

# TROUS NOIRS ASTROPHYSIQUES

A black hole with a glowing accretion disk and two jets of light extending outwards, set against a dark, starry background.

**Félix Mirabel**

Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives. France

&

Instituto de Astronomía y Física del Espacio. Argentina

# L'ORIGIN DE L'IDEE DE "TROU NOIR"

**Michell:** en 1783 le révérend, dans le contexte du concept classique de gravitation et la conception corpusculaire de la lumière, par le calcul de la vitesse de libération

- « **corps depuis lesquels la lumière ne peut pas sortir... »**
- « **peut être détecté dans des systèmes stellaires binaires** »

**Laplace** (1796): "**astres occlus**"

• « **Corps en aussi grand nombre qu'étoiles** »  
ne permettrait, en vertu de son attraction, à aucun de ses rayons de parvenir jusqu' a nous.

• « **Il est possible que les plus grands corps de l'univers, soient par cela même, invisibles.** »

## TROUS NOIRS SUPER-MASSIFS

Cette idée est absente dans la 3ème édition (1808) et pour plus d'un siècle cette idée tombe dans l'oublie... Lavoisier (1794), mais diffraction/interférence par Young en 1801



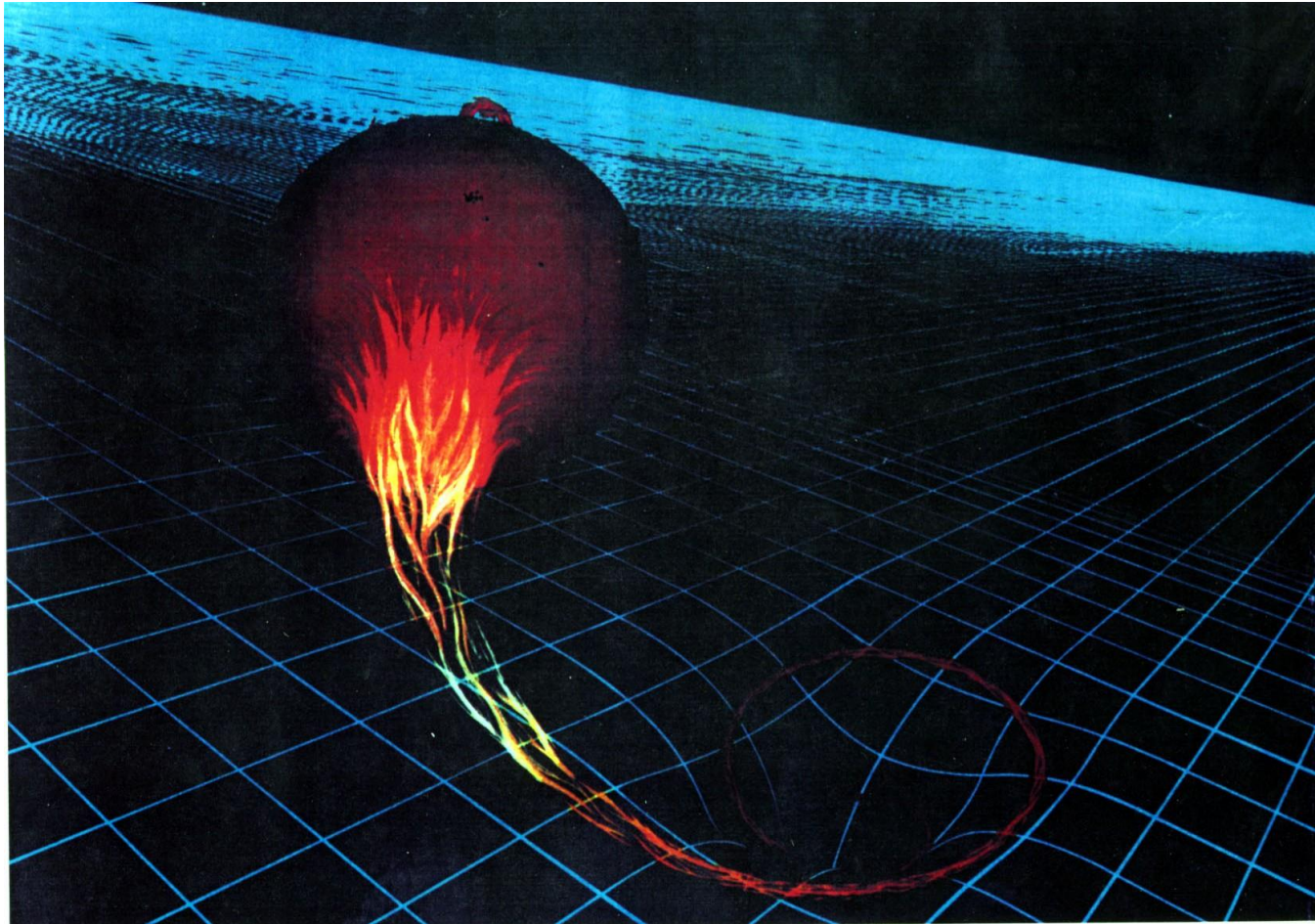
EXPOSITION  
DU SYSTEME  
DU MONDE,  
PAR PIERRE-SIMON LAPLACE,  
de l'Institut National de France, et  
du Bureau des Longitudes.  
TOME SECOND.

A PARIS,

De l'Imprimerie du Cercle-Social, rue du  
Théâtre Français, N°. 4.

L'AN IV DE LA REPUBLIQUE FRANÇAISE.

# L'IDEE DE « TROUS NOIR » RENAIT DANS LE CONTEXTE DE LA CONCEPTION RELATIVISTE DE LA GRAVITATION



LE TRAJET DE LA LUMIERE EST DÉVIÉ ET  $\lambda$   
MODIFIÉE SOIT ELLE CORPUSCULE OU ONDE

# THEORY RELATIVISTE DU TROU NOIR STELLAIRE

Einstein



1916

Schwarzschild



1916

Eddington



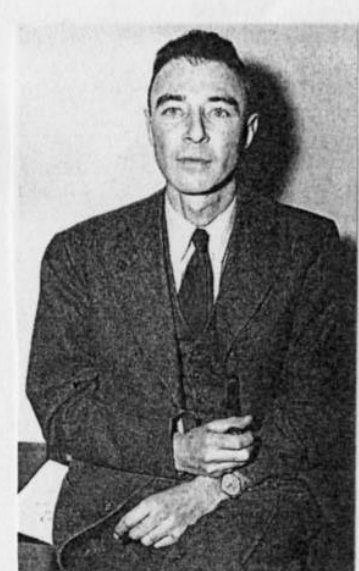
1924

Chandrasekhar



1930

Oppenheimer



1939

Nouvelle théorie  
de la gravitation

⇒

Trou Noir

Horizon:

$$R_s = 2 G M / c^2$$

$$\sim 3 M / M_\odot \text{ km}$$

Naine Blanche:

$$R_{wd} = R_T$$

Limite de masse

des Naines blanches:

$$M_{eb} < 1.4 M_\odot \Rightarrow$$

Etoile a

Neutrons:

$$M > 1.4 M_\odot$$

$$R \sim 20 \text{ km}$$

Trou Noir:

