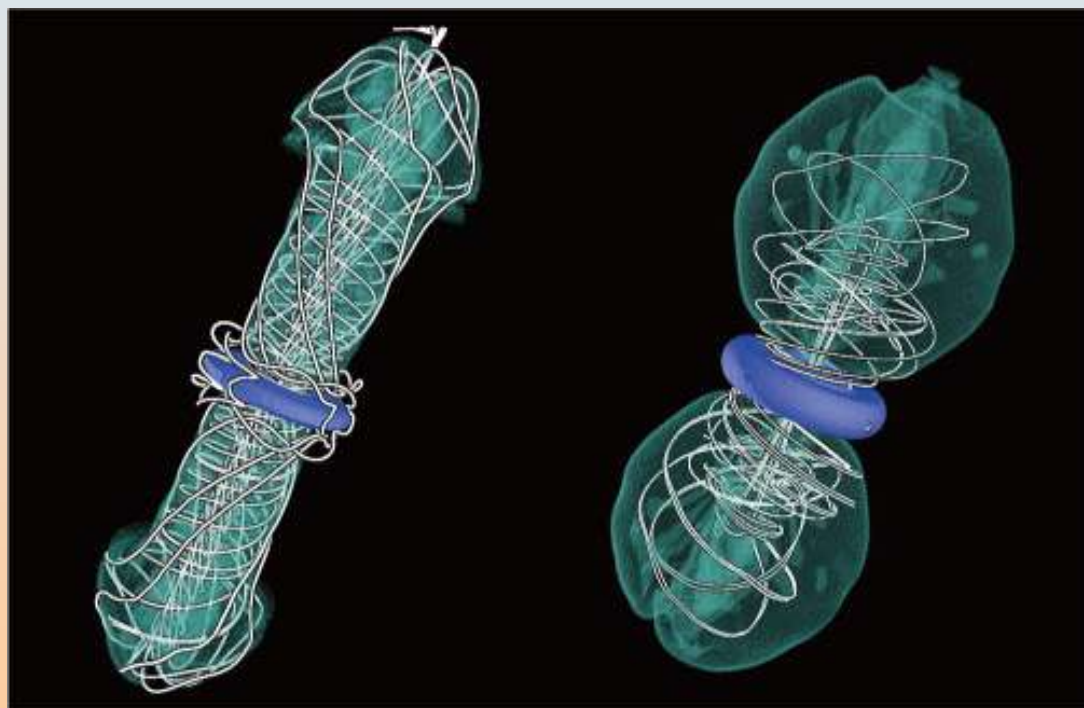
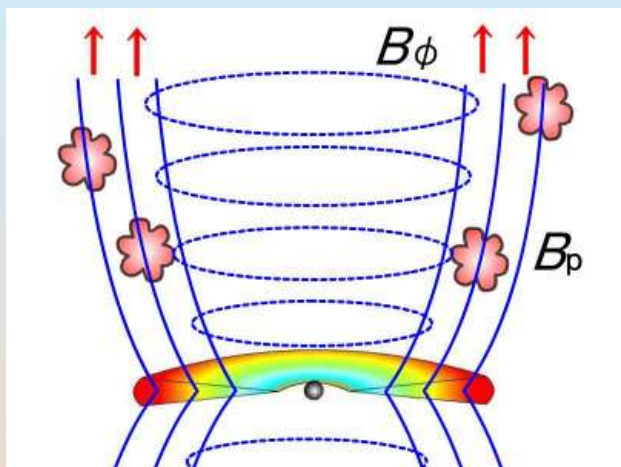
- ✿ ブラックホールは物質を吸い込み光輝くだけではない。意外なことに、ブラックホール近傍からは、高温プラズマの噴流が吹き出している。
- ✿ 中心の天体から、天体をはさんで双方向に吹き出す細く絞られたプラズマの流れを、**宇宙ジェット (astrophysical jet)** と呼ぶ。
- ✿ 宇宙ジェットや降着円盤は、重力天体の周辺で生じる動的な段階に伴って現れる**普遍的**な現象だと思われるようになってきている。





