



Les jets dans l'Univers

**Ou nous verrons que les jets sont une propriété
commune à beaucoup d'astres...**

Sylvain CHATY

(Université Paris 7 / Service d'Astrophysique)

Festival d'Astronomie de Fleurance - 9 août 2007



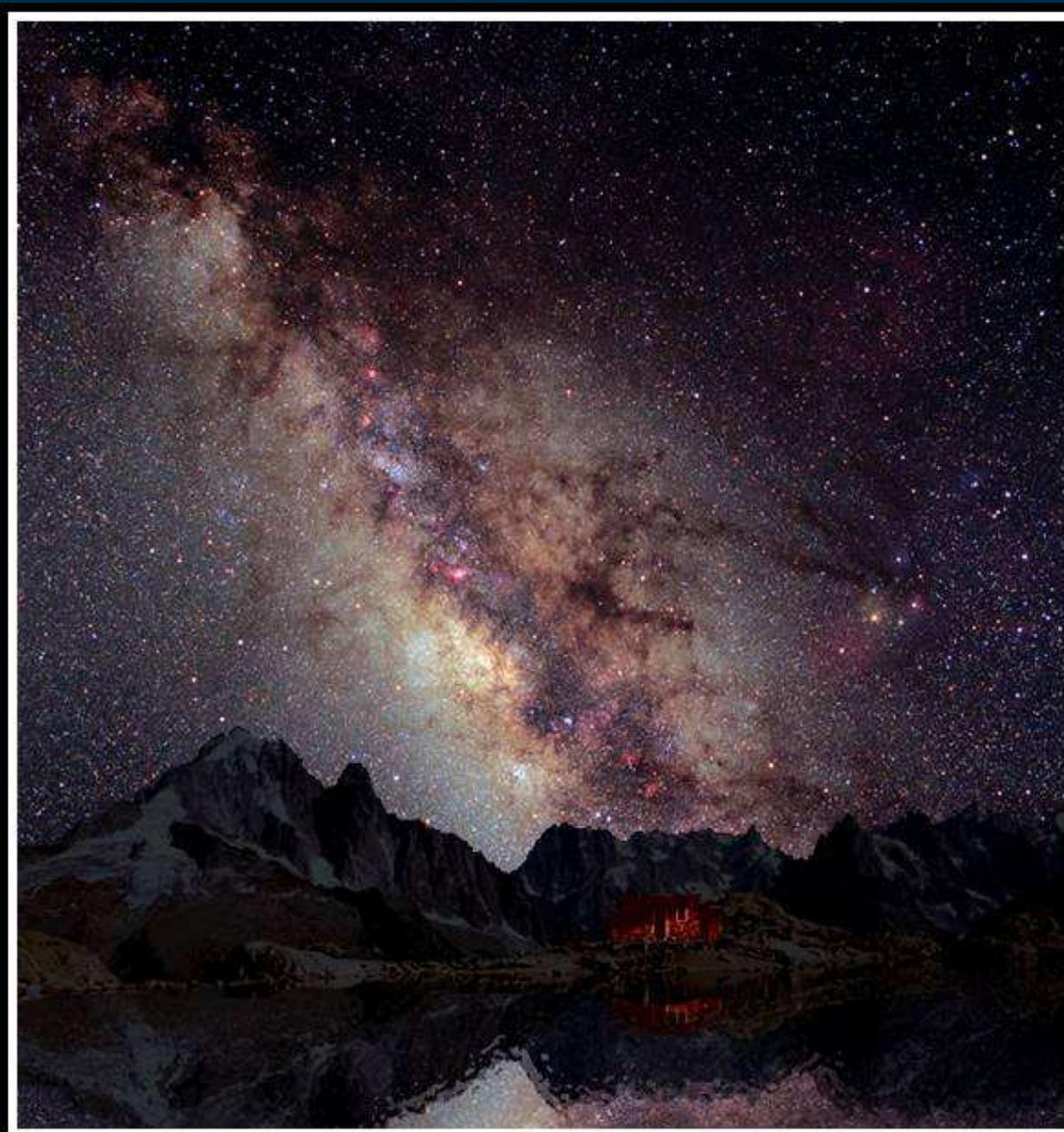
Plan

- Les jets sont partout dans l'Univers!
 - La naissance des étoiles
 - La vie des étoiles
 - La mort des étoiles
 - La réincarnation des étoiles
 - Les quasars

- Les mécanismes d'accrétion-éjection
 - Observations du lien accrétion-éjection
 - Là où il y a accrétion, il y a éjection!

- Perspectives
 - Les sursauts de rayons γ
 - Le mécanisme universel?

Un ciel étoilé: la Voie Lactée, notre Galaxie



L'évolution des étoiles

- Les étoiles naissent...
- ...vivent...
- ...meurent...
- ... puis se réincarnent...
- Au cours des différentes phases de leur vie, des éjections se produisent.

Plan

- Les jets sont partout dans l'Univers!
 - La naissance des étoiles
 - La vie des étoiles
 - La mort des étoiles
 - La réincarnation des étoiles
 - Les quasars

- Les mécanismes d'accrétion-éjection
 - Observations du lien accrétion-éjection
 - Là où il y a accrétion, il y a éjection!

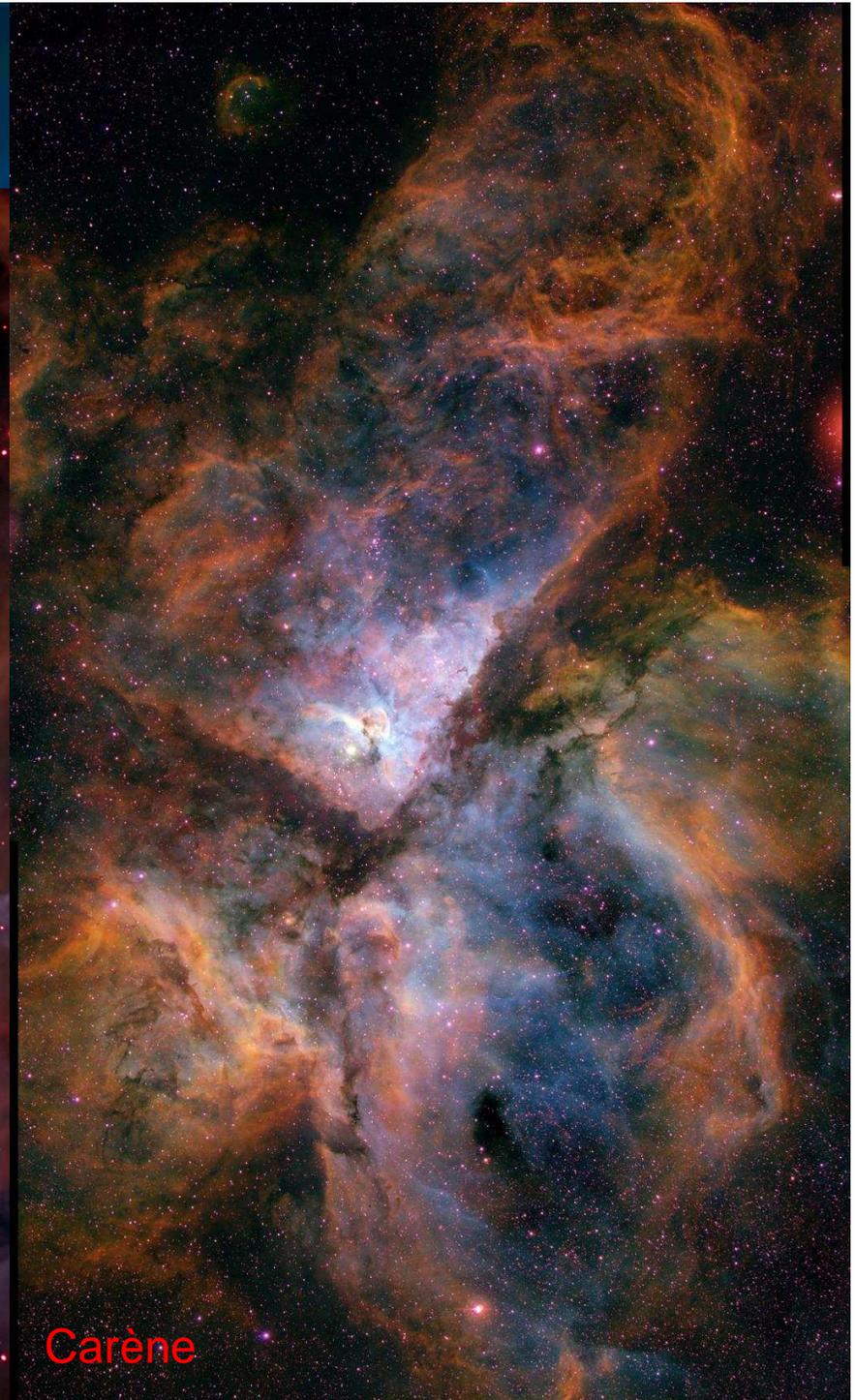
- Perspectives
 - Les sursauts de rayons γ
 - Le mécanisme universel?

La naissance des étoiles

Nébuleuses



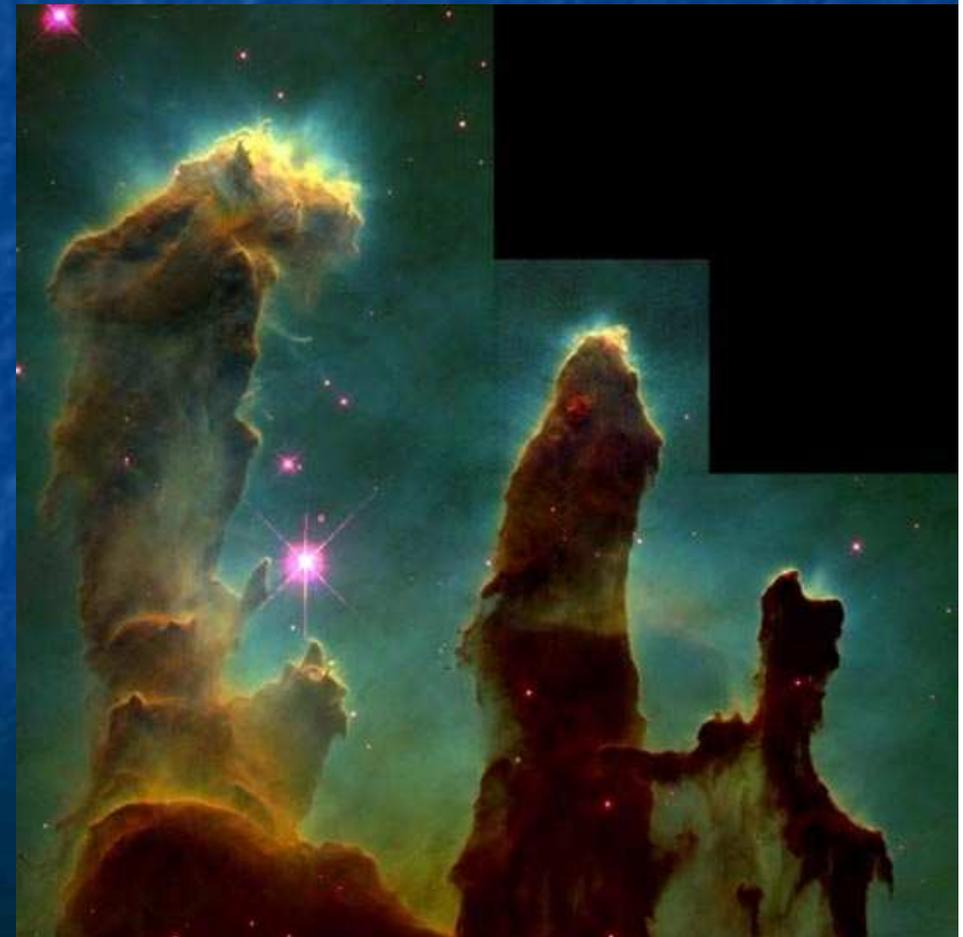
Orion



Carène

La naissance des étoiles

- Nébuleuse de l'aigle, HST, amas ouvert M16, à 7000 a.l.
- Evaporating gaseous globules (EGGs): pouponnières stellaires
- Colonnes de gaz H_2 /poussière: qq a.l., très denses: contraction gravitationnelle
- Mise à nu des EGGs par rayonnement intense de jeunes étoiles



La naissance des étoiles: Objets Herbig Haro

- Etoiles en formation: vents/écoulements bipolaires collimatés
- HH: Gaz en collision supersonique (~ 100 km/s) avec nuages froids de gaz/poussière, phénomène transitoire: ~ 1000 ans
 - Observé fin XIX par [Sherburne Wesley Burnham](#)
 - Etudié en 1940 par [George Herbig](#) et [Guillermo Haro](#)
- Découverte de mouvements propres
 - Cudworth & Herbig 1979
 - Herbig & Jones 1981
- HH1 et HH2 distants d'1 a.l., axisymétriques / étoile jeune

QuickTime™ et un
décompresseur TIFF (non compressé)
sont requis pour visionner cette image.

Objets Herbig-Haro

- Etoiles entourées de disques d'accrétion durant $\sim 10^5$ ans, en rotation rapide: création de jets polaires collimatés de plasma chaud ionisé
 - Masse éjectée: 1-20 M_{\odot}
 - T: 8-12 000 K
 - Densité: ~ 10000 part./cm³ (10x+ que régions HII)
 - 75% H, 25% He
- **HH30: Disque d'accrétion, HH34: éjections périodiques, HH47: étoile à gauche**
barre: 1000 u.a.

décompresseur TIFF (non compressé)
sont requis pour visionner cette image.

QuickTime™ et un

QuickTime™ et un
décompresseur TIFF (non compressé)
sont requis pour visionner cette image.

Objets Herbig-Haro

- 400 HH connus, ~150 000 HH dans la Galaxie
- Régions HII formation stellaire, près des globules de Bok (nébuleuses sombres contenant des étoiles jeunes)
- La plupart des HH à moins de 0.5 pc de l'étoile mère, certains jusqu'à qq pcs (MIS peu dense)
- Etoiles enfouies dans nuage moléculaire dense: IR/radio

- HH32
- Ondes de choc IR dans Orion

QuickTime™ et un décompresseur TIFF (non compressé) sont requis pour visionner cette image.

