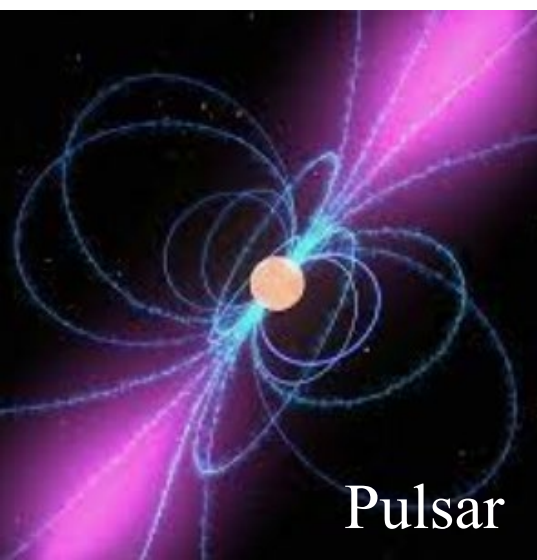




COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

Chaire Galaxies et Cosmologie

Phénomènes variables sur différentes échelles



Pulsar



Sursaut gamma

Françoise Combes



Une grande diversité



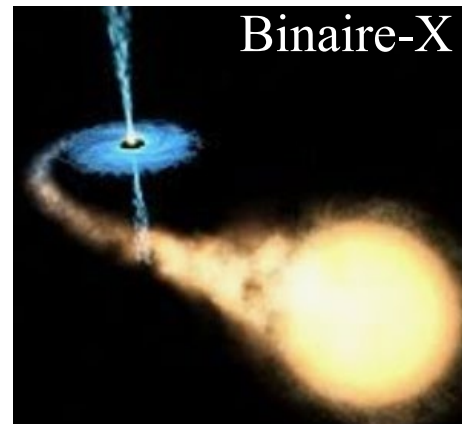
- **Les étoiles variables:** RR-Lyrae, Céphéides, Pulsars
- Les supernovae SNI, SNIa, (SNIb, SNIc, collapse..)

→ **Noyaux actifs (AGN) Blazars, des Gamma à la radio**
de la seconde à l'année

→ **Micro-quasars, et binaires X**

→ **Sursauts gamma GRB (Gamma Ray Bursts)**

→ **Sursauts Radio FRB**
(Fast Radio Bursts)



Les étoiles variables

Outre les binaires, éclipses, etc..

Variations intrinsèques:

Convection turbulente:

Étoiles de type solaire, Irrégulières

Modes de gravité:

Mira, Céphéides, RR Lyrae

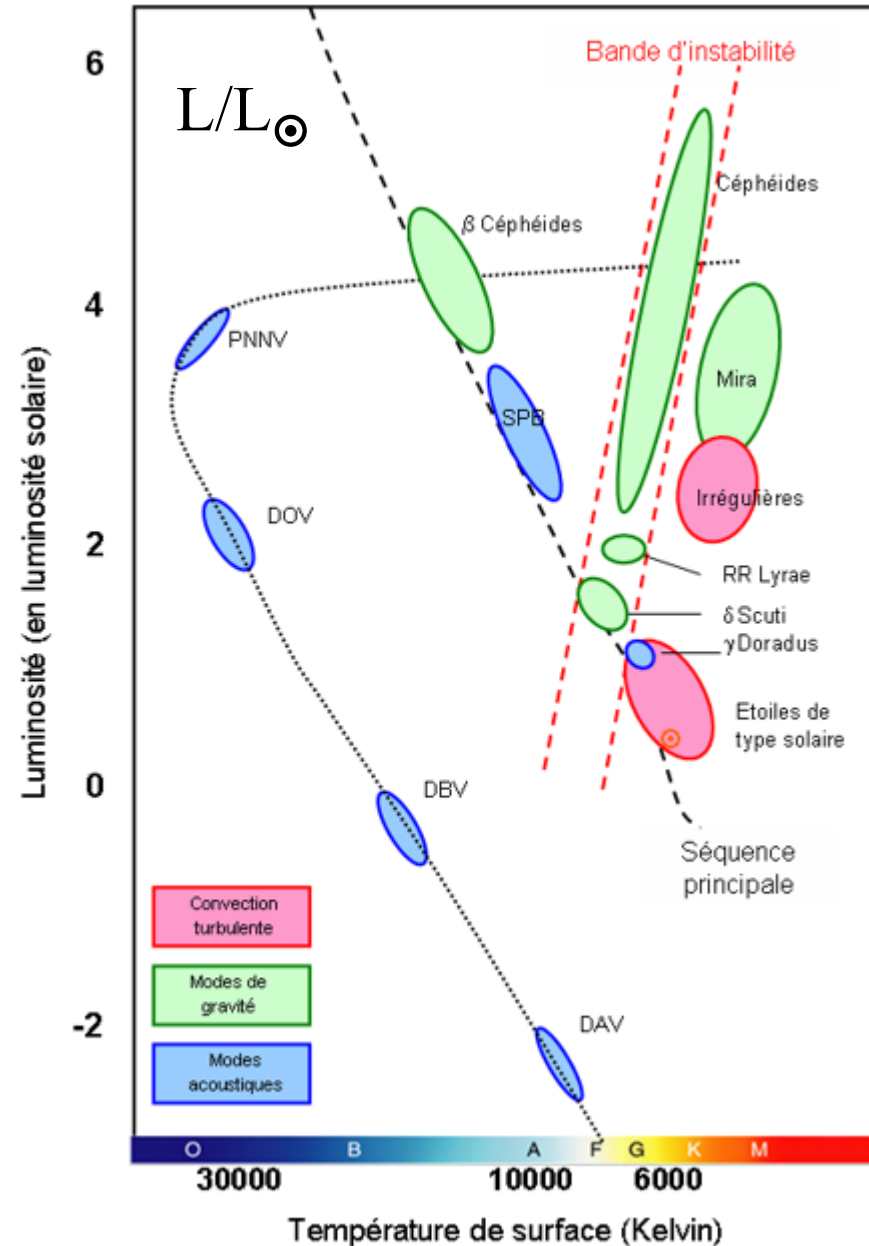
Les Cep de type I (massives) sont des Chandelles standard, (qq j à 2 mois)

Relation P-L (Leavitt 1909)

Modes acoustiques

Naines blanches pulsantes

DBV-He, DAV-H



Pulsations des Céphéïdes

H est épuisé: commencent à brûler He dans le coeur → C, N, O

Energie moins bien rayonnée → instabilité

Couche He ionisée sous la photosphère, opaque (mécanisme kappa)

Principe de l'oscillation: les forces de pression de radiation deviennent supérieures aux forces de gravité: les couches externes s'expansent