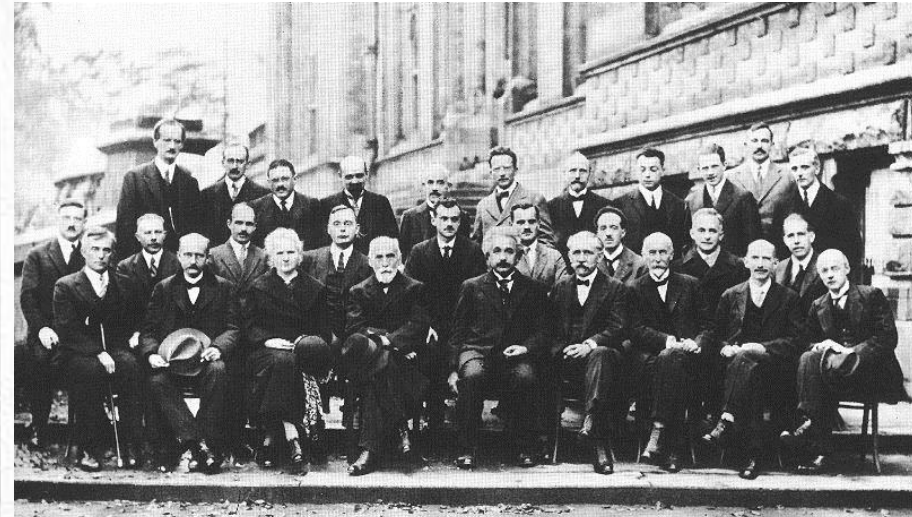
$$M > 3 M_\odot$$

**Les trous noirs sont définis par leur masse, rotation et charge électrique**

Représentation artistique  
de le trou noir



## Duel au sommet: A. Einstein vs N. Bohr Solvay 1927



A. PICCARD E. HENRIOT P. EHRENFEST E. HERZEN T. DE DONDER E. SCHRÖDINGER E. VERSCHAFFELT W. PAULI W. HEISENBERG R.H. FOWLER L. BRILLOUIN  
P. DEBYE M. KNUDSEN W.L. BRAGG H.A. KRAMERS P.A.M. DIRAC A.H. COMPTON L. de BROGLIE M. BORN N. BOHR  
I. LANGMUIR M. PLANCK Mme CURIE H.A. LORENTZ A. EINSTEIN P. LANGEVIN C.H. GUYE C.T.R. WILSON O.W. RICHARDSON

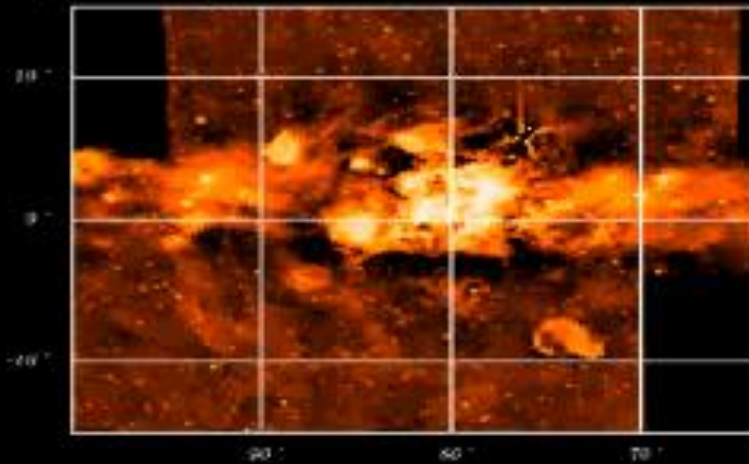
Einstein: « Dieu ne joue pas au dés »

Bohr: « *Qui êtes-vous, Albert Einstein pour dire à Dieu ce qu'il doit faire ?* »

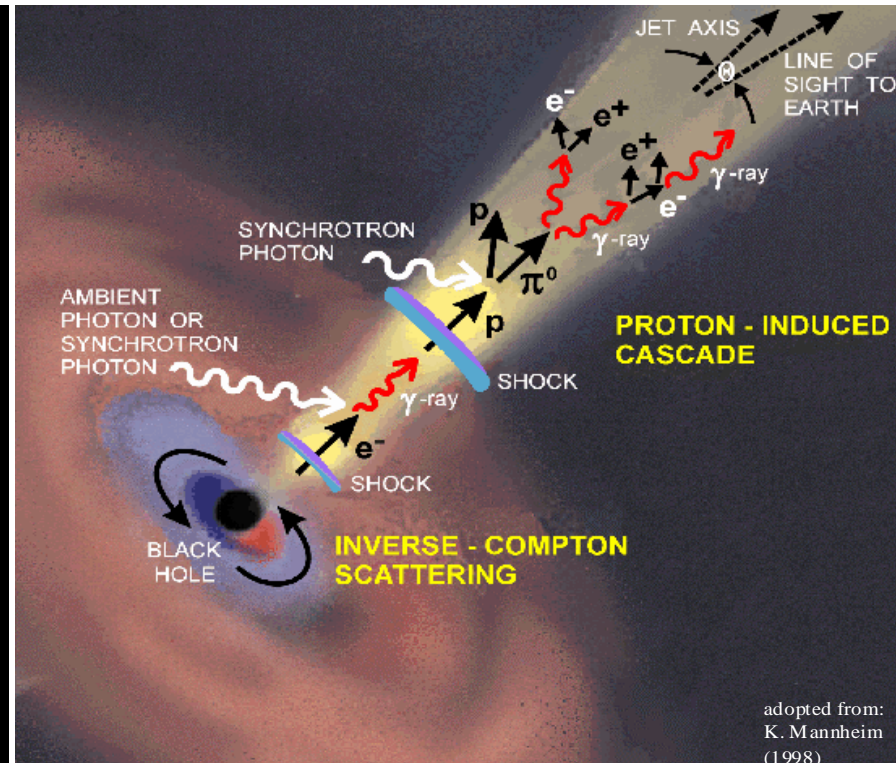
# LES PREMIERES EVIDENCES: QUASARS et RADIOGALAXIES

Depuis les années 1970 la variabilité temporelle et puissance des quasars et radiogalaxies avait **suggéré** l'existence des trous noirs super massifs

Cygnus-Region 100-m-Radioteleskop 1.4 GHz



VLBI: Krichbaum et al. (1999)