ジェットの作り方1 磁場

❁ 磁場の力で駆動する



Y. Kato

2008/8/26

BHシャドーとBHジェット

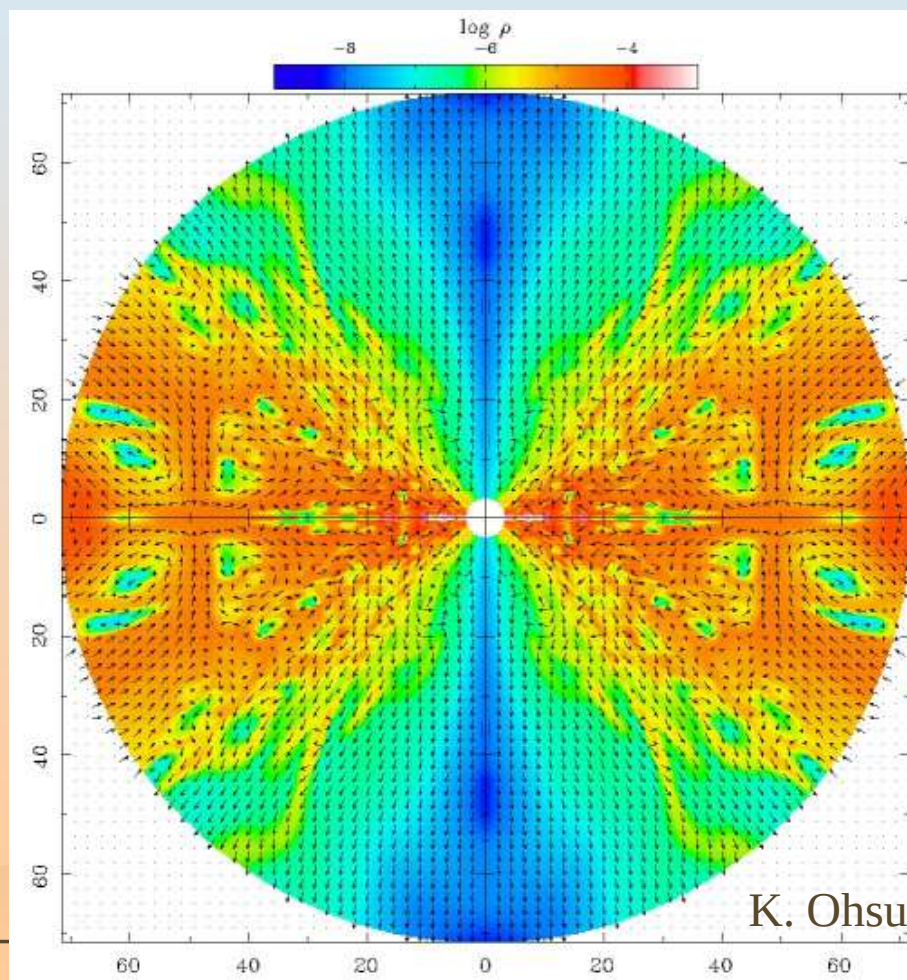
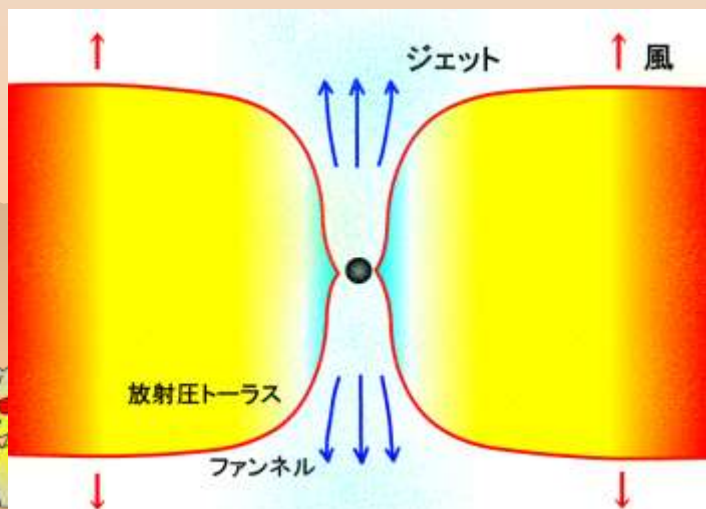
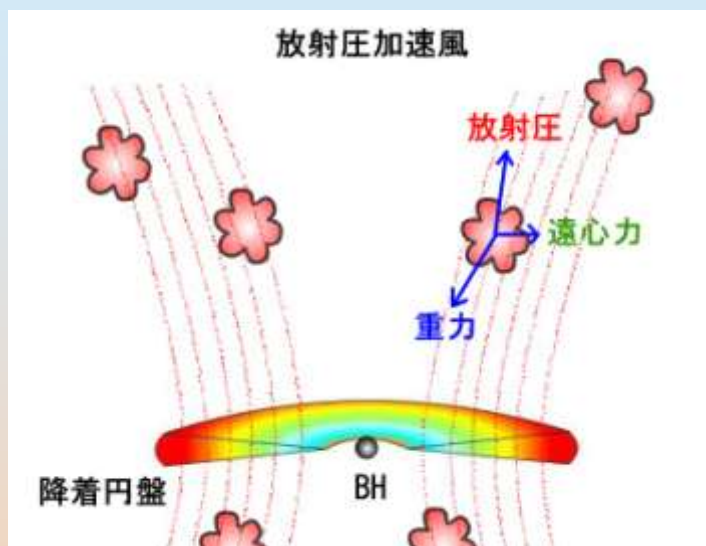
73





ジェットの作り方2 放射

❁ 光の圧力で駆動する



K. Ohsuga



天体は“見た目”が10割

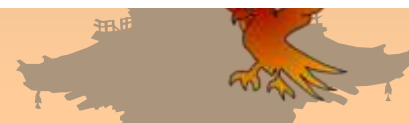
❁ ブラックホールジェット

- 不透明のとき
- 見かけ上の“**光球(photosphere)**”

