

七つ星のブラックホールジェット





宇宙ジェット現象

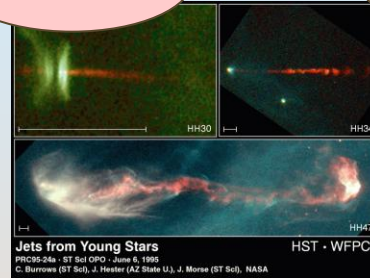
宇宙ジェット (astrophysical jets)

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

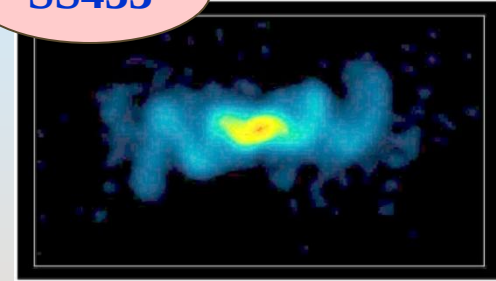
- ✿ (YSO)
- ✿ (CVs, SSXSs)
- ✿ Crab pulsar
- ✿ SS 433
- ✿ microquasar
- ✿ AGN
- ✿ quasar
- ✿ gamma-ray burst



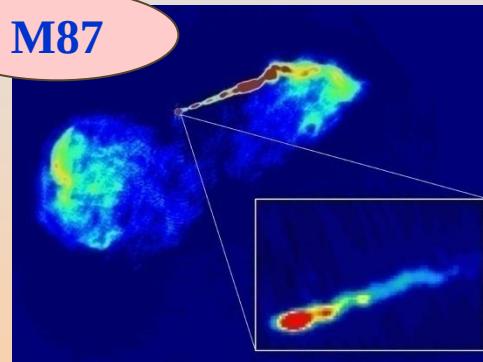
YSO



SS433



M87



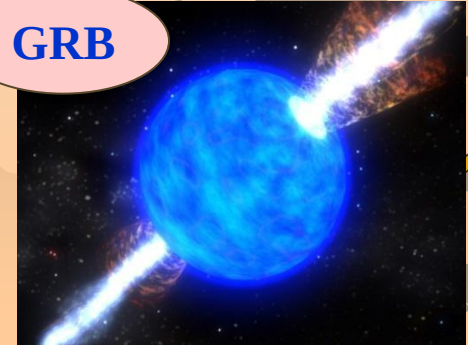
GRS1915



3C273



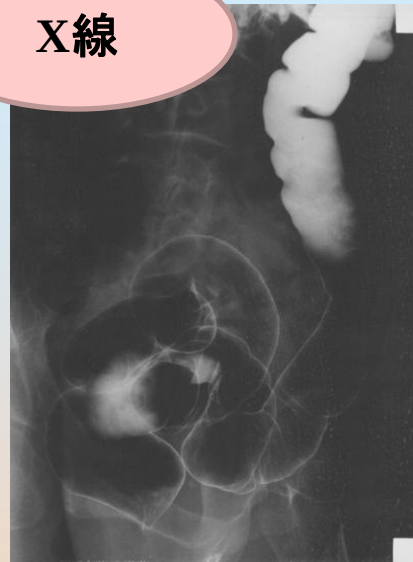
GRB





光のスペクトル

X線



可視光



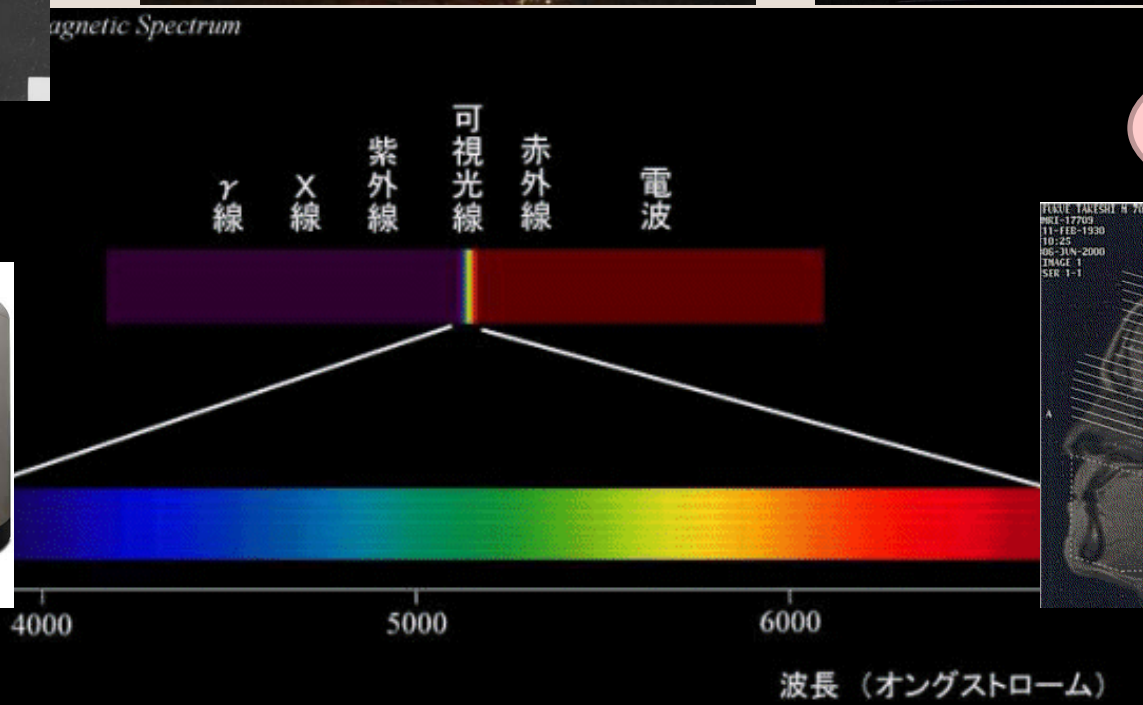
赤外線



ガンマ線



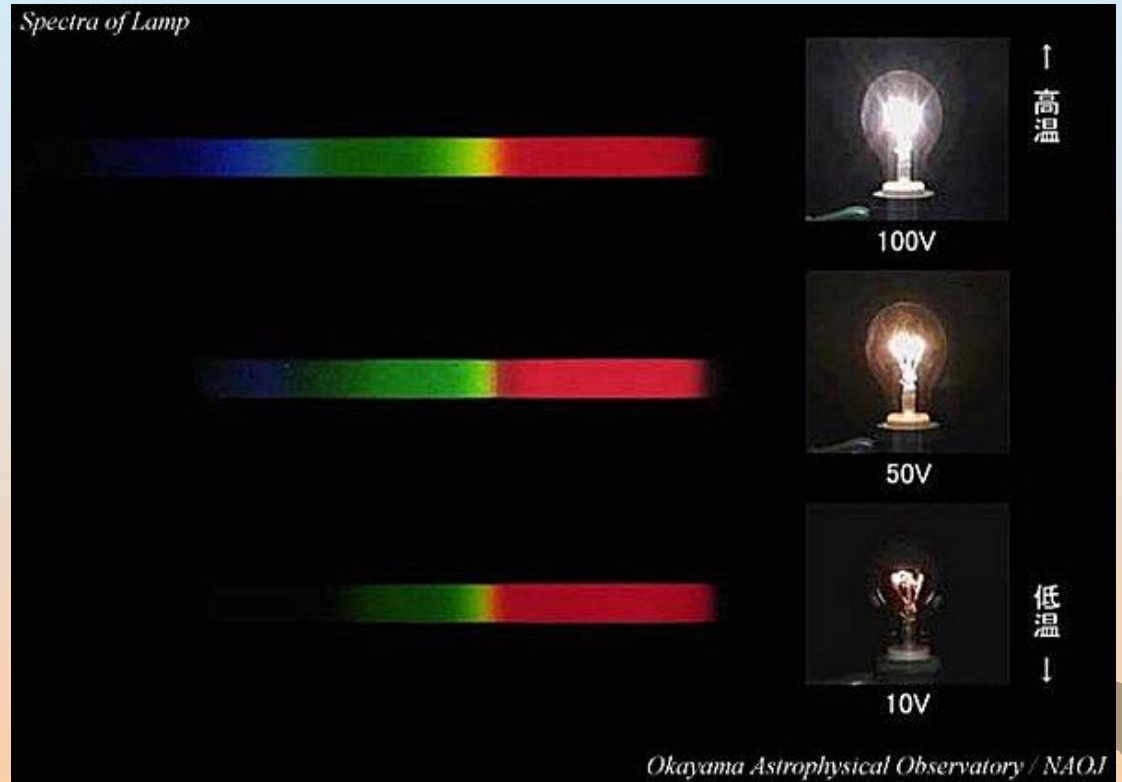
電波





光のスペクトル 連続スペクトル

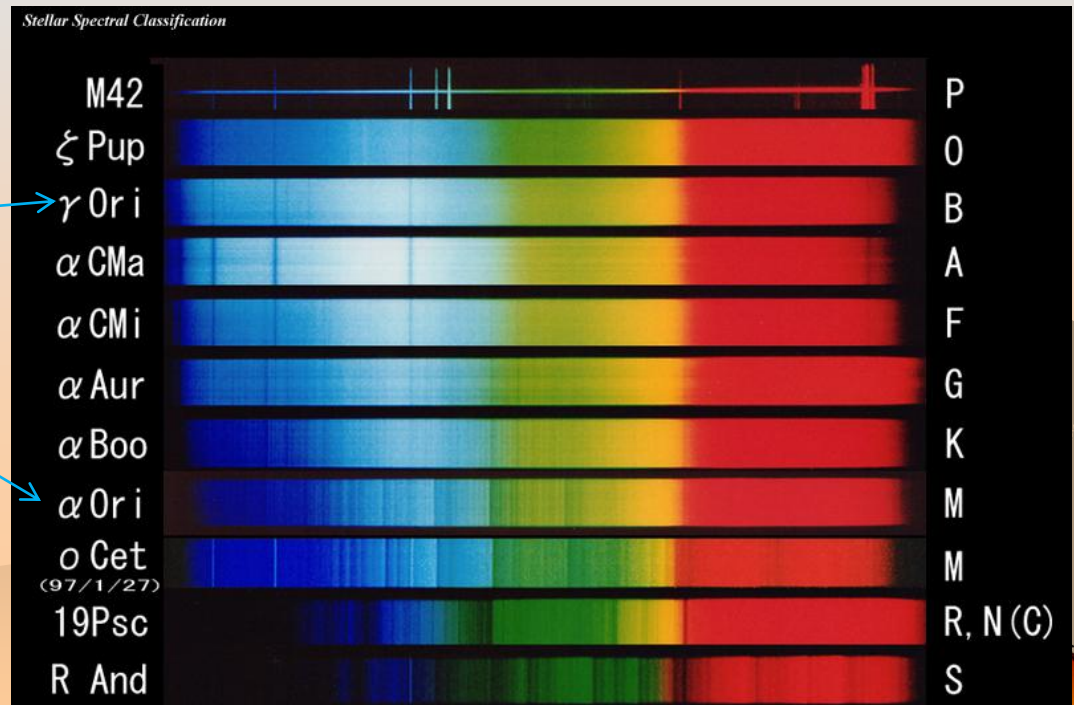
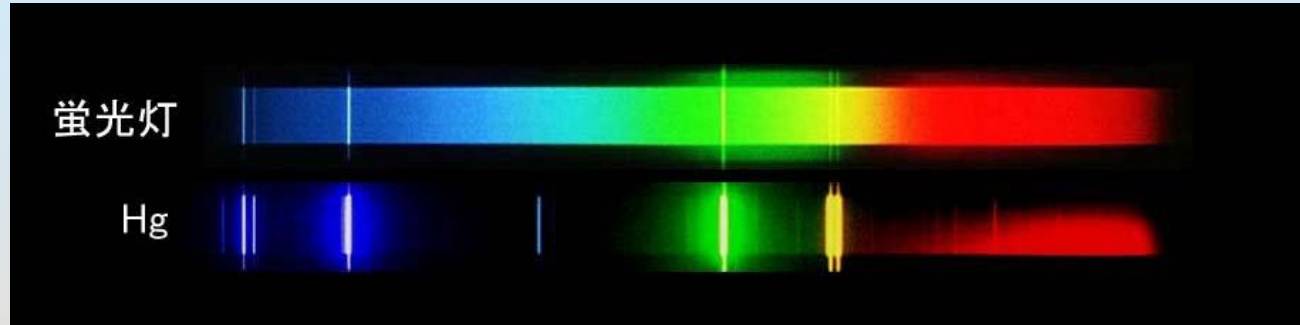
- ❁ 白熱電球
- ❁ ホタル