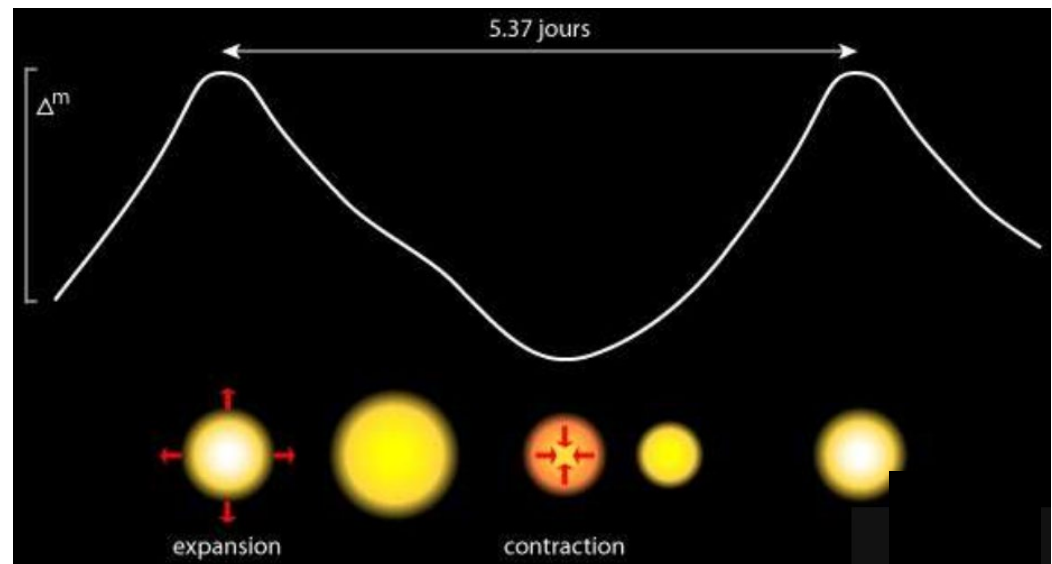
Sur leur lancée, la position d'équilibre est dépassée

La gravité domine à nouveau, et les couches externes se contractent

Position d'équilibre dépassée → oscillations $L = 10^5 L_{\odot}$

Plusieurs harmoniques

L'opacité d'une enveloppe circumstellaire peut perturber

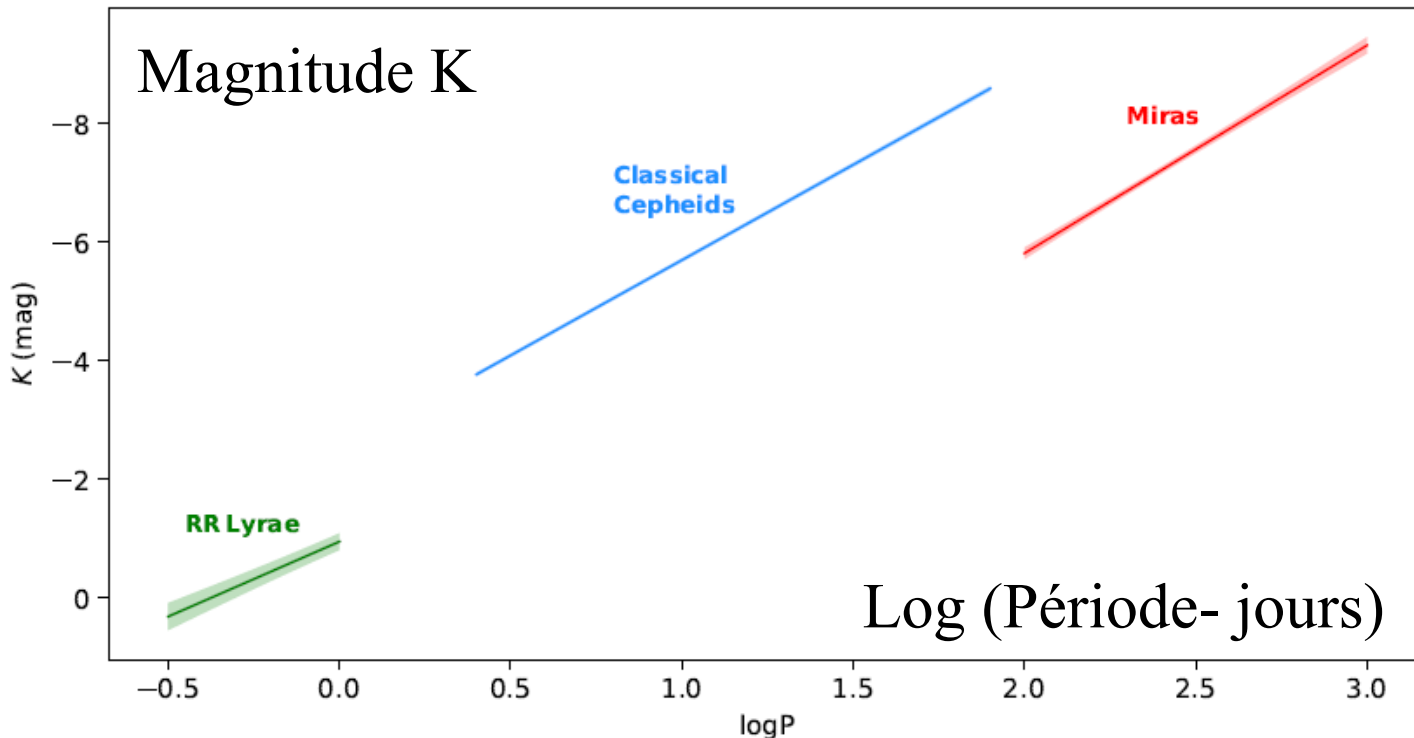


Comparaison des variables

Tip of Red Giant Branch TRGB commence par le flash de l'Helium, toujours à la même température, d'où $L_{int} \rightarrow$ chandelle standard