❁ 光の伝播への相対論的効果

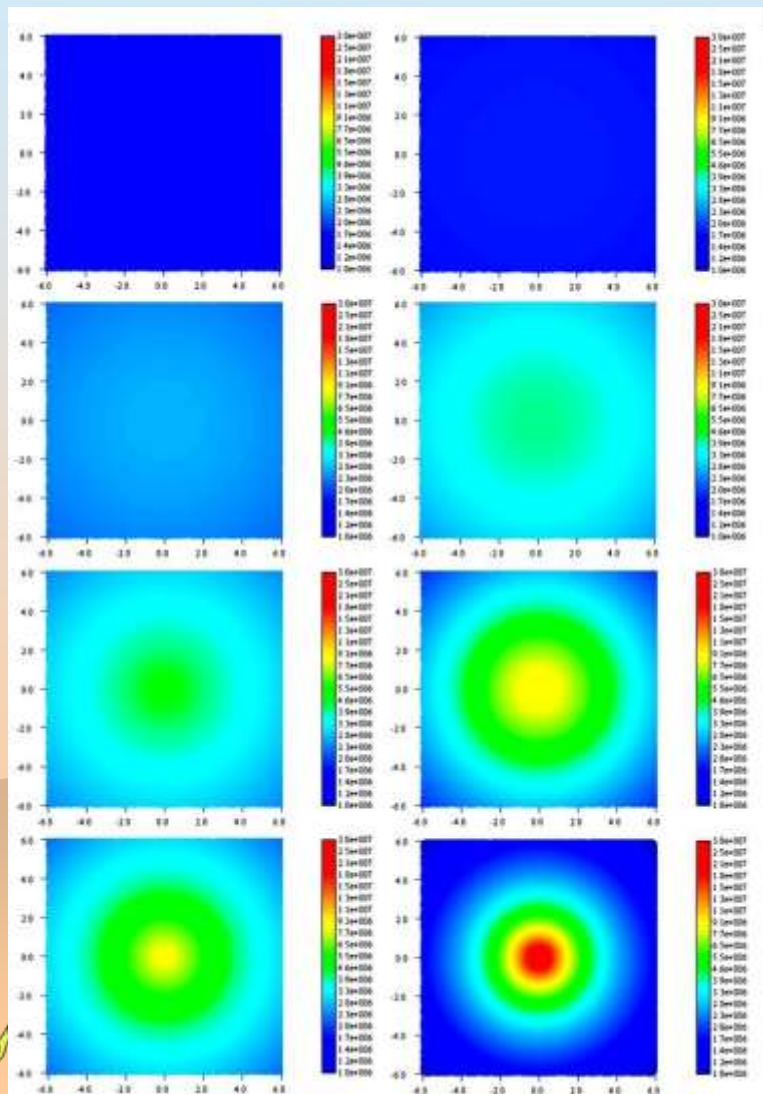
- 光行差
- **ドップラー効果**
- 重力赤方偏移
- 光線の彎曲

ドップラーブースト。亜光速で吹き出すプラズマジェットを正面から観測すると、非常に明るく観測される。





ブラックホールジェットの“見た目”

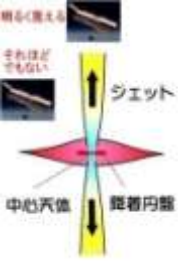


光を放射している天体プラズマが観測者に対して運動していると、ドップラー効果などのために、観測される明るさや見かけの温度が変化して見える。

たとえば、ブラックホール近傍から吹き出したプラズマガス—宇宙ジェット—を正面方向から観測すると、ジェットのガスは観測者に対して高速で近づいてくる。このとき、ジェットから放射される光は、ドップラー効果によって波長が短くなるとともにエネルギーが高くなる。また同時に、光行差のために光は前方方向へ集束される。

これらの両方の結果が合わさって、ジェットの観測される明るさは本来の明るさよりも非常に明るくなる。このような相対論的効果を**ドップラーブースト (Doppler boost)**と呼ぶことがある。





ガス体や雲の“表面”

- 晴れた日には数km先まで見えるが霽が濃いときには1m先ぐらいまでしか見えないこともある。星間空間では何万光年も彼方の星が見えるが、太陽内部では0.5cm先ぐらいまでしか見えない。