光のスペクトル 線スペクトル

- ❁ 蛍光灯
- ❁ 星

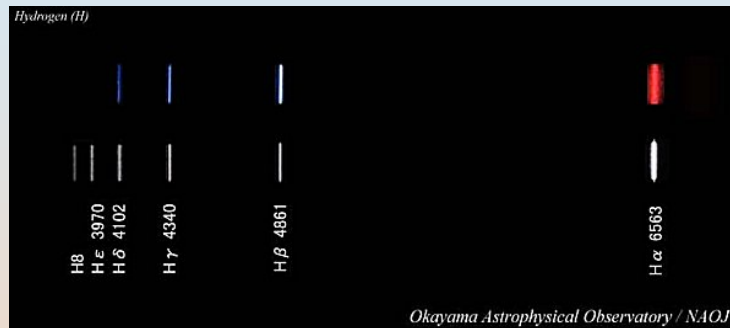




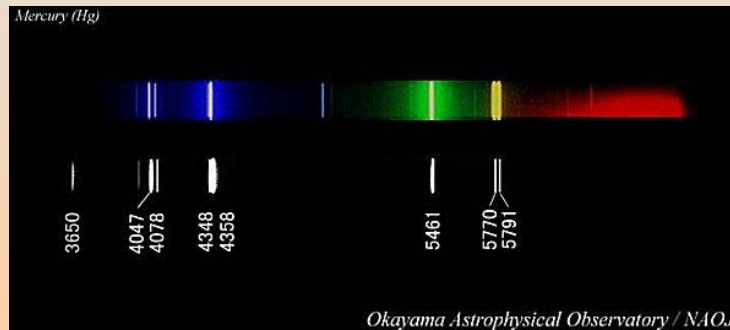
光のスペクトル 水素バルマー線

原子は固有の波長で光を放射する

水素



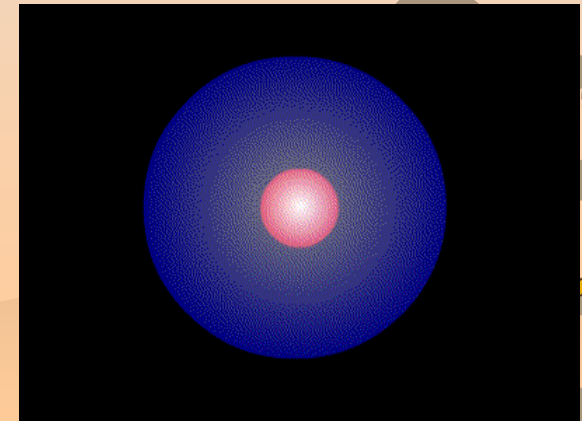
水銀



ナトリウム



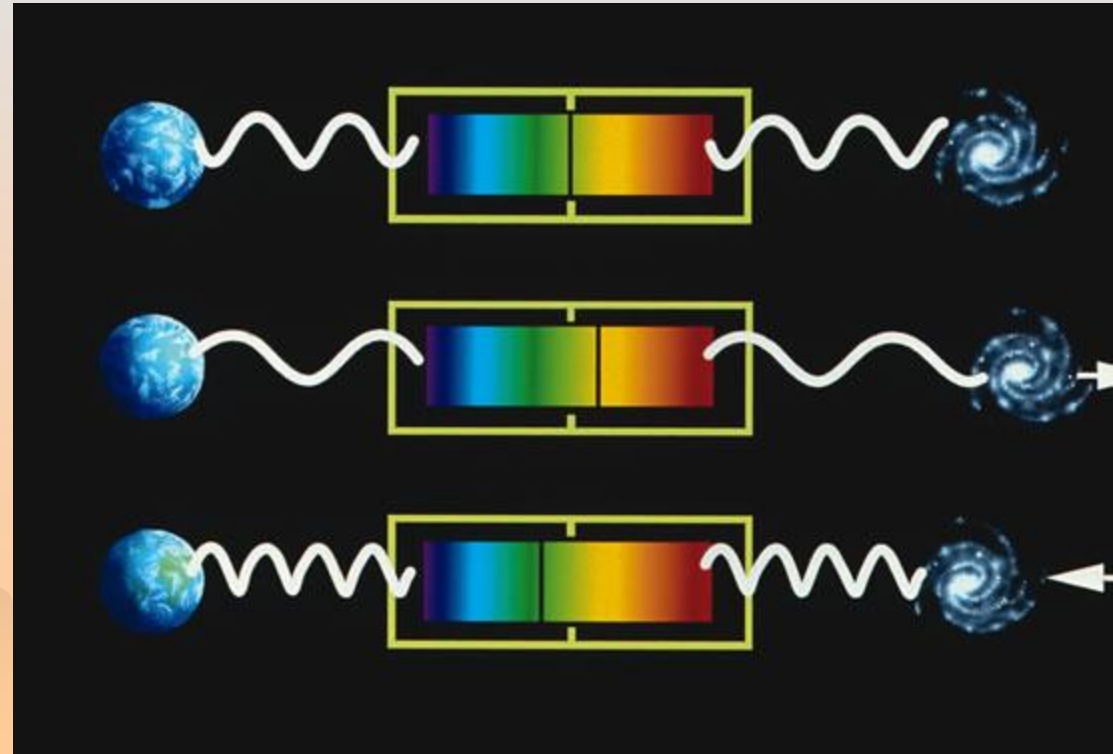
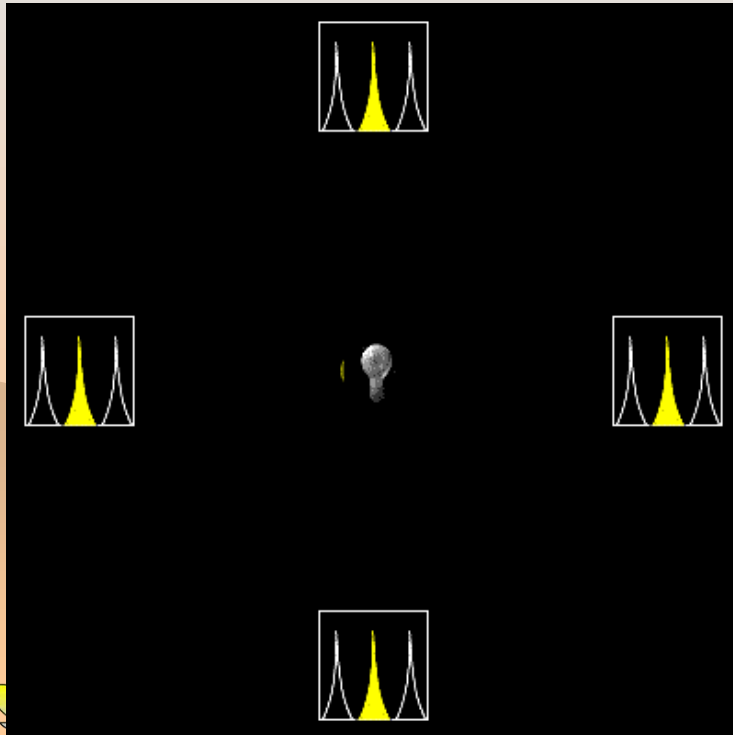
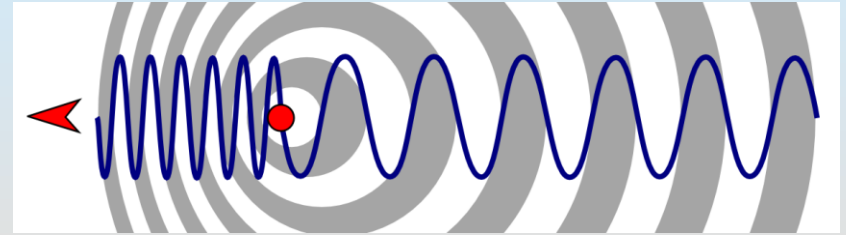
水素ガスが赤い光を出しているバラ星雲





光のスペクトル 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。





Maarten Schmidt
(1929-) in 1992

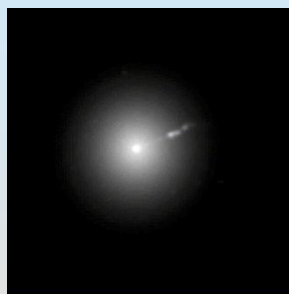
Donald Lynden-
Bell (1935-)



宇宙ジェットの発見

観測

- ❁ 1918年 “星雲” M87の光の矢 (Curtis)
- ❁ 1963年 クェーサー 3C273の同定 (Schmidt)
- ❁ 1978年 特異星 SS433の発見 (Margon)
- ❁ 1994年頃 マイクロクェーサーの類別 (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



最初に同定されたクェーサー 3C273 (NOAO/AURA/NSF)

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 (Shakura and Sunyaev)
- ❁ 1986年 ファイアボールモデル (Paczynski)



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)







銀河

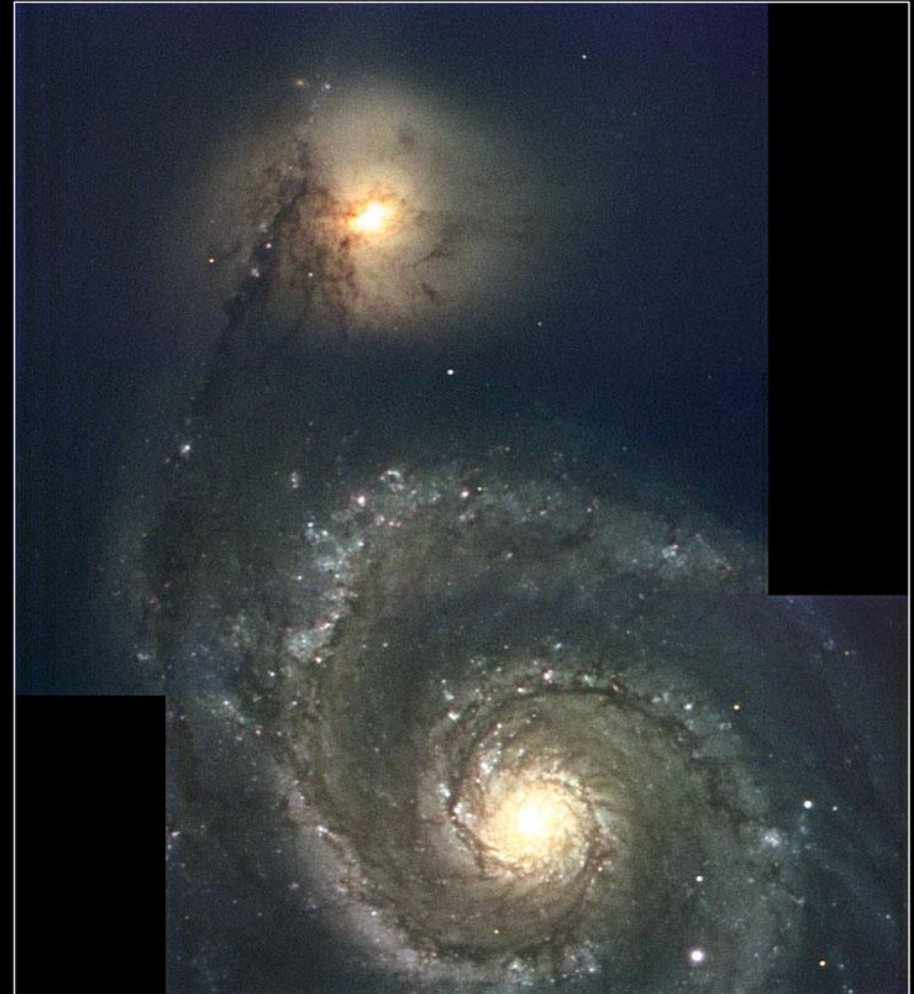
銀河 (galaxies)

銀河 = 数千億個の星
とガスの巨大な集合
体; 円盤状の渦状銀
河や球状の楕円銀
河などがある

子持ち銀河M51→



七



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

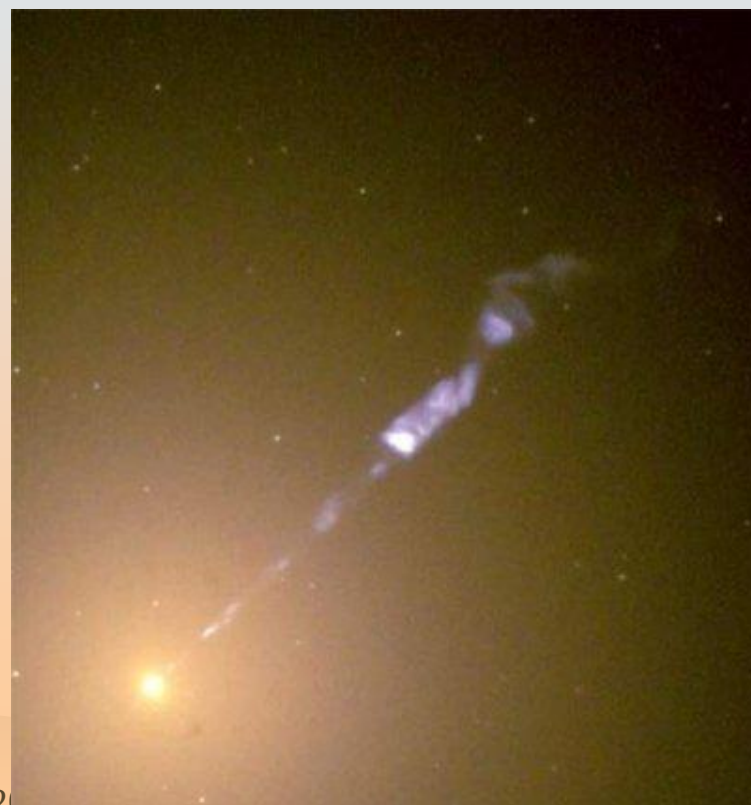


活動銀河

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(可視光)



七夕2011

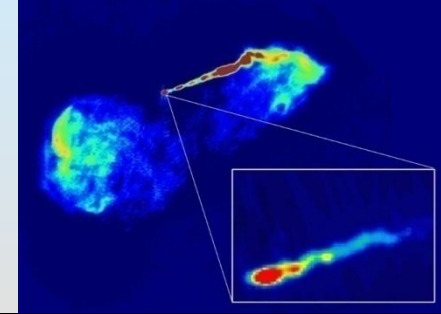




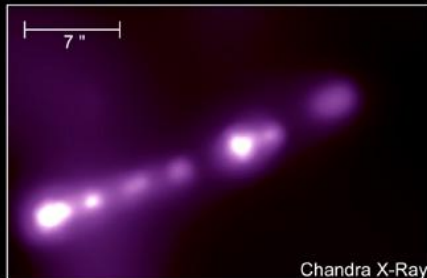
活動銀河



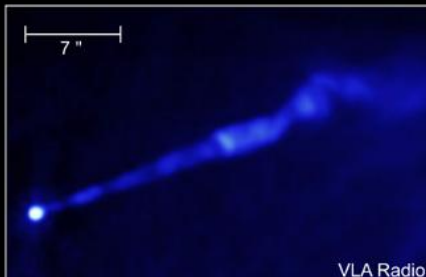
活動銀河核 (active galactic nuclei)
中心核が何らかの活動性を示す銀河