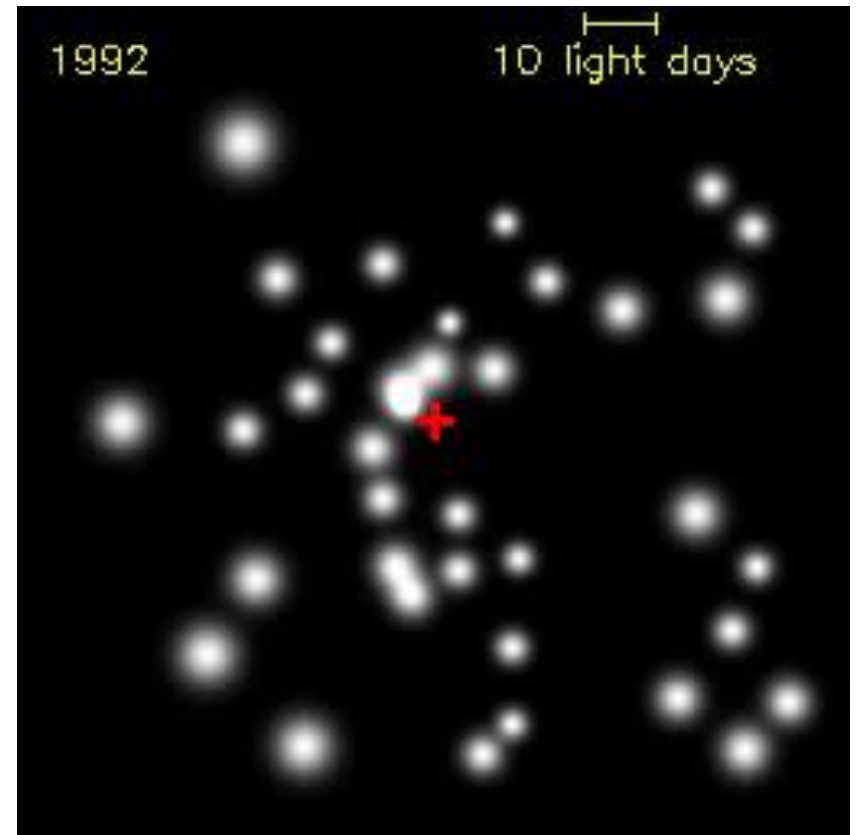
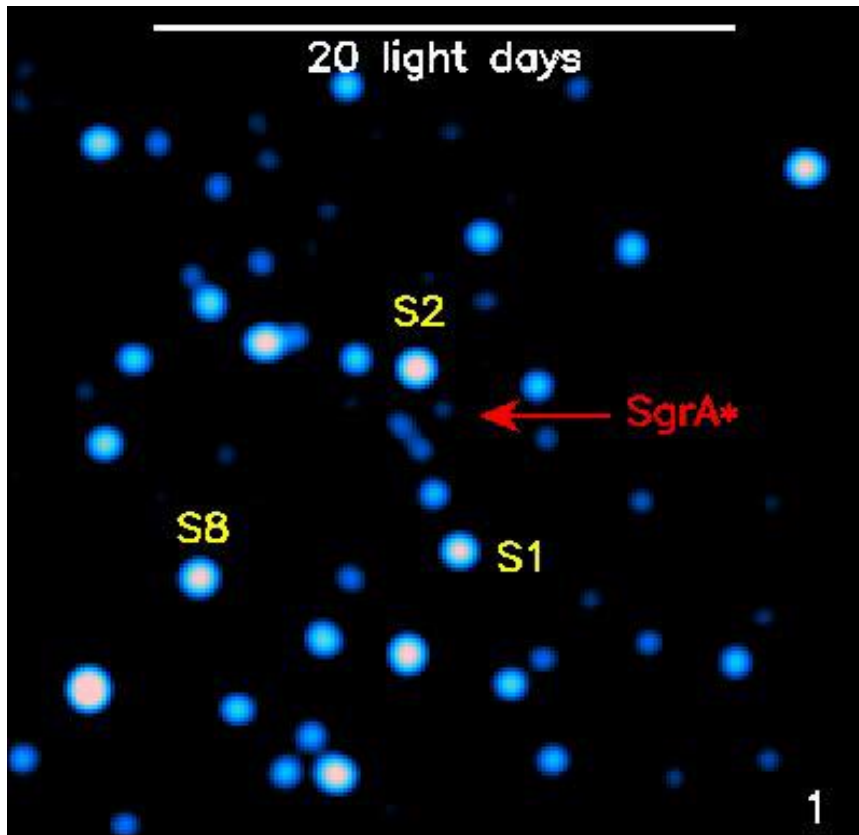


adopted from:  
K. Mannheim  
(1998)

Laboratoires pour l'étude de la  
physique d'hautes énergies

# LE TROU NOIR SUPER-MASSIF AU CENTRE DE LA GALAXIE

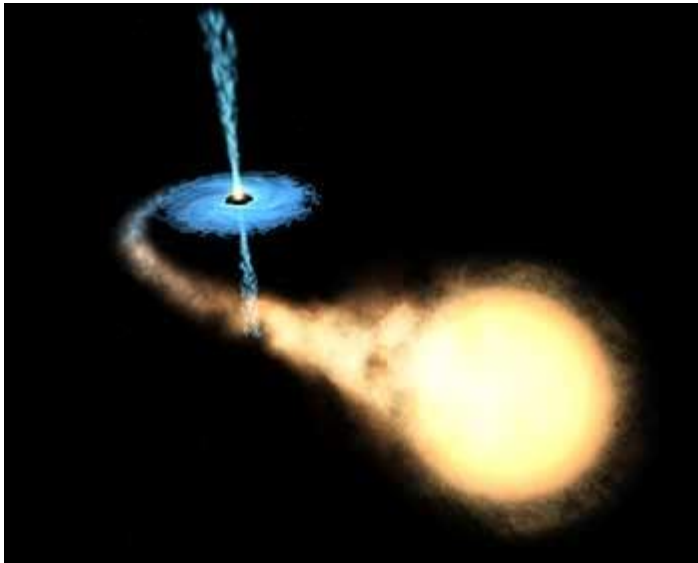
- Le trou noir de  $\sim 4$  Million de masses solaires au centre de la galaxie
- Observations dans l'infrarouge avec optique adaptatif (Genzel et al., 2008)



- $4 \times 10^6 M_{\odot}$  confinés dans une région encadrée par l'orbite de la Terre
- Comment peut exister un amas d'étoiles de  $\sim 10^7$  ans dans cet environnement ?

# TROUS NOIRS DE MASSE STELLAIRE

Découverts comme des sources X



(Giacconi, 1962... Prix Nobel, 2002)

**DANS DES SYSTÈMES BINAIRES:**  
comme prédit par Michell (1783)

**$M > 3 M_{\odot} \Rightarrow$  TROU NOIR**

- ~30 trous noirs connues dans binaires et 20 autres candidats

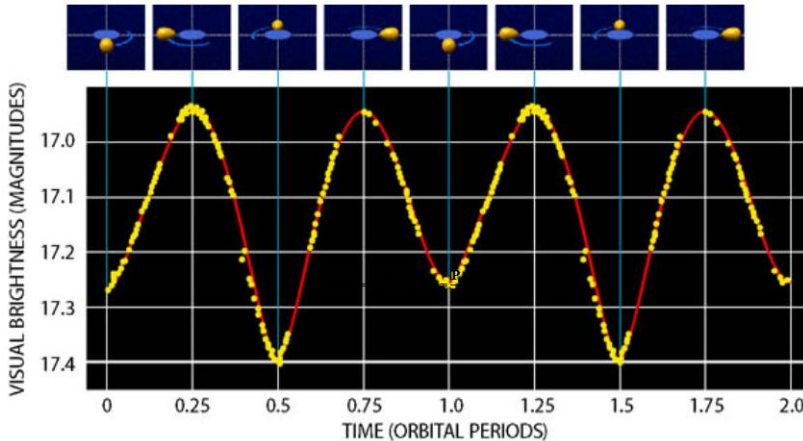
- Nombre attendu dans la Galaxie

**$\sim 3 \times 10^8 \Rightarrow$**

- Pour  $\sim 10 M_{\odot}$  per trou noir  $\Rightarrow$

**$\sim 4\%$  de la masse baryonique**

- Leur masse intégrée serai  **$10^3$**  fois la masse du trou noir super massif dans la Galaxie