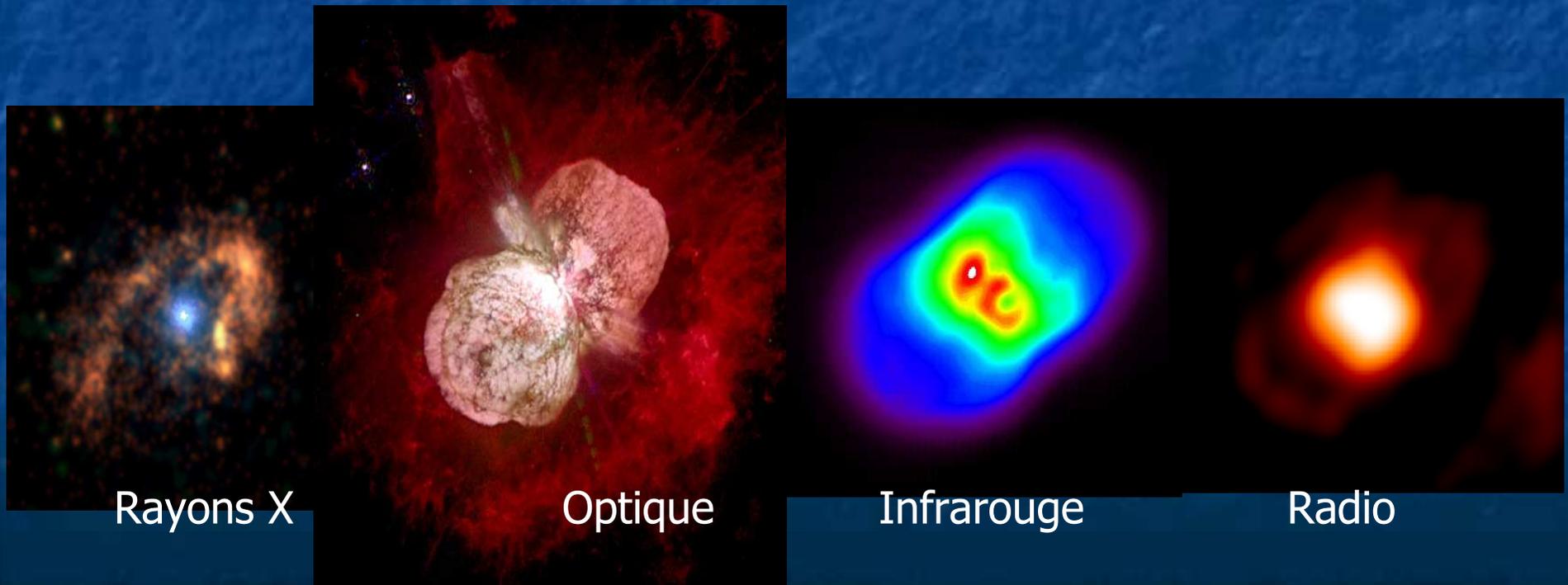
QuickTime™ et un décompresseur TIFF (non compressé) sont requis pour visionner cette image.

Plan

- Les jets sont partout dans l'Univers!
 - La naissance des étoiles
 - La vie des étoiles
 - La mort des étoiles
 - La réincarnation des étoiles
 - Les quasars
- Les mécanismes d'accrétion-éjection
 - Observations du lien accrétion-éjection
 - Là où il y a accrétion, il y a éjection!
- Perspectives
 - Les sursauts de rayons γ
 - Le mécanisme universel?

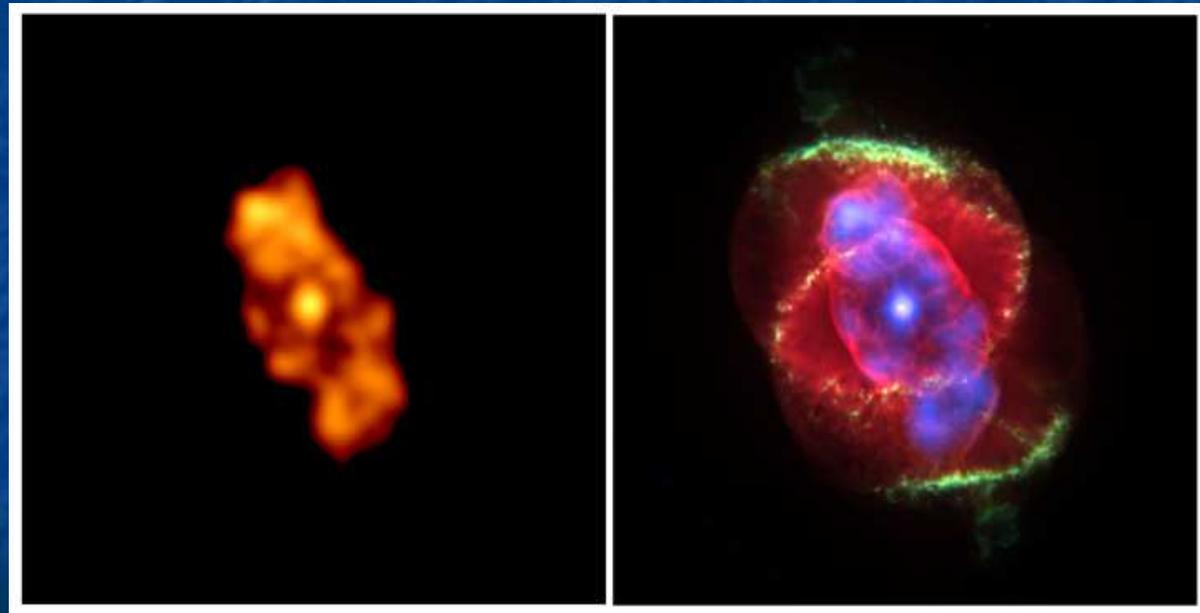
La vie des étoiles

- Eta Carinae: l'étoile la plus lumineuse de notre Galaxie, 5 millions de Soleils (LBV), à 7000 al.
- La prochaine Supernova?



La vie des étoiles

- Nébuleuse de l'œil de chat, à plusieurs millions de degrés
- Etoile centrale, très brillante, deviendra une naine blanche dans quelques millions d'années



Rayons X

Optique

Plan

- Les jets sont partout dans l'Univers!
 - La naissance des étoiles
 - La vie des étoiles
 - La mort des étoiles
 - La réincarnation des étoiles
 - Les quasars

- Les mécanismes d'accrétion-éjection
 - Observations du lien accrétion-éjection
 - Là où il y a accrétion, il y a éjection!

- Perspectives
 - Les sursauts de rayons γ
 - Le mécanisme universel?

La mort des étoiles légères: Les naines blanches

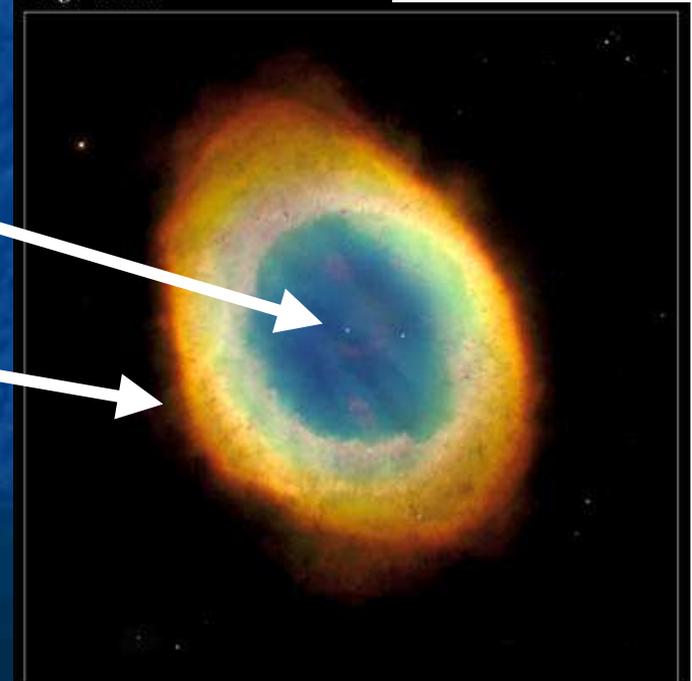
- Etoiles peu massives ($<1.4 M_{\text{Soleil}}$) ayant épuisé Hélium
- Le cœur reste intact (pas de réaction nucléaire) mais sans couche extérieure
- La pression de dégénérescence des électrons maintient l'équilibre (principe de Pauli, mécanique quantique)
 - $M_{\text{Soleil}}/2$ dans volume de la Terre
 - Grande densité: 10^9 kg/m^3
 - 1 cuillère à café pèse 1 tonne
- Soleil: géante rouge -> naine blanche dans $5 \cdot 10^9$ d'années
- Nébuleuse planétaire M57 (Lyre):
 - Ejection de couches extérieures
 - Taille: 6 a.l. de large
 - Âge: plusieurs milliers d'années
 - Distance: 7000 a.l.
- Puis naine blanche s'éteint lentement -> naine noire

QuickTime™ et un décompresseur TIFF (non compressé) sont requis pour visionner cette image.



QuickTime™ et un décompresseur TIFF (non compressé) sont requis pour visionner cette image.

Ring Nebula



La mort des étoiles massives: les étoiles à neutron

- Mort d'une étoile massive ($>4-8 M_{\text{Soleil}}$):
 - Epuisement du carburant nucléaire
 - La région centrale de l'étoile s'effondre sous la gravité
 - $p + e^- \rightarrow n$: « étoiles à neutrons »
- La pression de dégénérescence des neutrons maintient l'équilibre (principe de Pauli, mécanique quantique).
- $M \sim 1.4 M_{\text{Soleil}}$
- Volume: sphère $R=10 \text{ km}$
- Grande densité:
 - $1\,000\,000\,000\,000\,000\,000 \text{ kg/m}^3$
 - 1 cuillère à café pèse 1 milliard de tonnes... ($10^6 \times$ + NB)
- Champ gravitationnel = $300\,000 \text{ g}$
- Supergéante rouge \rightarrow Explosion de supernova
- Ejection des couches extérieures \rightarrow rémanent de supernova
- Pulsars



QuickTime™ et un décompresseur H.264 (non compressé) sont requis pour visionner cette image.

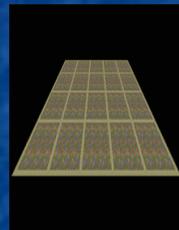
=1 000 000 000

QuickTime™ et un décompresseur H.264 (non compressé) sont requis pour visionner cette image.

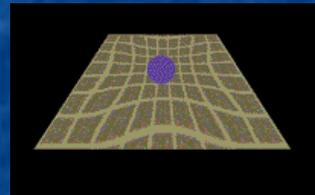


La mort des étoiles massives: déformations de l'espace-temps

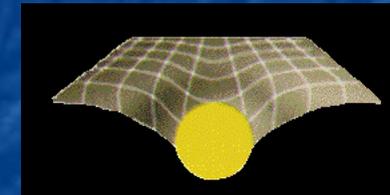
- Relativité générale: 4 dimensions d'espace-temps intimement liées.
- La matière courbe l'espace.
- Espace à 2 dimensions: feuille de papier plate, mais déformée par un poids.



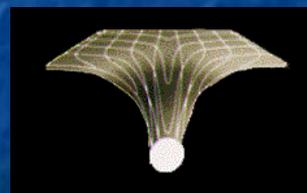
Vide



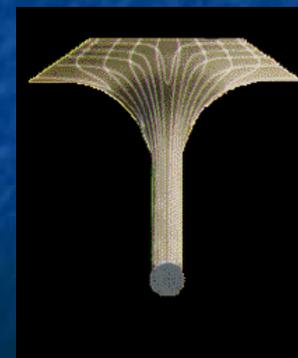
Terre



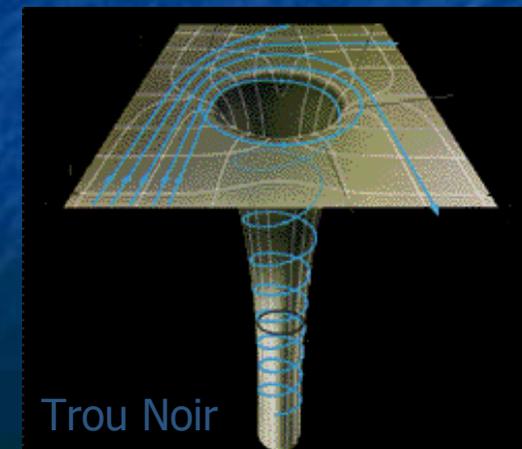
Soleil



Naine blanche



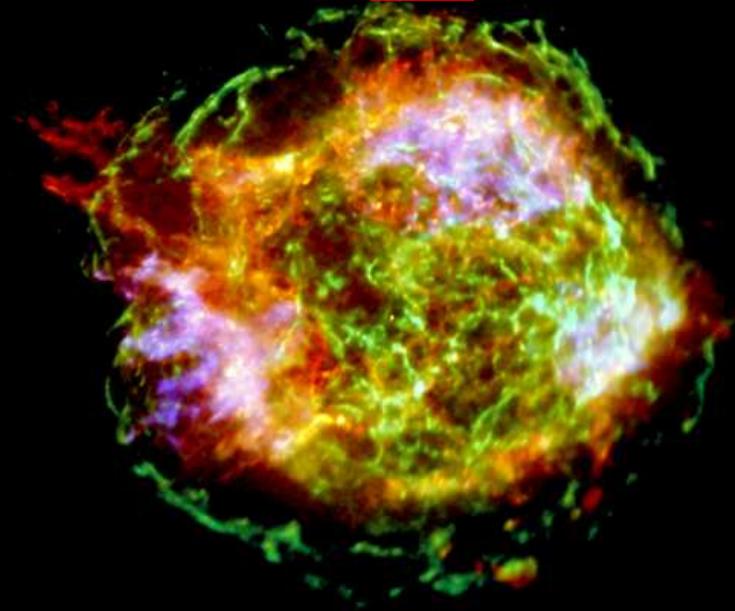
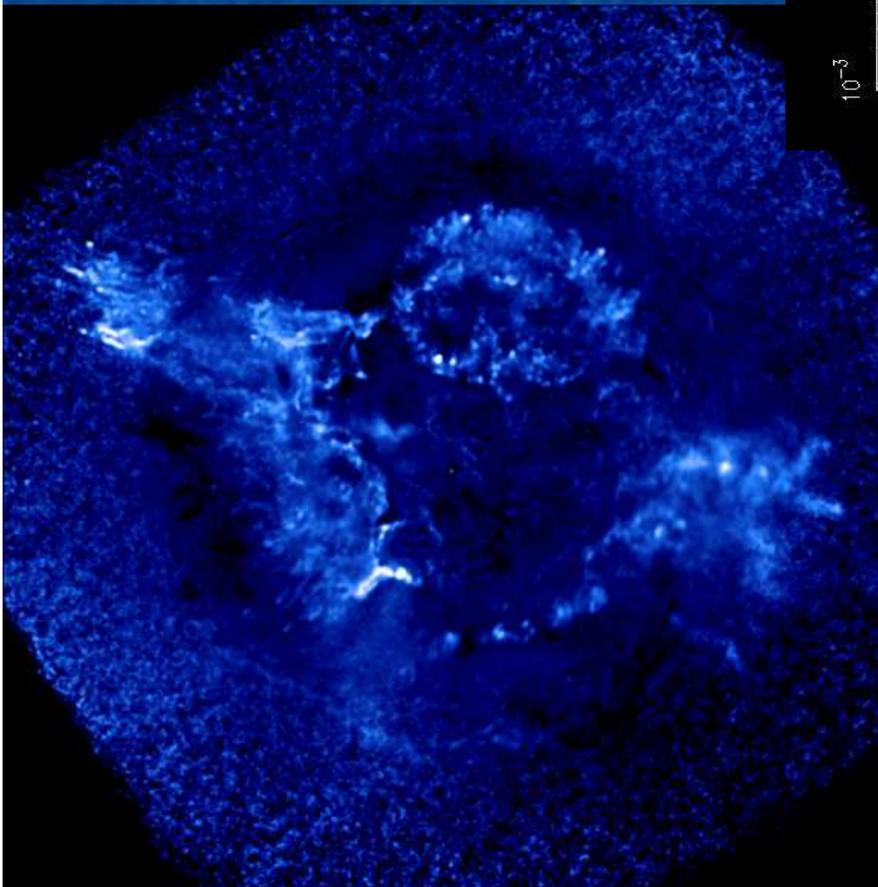
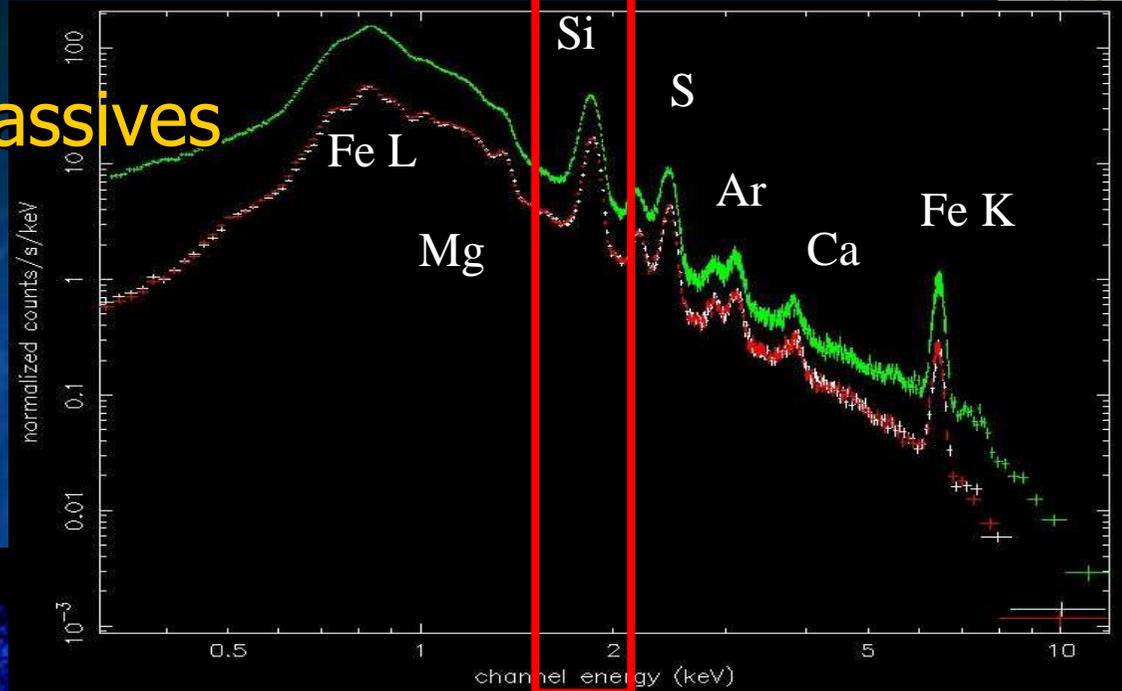
Etoile à neutron