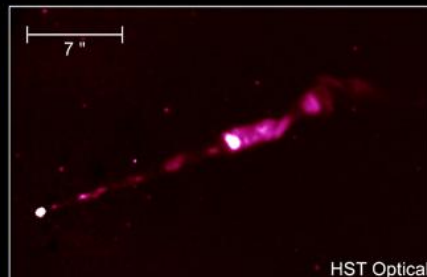
電波銀河M87



Chandra X-Ray

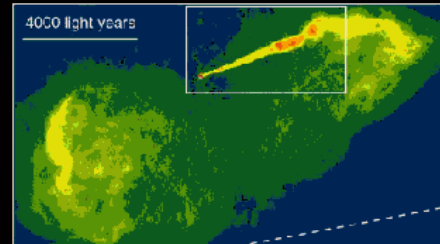


VLA Radio

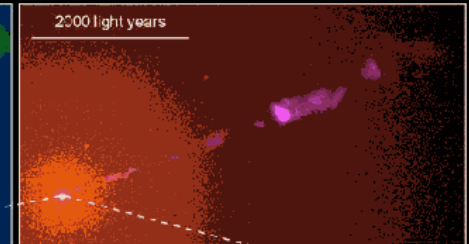


HST Optical

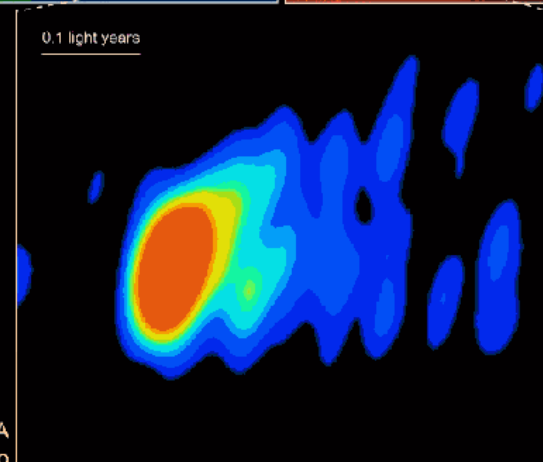
Galaxy M87



VLA
Radio



HST-WFPC2
Visible



VLBA
Radio



活動銀河

電波銀河Cen A

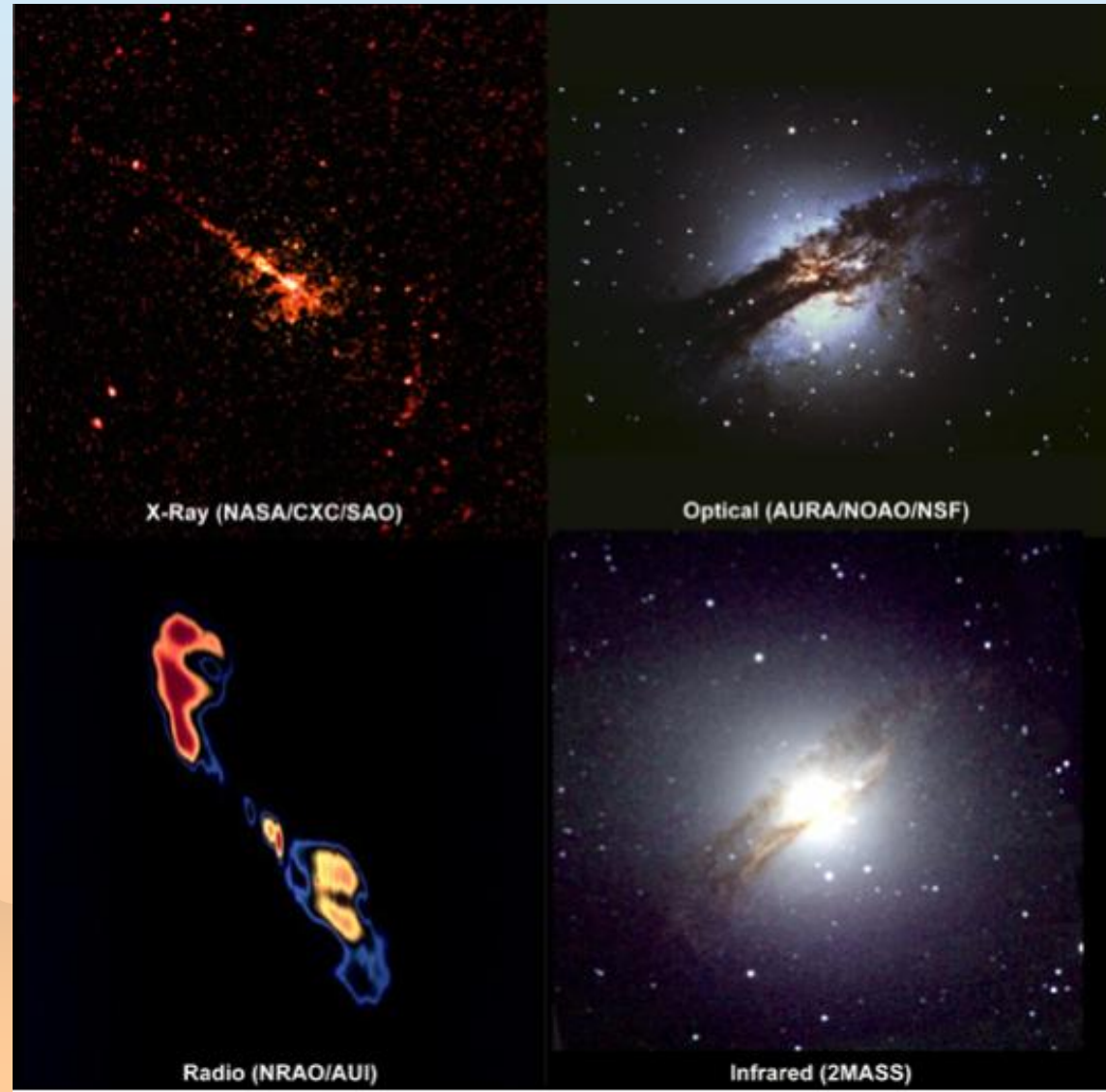
さまざまな波長で見た活動銀河ケンタウルス座A/NGC5128 (<http://physics.gmu.edu/~rms/astro113/myimages/cenacomp.jpg>)。

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。





クエーサー

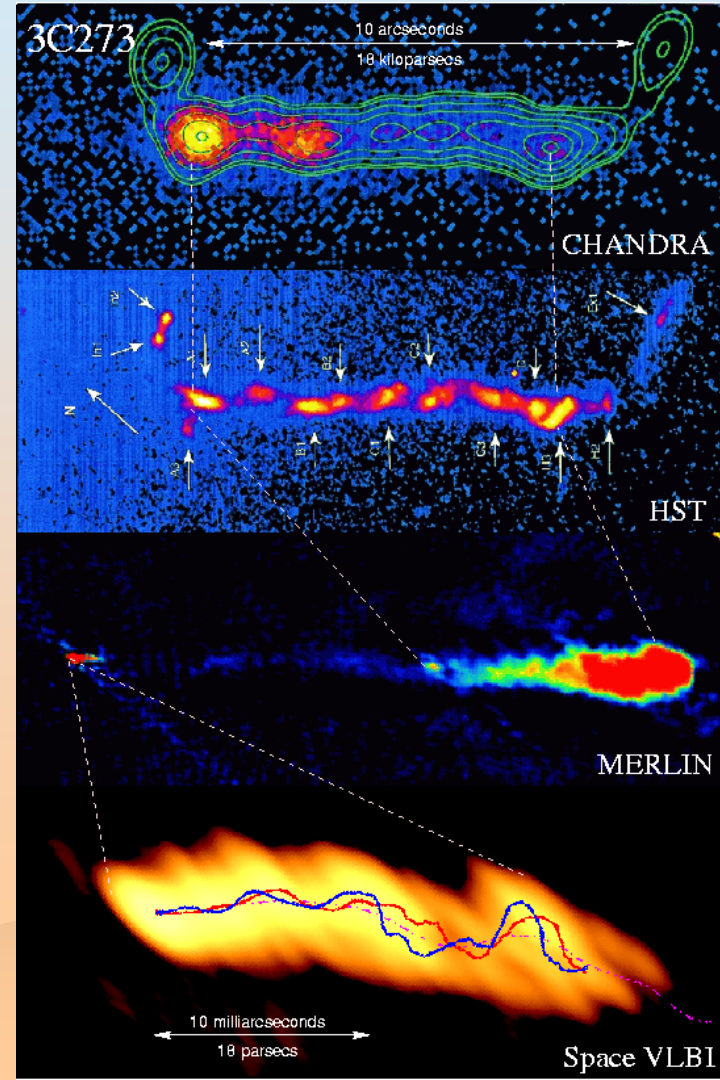
クエーサー(quasar)非常に遠方の活動銀河核

クエーサー 3C273

多波長で観測したクエーサー3C273のジェット
(NASA/STScI/JAXA)。上から、

- 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)

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





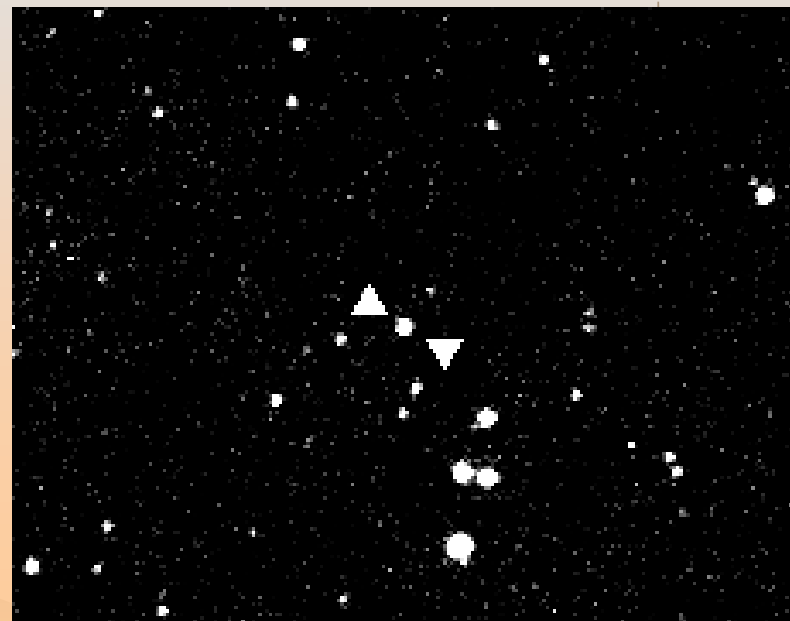
銀河系内の宇宙ジェット



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)