Supernovae de type I A: binaire avec naine blanche $L_{int} \propto$ durée

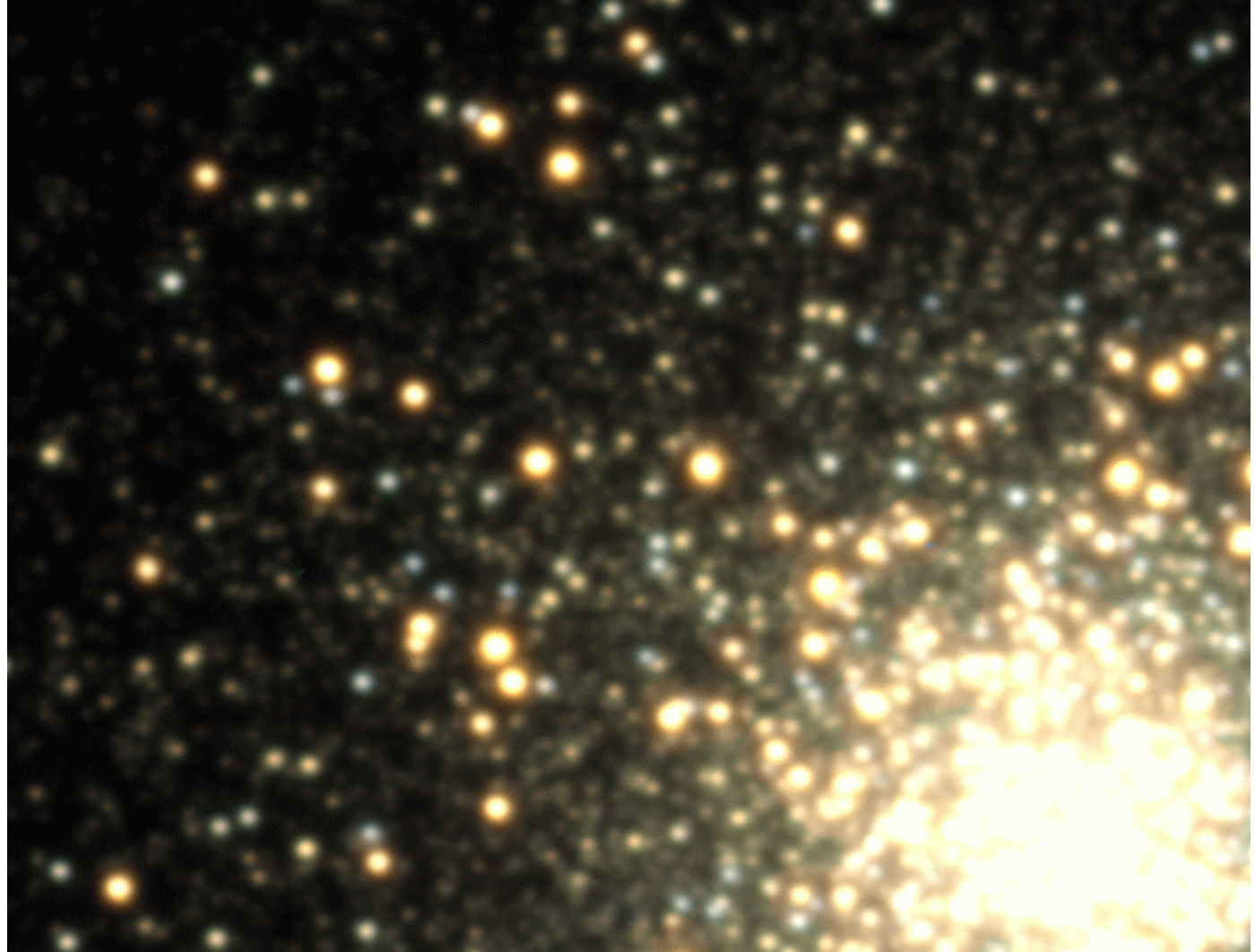
RR Lyrae, plus locales ($50 L_{\odot}$), plus vieilles