Trou Noir

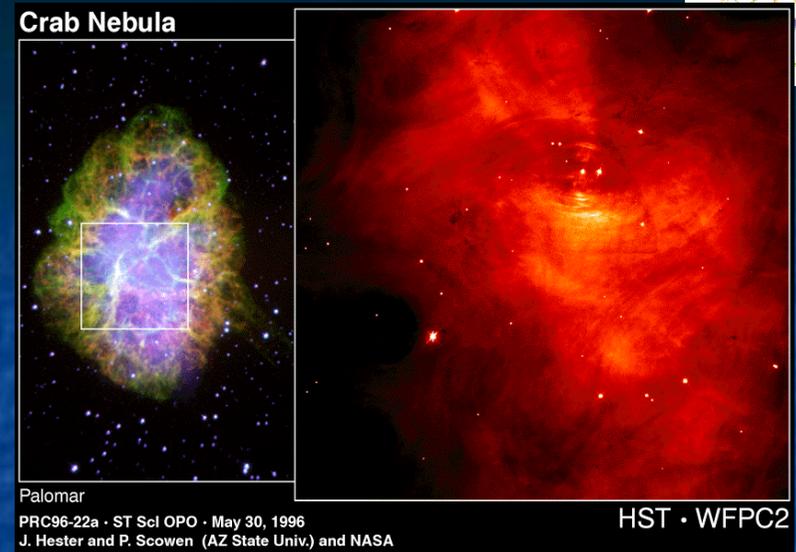
La mort des étoiles massives

- Image (1 Ms) *Chandra* du reste de supernova Cas A
 - Spectre XMM dans la bande du Si



La mort des étoiles massives: les étoiles à neutron

- Pulsar de la nébuleuse du Crabe
- Rémanent de supernova observée en 1054 par les Chinois et Arabes (Messier 1) visible pendant 23 jours
 - Diamètre: 6 a.l.
 - Âge: 951 ans!
 - Distance: 6500 a.l.
 - Etoile centrale en rotation: 30 tours/s
 - Expansion: 1000 km/s
 - Nébuleuse à plusieurs millions de degrés
- Film (plusieurs mois)
 - Ondes de choc, vent de (anti-)matière à 150 000 km/s



QuickTime™ et un
décompresseur codec YUV420
sont requis pour visionner cette image.

Rayons X

Optique

Plan

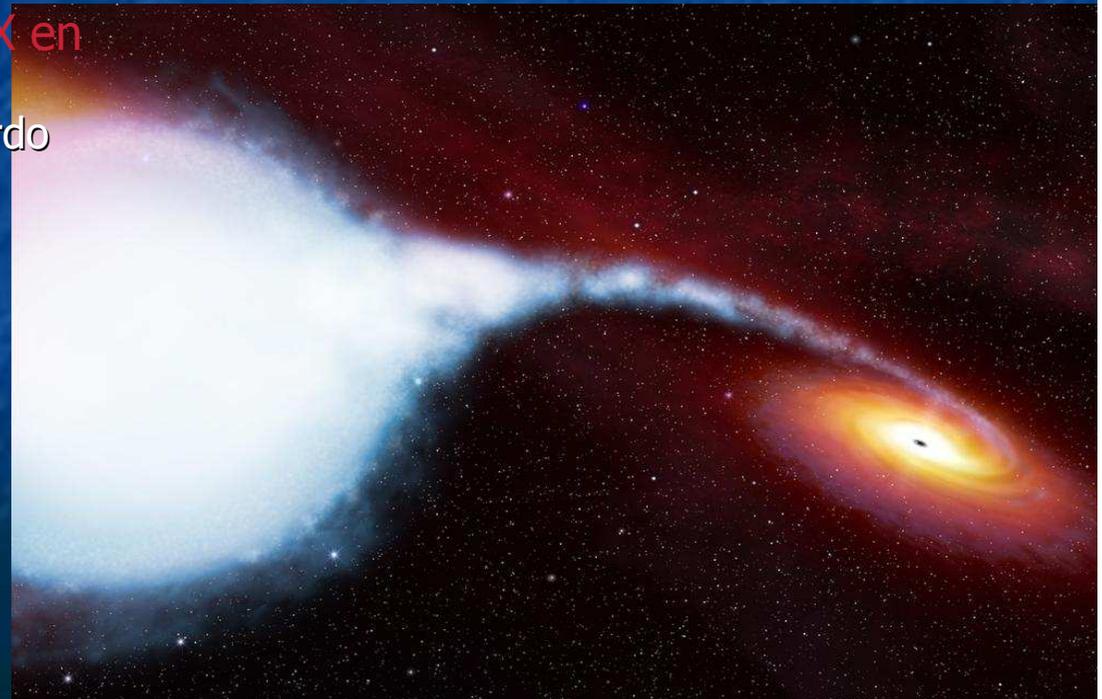
- Les jets sont partout dans l'Univers!
 - La naissance des étoiles
 - La vie des étoiles
 - La mort des étoiles
 - La réincarnation des étoiles
 - Les quasars

- Les mécanismes d'accrétion-éjection
 - Observations du lien accrétion-éjection
 - Là où il y a accrétion, il y a éjection!

- Perspectives
 - Les sursauts de rayons γ
 - Le mécanisme universel?

La réincarnation des étoiles

- Différence trou noir/ étoile à neutron:
 - Les trous noirs seuls n'émettent rien.
- Objet compact + étoile compagnon = système binaire
 - « Accrétion/éjection »: émission de rayons X/ γ
- Premières observations d'astres X en 1960:
 - Prix Nobel de Physique de Riccardo Giacconi (2002)



Vent collimaté dans les naines blanches

- Accrétion: apparition de raies satellites H α , H β , HeII décalées de $\sim 800 \rightarrow 5000 \text{ km/s}$
- Binaires serrées à fort taux de transfert de masse ($10^{-7} M_{\text{sol}}/\text{an}$), variable cataclysmique, $L_x = 10^{37} \text{ erg/s}$, $100\,000 \text{ K}$ □ □
- Combustion thermonucléaire stable de H à la surface de la naine blanche ($0.007 mc^2$).
- Accumulation de masse \rightarrow limite de Chandrasekhar \rightarrow SN Ia

QuickTime™ et un
décompresseur TIFF (non compressé)
sont requis pour visionner cette image.

- RXJ 0925-4758, avec/sans jet (5600 km/s) (Motch 1998)

Accrétion/Combustion

- Comparaison de l'énergie générée par:
 - accrétion sur un objet compact ($1M_{\text{Sol}}$)
 - combustion thermonucléaire de l'hydrogène.

Objet compact	Accrétion	Combustion nucléaire
Naine blanche	0.00025 mc^2	0.007 mc^2
Etoile à neutron	0.15 mc^2	0.007 mc^2
Trou noir	0.1-0.42 mc^2	-

La réincarnation des étoiles: SS 433

- Découverte en 1979 de la première binaire X galactique produisant 2 jets symétriques de particules relativistes
- Vitesse: $0.26c$ ($\Gamma=1.04$)
- Observations de raies d'émission en optique (H Balmer, HeI) et X (Fe) décalées par effet Doppler: jets baryoniques
- Spectres optique et X (ASCA): (Margon et al. 1979, Kotani et al. 1994)

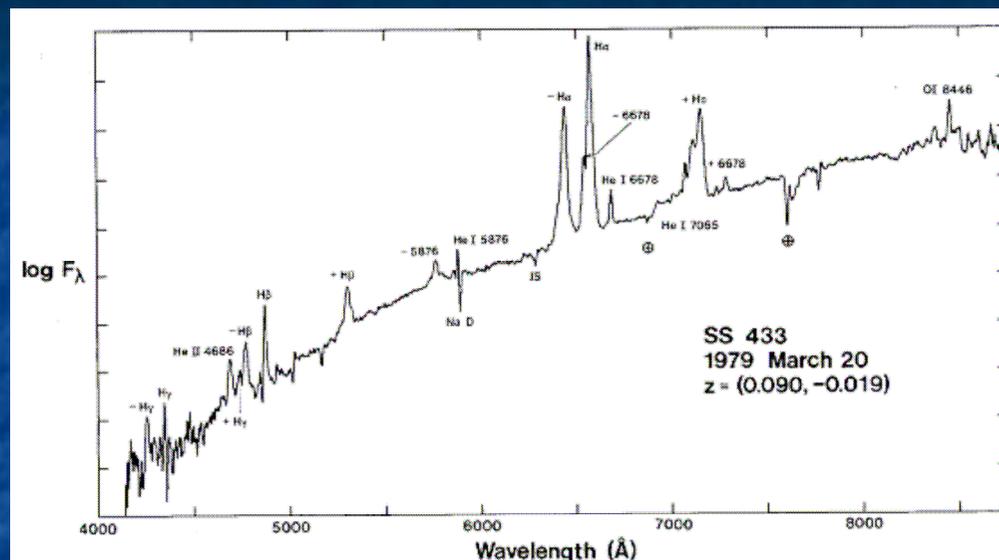


FIG. 1.—Spectrum of SS 433 obtained on 1979 March 20 with the Lick Observatory 3 m Shane reflector. The data have been converted to flux units via observations of spectrophotometric standard stars from the list of Stone (1977). The principal emission features are identified, and the prefixes “+” and “-” to these labels denote lines in the redshift and blueshift systems, respectively. Stronger interstellar and telluric absorption features are also labeled. Each division on the ordinate corresponds to 0.83 mag.

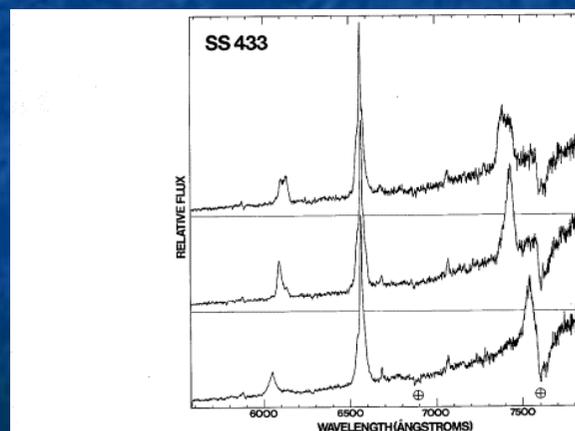
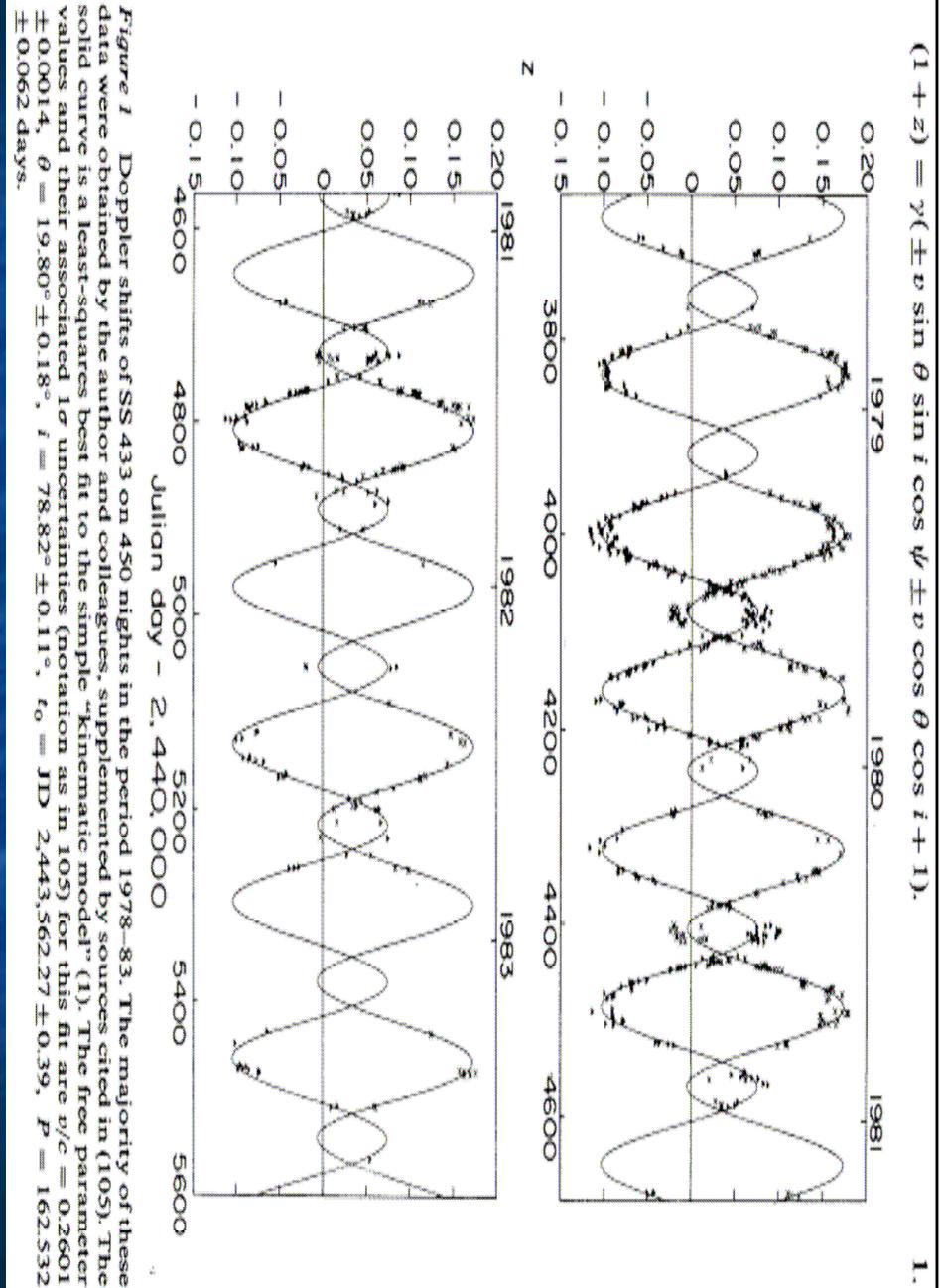


FIG. 3.—The red/infrared spectrum of SS 433 on three of four consecutive nights, obtained with 10 Å resolution on the Lick 0.6 m reflector. The dramatic changes in both wavelength and profile of the two unidentified emission features flanking H α are well-illustrated in this example. He I λ 5876, 6678, 7065 emission is visible, as are the unresolved interstellar NaD lines and λ 6284 band. The emission bands in the λ 6300-6400 range (cf. Fig. 1) are absent on these particular nights. The telluric A and B bands have been indicated. The upper, center, and lower panels were observed on 1978 October 23, 24, and 26, respectively.