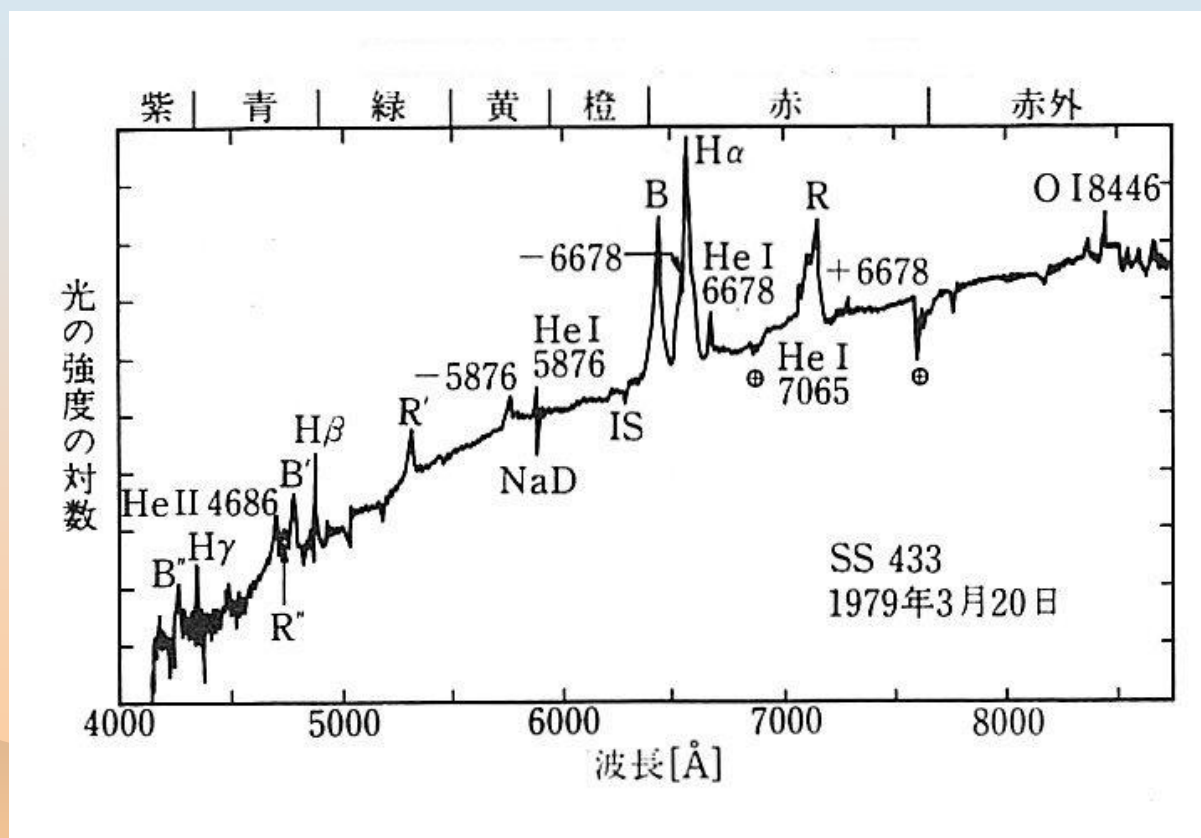
七夕2011





特異星SS433 スペクトル

❁ 奇妙なスペクトル線

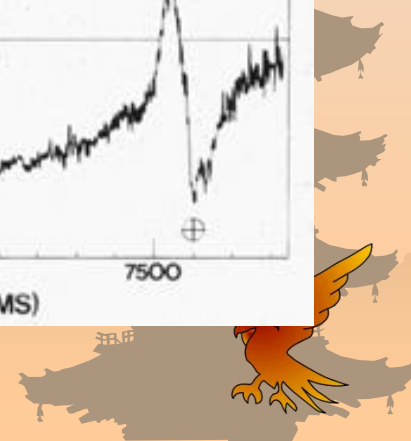
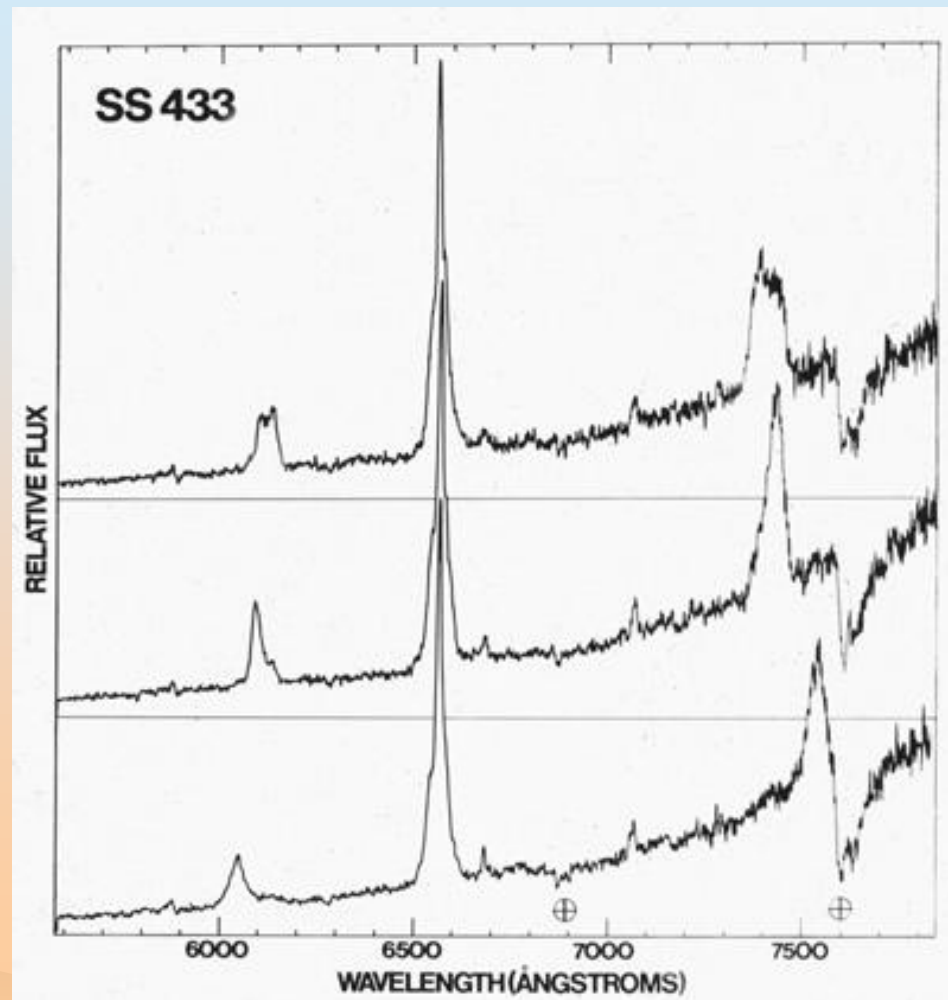




特異星SS433 スペクトル



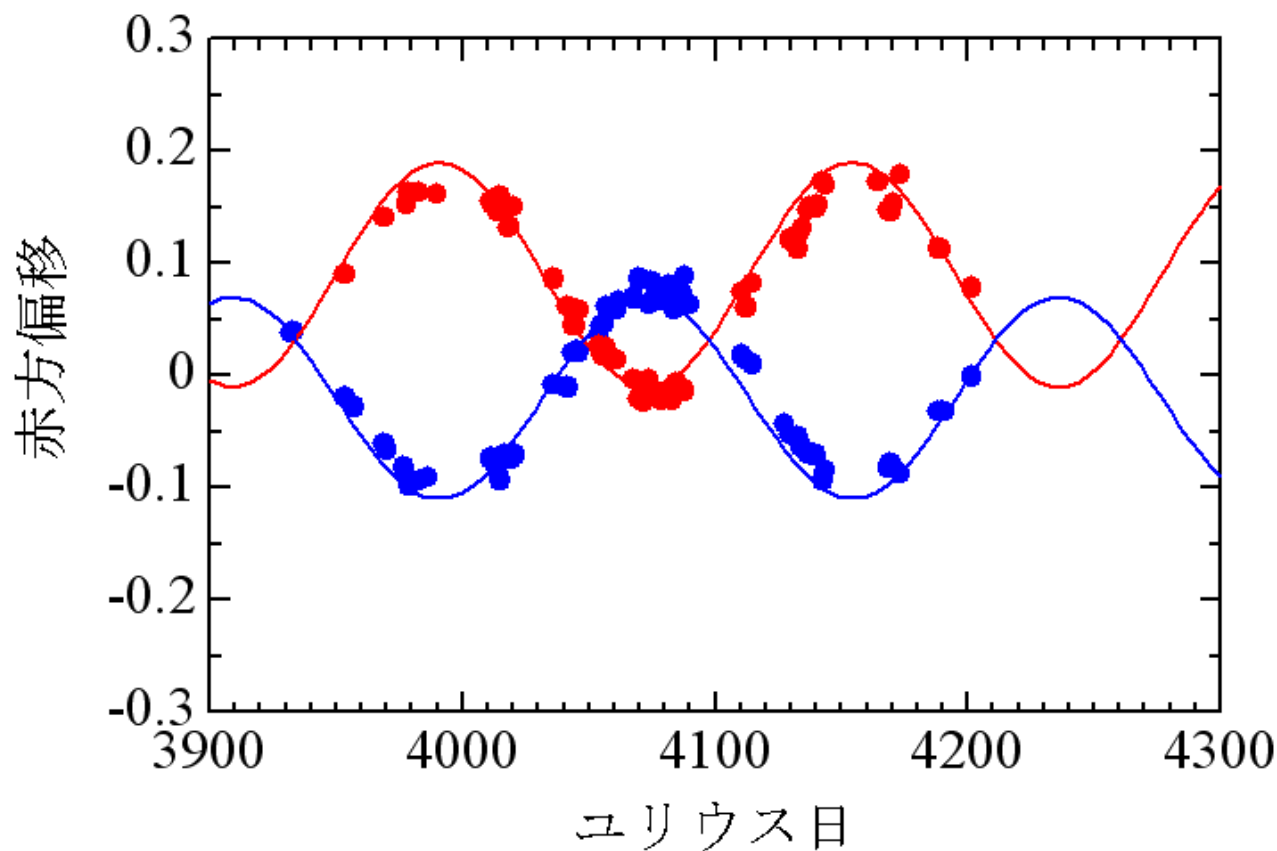
❁ 動くスペクトル線





特異星SS433 スペクトル

- ❁ 輝線の位置が周期的に変化する
- ❁ 162日

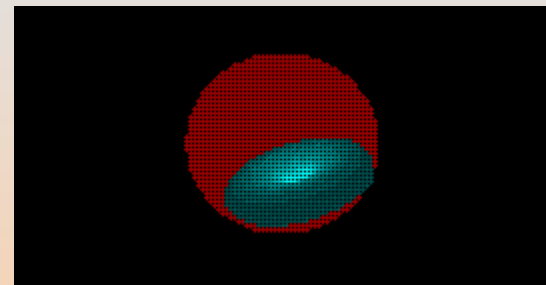
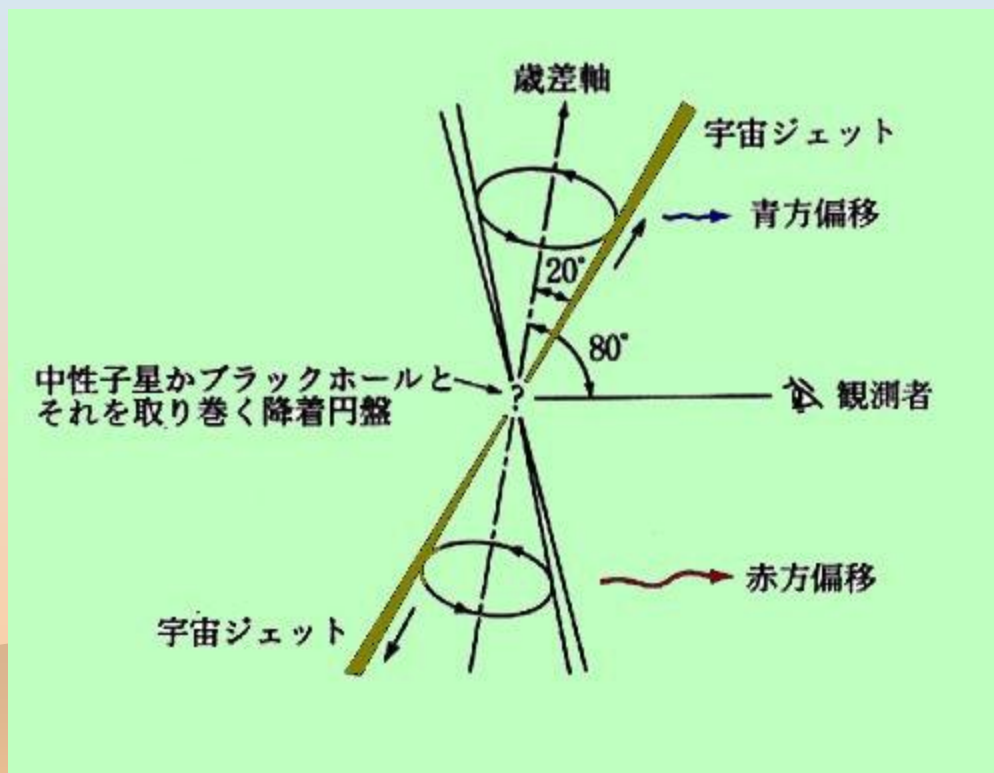




特異星SS433 モデル



❁ 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

光度曲線



❁ 光度曲線

- 13日周期：連星周期
- 162日周期：歲差周期

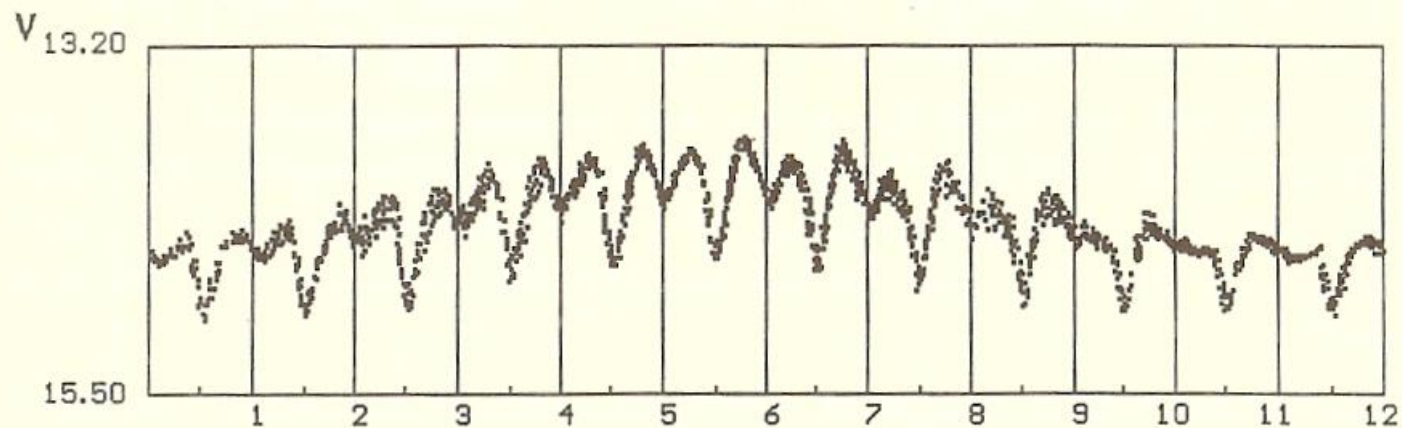
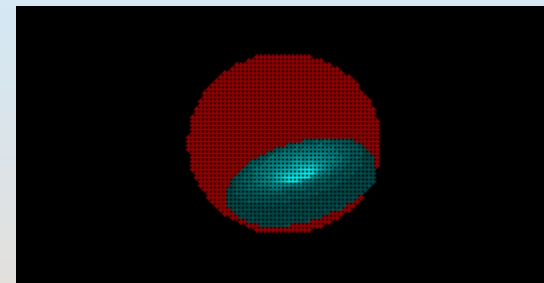