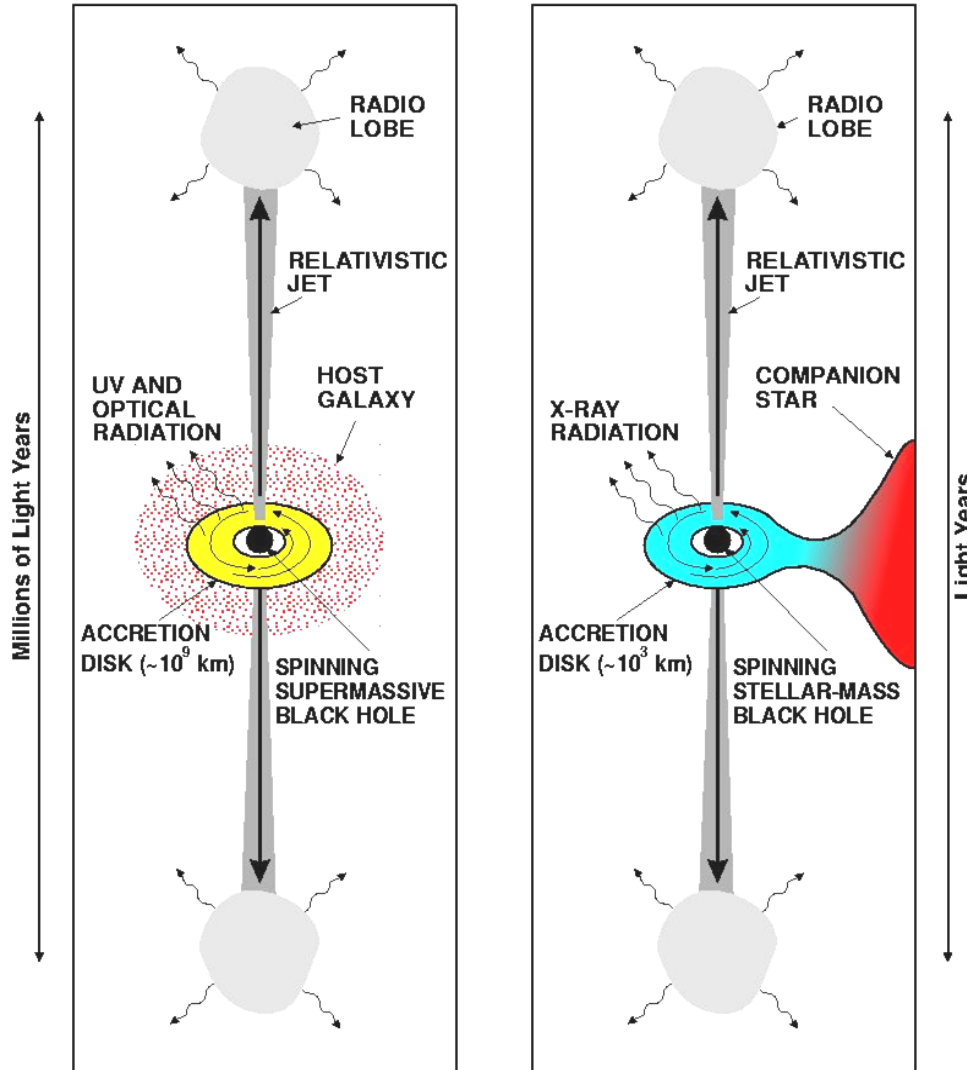


Fonction de masse:  $f_x(M) = \frac{M_n^3 \sin^3 i}{(M_n + M_x)^2} = \frac{P_{orb} K}{2\pi G}$

*Minimum de masse de l'objet compact*

# “MICRO-QUASARS” DANS LA VOIE LACTEE

Mirabel & Rodríguez (Nature 1998)



$$R_{\text{sh}} = 2GM_{\text{BH}}/c^2 ; \Delta T \propto M_{\text{BH}}$$

Mirabel, Rodríguez et al. 1992



8 conferences internationals sur les  $\mu$ QSOs

# EJECTION SUPERLUMINIQUE PAR UN $\mu$ QSO

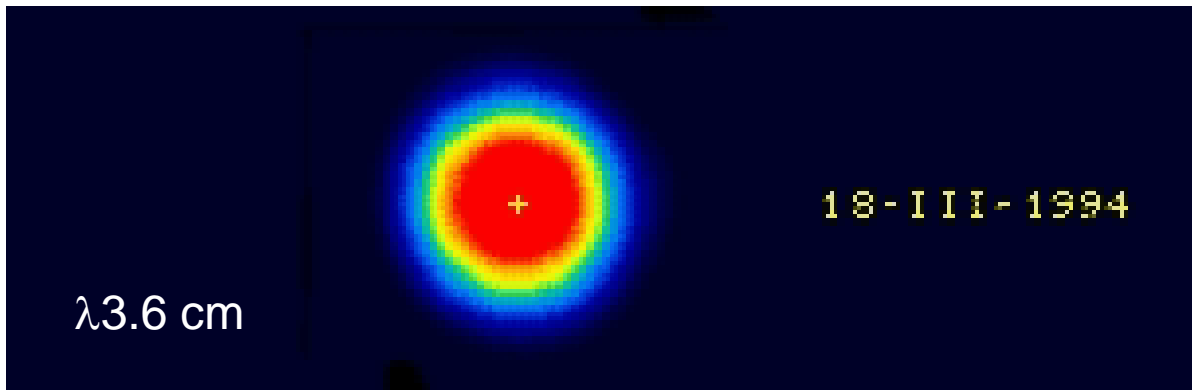
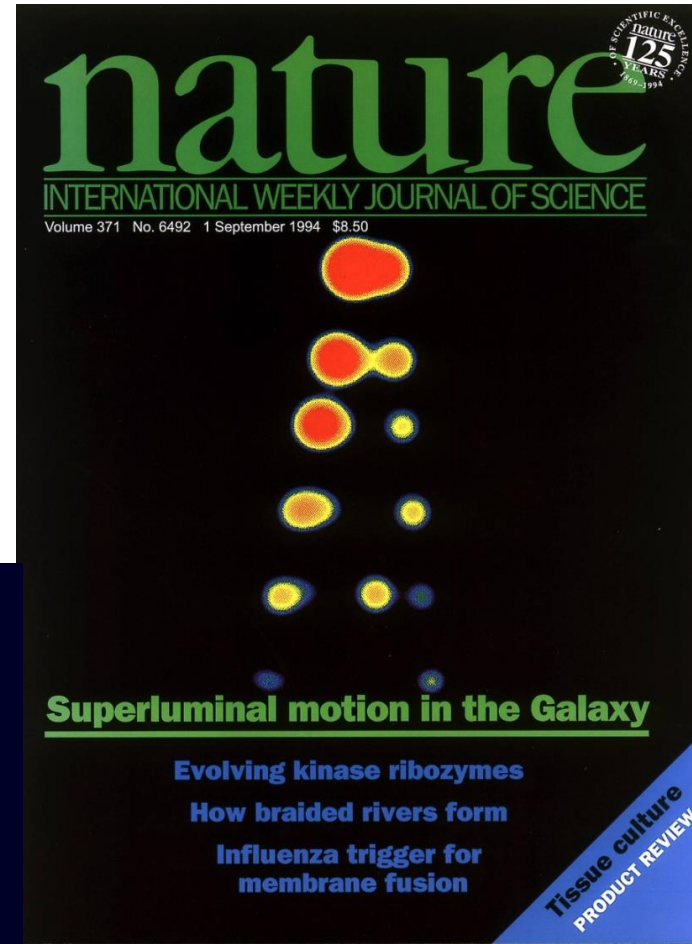
- GRS 1915+105 (découvert avec GRANAT)
- 0.5  $M_{\odot}$  géante rouge en orbite autour a trou noir de 10  $M_{\odot}$

Mirabel & Rodriguez, 1994



1 arc sec

Luis F. Rodriguez



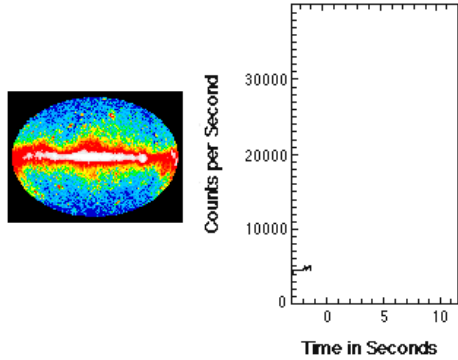
$V_{app} > C$ : Les jets ont des vitesses apparentes superluminiques