Amas globulaire M3: variations sur une nuit

La plupart des
variations sont
RR Lyrae
x2, + bleu
Profils
Caractéristiques

Chandelles
Standard Lint



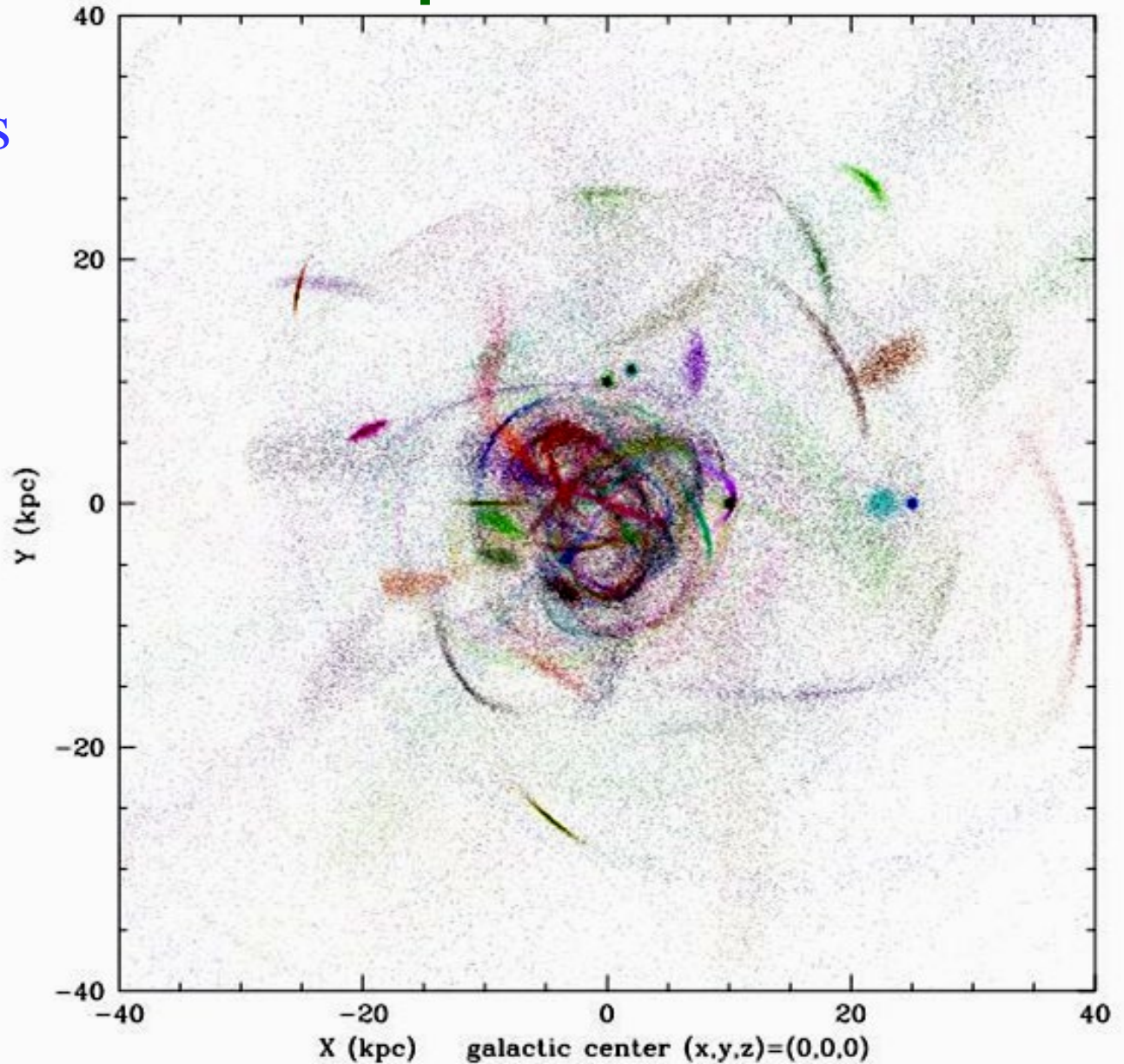
Temps de traversée 100 000 ans

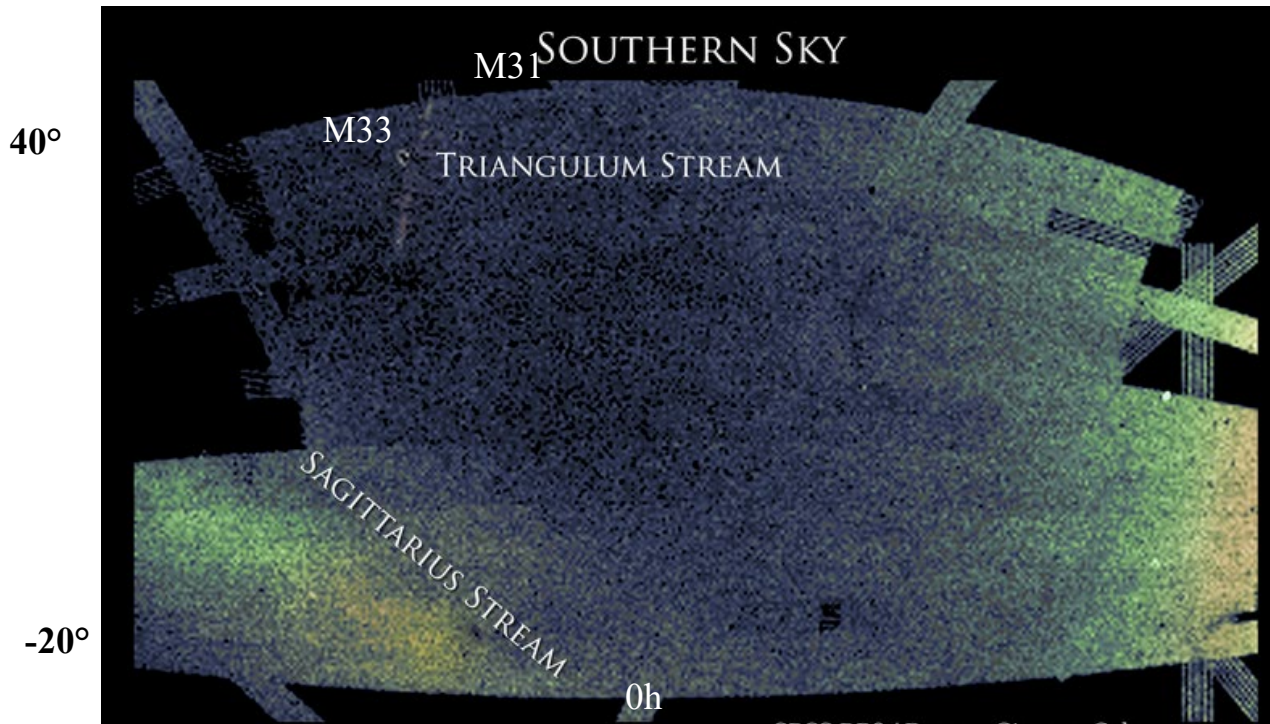
Formation du halo stellaire par accrétion

Fusions mineures

- Les halos stellaires de la Voie lactée et d'Andromède montrent des preuves de leur formation par accrétion et destruction de **galaxies satellites naines** et des **amas globulaires**

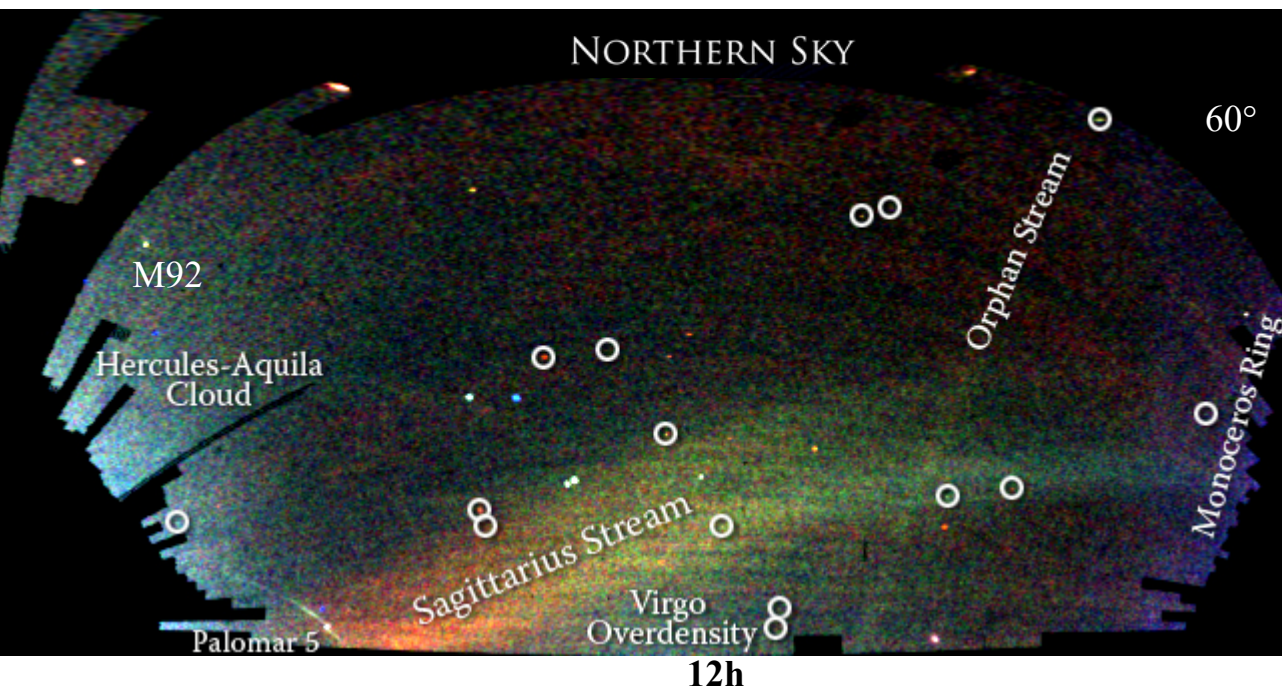
→ arcs, courants de marée





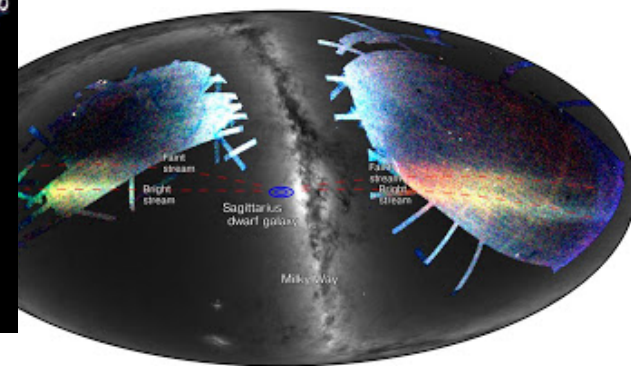
Nouveau courant
stellaire dans la
direction de M31
et M33
D=26kpc
➔ Amas globulaire