QuickTime™ et un décompresseur TIFF (non compressé) sont requis pour visionner cette image.

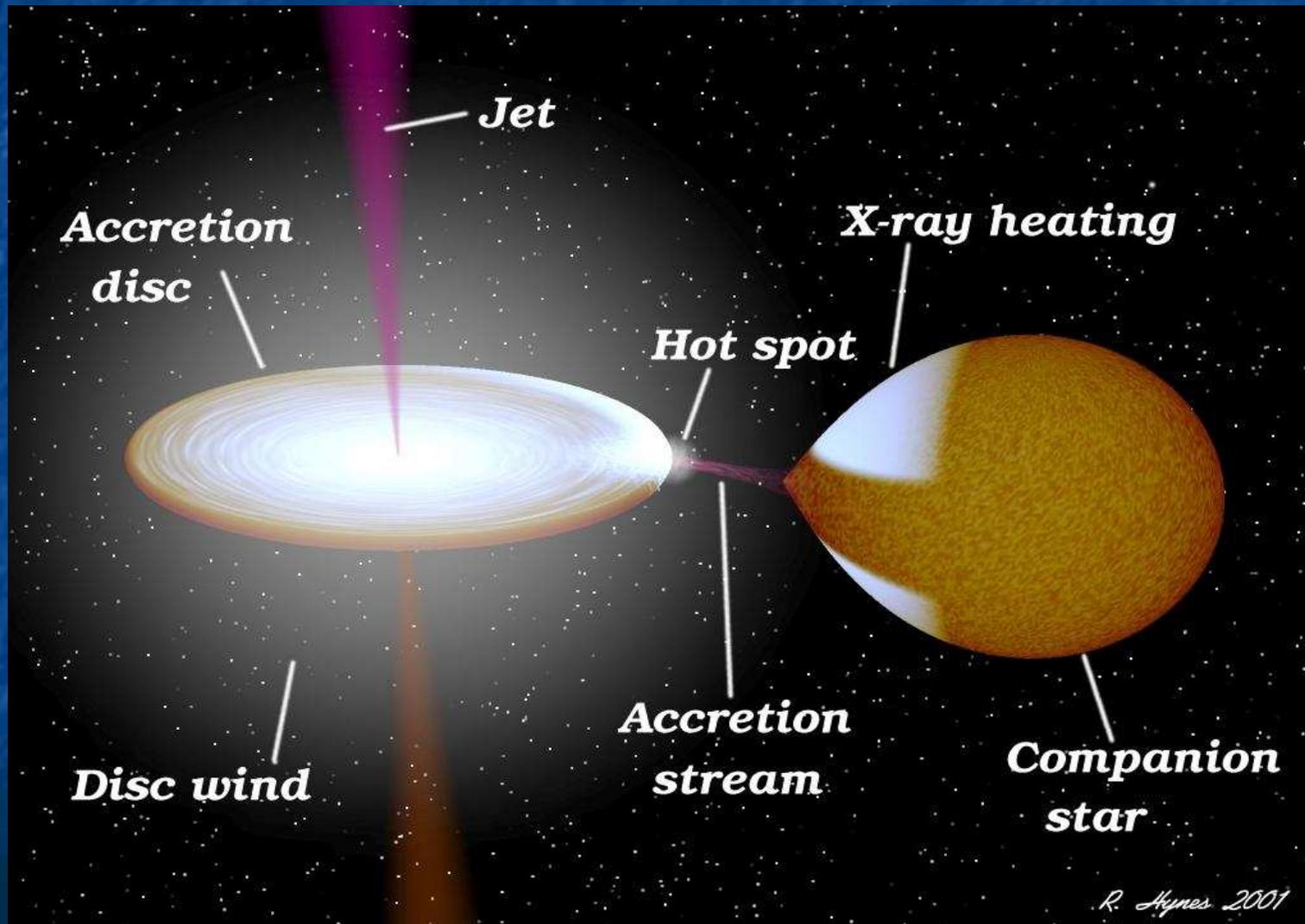
Les jets de SS 433

- SS 433 à 5 kpc,
 $P_{\text{orb}} = 13.08$ jours
- Précession 19.8° autour
d'un axe incliné de 78.8° ,
période 163 jours,
collimation 4° (Margon et
al. 1979)
- OCNI: Objet Compact
Non Identifié (NS?)
- **Microquasar
prototype:** comment un
objet de la galaxie envoie
de la matière à des
vitesses relativistes?



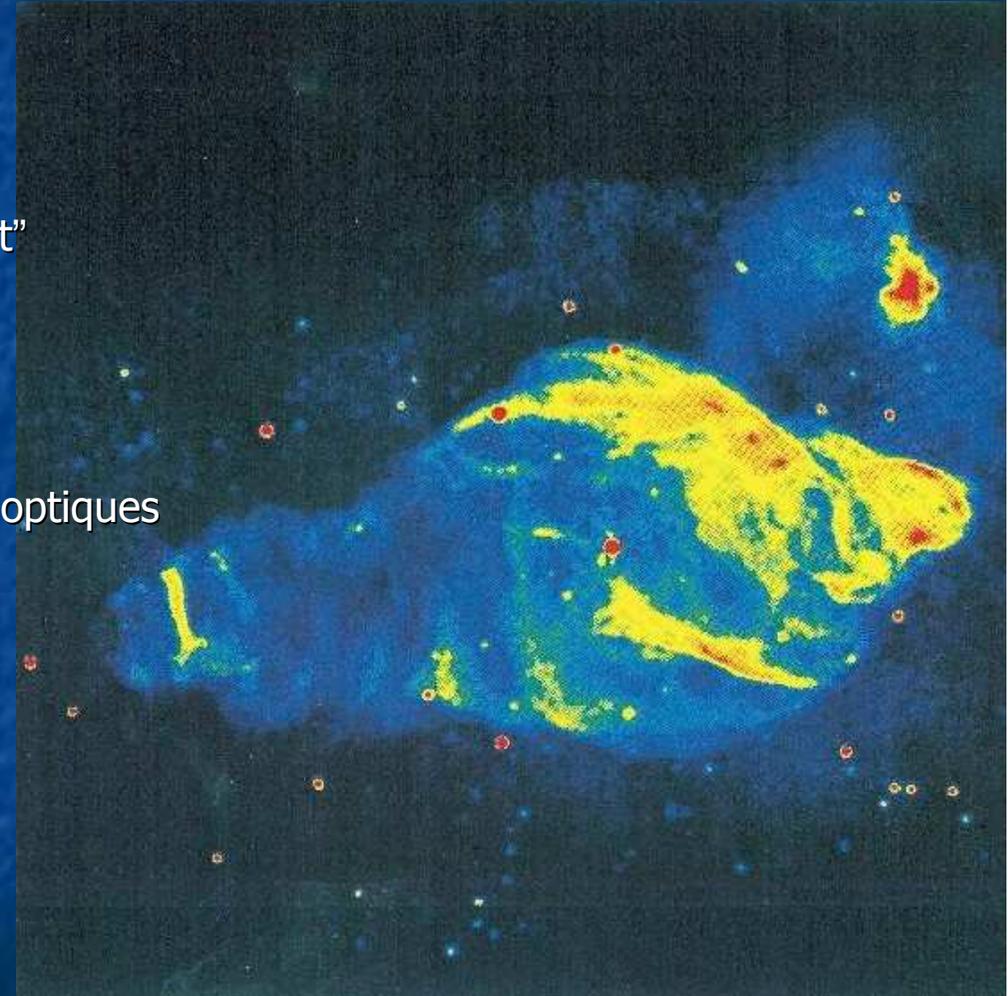
La réincarnation des étoiles en microquasars

- ~ 20 microquasars dans la Galaxie



SS 433: considérations énergétiques

- SS 433 au centre d'un reste de SN: W 50
- Ejections:
 - balistiques par paquets
 - Temps de vie radiatif des $e^- > 1000$ ans
 - collision relativiste avec W 50: "percement"
- Emission des jets:
 - Base: $kT > 10\text{keV} \rightarrow X$ (Bremmstrahlung)
 - $r > 10^{12}$ cm (1ua): $T < 10^5\text{K}$
 - $r \sim 10^{15}$ cm: $T \sim 2 \times 10^4\text{K}$, $n_e > 10^6\text{cm}^{-3}$: raies optiques (thermique)
 - $10^{14} < r < 10^{17}$ cm: radio (synchrotron)
 - 10^{18} cm: X (choc MIS) $\rightarrow 100\text{pc}$
- Source X peu lumineuse:
 - $L_x \sim 5 \times 10^{35}$ erg/s, $E_{c_jet}: 10^{40}$ erg/s
 - Zone d'impact: $E_{jet} = 3 \times 10^{40}$ erg/s
 - $dM/M = 10^{-5-6} M_{sol}/\text{an}$
- Energie d'accrétion injectée dans jets.

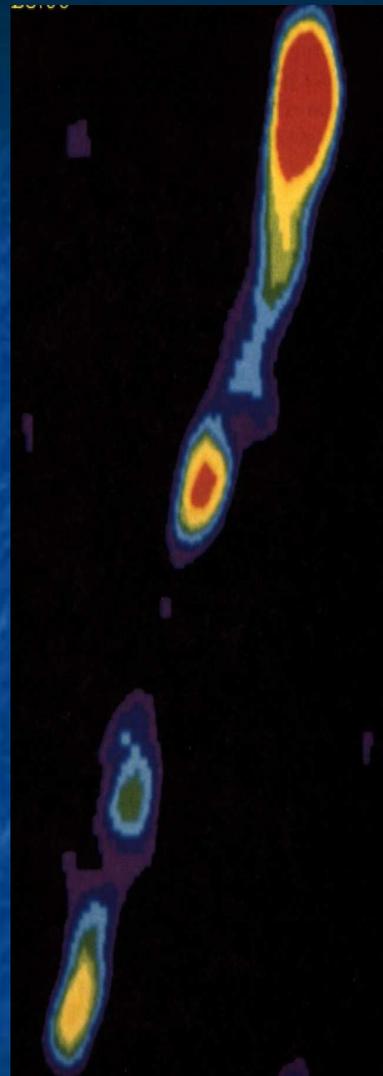


SS433 & W50: $2^\circ \times 2^\circ$ (Dubner et al., 1998)

QuickTime™ et un
décompresseur H.264
sont requis pour visionner cette image.

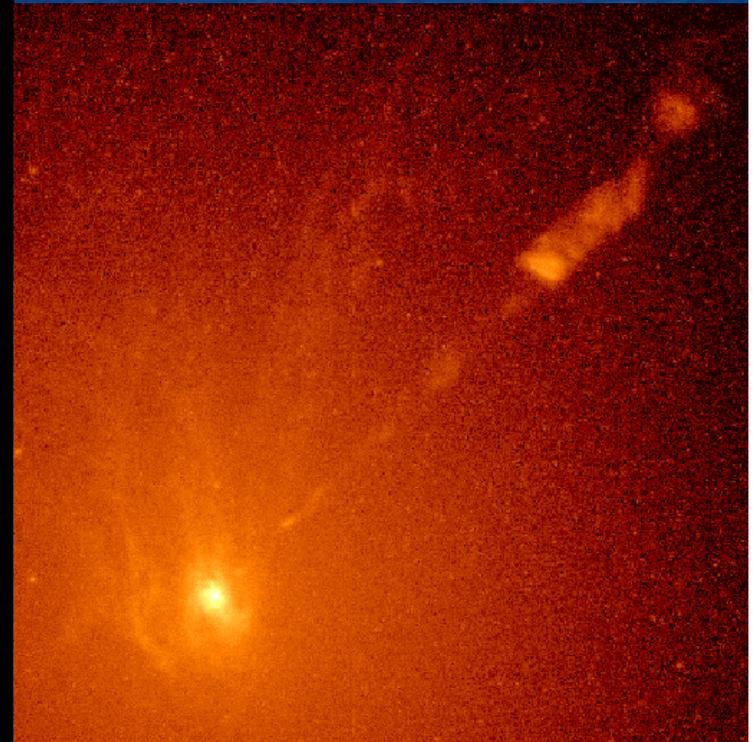
Les microquasars

- Microquasar 1E 1740.7-2942:
 - le grand annihilateur de la Galaxie
- Jets radio bipolaires collimatés sur qq a.l.
- Analogie quasars-microquasars