# SURSAUTS GAMMA = FORMATION DE TROUS NOIRS STELLAIRES

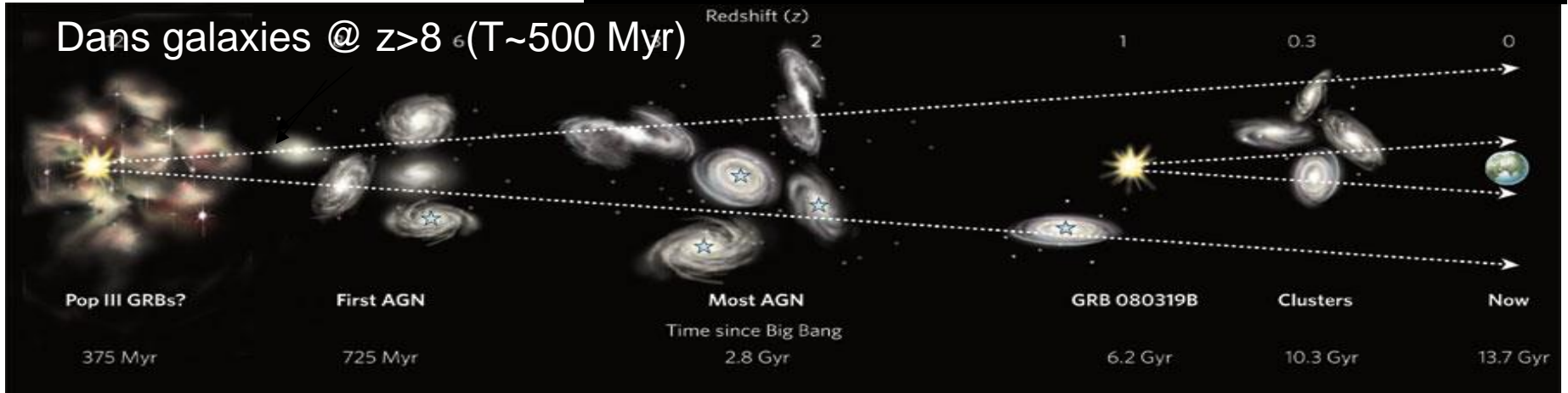
## LES EXPLOSIONS LES PLUS ÉNERGIQUES DEPUIS "LE BIG BANG"

Écroulement stellaire et jets super-relativistes

Associés à Hyper-Novas (SNe Ic)



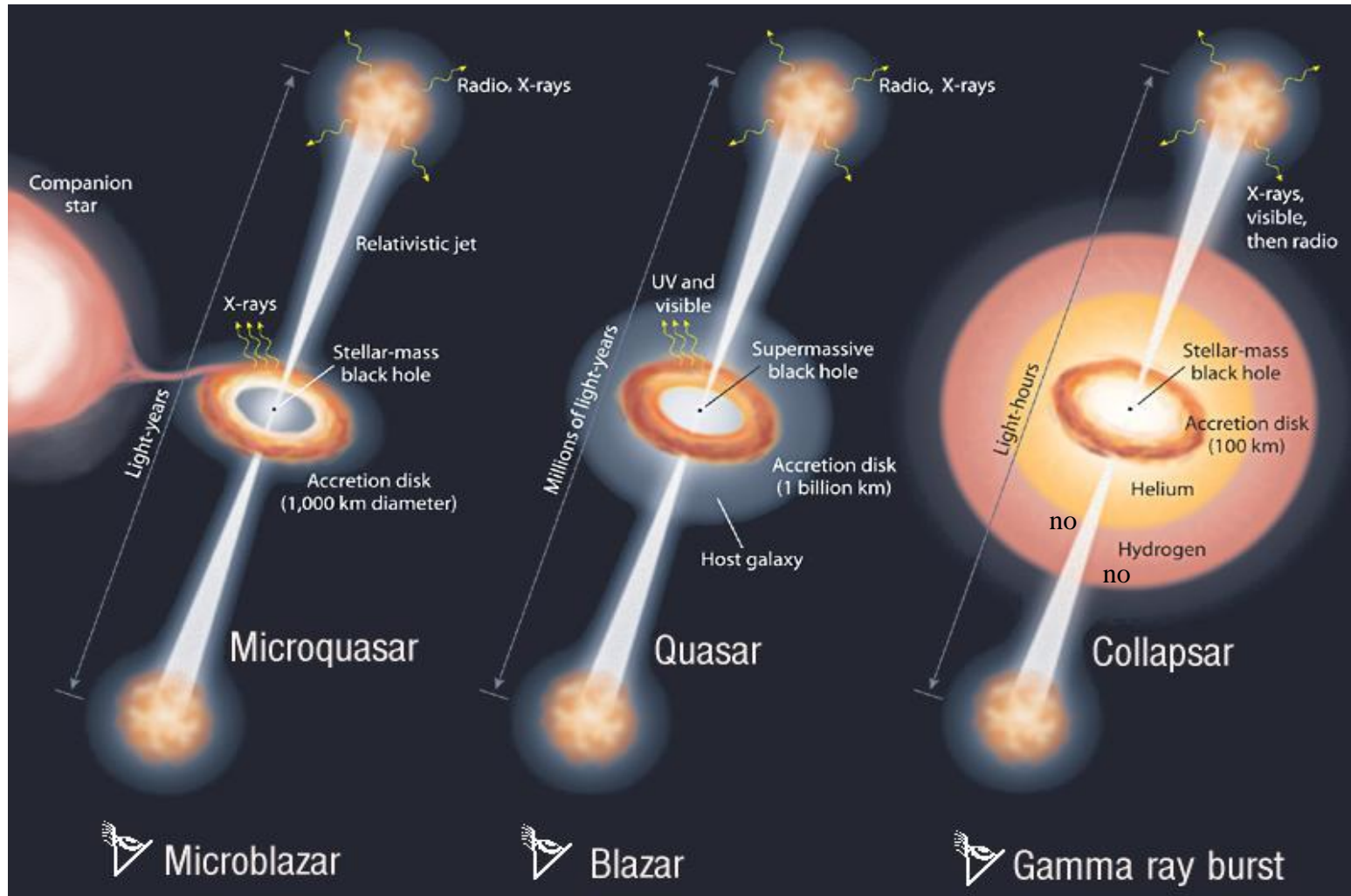
Dans galaxies @  $z > 8$  (T ~ 500 Myr)



**Chronologie universelle depuis la formation des premières étoiles**

# ANALOGIE QSO - $\mu$ QSO - GRB

(Mirabel & Rodríguez, Sky & Telescope 2002)



- **UN MECHANISME MAGNETO-HYDRODINAMIQUE UNIVERSELLE POUR LES JETS DES TROUS NOIRS?**
- **LES TROUS NOIRS ONT DES ROLES REGULATEURS A NIVEAUX GALACTIQUE ET COSMIQUE?**