Bonaca 2012



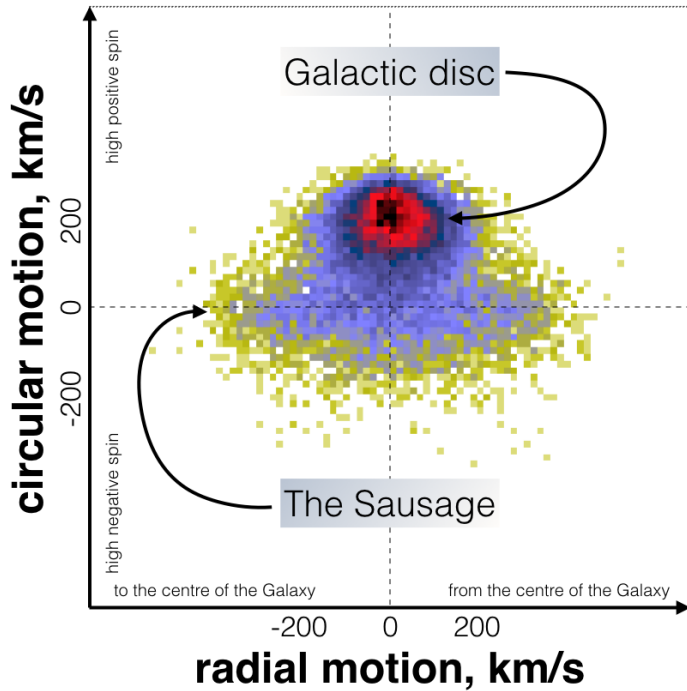
Courants stellaires

Belokurov 2006-7



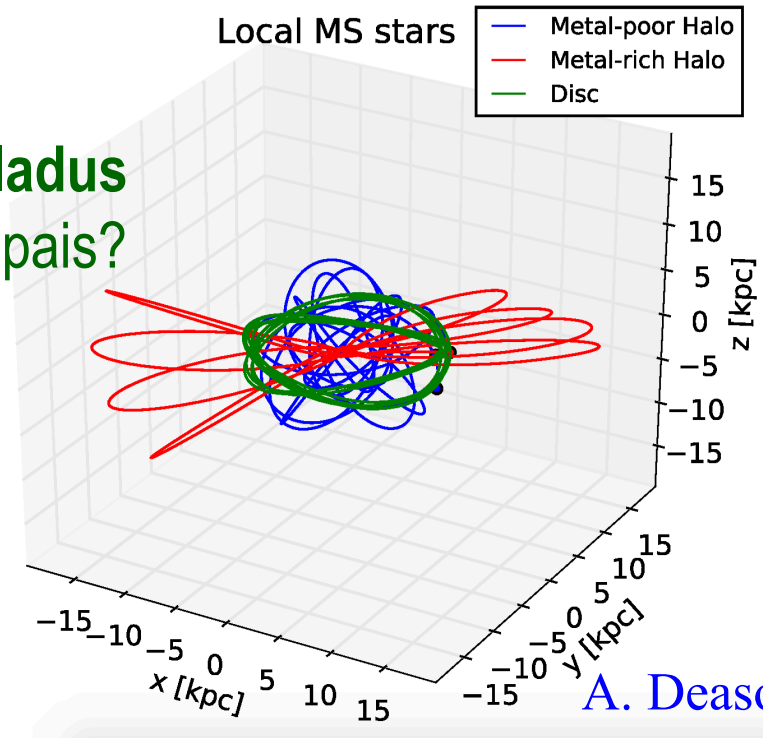
Orbites d'étoiles-types de GAIA-Sausage

Motions of 7,000,000 Gaia stars



V. Belokurov, 2018

GAIA-Enceladus
 → Disque épais?