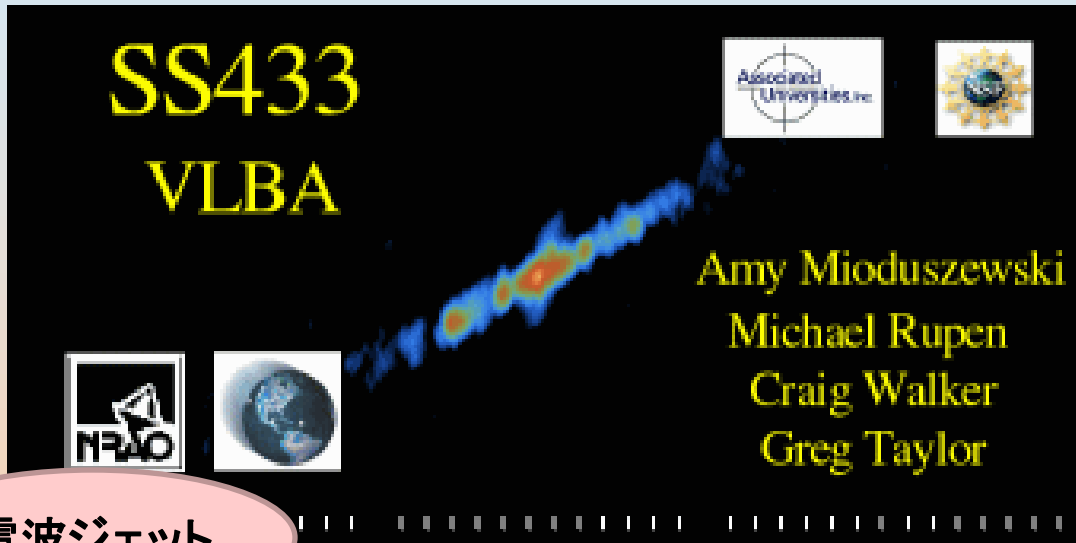
Fig. 1.27 Folded light curves of SS 433 obtained by 19-year optical monitoring. (After Goranskij et al. 1998)



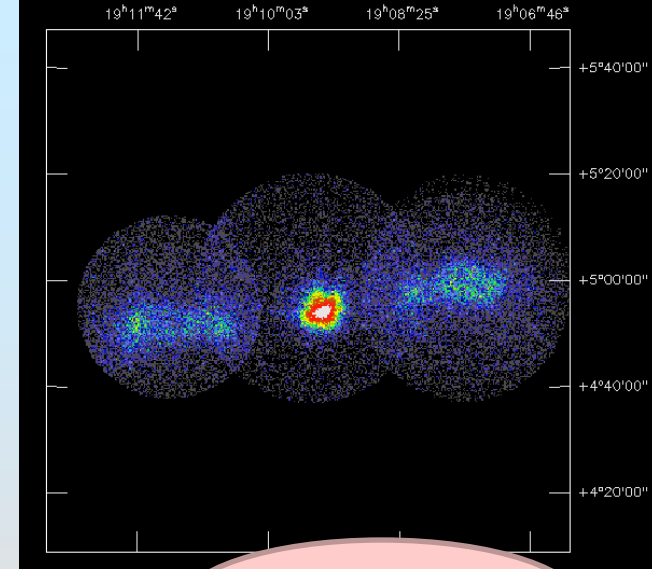


特異星SS433 ジェット

✿ 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。

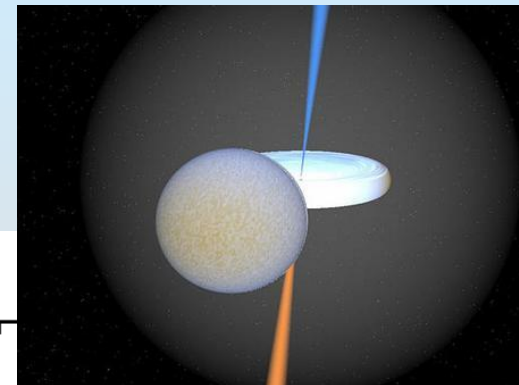
七夕2011





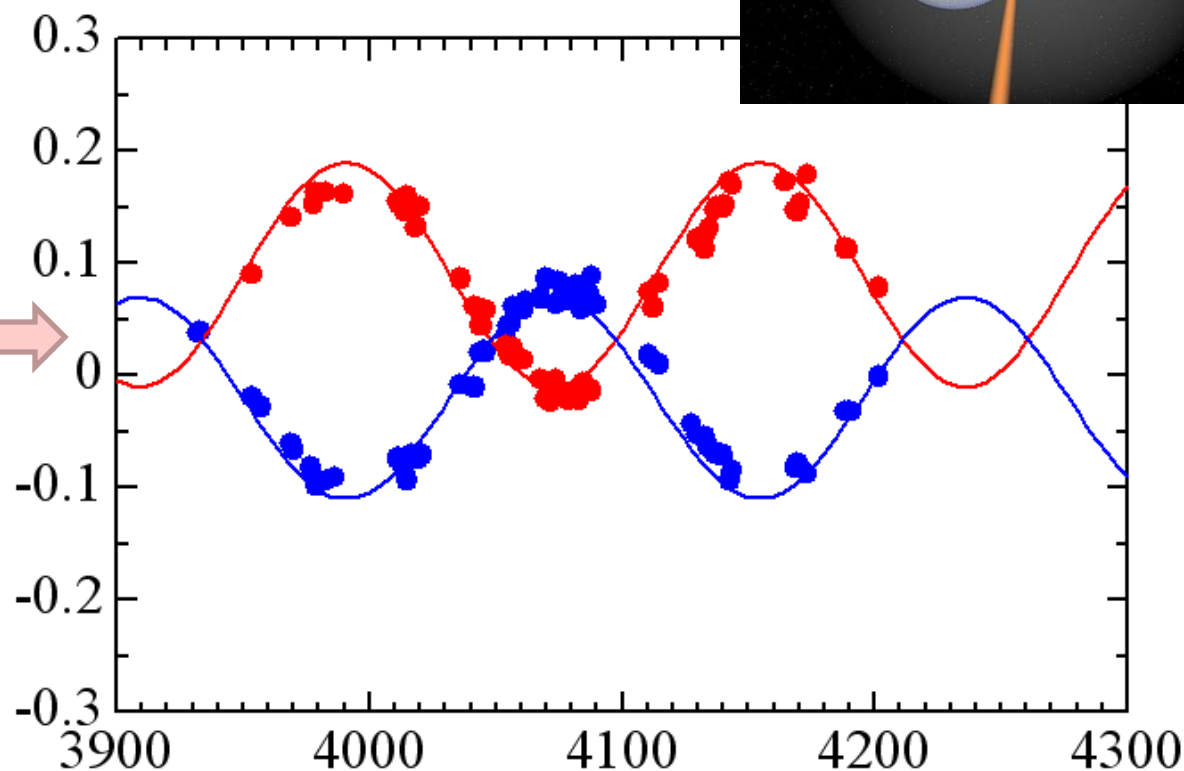
特異星SS433 輝線スペクトル

- ❁ 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



セタ2011

ユリウス日





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% !

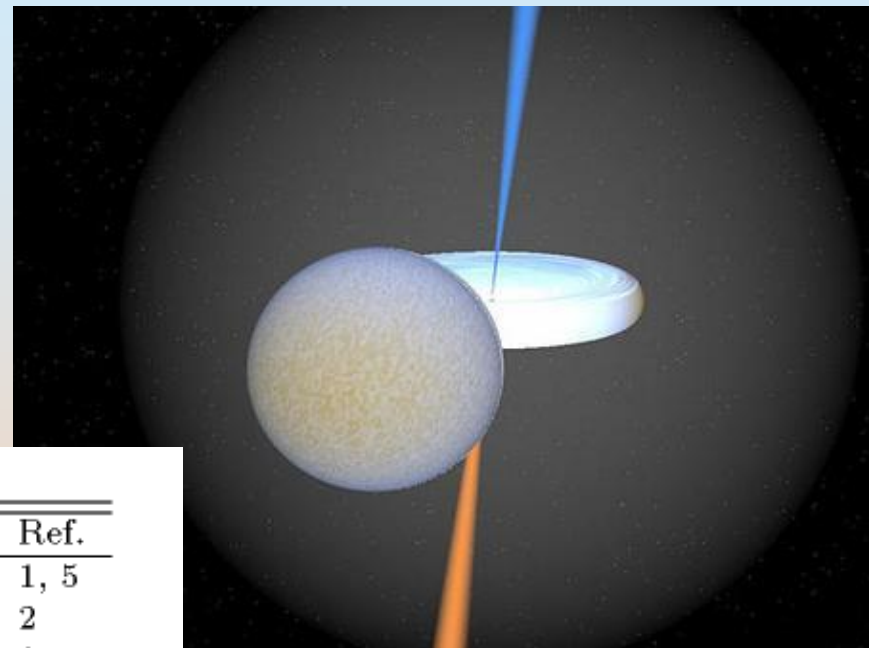
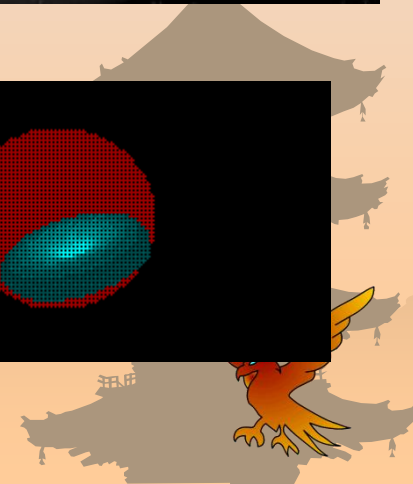
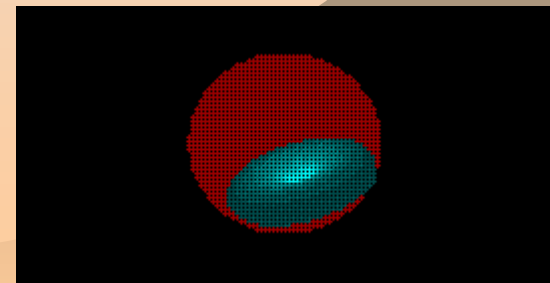
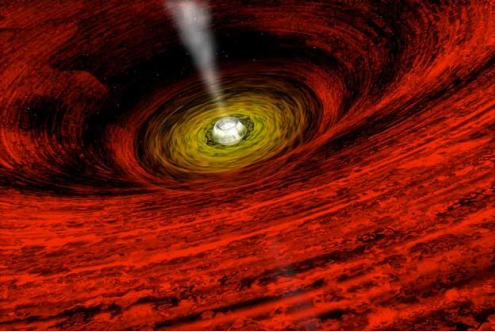


Table 1.5 Elements of SS 433.⁵

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

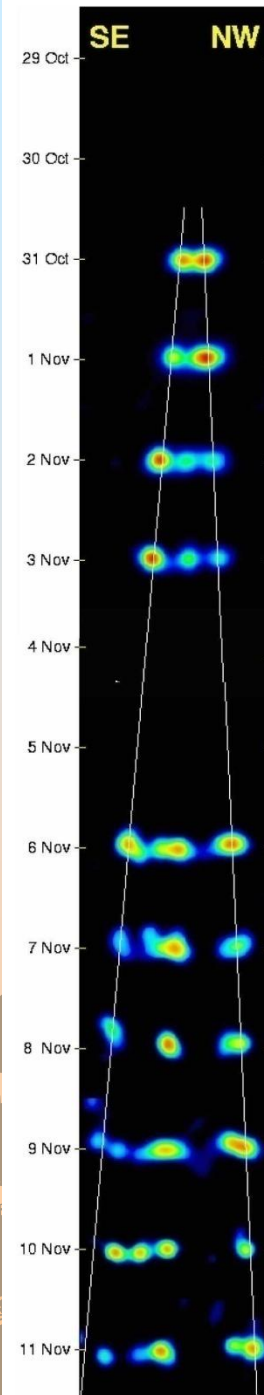
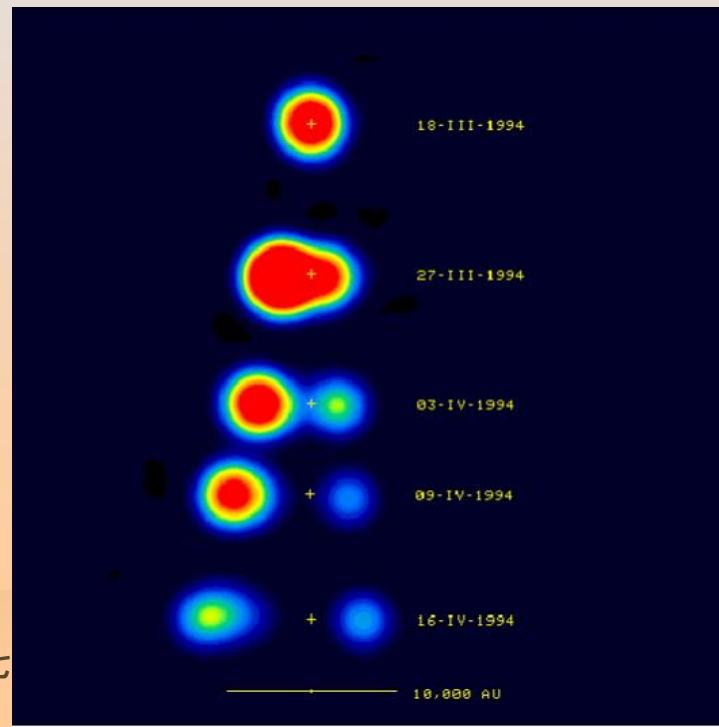
マイクロクエーサー (microquasar)