1E1740, 1'x1': Mirabel et al. 1992

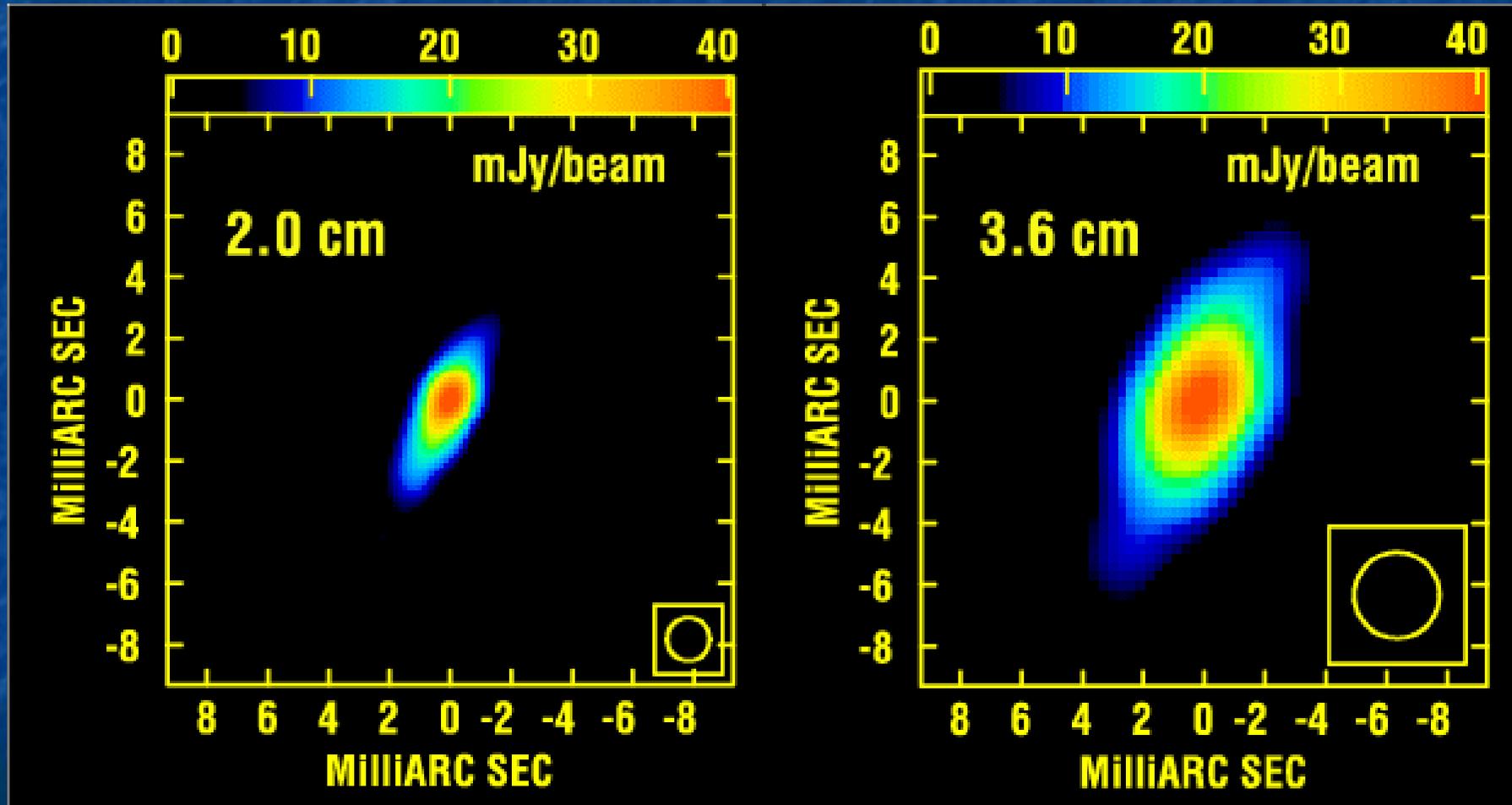
RADIO



M87 OPTIQUE

Les microquasars: jets en radio

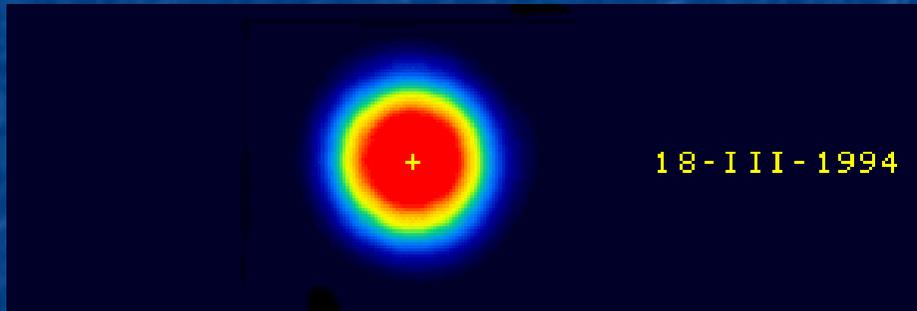
- Phénomènes d'éjection dans les microquasars...



- ...1 mas représente 10 u.a.!

Jets de microquasars

- GRS 1915+105: Nova Aquila 1992
 - Source X variable, lumineuse:
 $L_x \sim 3 \times 10^{38}$ erg/s
 - D=12.5 kpc
 - TN $M=14M_{\text{sol}}$ □
 - QPO 67 Hz
 - 2 jets radio: 1.25 et 0.65c ($v=0.92c$)



GRS 1915+105: jets radio

- VLA (1 mois)
- MERLIN: distance 3000 u.a.

QuickTime™ et un
décompresseur TIFF (non compressé)
sont requis pour visionner cette image.

Sources de jets relativistes Galactiques

- 20% des binaires émettent en radio avec spectre plat synchrotron, ou résolues spatialement en jets collimatés.

QuickTime™ et un
décompresseur TIFF (non compressé)
sont requis pour visionner cette image.

Microquasars

Table 2.1: Microquasars in our Galaxy

Name	Position (J2000.0)	System type ^(a)	D (kpc)	P_{orb} (d)	M_{compact} (M_{\odot})	Activity radio ^(b)	β_{app}	$\theta^{(c)}$	Jet size (AU)	Remarks ^(d)
High Mass X-ray Binaries										
LS I +61 303	02 ^h 40 ^m 31 ^s .66 +61°13'45".6	B0V +NS?	2.0	26.5	–	p	≥ 0.4	–	10–700	Prec?
V4641 Sgr	18 ^h 19 ^m 21 ^s .48 –25°25'36".0	B9III +BH	~ 10	2.8	9.6	t	≥ 9.5	–	–	
LS 5039	18 ^h 26 ^m 15 ^s .05 –14°50'54".24	O6.5V((f)) +NS?	2.9	4.1	1–3	p	≥ 0.15	$< 81^\circ$	10–10 ³	Prec?
SS 433	19 ^h 11 ^m 49 ^s .6 +04°58'58".	evolved A? +BH?	4.8	13.1	11 \pm 5?	p	0.26	79°	$\sim 10^4$ –10 ⁶	Prec XRJ
Cygnus X-1	19 ^h 58 ^m 21 ^s .68 +35°12'05".8	O9.7Iab +BH	2.5	5.6	10.1	p	–	40°	~ 40	Prec?
Cygnus X-3	20 ^h 32 ^m 25 ^s .78 +40°57'28".0	WNe +BH?	9	0.2	–	p	0.69	73°	$\sim 10^4$	
Low Mass X-ray Binaries										
XTE J1118+480	11 ^h 18 ^m 10 ^s .85 +48°02'12".9	K7V–M0V +BH	1.9	0.17	6.9 \pm 0.9	t	–	–	≤ 0.03	
Circinus X-1	15 ^h 20 ^m 40 ^s .9 –57°10'01".	Subgiant +NS	5.5	16.6	–	t	> 15	$< 6^\circ$	$> 10^4$	
XTE J1550–564	15 ^h 50 ^m 58 ^s .70 –56°28'35".2	G8–K5V +BH	5.3	1.5	9.4	t	> 2	–	$\sim 10^{5\ddagger}$	XRJ
Scorpius X-1	16 ^h 19 ^m 55 ^s .1 –15°38'25".	Subgiant +NS	2.8	0.8	1.4	p	0.68	44°	~ 40	
GRO J1655–40	16 ^h 54 ^m 00 ^s .25 –39°50'45".0	F5IV +BH	3.2	2.6	7.02	t	1.1	72°–85°	8 10 ³	Prec?
GX 339–4	17 ^h 02 ^m 49 ^s .5 –48°47'23".	– +BH	> 6	1.76	5.8 \pm 0.5	t	–	–	$\sim 4.6 10^{4\ddagger}$	
1E 1740.7–2942	17 ^h 43 ^m 54 ^s .83 –29°44'42".60	– +BH ?	8.5?	12.5?	–	p	–	–	$\sim 10^6$	
XTE J1748–288	17 ^h 48 ^m 05 ^s .06 –28°28'25".8	– +BH?	≥ 8	?	$> 4.5?$	t	1.3	–	$> 10^4$	
GRS 1758–258	18 ^h 01 ^m 12 ^s .40 –25°44'36".1	– +BH ?	8.5?	18.5?	–	p	–	–	$\sim 10^6$	
GRS 1915+105	19 ^h 15 ^m 11 ^s .55 +10°56'44".7	K–M III +BH	12.5	33.5	14 \pm 4	t	1.2–1.7	66°–70°	~ 10 –10 ⁴	Prec?

Notes: ^(a) NS: neutron star; BH: black hole. ^(b) p: persistent; t: transient. ^(c) jet inclination.

^(d) Prec: precession; XRJ: X-ray jet. ^{*}Reported by Corbel et al. 2002. [†]Recently reported by Gallo et al. 2004.

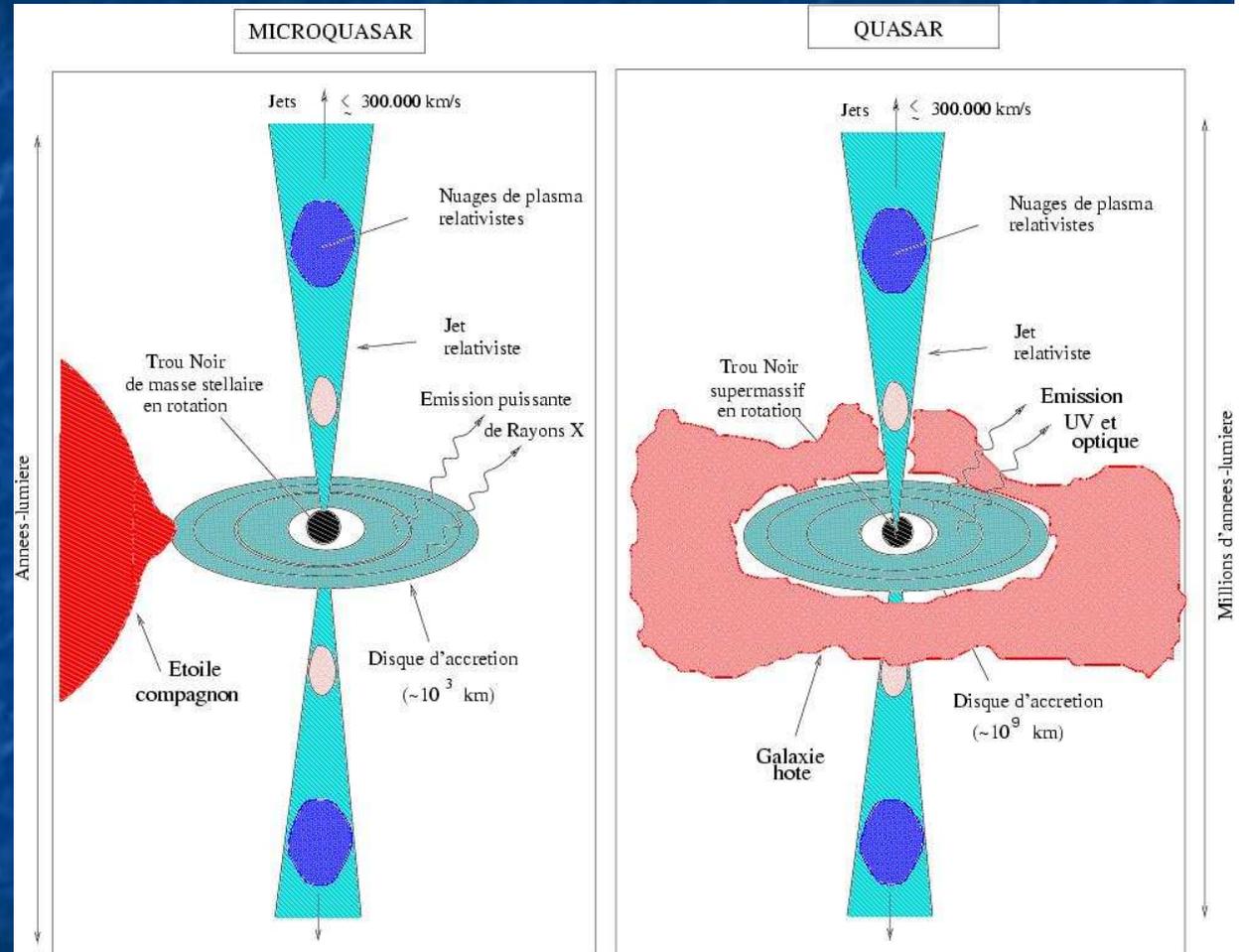
Jets galactiques

QuickTime™ et un
décompresseur TIFF (non compressé)
sont requis pour visionner cette image.

- Les jets ne sont pas des oiseaux rares dans l'Univers
- Vitesse & Mécanisme dépendent de nature de objet accrétant
- Mais propriétés communes: champ gravitationnel, disque d'accrétion

Microquasars/quasars

- Enorme différence de masse et de taille entre quasars et microquasars, mais la physique est la même: celle des trous noirs!
- Jets microquasars: 10^{17} cm
- Jets quasars: 10^{24} cm
- Echelle de temps dynamique de variation prop. masse objet accrétant.



Chaty, 1998

Plan

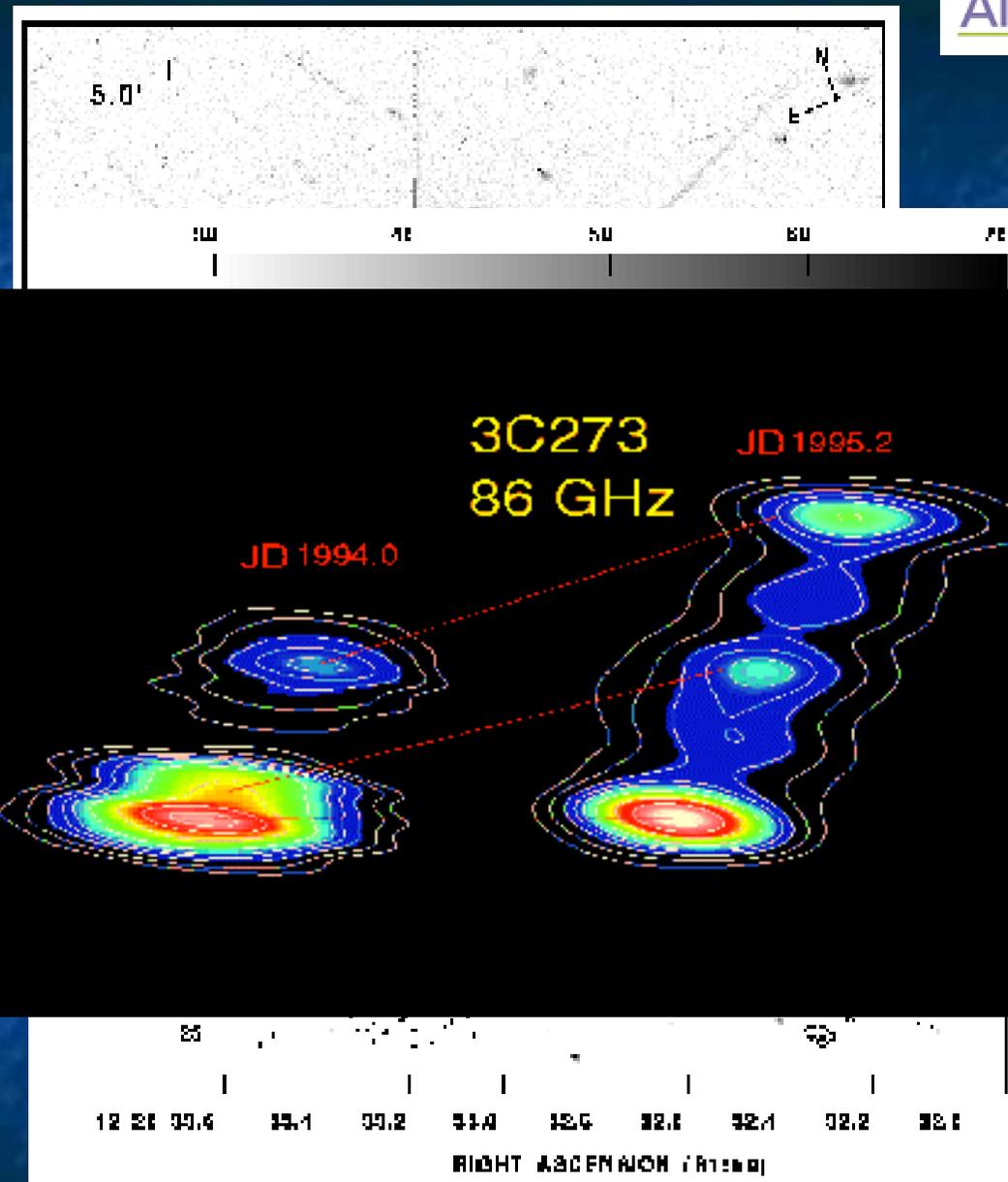
- Les jets sont partout dans l'Univers!
 - La naissance des étoiles
 - La vie des étoiles
 - La mort des étoiles
 - La réincarnation des étoiles
 - Les quasars

- Les mécanismes d'accrétion-éjection
 - Observations du lien accrétion-éjection
 - Là où il y a accrétion, il y a éjection!