- ガス体は半透明で、温度などの状況によって見える深さ(場所)も違う。



雨の日



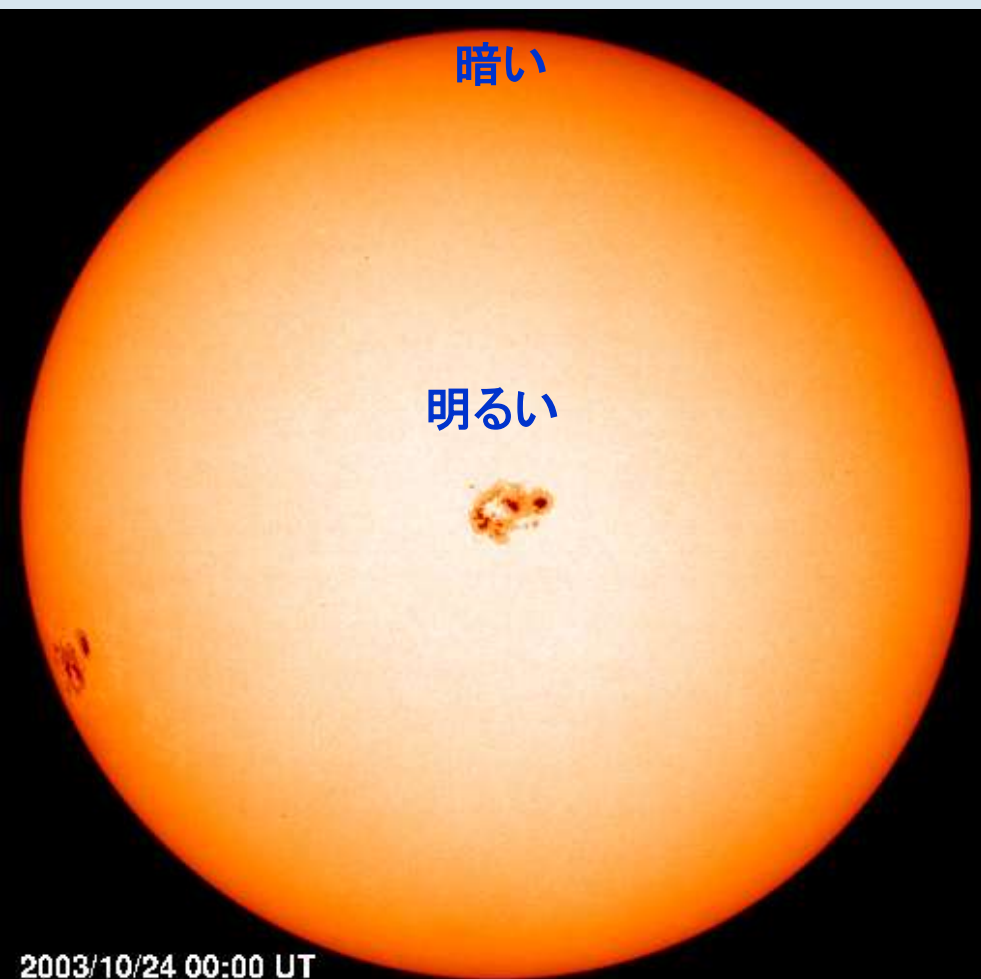
黄砂の日



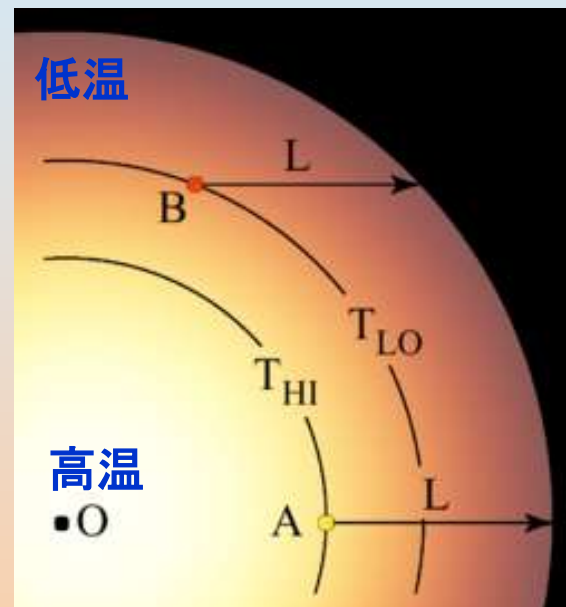


周縁減光効果

❁ 太陽の正面写真



❁ 太陽の断面図



周縁
浅い場所
低温
暗い

中央部
深い場所
高温
明るい

❁ どこを視ているのか





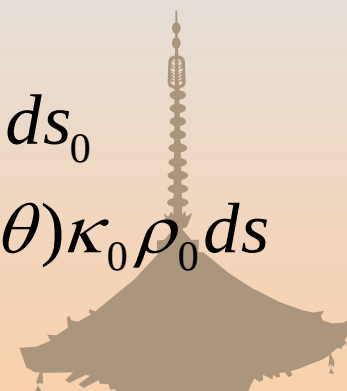
ローレンツ＝フィッツジェラルド短縮



- ❁ 光路長 ds や λ は、ローレンツ＝フィッツジェラルド短縮で変わる
- ❁ 光学的厚み $d\tau$ は、相対論的不変量
- ❁ 亜光速プラズマ流では、下流方向に向かって光学的厚み τ は見かけ上は小さくなる。上流へは大きくなる。

$$\lambda = \frac{1}{\gamma(1 - \beta \cos \theta)} \lambda_0$$

$$\begin{aligned} d\tau &= d\tau_0 = \kappa_0 \rho_0 ds_0 \\ &= \gamma(1 - \beta \cos \theta) \kappa_0 \rho_0 ds \end{aligned}$$





ブラックホール風のモデル

❁ 仮定

- 定常
- 球対称 (R)
- 重力なし
- 速度一定 ($v = c\beta = \text{const}$)
- 断熱膨張 ($T \propto \rho^{\Gamma-1}$)