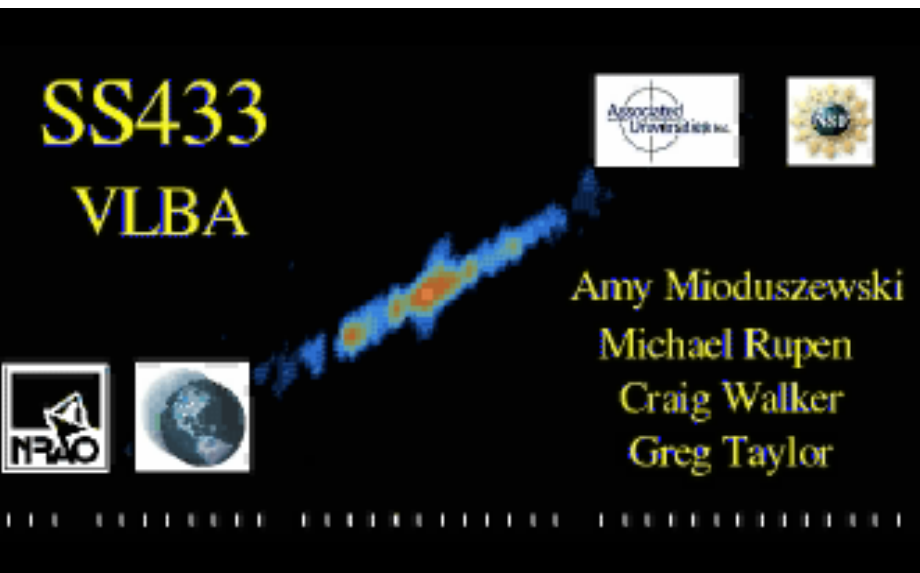
# QUELQUES QUESTIONS OUVERTES

- Comment ce sont formés les trous noirs super-massifs ( $M > 10^9 M_{\odot}$ ), quand l'univers avait seulement 600 millions d'années?
- Comment se forment les trous noirs stellaires (masses  $< 100 M_{\odot}$ )?
- Existient-ils des trous noirs de masse intermédiaire (100-1000  $M_{\odot}$ )?
- Les trous noirs ne sont pas éternels (Hawking, 1971)... Peut-on observer l'évaporation explosive des trous noirs primordiaux?
- Par principe de symétrie, pourrait il exister des contreparties des trous noirs (« trous blancs, fontaines blanches »), ou rien ne peut pénétrer?
- Le Big Bang a pu être l'évaporation d'un trou noir (trou blanc) créé par le collapse gravitationnel d'un univers précédent? Est-ce que l'inflation et l'énergie obscure ont une relation avec cette hypothèse fantastique?
- Questions passionnantes sur: 1) Trous de ver (Einstein & Rosen, 1935), 2) l'intrication quantique et les trous de ver (Maldacena & Susskind 2013)...

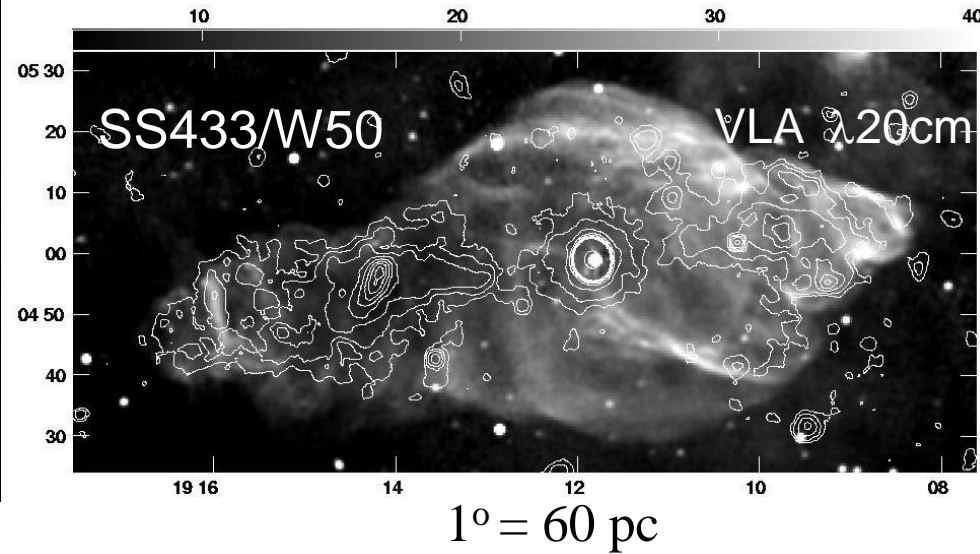
**Notre univers pourrait il être un trou noir où l'univers observable serait a l'intérieur de son horizon?**

**$R_{SH}=60 \times 10^9$  a.l. tandis que  $R_{obs}= 14 \times 10^9$  a.l.**

# PUISSANTS JETS DES TROUS NOIRS



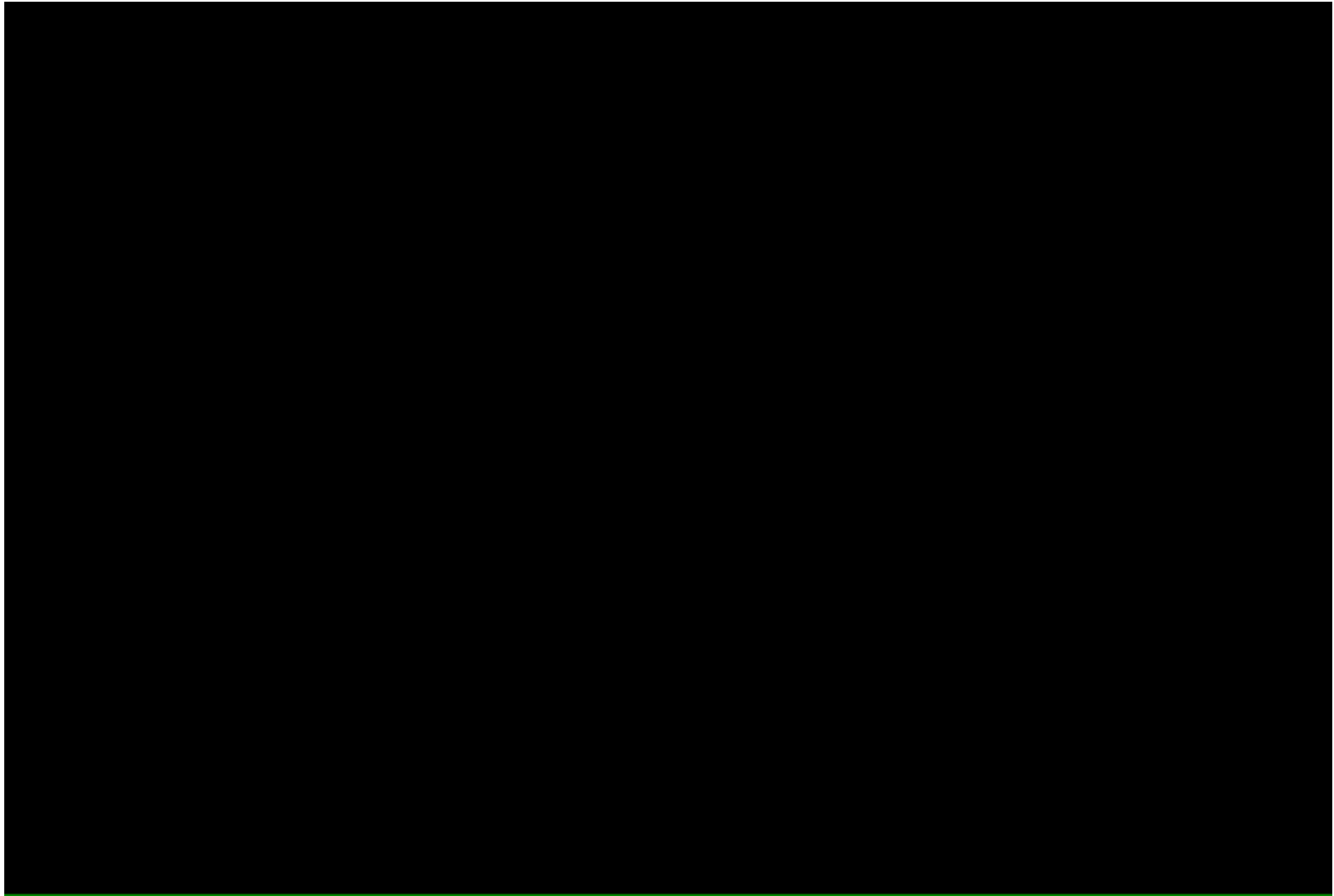
Radio (Dubner et al); Radiation X: (Brinkmann et al)