- Perspectives
 - Les sursauts de rayons γ
 - Le mécanisme universel?

Jets des quasars

- Quasars découverts en 1963
- Noyaux actifs de galaxies abritant des trous noirs supermassifs
- Un quasar émet dans une région de la taille du système solaire la luminosité de 100 Voies lactées!
- Jet de 3C273 en optique/radio (Schmidt 1963)



Quasars et Jets extragalactiques

- 1^{ère} découverte d'un jet dans l'Univers:
 - Curtis 1918: "a curious straight ray ... apparently connected with the nucleus by a thin line of matter".
- M87: galaxie géante, au centre de l'amas de la Vierge à 16 Mpc:
 - $3 \times 10^9 M_{\text{sol}}$ dans 3 pc
 - Jet sur 20" $\sim 50\,000$ al.
 - Mvt propre: $v_{\text{app}} \sim 4-6c$
 - Inclinaison du jet $< 19^\circ$
 - HST: 6" = 500pc



QuickTime™ et un décompresseur TIFF (non compressé) sont requis pour visionner cette image.

Les quasars

- Centaurus A (NGC 5128):
Radio Galaxie active la plus
proche (elliptique barrée d'une
ceinture de poussière)
- Distance: 3 Mpc=11 millions a.l.
- Optique, IR, radio, X (jet:
synchrotron)

QuickTime™ et un
décompresseur TIFF (non compressé)
sont requis pour visionner cette image.

QuickTime™ et un
décompresseur TIFF (non compressé)
sont requis pour visionner cette image.

QuickTime™ et un
décompresseur TIFF (non compressé)
sont requis pour visionner cette image.

QuickTime™ et un
décompresseur TIFF (non compressé)
sont requis pour visionner cette image.

Les quasars

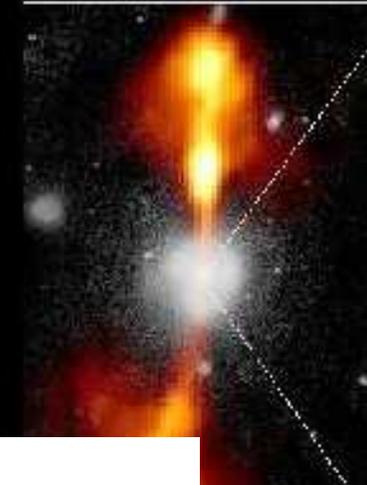
- □ Le cœur d'une galaxie active (radio/optique)

Core of Galaxy NGC 4261

Hubble Space Telescope

Wide Field / Planetary Camera

Ground-Based Optical/Radio Image



HST Image of a Gas and Dust Disk

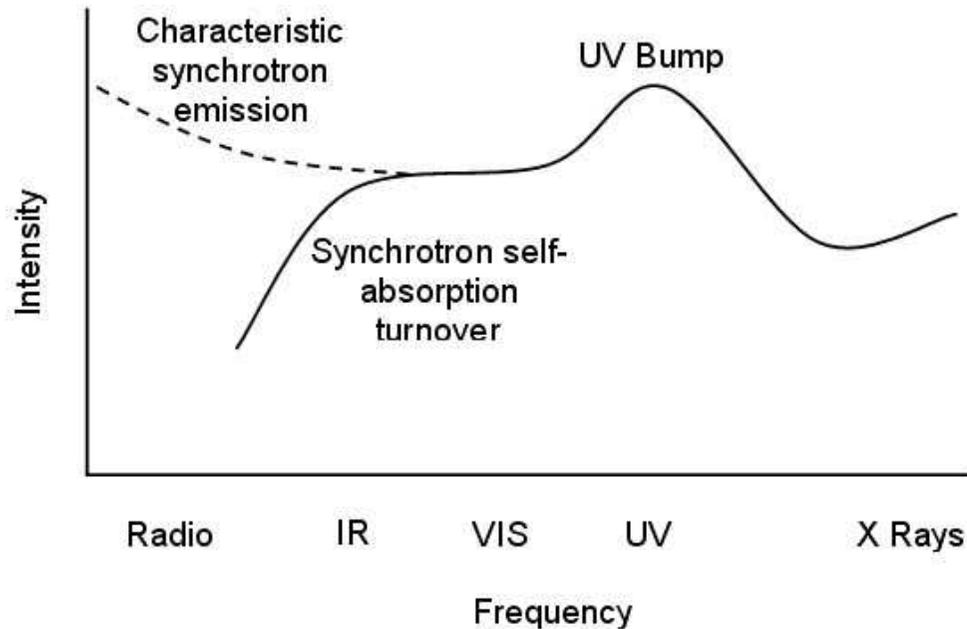
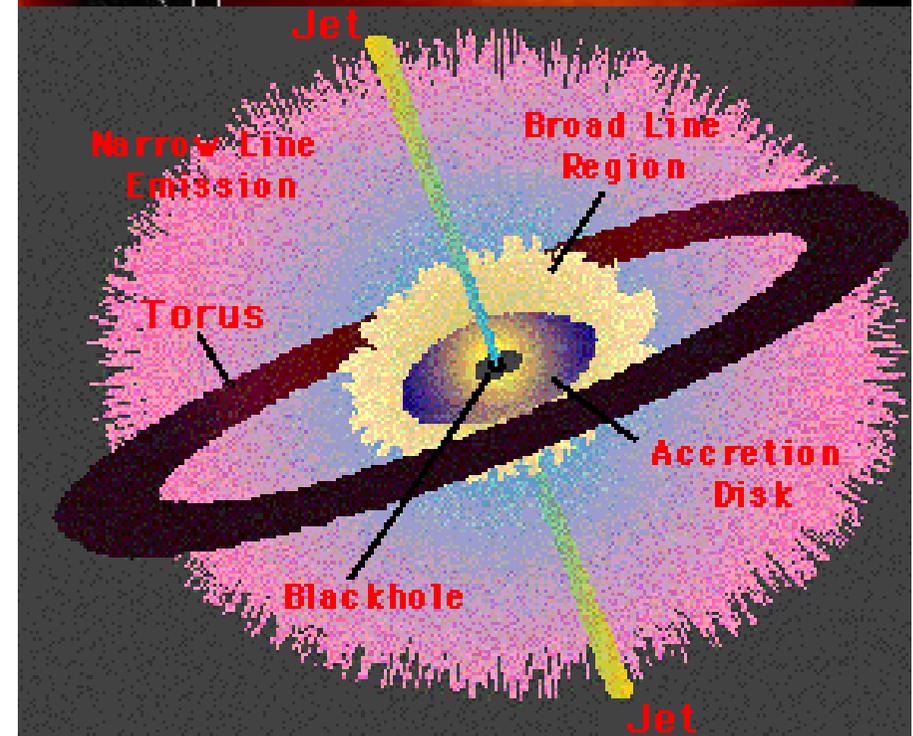
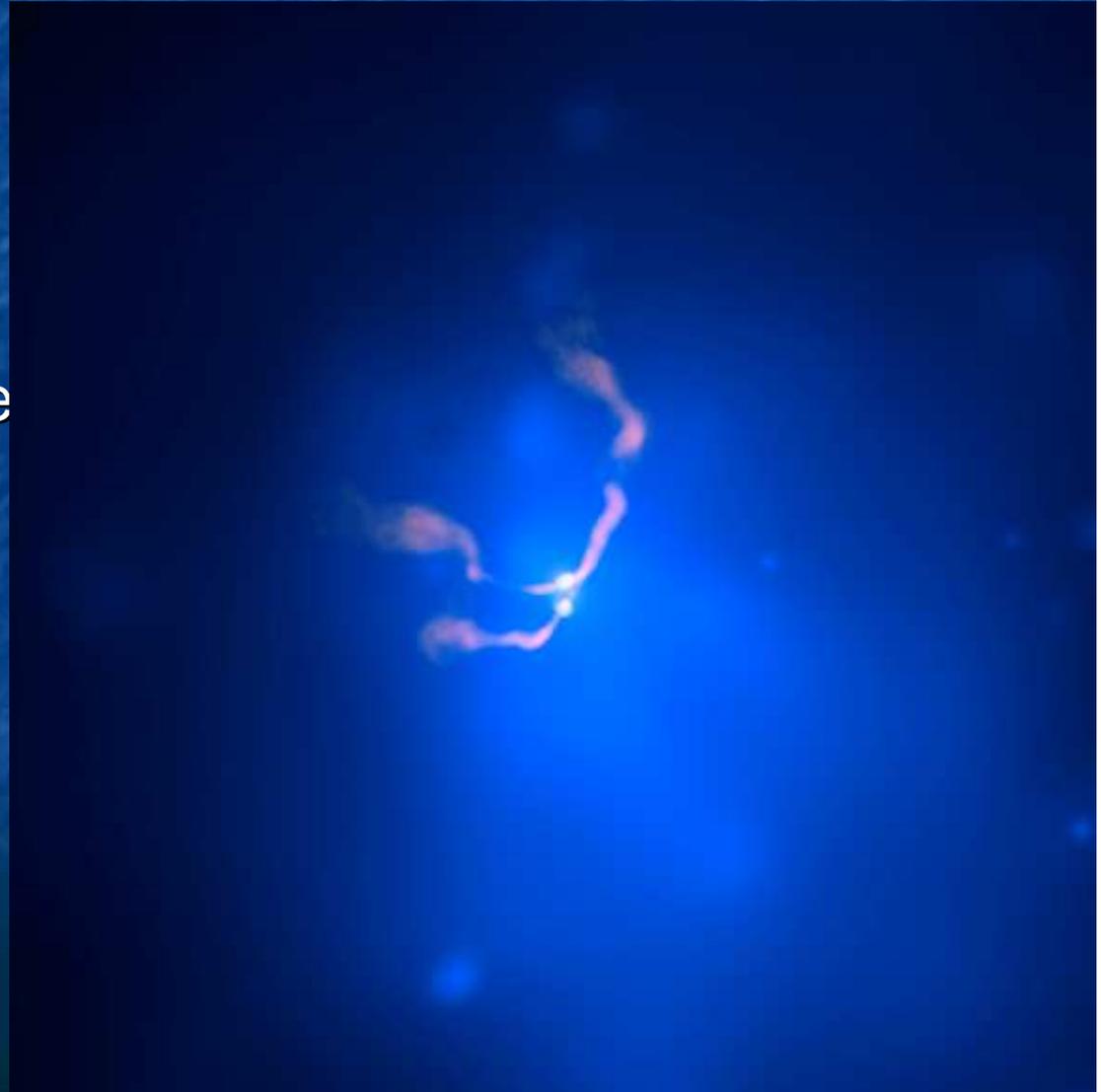


Figure 4: A sketch of the continuum observed for many AGN with intensity vs. frequency.



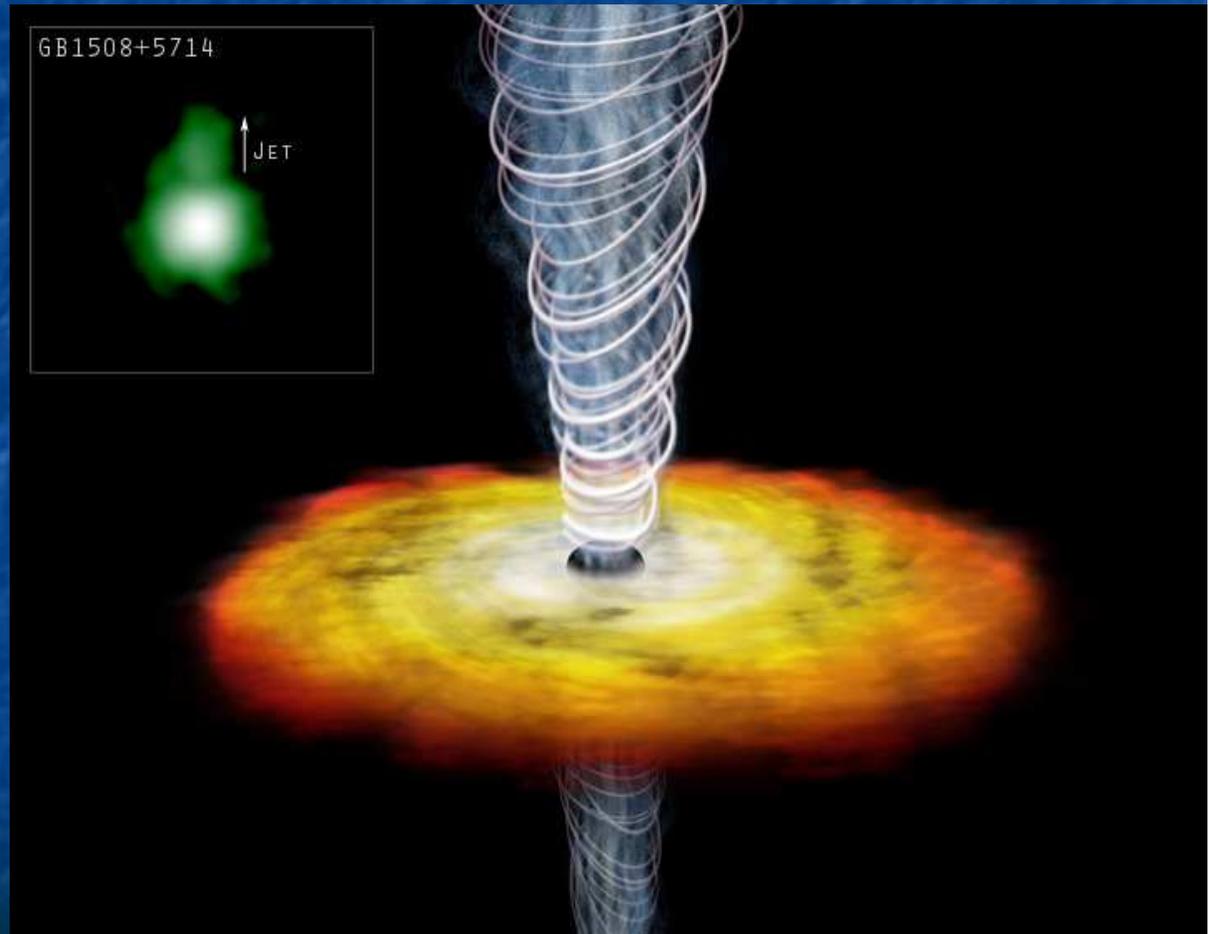
3C 75 dans Abell 400: 2 trous noirs liés

- Amas de galaxies Abell 400: jets radio (rose) dans gaz X (bleu) $\sim 10^6\text{K}$
- 2 TNs supermassifs en coalescence dans la galaxie NGC 1128: source radio géante 3C 75



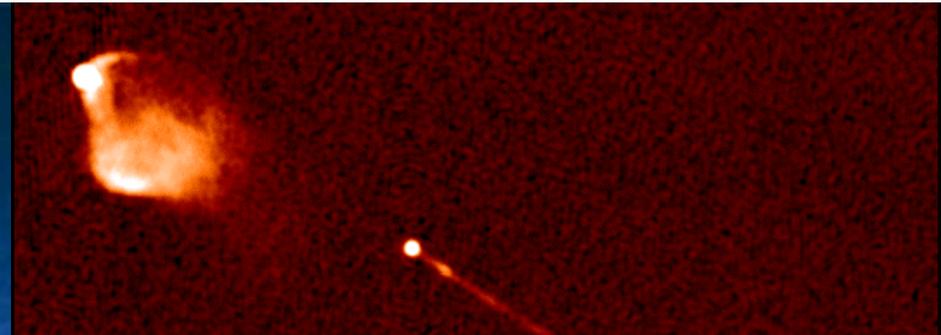
Les quasars

- Quasar à $12 \cdot 10^9$ al...
- Jet: 100 000 al!