❁ 密度分布と温度分布

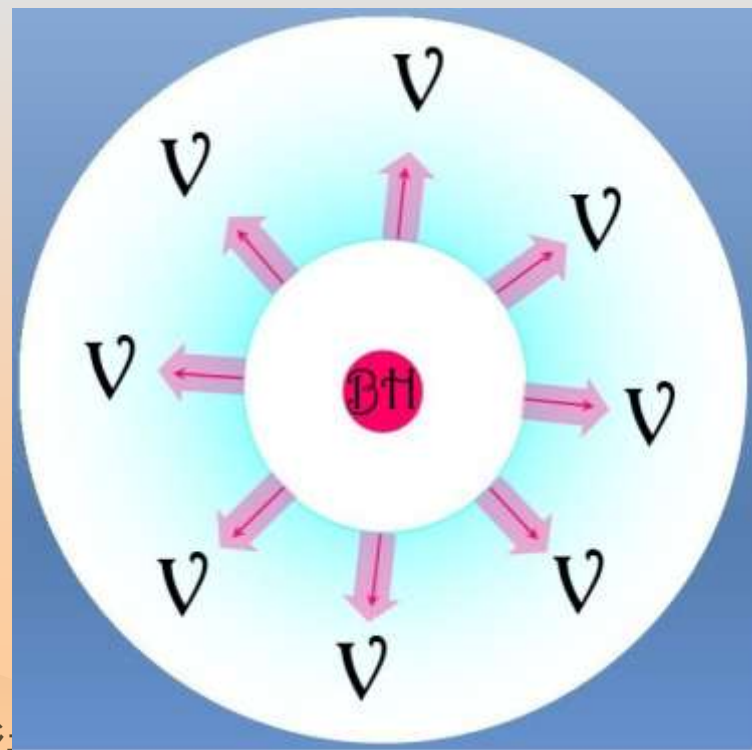
$$\rho_0 = \frac{\dot{M}_0}{4\pi\gamma R^2} \quad \frac{T_0}{T_c} = \left(\frac{R}{R_c} \right)^{-2/3}$$



2008/8/26

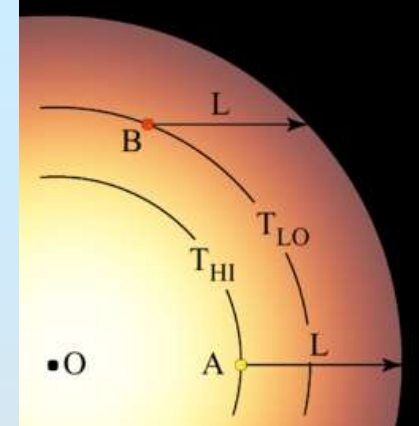
BHシャドーとBHジェット

- ❁ 中心(ブラックホール)から周囲の四方発表へ球状に風が吹いている

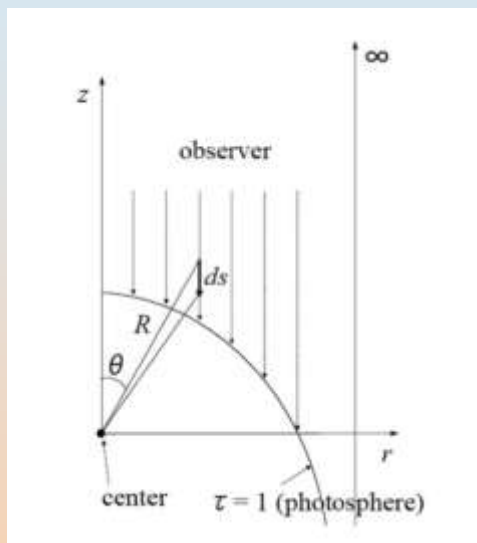




見かけの光球面

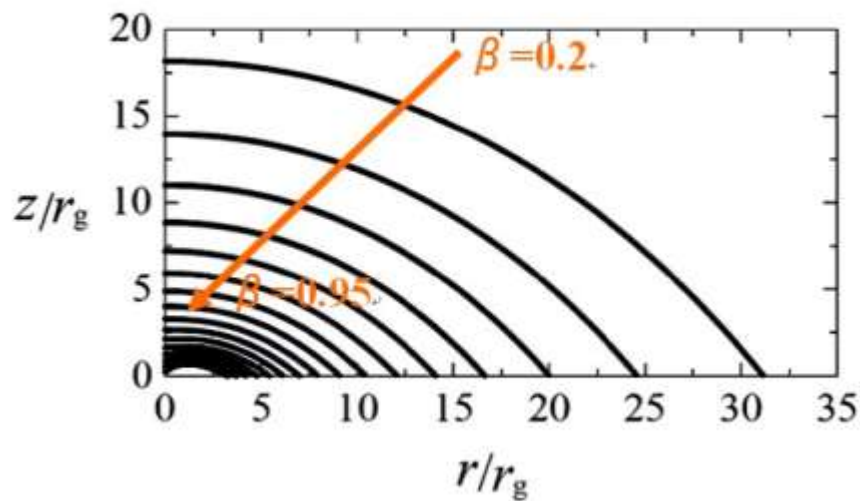


- 観測者は $z=\infty$ にいる



$$\beta = v/c$$

- 光球(見た目の表面)の位置



- β 小: 周縁減光効果
- β 大: 光球面収縮
- β 大($>2/3$): 中央で凹に

見かけの光球面の形状。速度は β が0.2から0.95まで0.05ずつ増えている。





見かけの温度分布と光度

✿ 見かけ上の光球面＝
最終散乱面

✿ 仮定

– 共動系で黒体放射

✿ 観測される温度

$$T_{\text{obs}} = \frac{1}{1+z} T_0 = \frac{1}{\gamma(1-\beta \cos \theta)} T_0$$