A. Deason



11 10^9 yrs
merger

A. Fattahi et al 2020

Courants de marée

Halo central, dû à quelques naines détruites au début
Il y a 10 Gyrs

Halo externe, dû à de multiples accrétions plus récentes, moins massives

Même des amas globulaires

M92 < 500 Myr

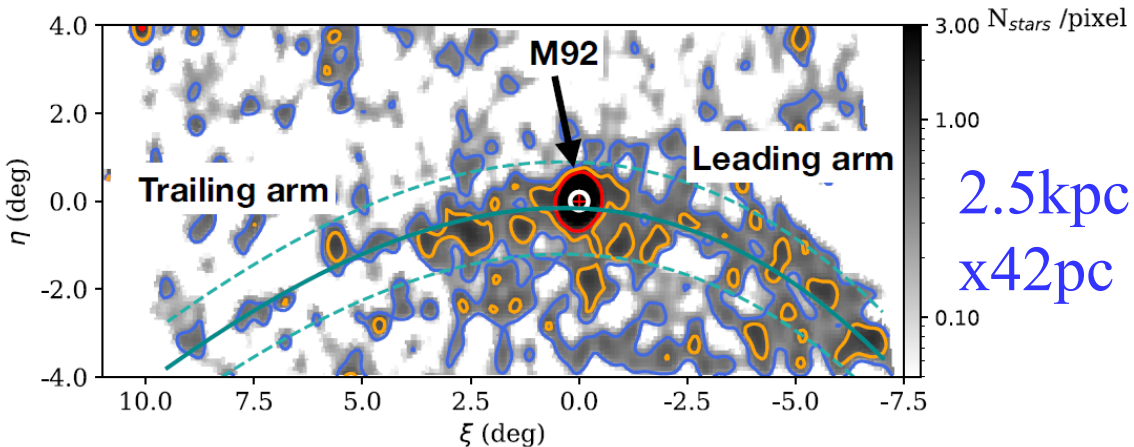
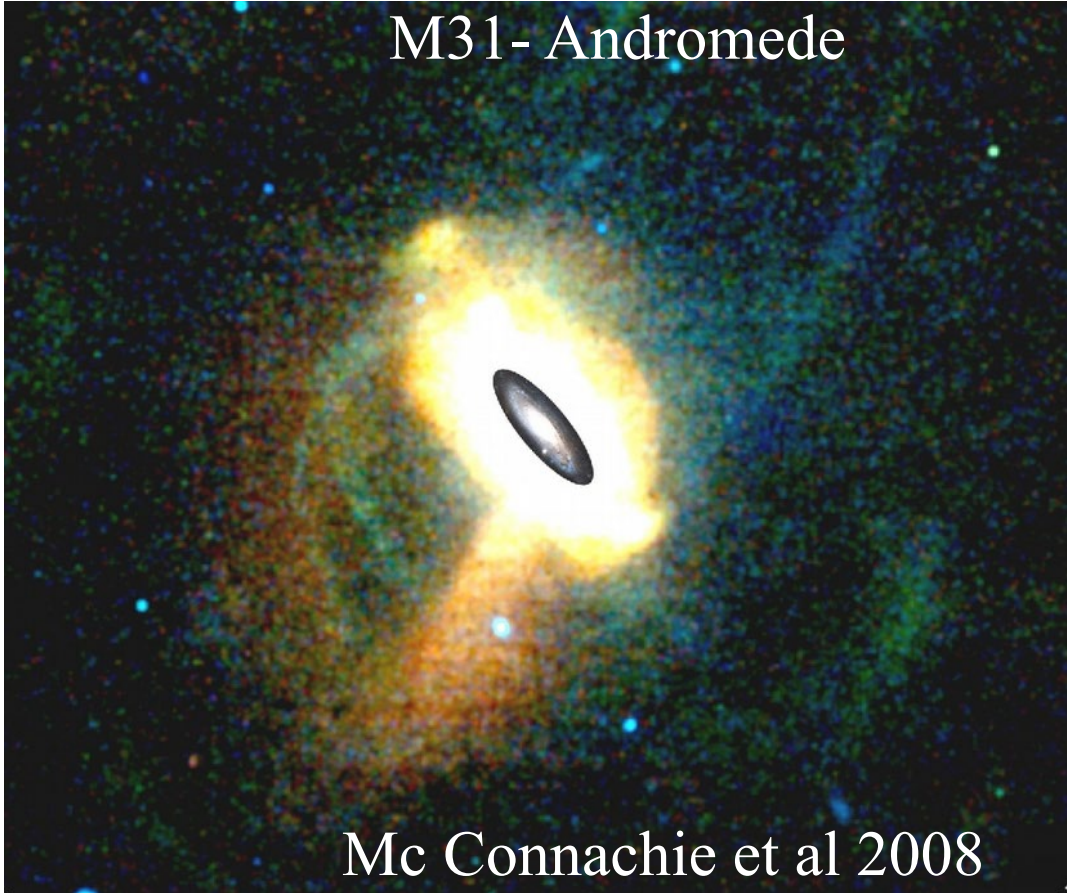
Thomas et al 2020

CMD, RR-Lyrae (distance)

Mouvement propre (GAIA)

Abondances

(Abbas 2021)

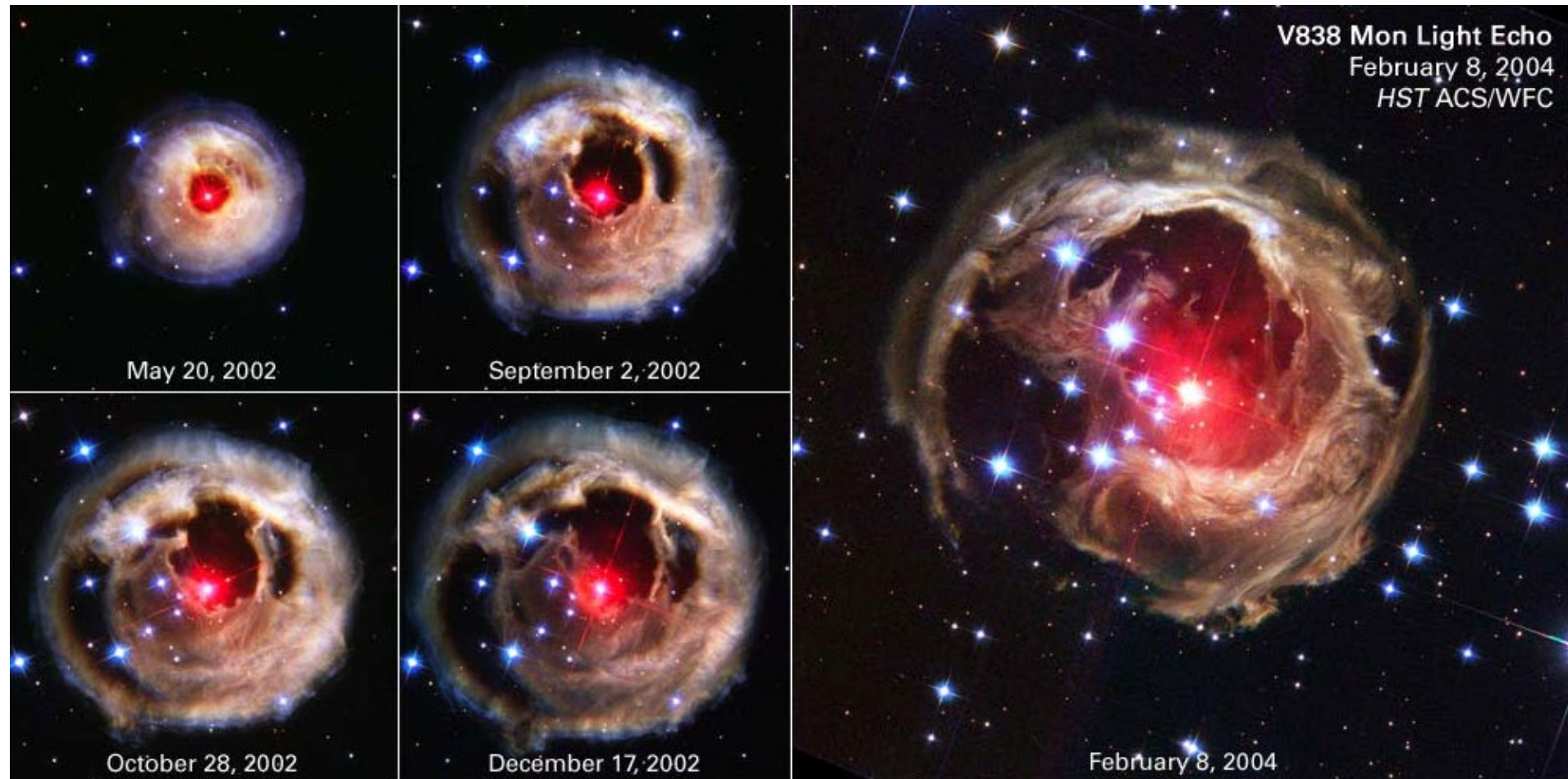


Soudaine éruption d'une géante

« Nova rouge lumineuse »