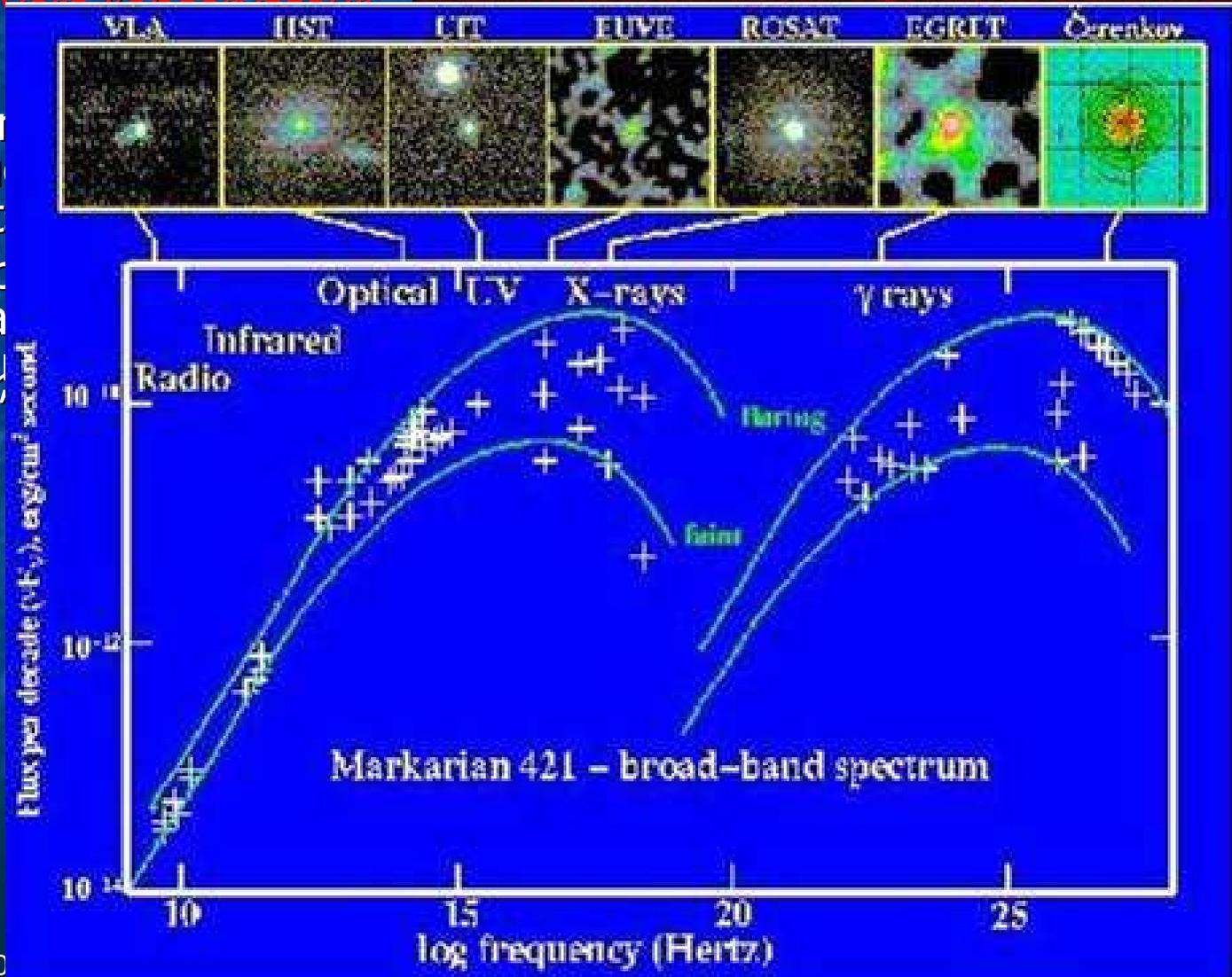
Quasar GB 1508+5714

Les blazars



- Blazar = Quasar dont le jet pointe quasi-exactement vers l'observateur

- Astres extrêmement variables
- variations drastiques de l'émission: sursauts
- Effet Doppler: amplification et déplacement du raies des fréquences plus élevées
- augmentation de l'émission de photons
- 3C175, M421



- Evolution temporelle de l'émission d'une bulle synchrotron en fonction de λ (van der Laan 1966)

QuickTime™ et un
décompresseur TIFF (non compressé)
sont requis pour visionner cette image.

Plan

- Les jets sont partout dans l'Univers!
 - La naissance des étoiles
 - La vie des étoiles
 - La mort des étoiles
 - La réincarnation des étoiles
 - Les quasars
- Les mécanismes d'accrétion-éjection
 - Observations du lien accretion-ejection
 - Là où il y a accrétion, il y a éjection!
- Perspectives
 - Les sursauts de rayons γ
 - Le mécanisme universel?

Plan

- Les jets sont partout dans l'Univers!
 - La naissance des étoiles
 - La vie des étoiles
 - La mort des étoiles
 - La réincarnation des étoiles
 - Les quasars
- Les mécanismes d'accrétion-éjection
 - Observations du lien accrétion-éjection
 - Là où il y a accrétion, il y a éjection!
- Perspectives
 - Les sursauts de rayons γ
 - Le mécanisme universel?

Propriétés radio, X des binaires X

- Candidat TN GX 339-4
- Couronne chaude X nécessaire à génération de plasmas relativistes émettant en radio (Corbel et al. 2000)

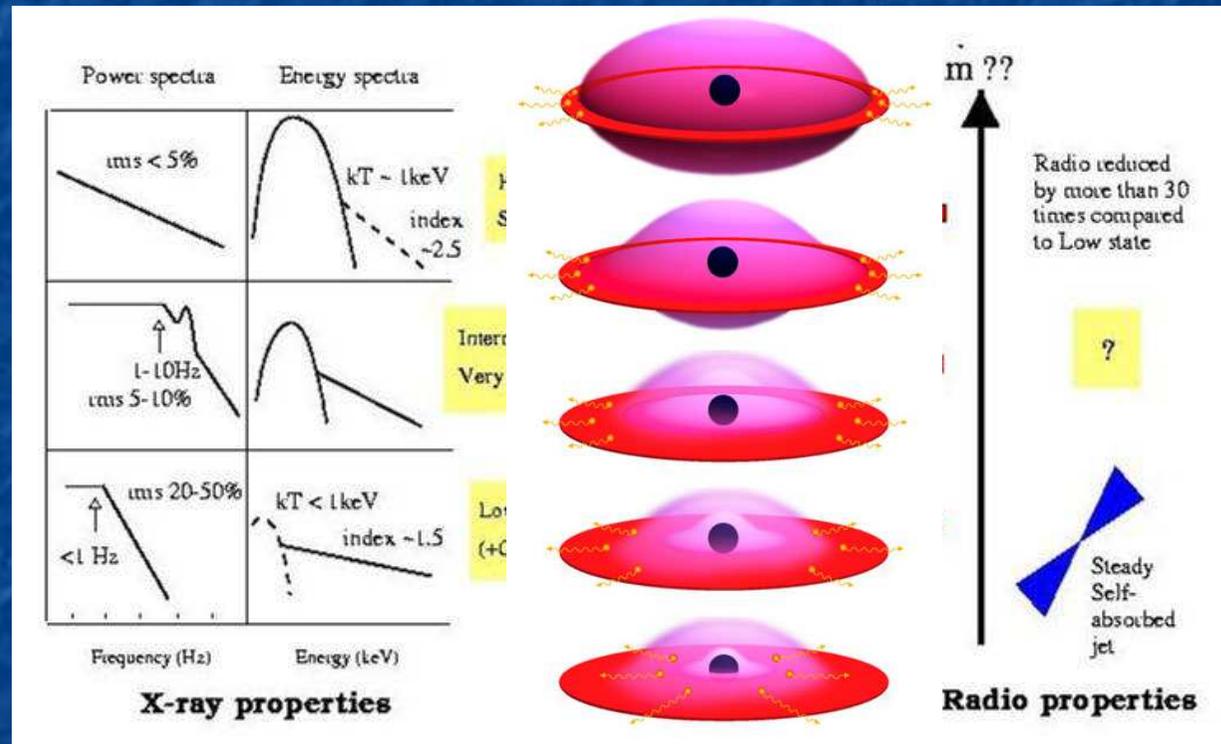
QuickTime™ et un décompresseur TIFF (non compressé) sont requis pour visionner cette image.

QuickTime™ et un décompresseur TIFF (non compressé) sont requis pour visionner cette image.

Les microquasars: accrétion

- **Modèle standard:**
 - émission thermique du disque d'accrétion multicolore
 - émission non-thermique d'une couronne de plasma
 - Etats bas/dur et haut/mou

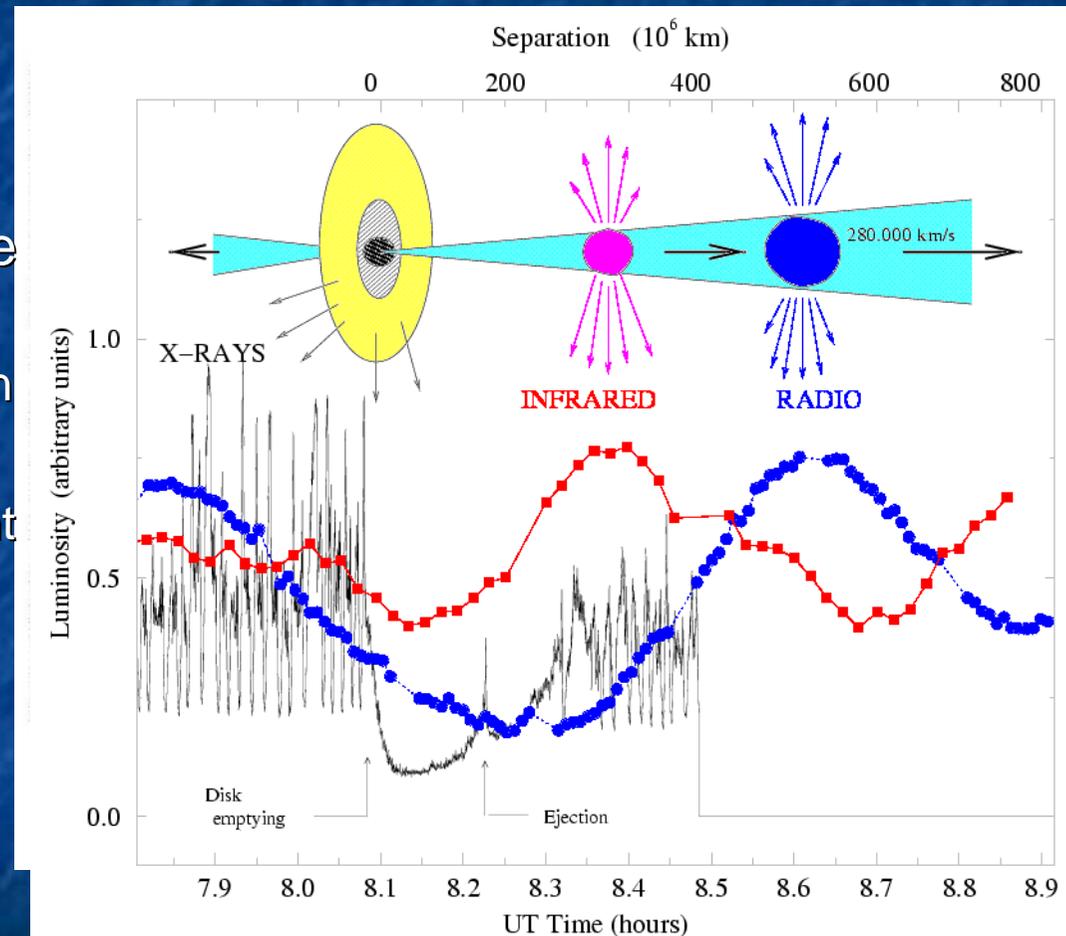
- **Modèle concurrent:**
 - émission synchrotron des jets de la radio jusqu'aux X



Fender 2001

Accrétion-éjection: le microquasar GRS 1915+105

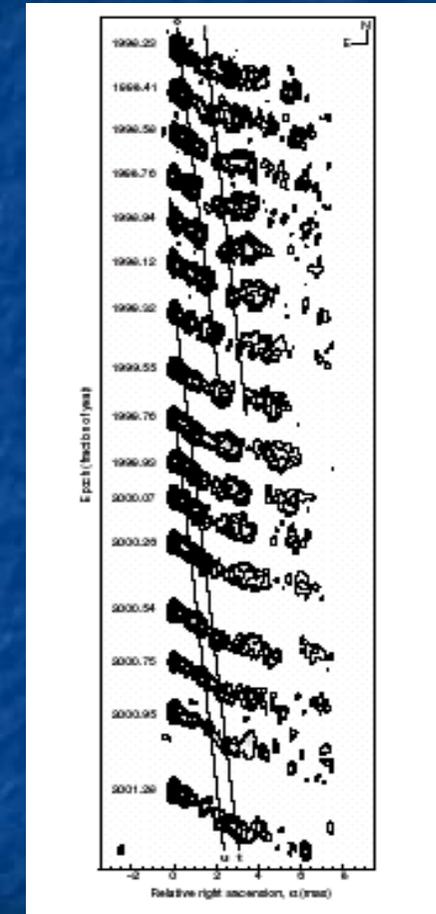
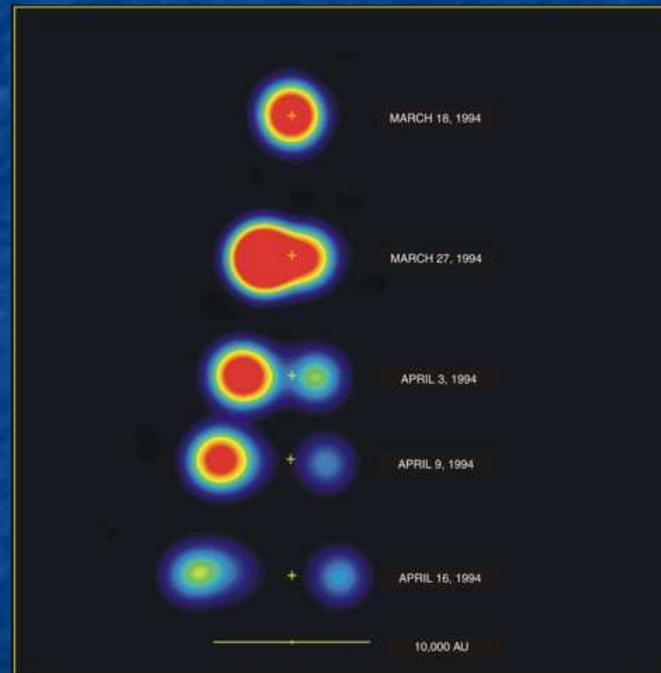
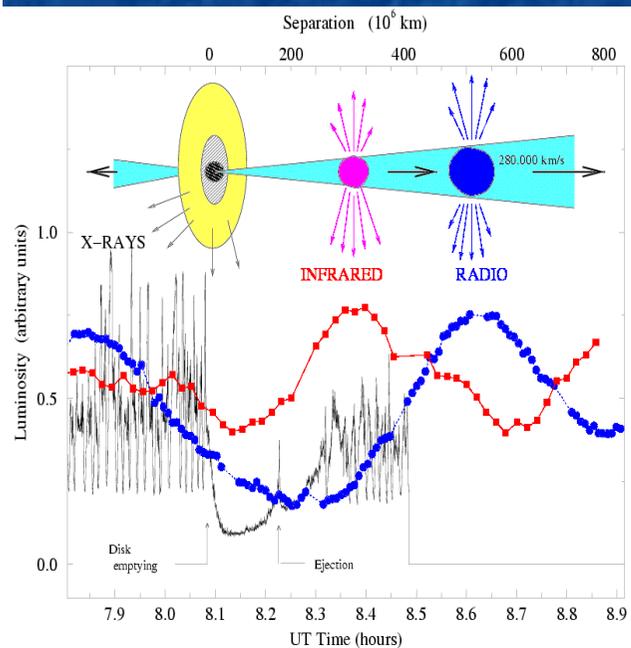
- 1^{ères} observations du lien entre accrétion (X)-éjection (IR/radio)
- Accrétion/éjection de nuages de plasma relativistes:
 - Cycles récurrents de $\sim 30-45$ mn
 - Champ magnétique: 10 G
 - Masse du nuage = 10^{19} g (Mont Everest)
 - Energie totale du nuage éjecté à $0.9c$: 10^{40} erg
 - L_{totale} du jet $\sim 10^3 L_{\text{sol}}$
 - E_{tot} du jet (1915) = 0.1-1% E_{tot} (SS 433)



Chaty, 1998; Mirabel, Dhawan, Chaty et al. 1998

Microquasars et Quasars

Cycles d'accrétion-éjection chez les quasars/microquasars: échelles de temps proportionnelles à la masse de l'objet compact



GRS 1915+105 observée sur 1 heure / 1mois

Chaty, PhD, 1998; Mirabel, Dhawan,
Chaty et al. 1998

3C120 observée sur 3 ans
Marscher et al. 2002

Plan

- Les jets sont partout dans l'Univers!
 - La naissance des étoiles
 - La vie des étoiles
 - La mort des étoiles
 - La réincarnation des étoiles
 - Les quasars

- Les mécanismes d'accrétion-éjection
 - Observations du lien accrétion-éjection
 - Là où il y a accrétion, il y a éjection!