亜光速ジェットをもった系内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。

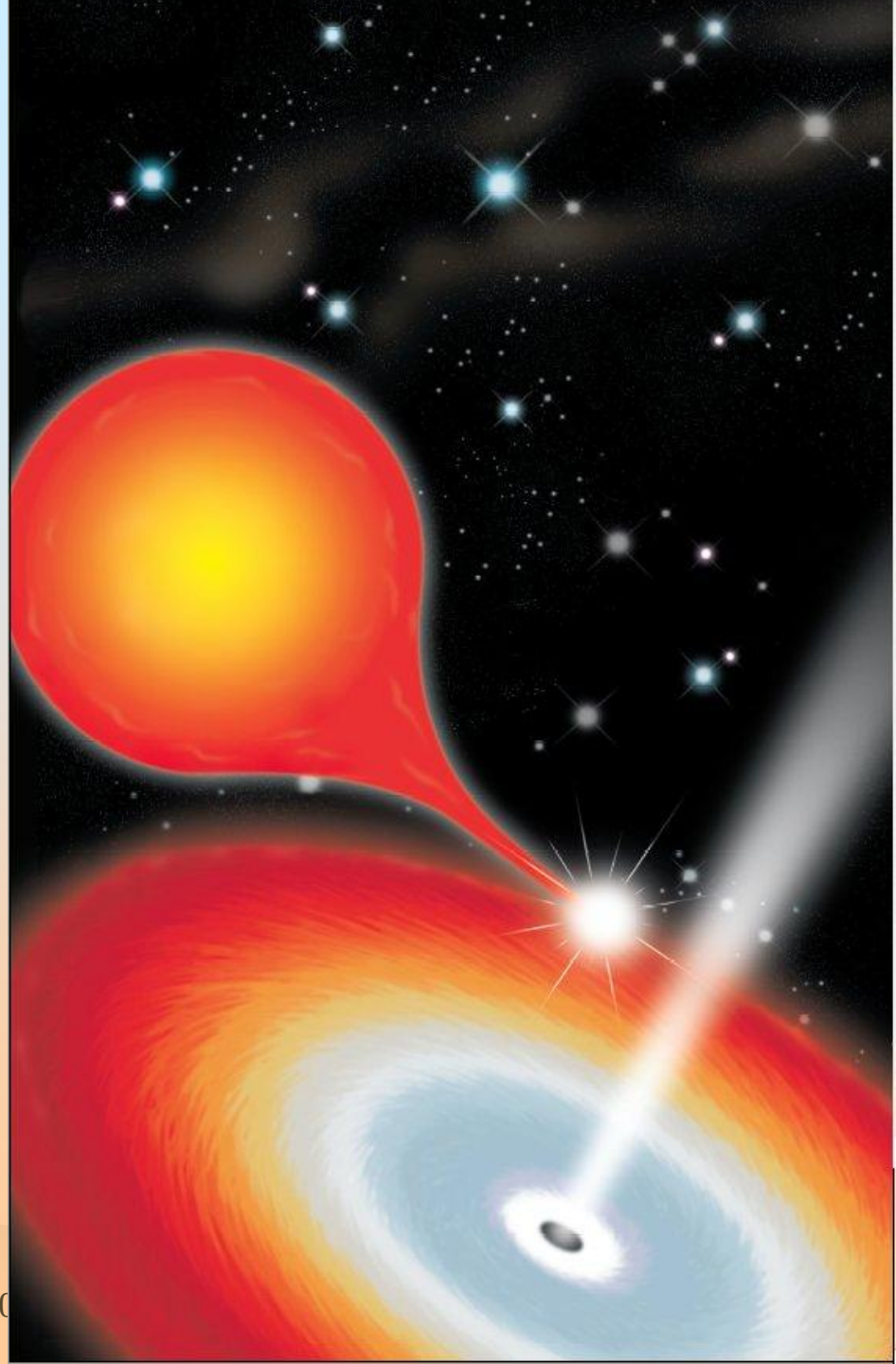


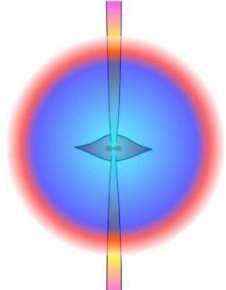


マイクロウェーサー の描像

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>

ブラックホールと普通の星からなるブラックホール連星の想像図。ブラックホールの強い重力が伴星のガスを引きずり込んで、ブラックホールのまわりにガス円盤が形成されている。ブラックホール近傍からはしばしば、高温プラズマガスがジェットとして吹き出している。この図の差し渡しは100万km程度で、ブラックホールの大きさはその10万分の1程度。。





ガンマ線バース

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

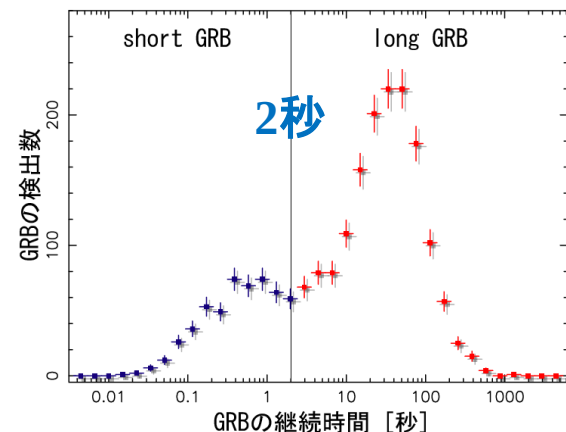
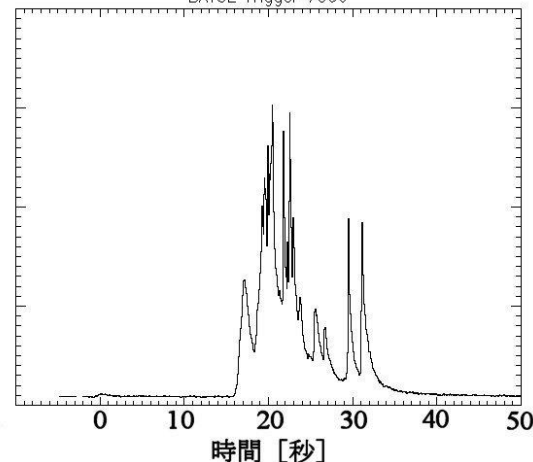
Short GRB/Long GRBの2種類

宇宙論的天体 (1991年)
 10^{45} Jを超えるエネルギー

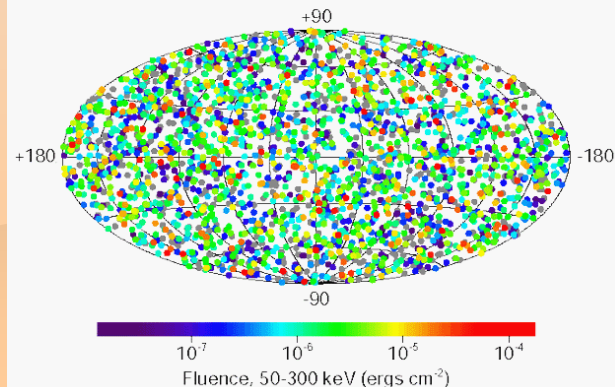
コンプトン衛星／
BATSEで検出した
数千例のGRB
(NASA)。赤ほど明
るく青ほど暗いが、
どれも全天で一様に
分布している。

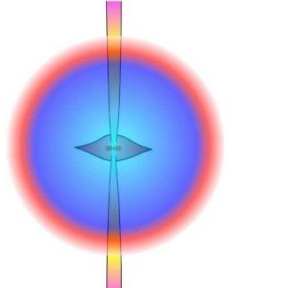
七夕2011

ガンマ線の強さ



2704 BATSE Gamma-Ray Bursts





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

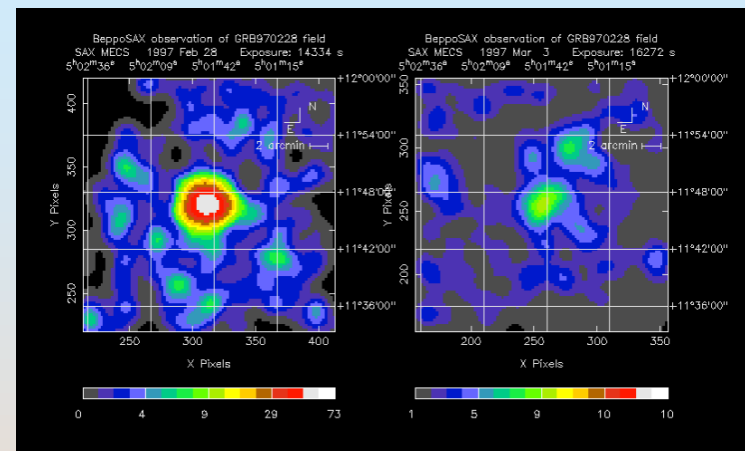
GRB970508は70億光年

極超新星との関連(2003年)

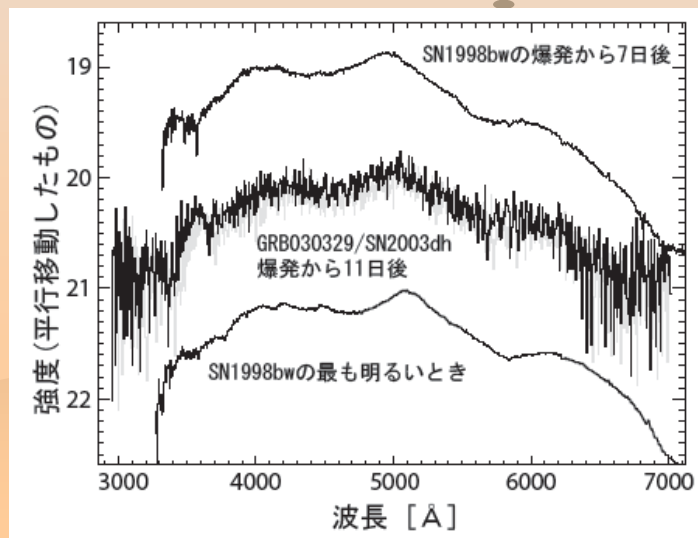
GRB030329/ SN2003dh

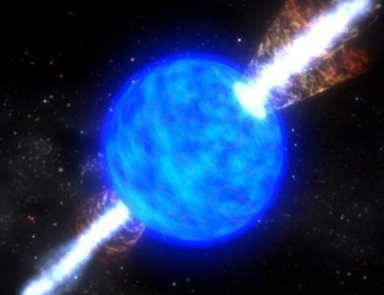
SN2003dhとSN1998bwを比較したスペクトル。GRB030329の残光を連続観測している中で出現してきたので、GRB030329と超新星SN2003dhの関係が明白に示された。

七夕2011



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%！！

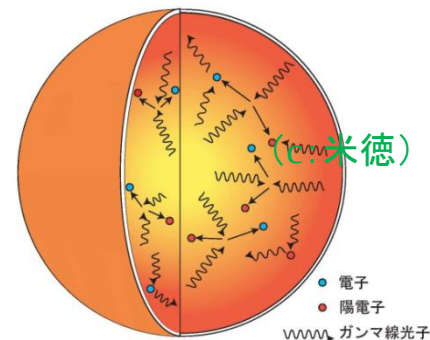
大質量星の崩壊に伴い、ほぼ光速で膨張するファイアボールが吹き出す

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

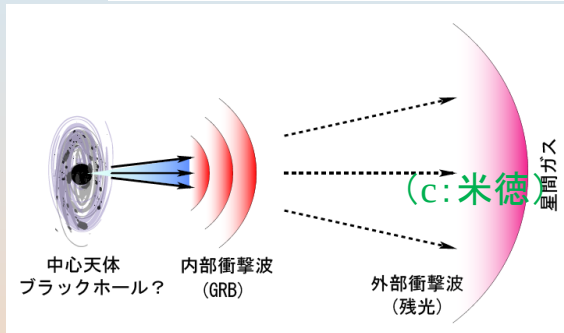
的なローレンツ因子も γ となる。



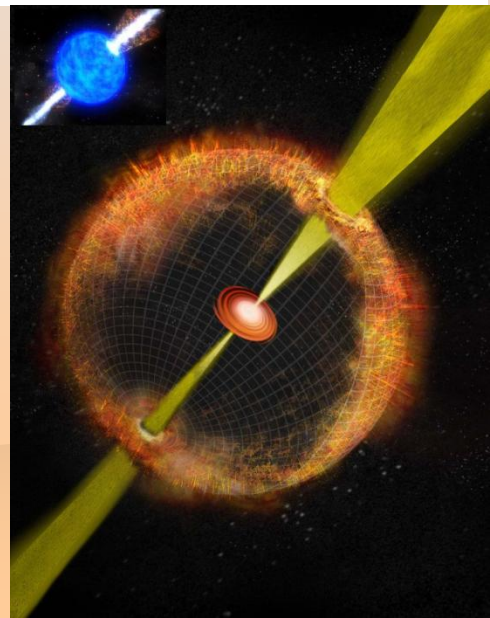
大量のガンマ線光子を狭い領域に閉じ込めると、電子・陽電子対を作り出す。ガンマ線は電子や陽電子に衝突して散乱し、外部へ抜け出せない。



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)。





ブラックホールジェットのまとめ

表 9.1 宇宙ジェットの類別

物理量	活動銀河ジェット	原始星ジェット	系内ジェット
サイズ	pc ~ Mpc	0.1 ~ 1 pc	100 AU ~ 100 pc
速度	$\lesssim c$	10 ~ 150 km/s	0.26 c ~ 0.92 c (NS, BH) 3000~5000 km/s (WD)
年齢	$\sim 10^6$ 年	$\sim 10^4$ 年	$\sim 10^3$ 年
収束度	$\lesssim 1^\circ$	$\sim 10^\circ$	$\lesssim 1^\circ$
中心天体 (脱出速度)	超大質量ブラックホール $\sim c$	原始星 ~ 400 km/s	コンパクト天体 $\sim c$ (NS, BH) ~ 5000 km/s (WD)
例	3C 273, M 87 Cyg A, Cen A	L 1551, Orion A AFGL 490	SS 433, Sco X-1 R Aqr, Cyg X-3 1E 1740-2942