- **NOYAUX ATOMIQUES AVEC  $v = 0.26c \Rightarrow$**
- **ENERGIE MECANIQUE  $> 10^{39}\text{ erg/sec}$**
- **$>50\%$  DE L'ENERGIE N'EST PAS RAYONNE**
- **LES JETS SONT « OBSCURS »**

# JETS EN RAYONS X DAN'S UN $\mu$ QSO

$\mu$ QSOs XTE J1550-564 & H1743-322 Corbel et al. Science (2002, 2005)

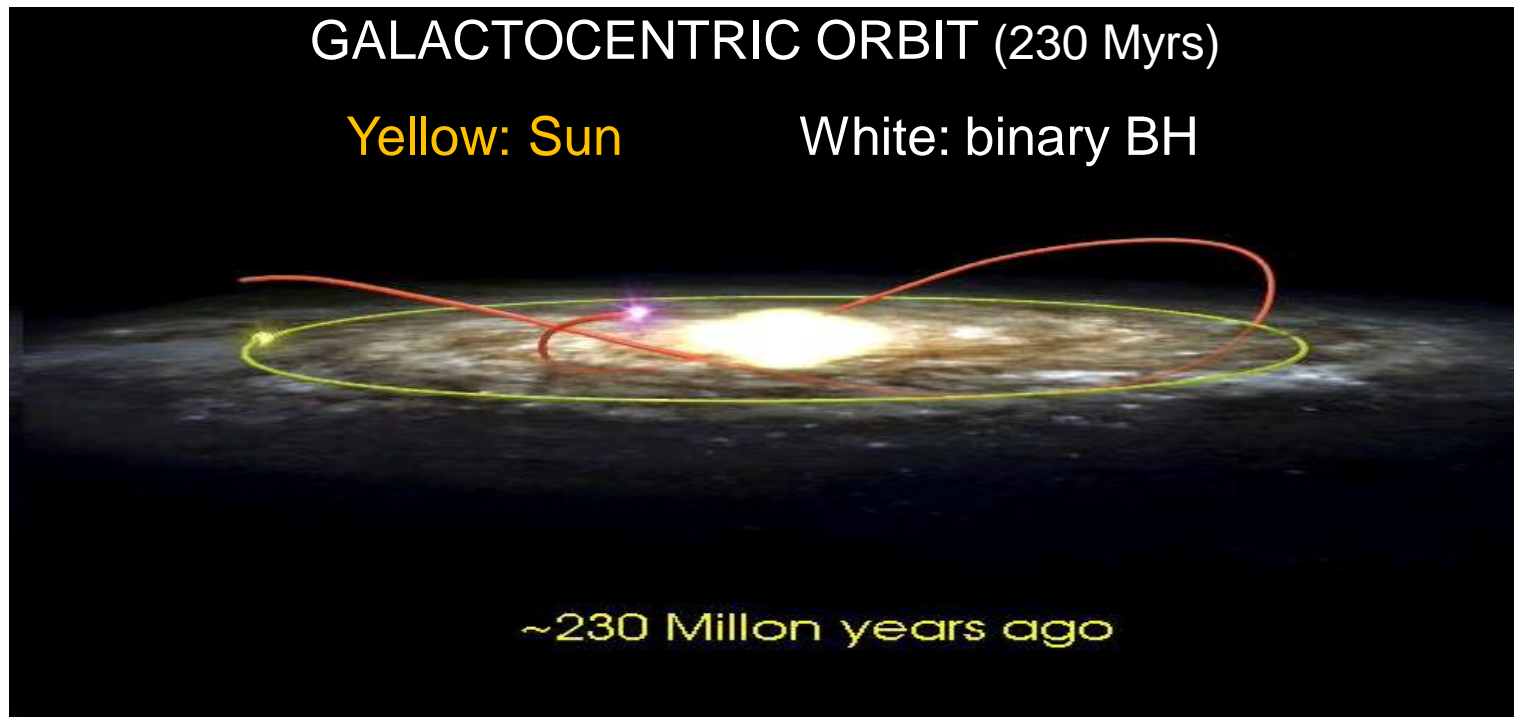


Rayonnement X produit par synchrotron  $\Rightarrow$  électrons avec énergies des TeVs

# DES TROUS NOIRS FUGITIFS

**XTE J1118+480**  $M_{\text{BH}} \sim 7 M_{\odot}$   $M_{*} \sim 0.4 M_{\odot}$  kpc;  $V_p = 145\text{-}210$  km/s

Mirabel, Dhawan, Rodrigues et al. (Nature 2001)



**GRO J1655-40:** Fossil of a HPN (Israelian et al. Nature 1999)

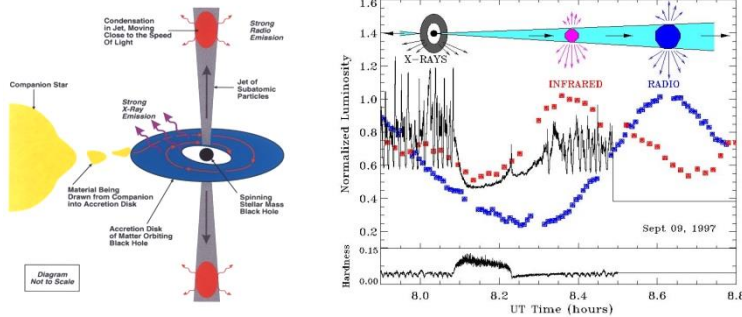
$M_{\text{BH}} \sim 5\text{-}7 M_{\odot}$   $M_{*} \sim 2 M_{\odot}$ ;  $D = 1\text{-}3$  kpc;  $V_p = 112 \pm 18$  km/s (Mirabel et al. 2002)