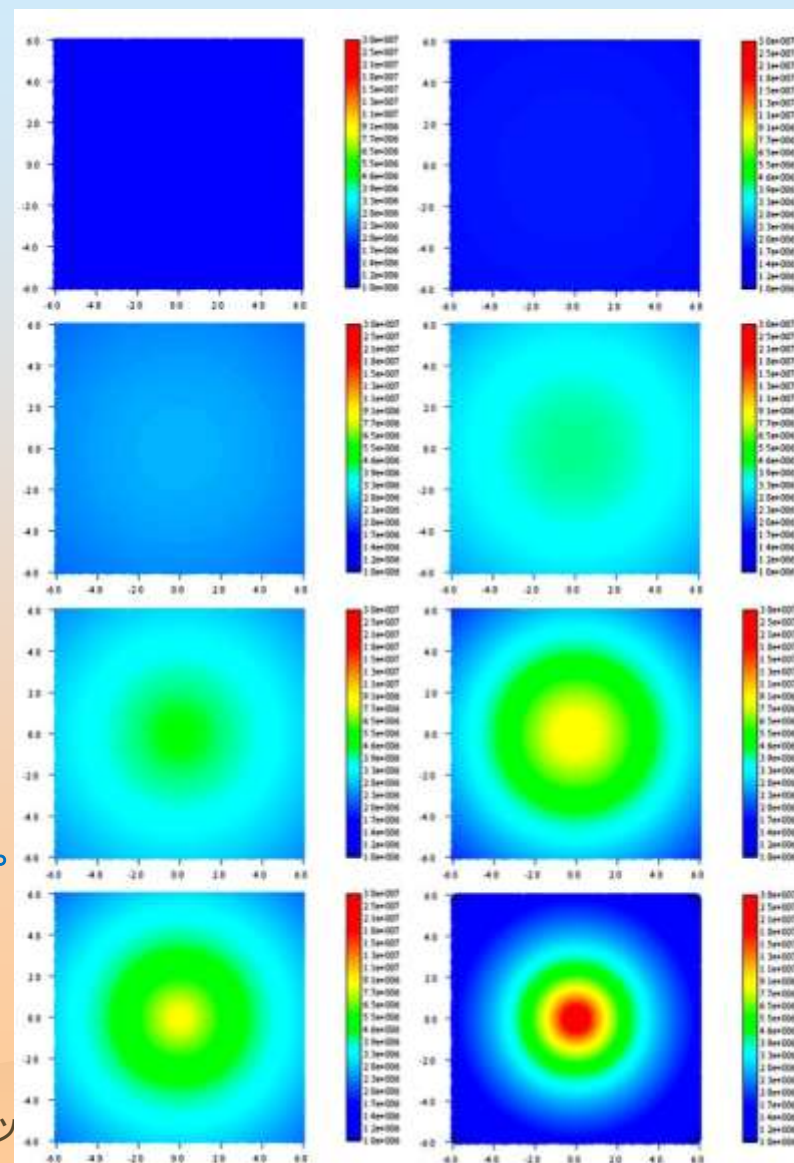
✿ パラメータ

– 10^7 太陽質量

– 中心温度 10^7 K

無限大の観測者から
見た光球の温度分布。
左列は共動系での、
右列は静止系での温
度分布。風の速度 β
は上から 0.2, 0.4, 0.6,