ブラックホールジェットのまとめ

✿ マイクロクェーサー

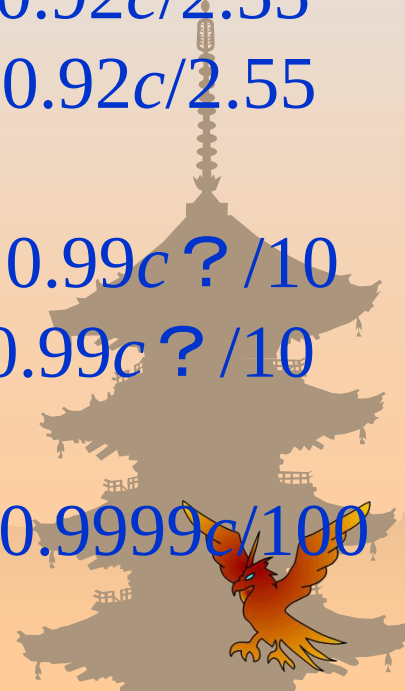
SS433	$> L_E$	ep	cont/blob	$0.26c/1.04$
1E1740.7-2942	?	ee?		$0.26c/1.04$
GRS 1915+105	$\sim L_E$	ee?	bloby	$0.92c/2.55$
GRO J1655-40	$\sim L_E$	ee?	bloby	$0.92c/2.55$
XTE J1748-288	$\sim L_E$	ee?	bloby	$> 0.92c/2.55$

✿ クェーサー、活動銀河

3C 273	$> L_E$	?	?	$0.99c ? / 10$
M87	$<< L_E$	?	?	$0.99c ? / 10$

✿ ガンマ線バースト

GRB030329/SN2003dh $>> L_E$ ee? fireball $0.99999c/100$





放射圧加速ジェット

- ✿ 光度
- ✿ 成分
- ✿ 形態
- ✿ 速度

$$L > L_E$$

ep通常プラズマ vs ee対プラズマ

continuous / periodic / intermittent

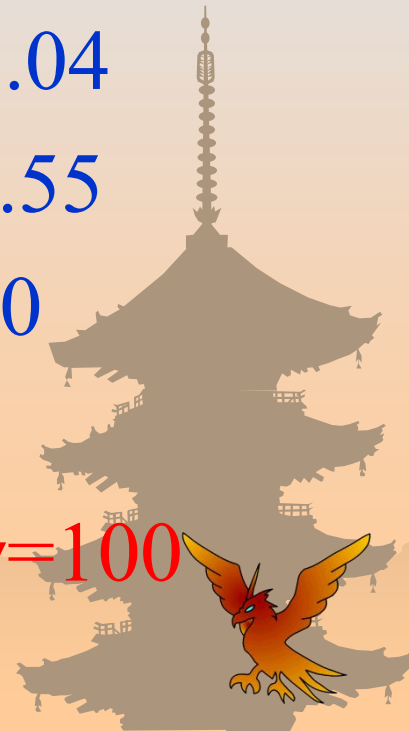
mildly relativistic $\beta=0.26$ 、 $\gamma=1.04$

highly relativistic $\beta=0.92$ 、 $\gamma=2.55$

ultra relativistic $\beta=0.99$ 、 $\gamma=10$

extremely relativistic

$$\beta=0.9999$$
$$\gamma=100$$



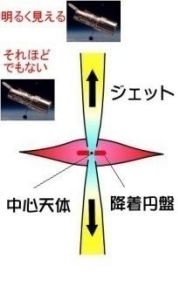


宇宙ジェットの加速機構

- ❁ エネルギー源
 - 重力エネルギー
 - 自転エネルギー（エルゴ圏）
- ❁ 加速・駆動方法
 - 高温ガスの圧力
 - 輻射（光）の圧力
 - 磁場の力

❁ 輻射力加速にせよ磁気力加速にせよ、光速の9割ぐらまでなら可能だが、 γ が10とか100の超相対論的ジェットはまだ実現できていない。





ブラックホールジェット

胃袋は無限だが喉元は有限

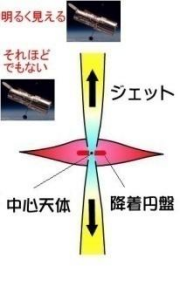
BHの胃袋は底なし

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

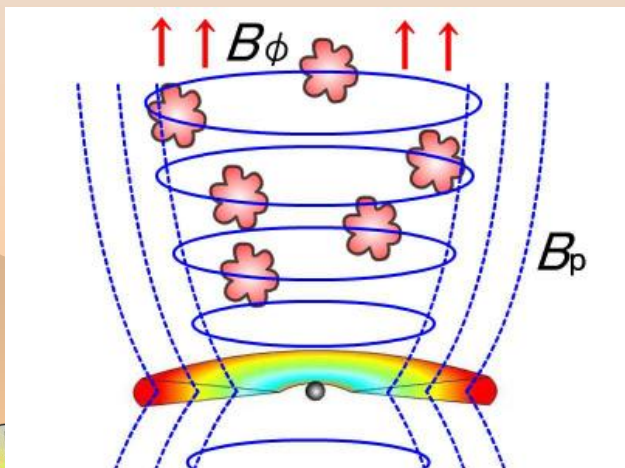
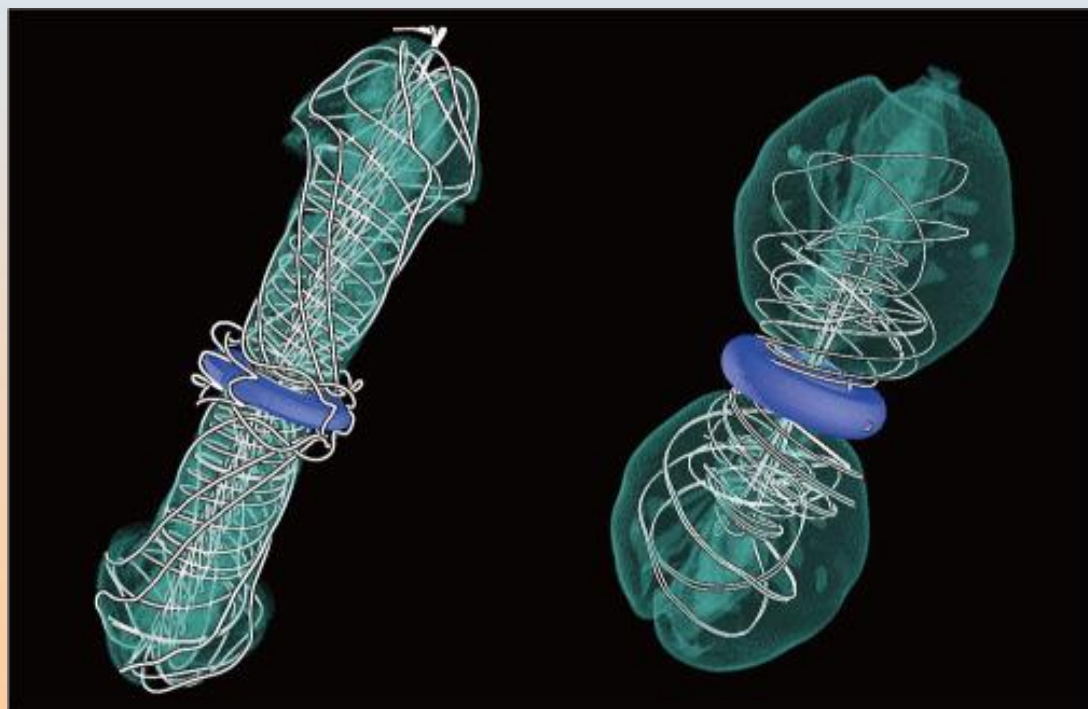
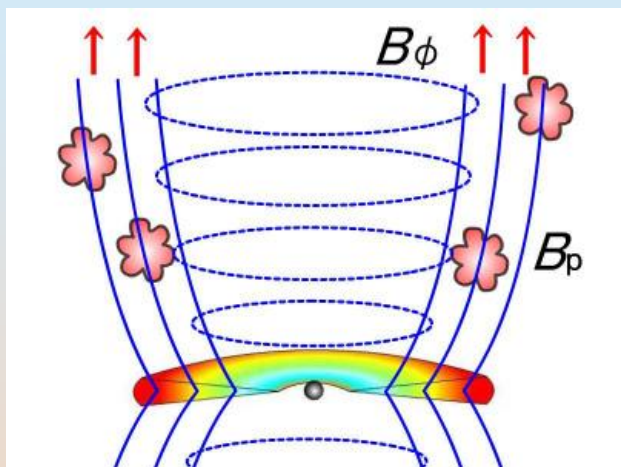
- ✿ ブラックホールは物質を吸い込み光輝くだけではない。意外なことに、ブラックホール近傍からは、高温プラズマの噴流が吹き出している。
- ✿ 中心の天体から、天体をはさんで双方向に吹き出す細く絞られたプラズマの流れを、**宇宙ジェット (astrophysical jet)** と呼ぶ。
- ✿ 宇宙ジェットや降着円盤は、重力天体の周辺で生じる動的な段階に伴って現れる**普遍的**な現象だと思われるようになってきている。





ジェットの作り方1 磁場

❁ 磁場の力で駆動する



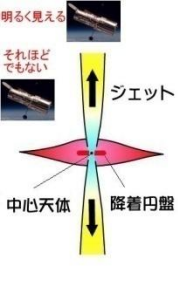
Y. Kato

2011/7/11

ブラックホール活動天体

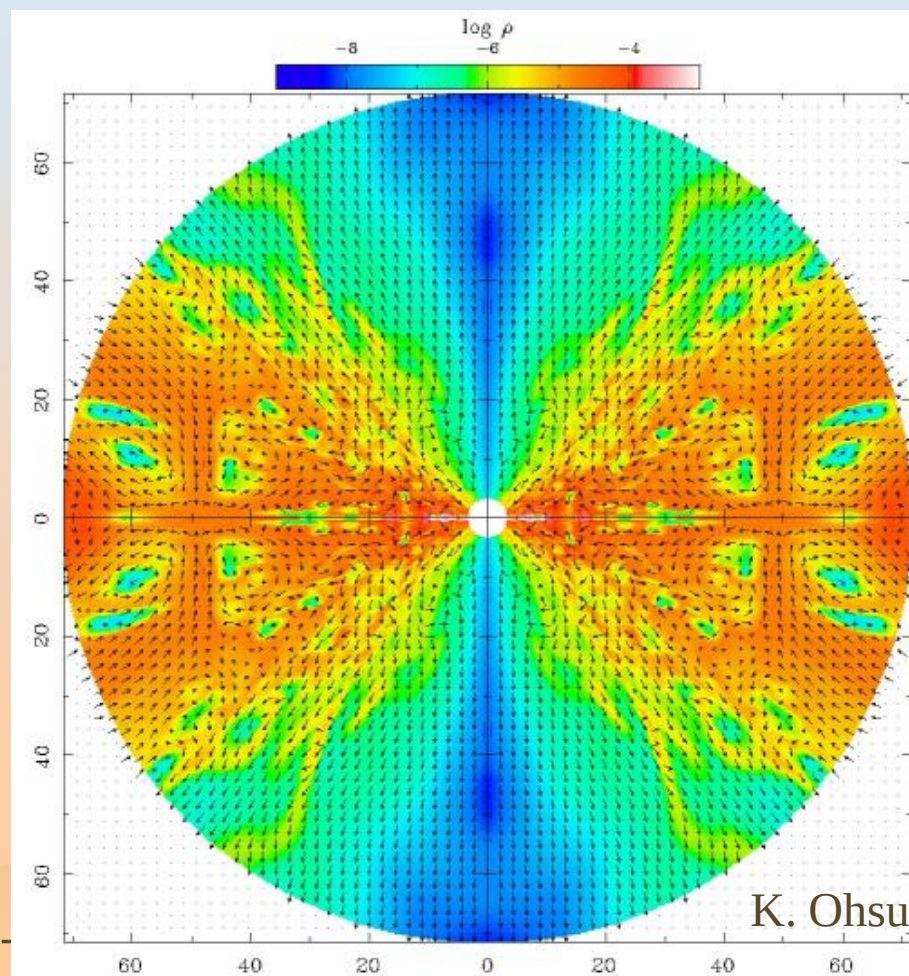
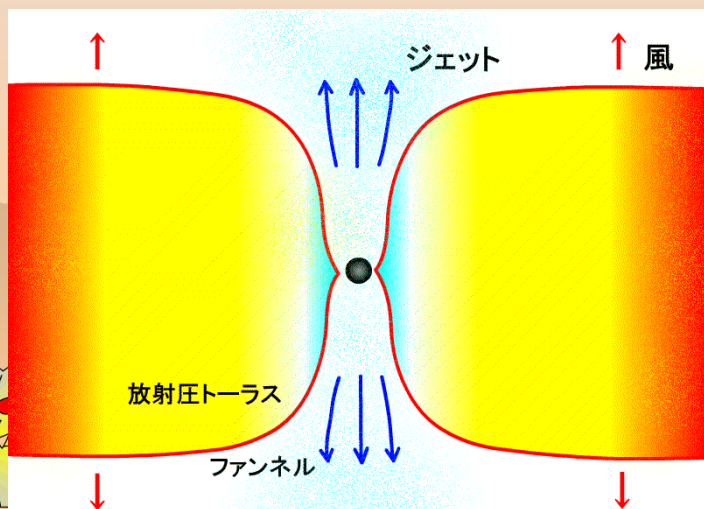
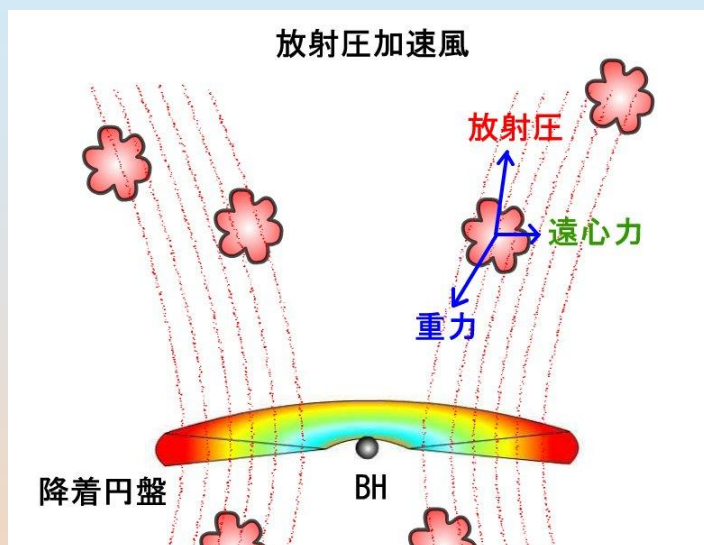
35