**LES DEUX BHS AVEC 5-7  $M_{\odot}$  NE SONT PAS RESTÉ DANS LEUR LIEU DE NAISSANCE**

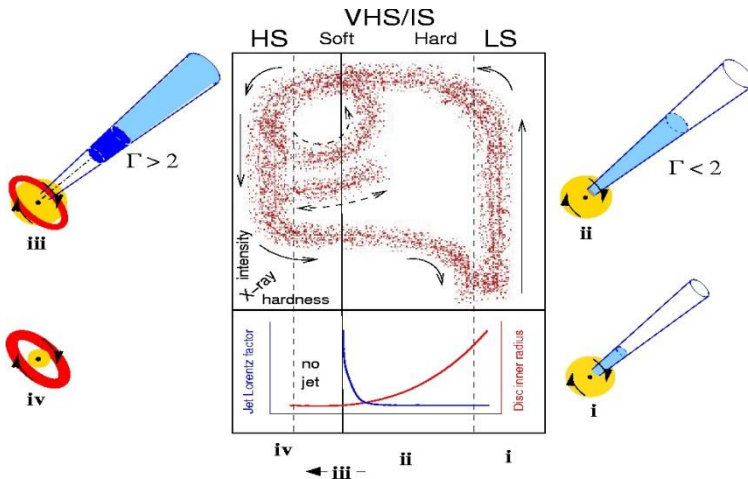
# LES $\mu$ QSOs ONT PERMIT

1) Comprendre la connexion entre les disques d'accrétion et les jets

Mirabel et al. 1998



Fender et. al. 2006



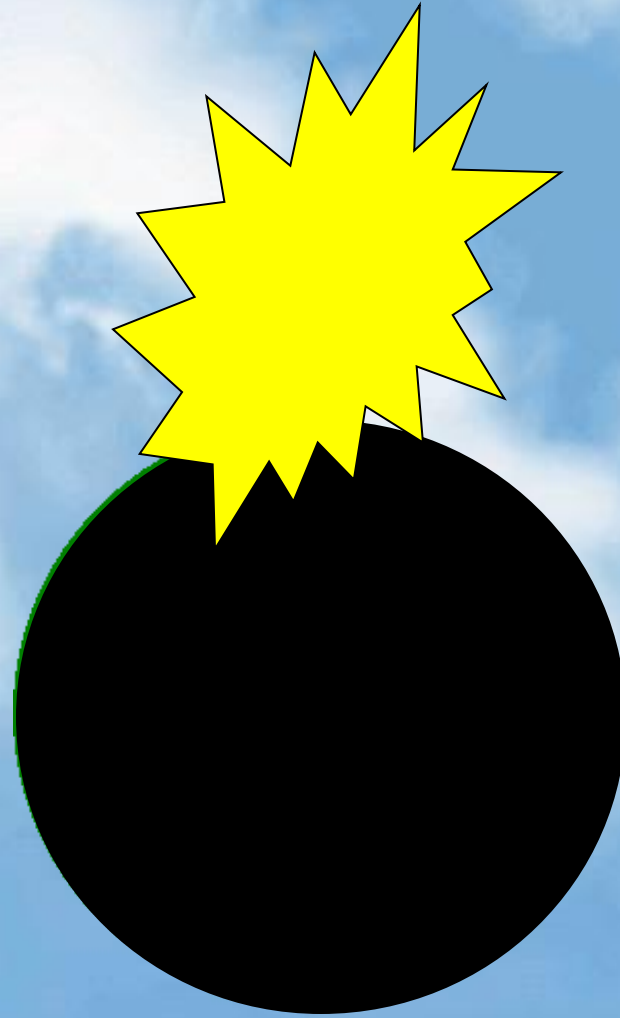
2) Etudier la connexion entre la rotation des trous noirs et les jets

La rotation des trous noirs es mesuré par:

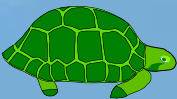
- QPOs de fréquence maximale (Zhang +, Narayan+, Fender+...)
- Température du disque d'accrétion (Zhang +, Narayan+...)
- Asymétrie de raies de fer dans les X (Meyer+, Tanaka+, Fabian+...)

Même connexion observée dans des QSOs mais dans des échelles de temps d'années

# HORIZON IS THE BASIC CONCEPT OF BLACK HOLE

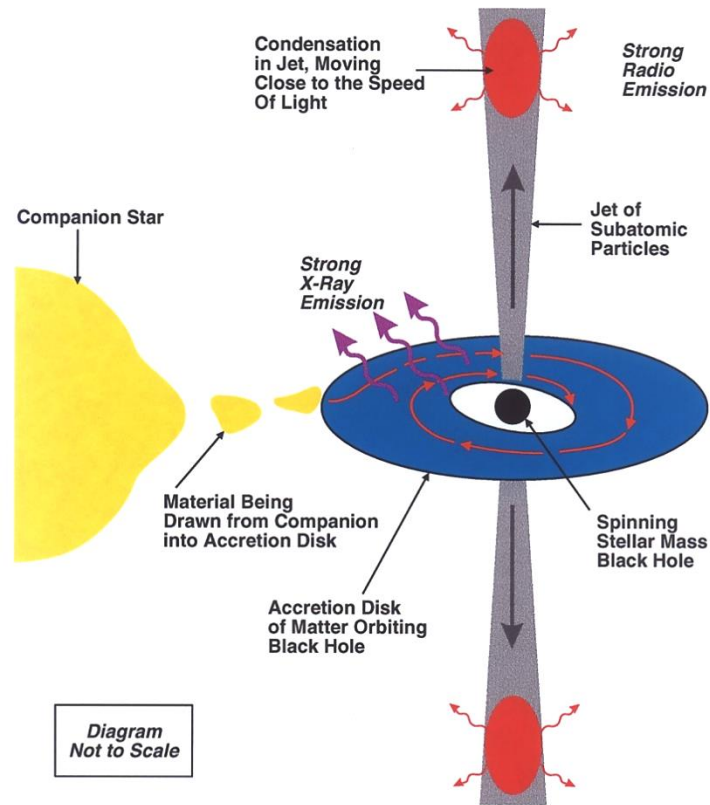


$t_{\text{combustion}} > t_{\text{chute}}$

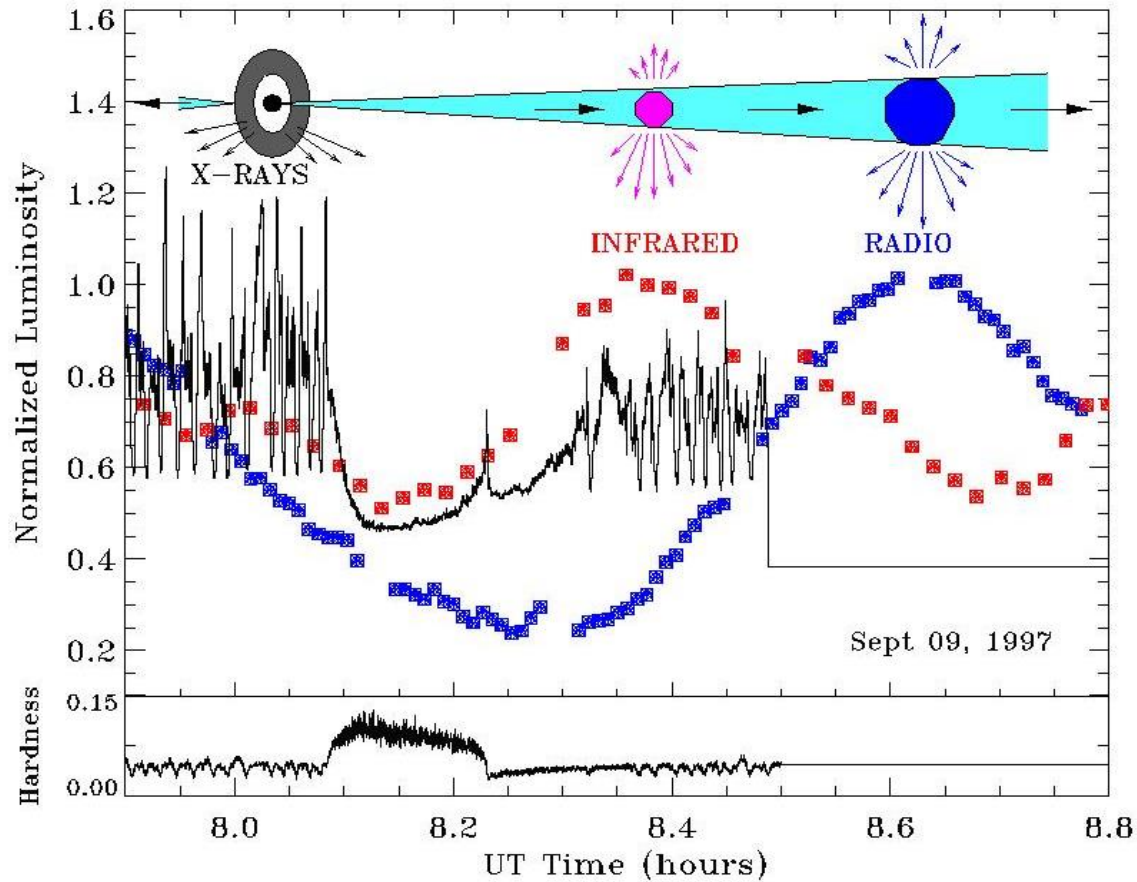


# ACCRETION - JET CONNECTION

$$\Delta T \propto M_{\text{BH}}$$



Mirabel, Dhawan et al. 1998



**MATTER RADIATING IN X-RAYS GOES BEYOND THE HORIZON ?**  
**JETS APPEAR ~5 MIN AFTER DISAPPEARANCE OF THE INNER DISK ⇒**  
**ABSENCE OF EVIDENCE FOR A MATERIAL SURFACE**