Explosion due à la fusion de 2 étoiles: V838 dans Monoceros, 2002-04

Echo → distance 0.7 kpc ? (0.44" par jour), Brillance x 10 000



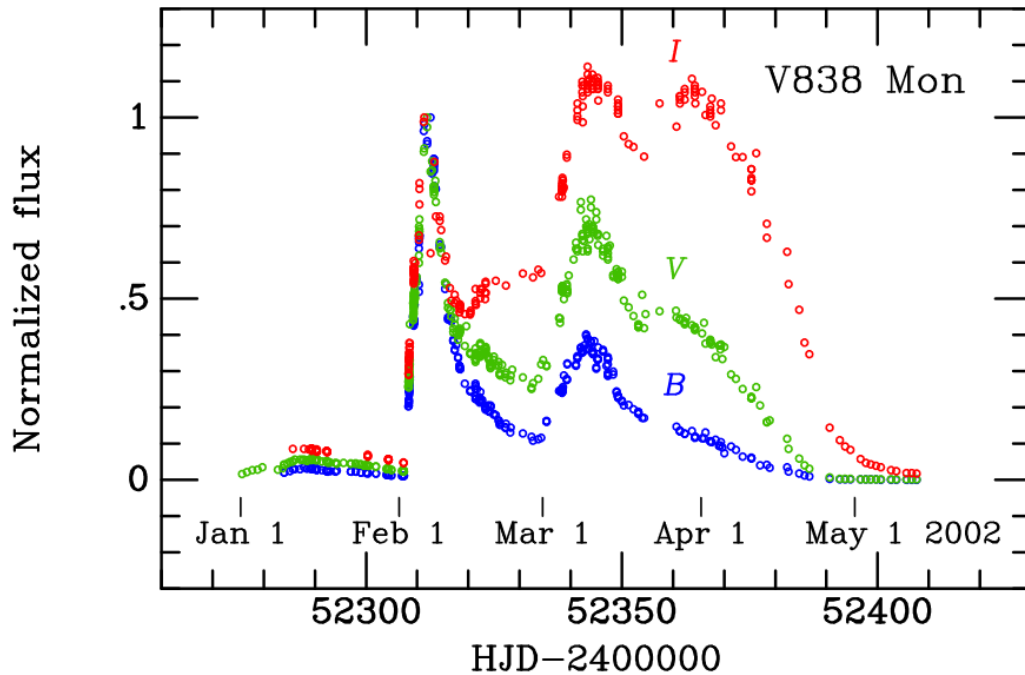
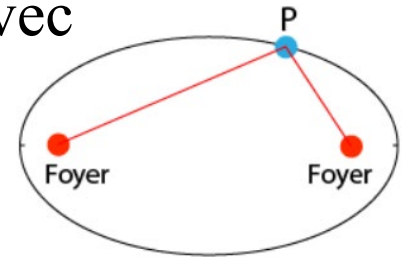
Bond et al 2003: enveloppes < 2pc

Echos de lumière

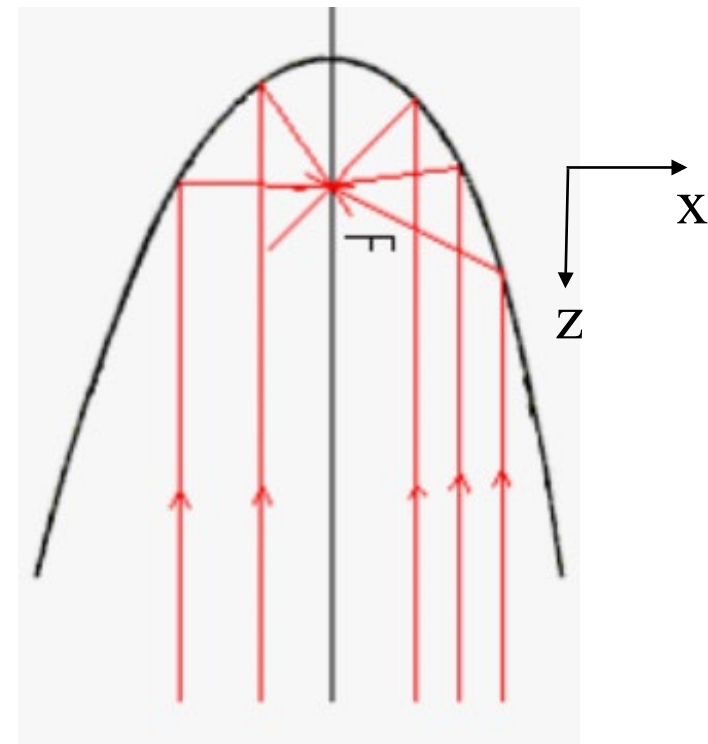
Pas d'éjection de matière, plusieurs sursauts, binaire (AGB+B*)

A un instant donné, l'écho se trouve sur une ellipse avec comme foyers la source et l'observateur

L'enveloppe autour de la nova est en expansion



Munari et al 2002



$$z = x^2 / (2ct) - ct / 2$$

Vitesse superluminiques

A son maximum, V838 était l'étoile la plus brillante de la Galaxie
 $10^6 L_{\odot}$, $D=6.2$ kpc