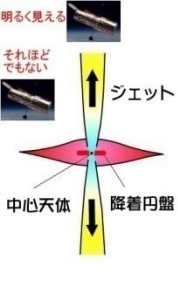


ジェットの作り方2 放射

❁ 光の圧力で駆動する



K. Ohsuga



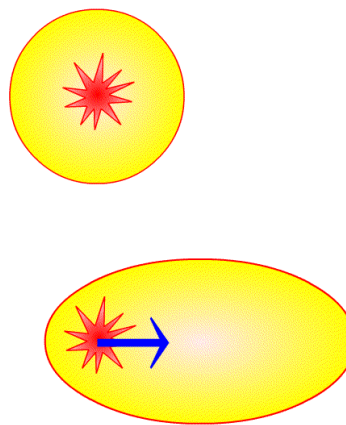
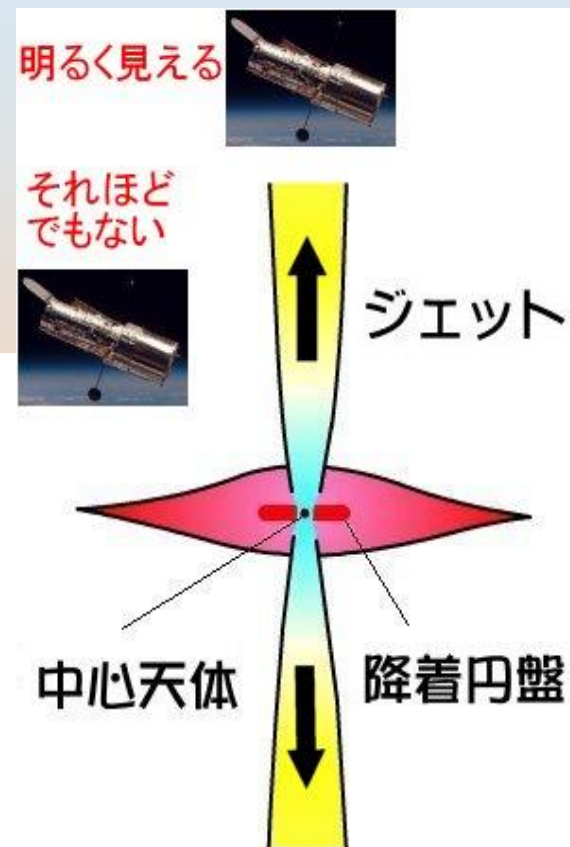
天体は“見た目”が10割

❁ 相対論的風(アウトフロー)

- アウトフローが光学的に厚い
- 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

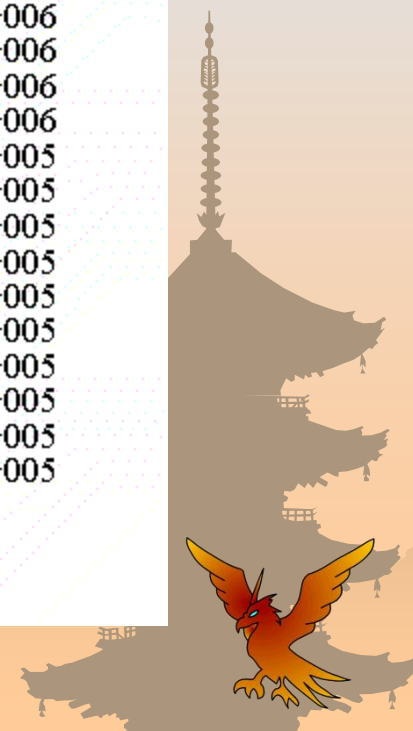
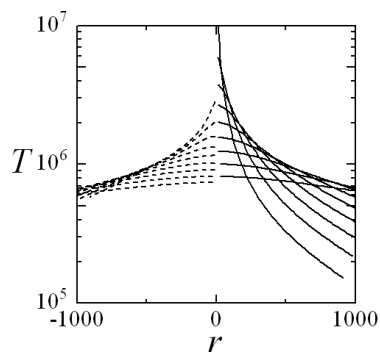
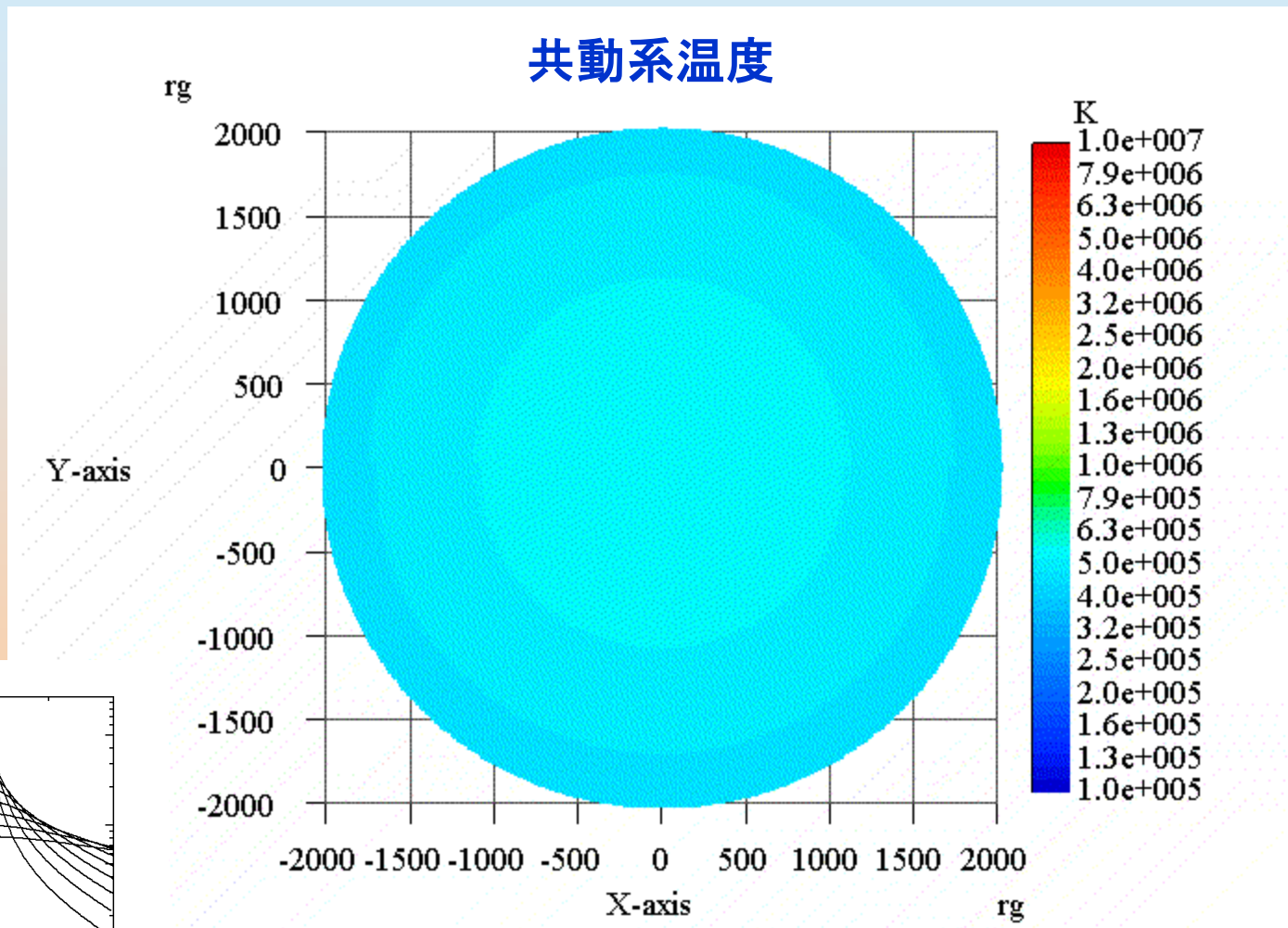


ドップラーブースト。亜光速で吹き出すプラズマジェットを正面から観測すると、非常に明るく観測される。



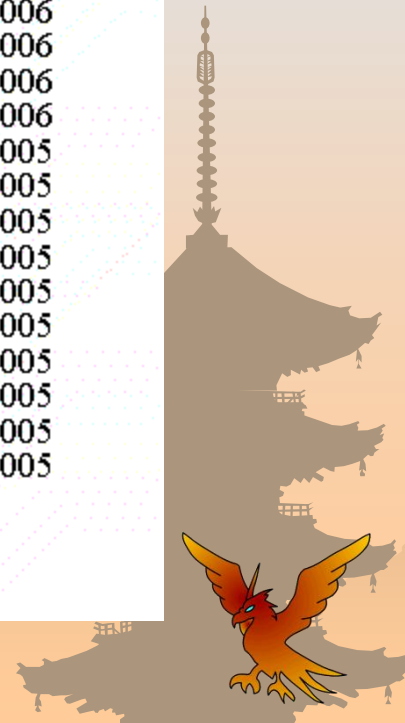
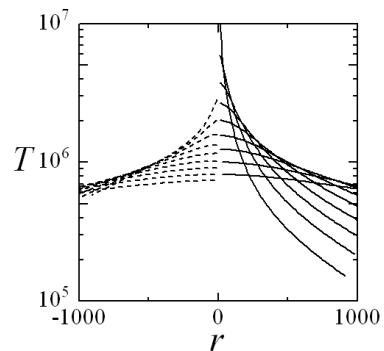
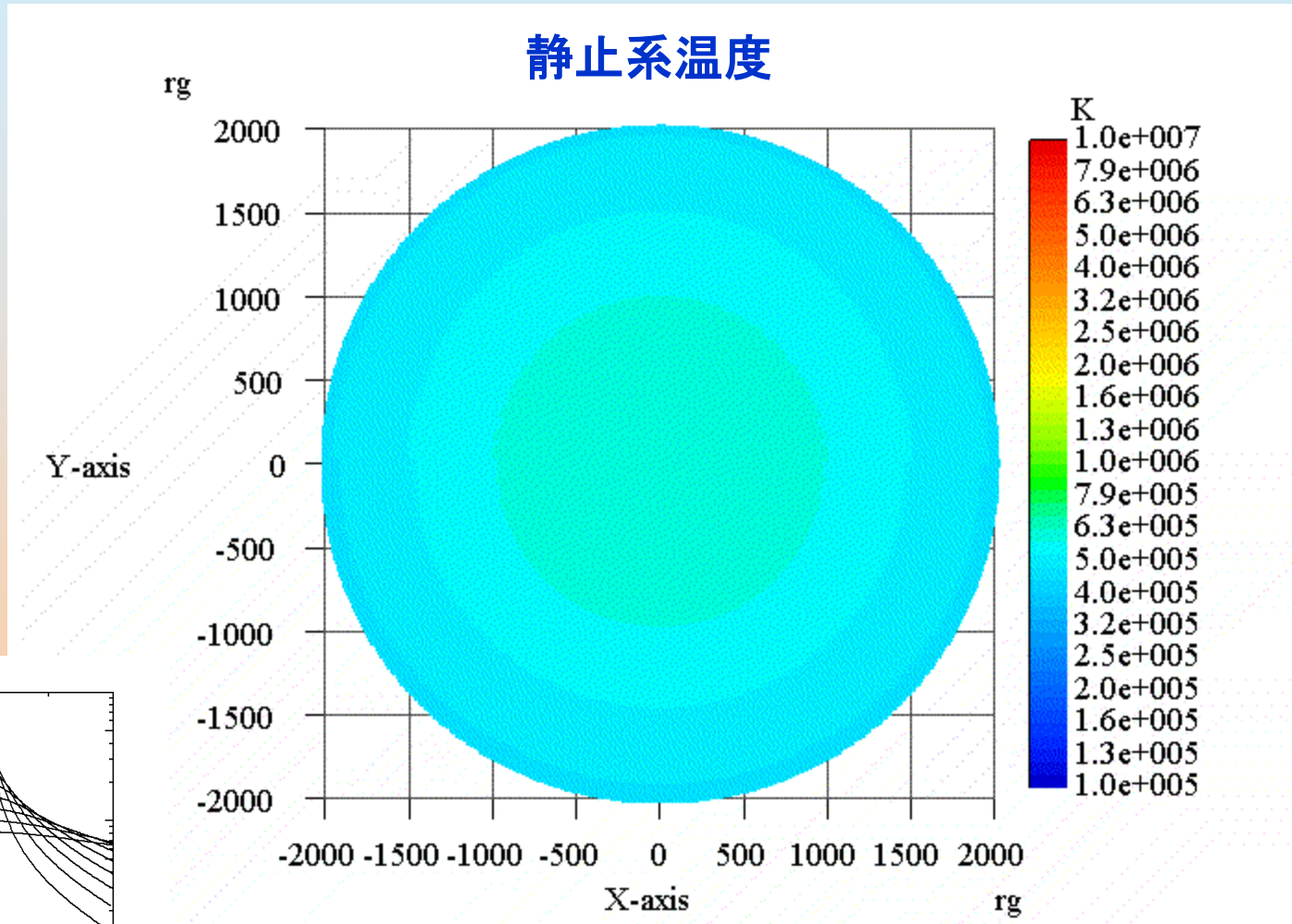


ジェットが加速すると！ ジェット共動系での見え方





ジェットが加速すると！ 観測者静止系での見え方





5. 影響 関連する天体現象

輻射場が重要な相対論的天体現象全般

- ❁ ブラックホール降着流：光子捕捉
- ❁ 相対論的天体風：超相対論的ジェット
- ❁ ガンマ線バースト：ファイアボール
- ❁ ニュートリノ円盤：ニュートリノトーラス
- ❁ 初期宇宙：最初の降着円盤、最初のジェット