0.8 である。

BHシャドーとBHジェツ

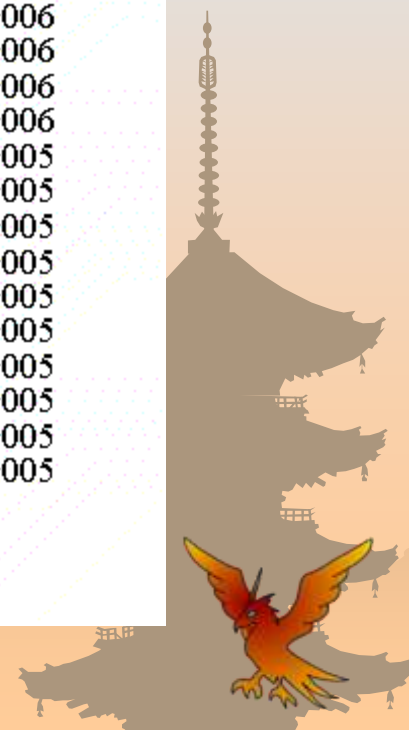
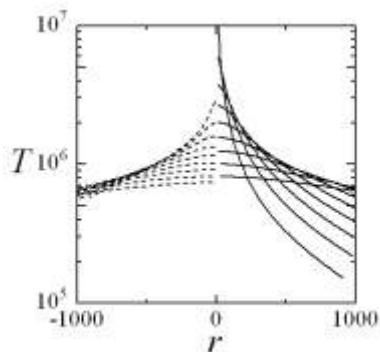
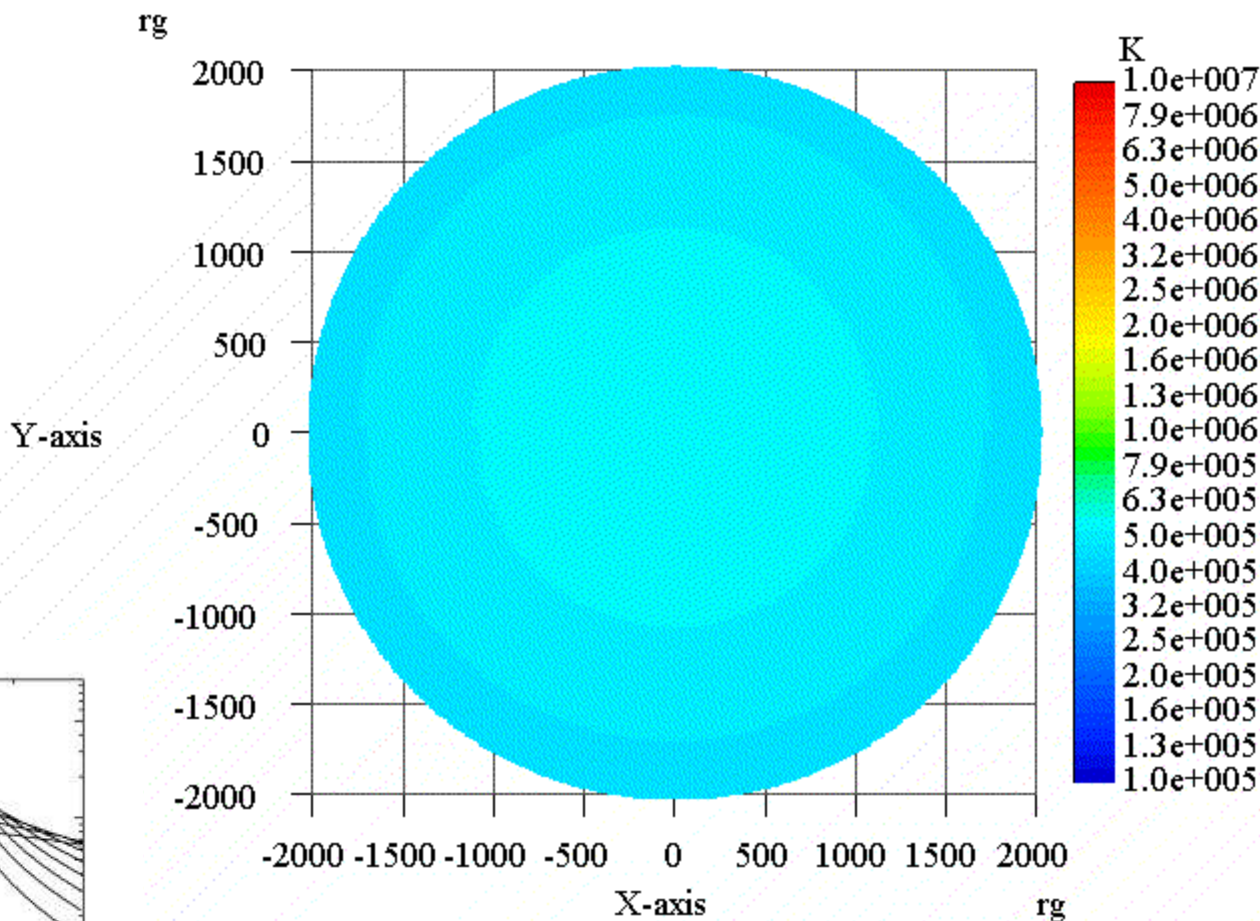