- Perspectives
 - Les sursauts de rayons γ
 - Le mécanisme universel?

Formation de jets astrophysiques

- Connexion Disque-Jet dans les étoiles en formation, microquasars et quasars
- Question 1: Faut-il un disque d'accrétion pour faire un jet?
 - OUI
- Question 2: Les disques d'accrétion font-ils nécessairement des jets?
Le jet est-il le principal mécanisme pour évacuer le moment angulaire?
 - NON
 - Une perte de masse par vent de $\sim 1\%$ suffit.
 - Jet efficace surtout dans les parties internes du disque.
- Vitesse jet \sim Vitesse libération de l'objet central

QuickTime™ et un
décompresseur TIFF (non compressé)
sont requis pour visionner cette image.

- Origine du jet dans parties centrales du disque d'accrétion
- Pas besoin ni d'un objet central en rotation critique, ni d'un objet relativiste, ni d'une luminosité d'Eddington => jets non conduits par la pression de radiation, mais accélérés et collimatés par effet magnéto-centrifuge.

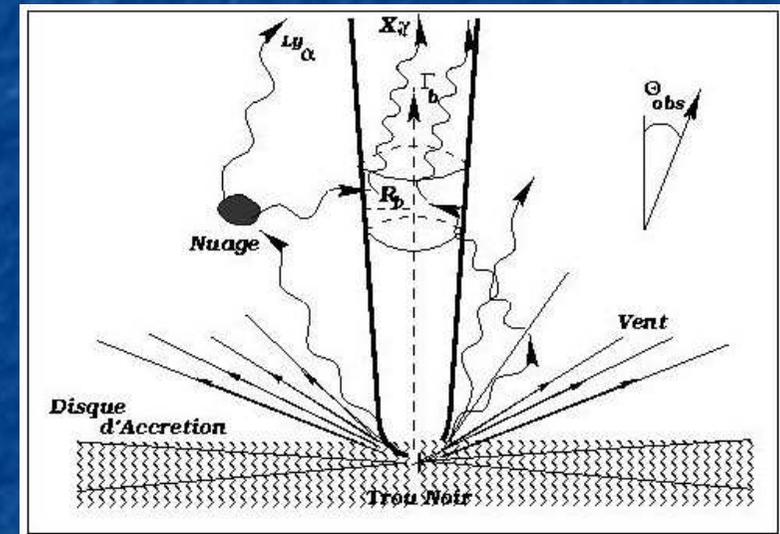
Jets dans l'Univers

- Vitesse de jet et vitesse de libération

QuickTime™ et un
décompresseur TIFF (non compressé)
sont requis pour visionner cette image.

Mécanismes d'accrétion-éjection

- Association jets bipolaires/disques d'accrétion commune au sein des quasars/microquasars
- Mécanismes magnéto-hydrodynamiques:
 - moment angulaire de la matière accrétée évacué aux pôles par les jets, le reste tombe vers le centre par attraction gravitationnelle
- Jets de matière propulsés par l'énorme énergie de rotation des objets compacts et disques d'accrétion
- Processus Blandford-Znajek:
 - Lignes de champ pénétrant le trou noir, confinées par le disque, pompent l'énergie de rotation du trou noir



Accélération des jets

- Accélération magnéto-centrifuge (Blandford & Payne 1982)
- Plasma suit les lignes du champ magnétique dipolaire ancré et tournant avec DA (B interstellaire ou dynamo)
- Angle(lignes, disque) $<60^\circ$: déplacement instable le long des lignes de champ, $F_{\text{centrifuge}} > F_{\text{grav}}$, plasma du disque arraché et propulsé vers l'équateur.

QuickTime™ et un
décompresseur TIFF (non compressé)
sont requis pour visionner cette image.

Collimation des jets

- Accélération s'arrête à magnétosphère (sphère d'Alfven $E_c \sim E_{mag}$)
- Plusieurs mécanismes de collimation:
 - Collimation poloïdale (Blandford 1993)
 - “hoop stress”: Champ magnétique s'enroule: $F_{Lorentz}$ centripète (Sakurai 1985)

QuickTime™ et un
décompresseur TIFF (non compressé)
sont requis pour visionner cette image.

Plan

- Les jets sont partout dans l'Univers!
 - La naissance des étoiles
 - La vie des étoiles
 - La mort des étoiles
 - La réincarnation des étoiles
 - Les quasars
- Les mécanismes d'accrétion-éjection
 - Observations du lien accrétion-éjection
 - Là où il y a accrétion, il y a éjection!
- Perspectives
 - Les sursauts de rayons γ
 - Le mécanisme universel?

Plan

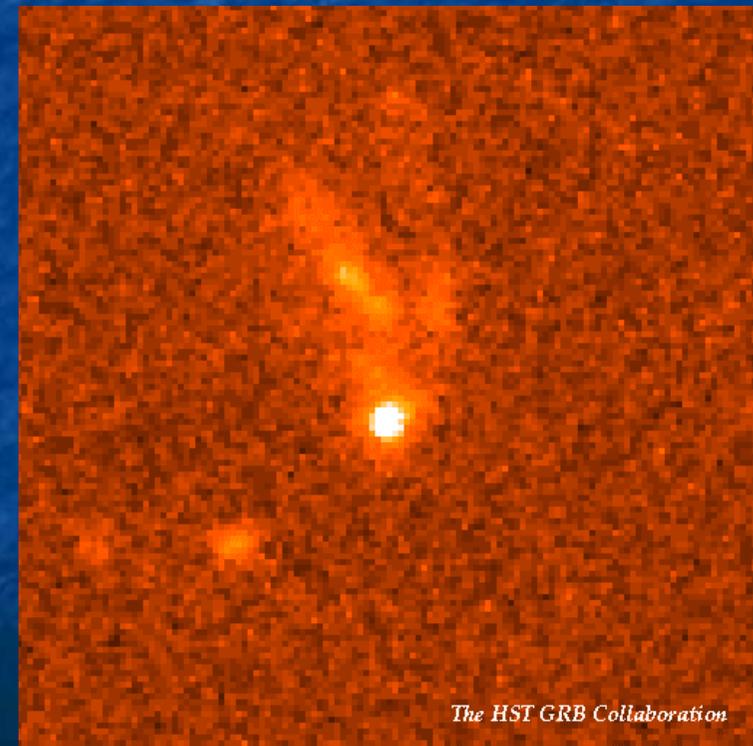
- Les jets sont partout dans l'Univers!
 - La naissance des étoiles
 - La vie des étoiles
 - La mort des étoiles
 - La réincarnation des étoiles
 - Les quasars

- Les mécanismes d'accrétion-éjection
 - Observations du lien accrétion-éjection
 - Là où il y a accrétion, il y a éjection!

- Perspectives
 - Les sursauts de rayons γ
 - Le mécanisme universel?

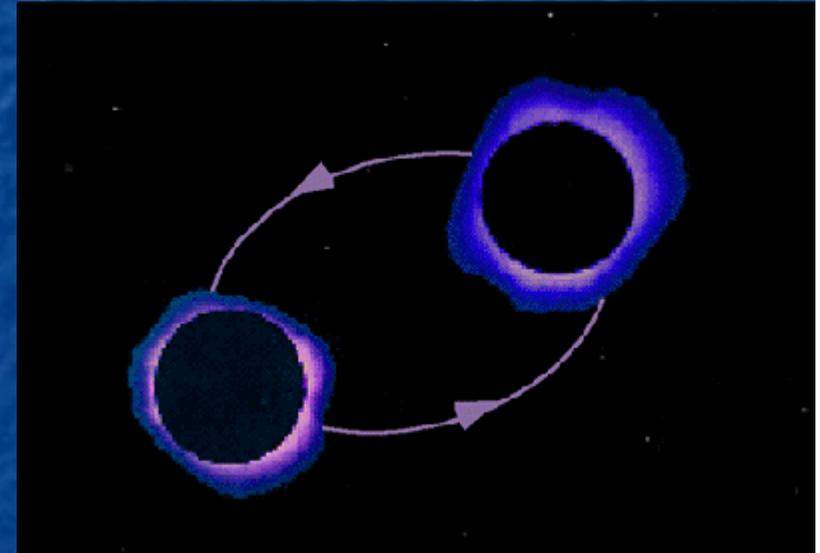
Sursauts de rayons γ

- Sursauts γ à des distances cosmologiques...
- Hypernova ou coalescence de trous noirs?
- GRB 031203: énergie intermédiaire entre sursauts γ et supernovae.



Les sursauts γ

- Sursauts γ : explosions les + énergétiques de l'Univers après le Big Bang, observables jusqu'aux confins de l'Univers
- Durée: qq s \rightarrow qq mn
- Systèmes binaires d'étoiles massives très proches peuvent donner lieu à des sursauts γ
 - se rapprochent jusqu'à donner naissance à un collapsar...
 - Supernovae associées aux sursauts γ sont de type Ic
 - Sursauts γ sont des jets hautement collimatés
- Si tout cela est vrai: les sursauts γ seraient dus à la naissance des microquasars dans des galaxies lointaines à fort taux de natalité stellaire.



Plan

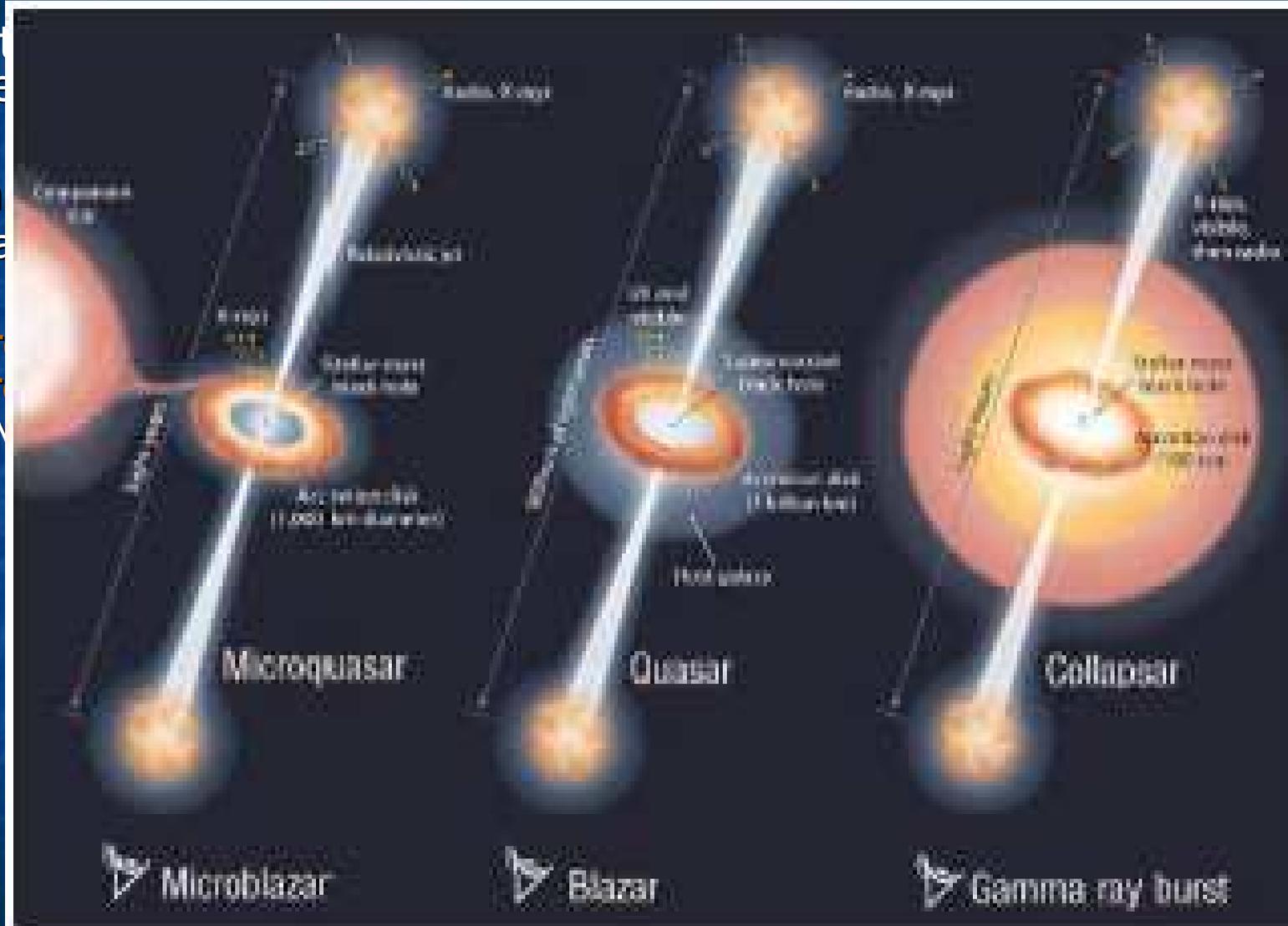
- Les jets sont partout dans l'Univers!
 - La naissance des étoiles
 - La vie des étoiles
 - La mort des étoiles
 - La réincarnation des étoiles
 - Les quasars

- Les mécanismes d'accrétion-éjection
 - Observations du lien accrétion-éjection
 - Là où il y a accrétion, il y a éjection!

- Perspectives
 - Les sursauts de rayons γ
 - Le mécanisme universel?

Perspectives: LE mécanisme universel?

- Existence observée
- Lien Quasars
- Microquasars
 - N
- Jets



Fin?



- El universo es tremendamente creativo, lo que nos obliga a abrirnos a lo desconocido...
(Alberto Ludwig Urquieta, 1926)

Naturaleza Azul,
[Francisco Brugnoli](#)