2008/8/26



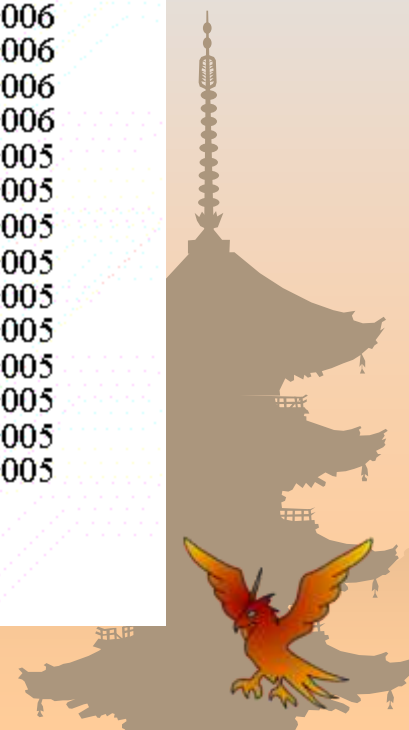
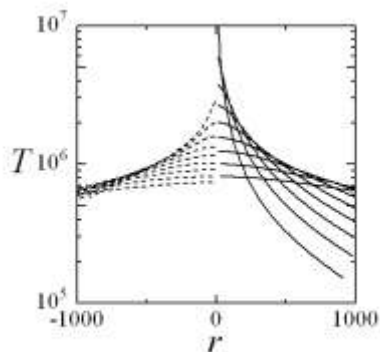
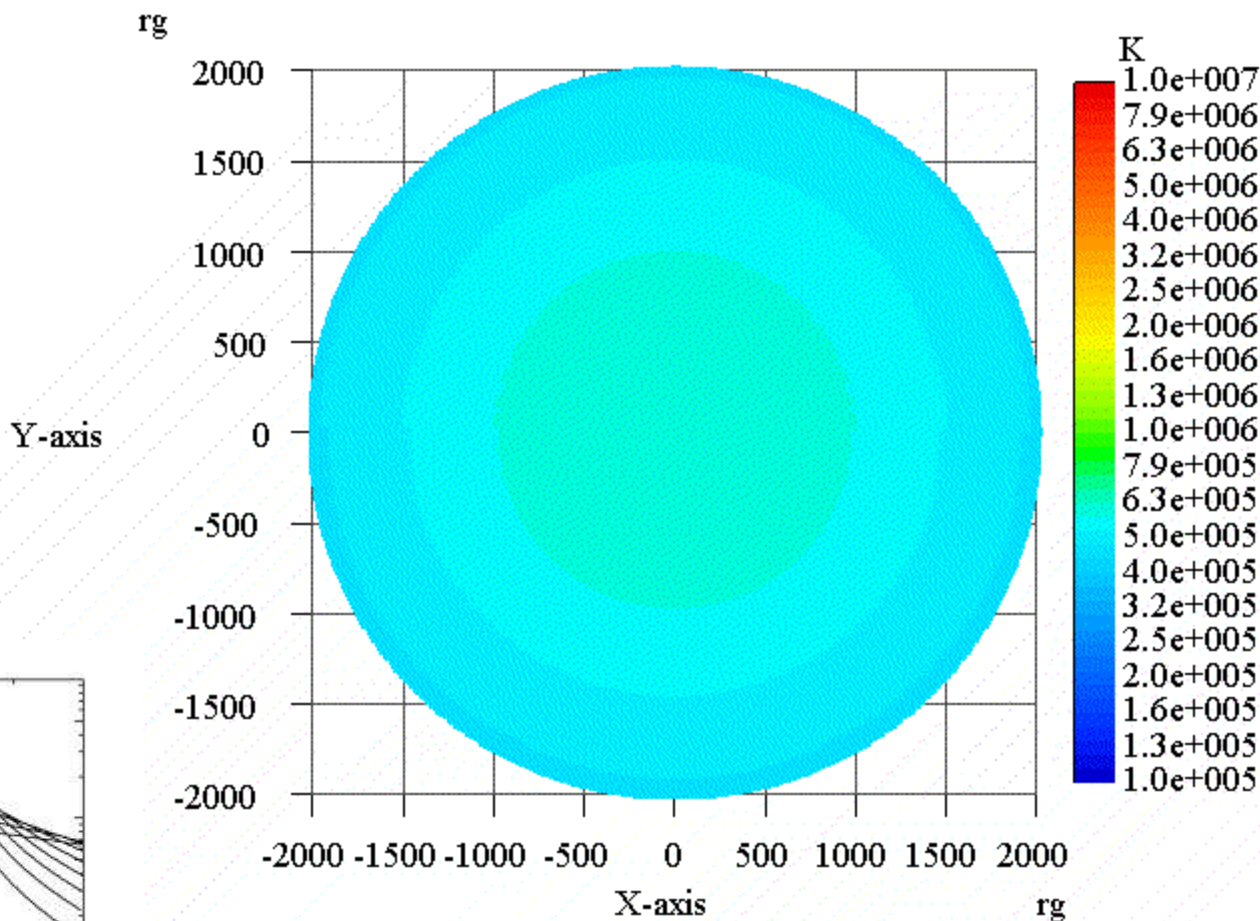


ジェットが加速すると！ ジェット共動系での見え方





ジェットが加速すると！ 観測者静止系での見え方





ブラックホールジェット まとめ



- ❁ 何でも吸い込むはずのブラックホール(近傍)から、高エネルギープラズマが吹き出す
- ❁ ジェットの見え方によって、ブラックホールエンジンの効率がわかる
- ❁ ジェットの見え方によって、ジェットの根元のブラックホール近傍領域の様子がわかる





ブラックホールシャドー ブラックホールジェット

- アインシュタインの遺した科学遺産！
- 遺産を食い潰しているようにみえる
- 使えば使うほど、遺産も増殖する
- 使いたい放題！
- 発掘されていないお宝だらけ！？
- 大阪教育大学で、一緒に発掘しよう♪