$$z = x^2 / (2ct) - ct/2$$

$$r^2 = x^2 + z^2$$

$$\rightarrow x^2 = ct(2r-ct)$$

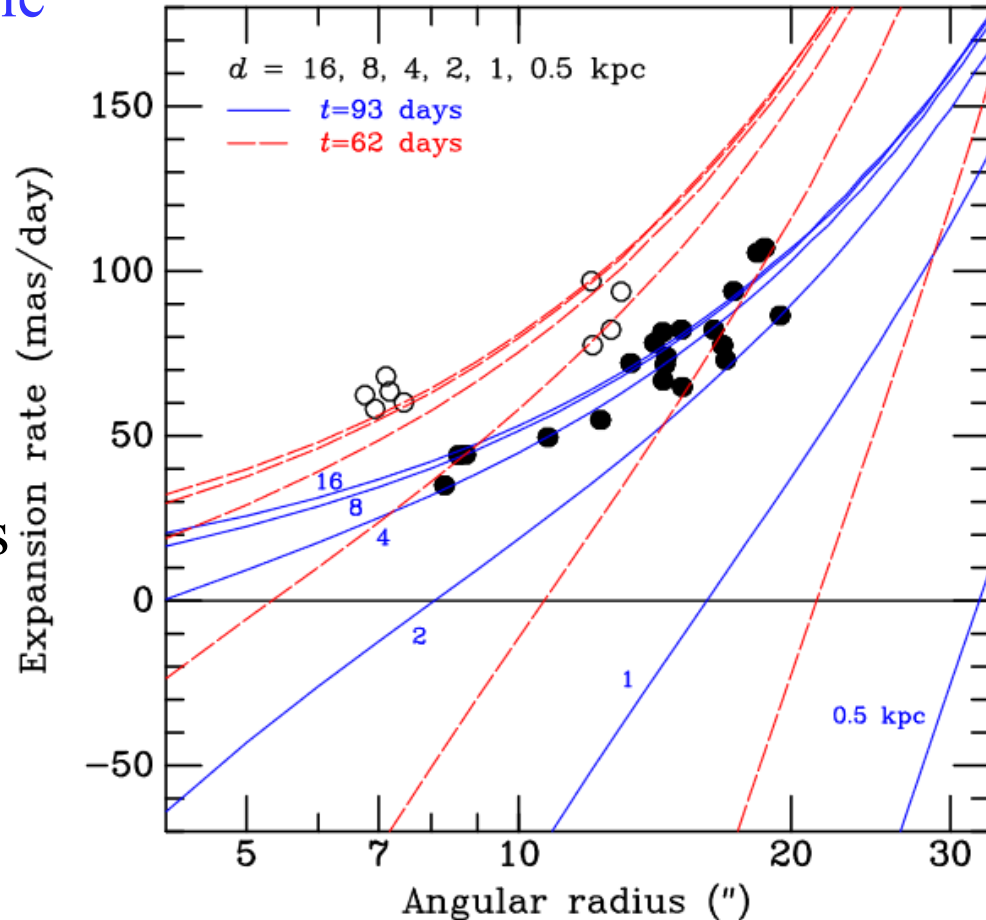
Expansion apparente des coquilles

$$dx/dt = (c/t)^{1/2}(r-ct)/(2r-ct)^{1/2}$$

Polarimétrie des coquilles à ct

\rightarrow Polarisation max à $\theta=0$

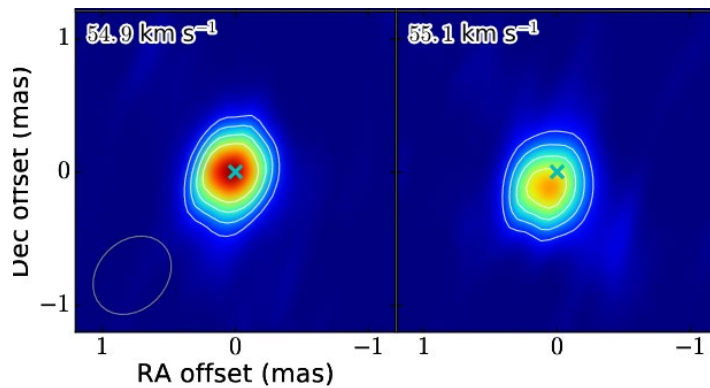
$$x=ct, z=0$$



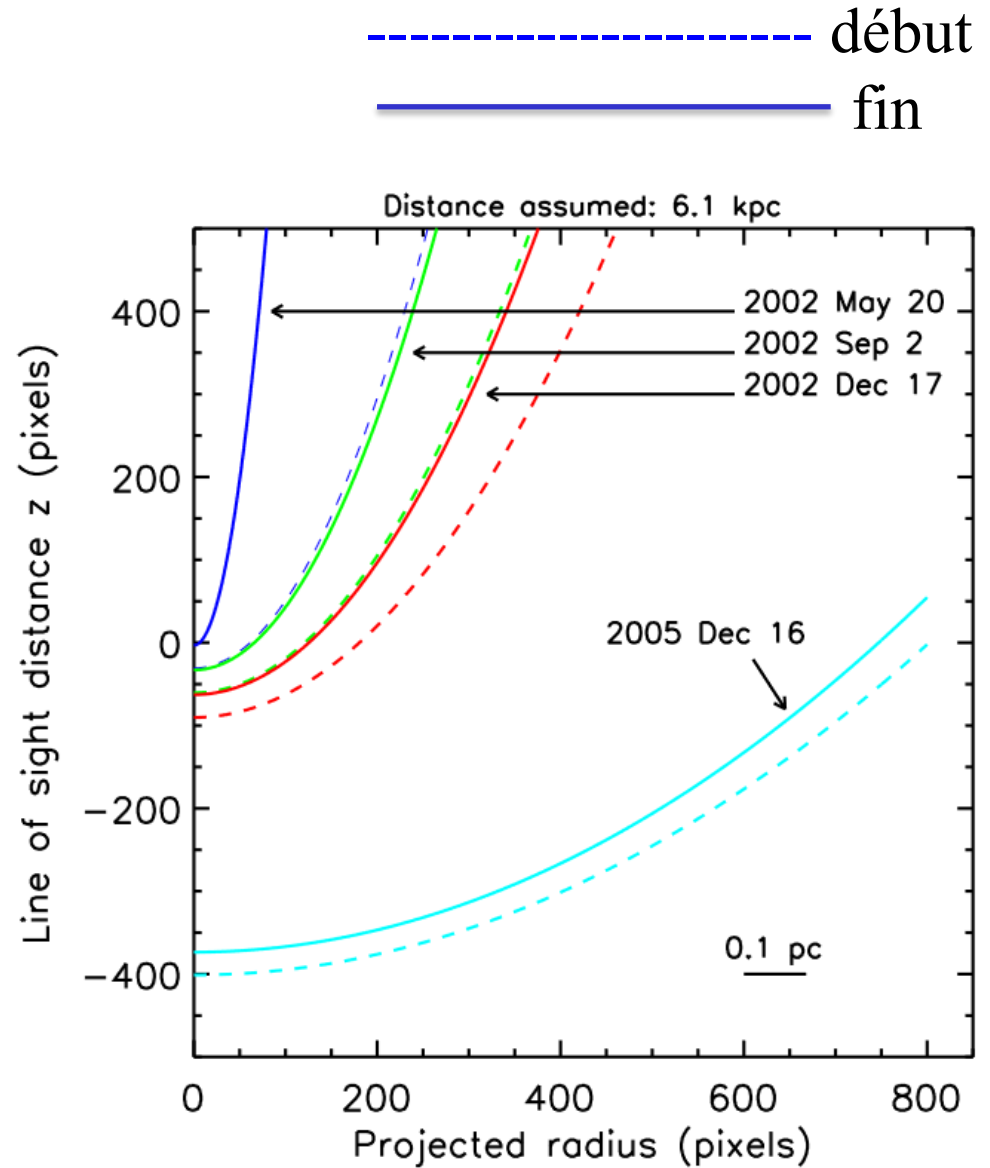
Evolution des sursauts

Maser SiO, par VLBI
Astrométrie et parallaxe
Donne une distance de 6 kpc

Origine du sursaut: fusion
entre deux étoiles,
le système était triple



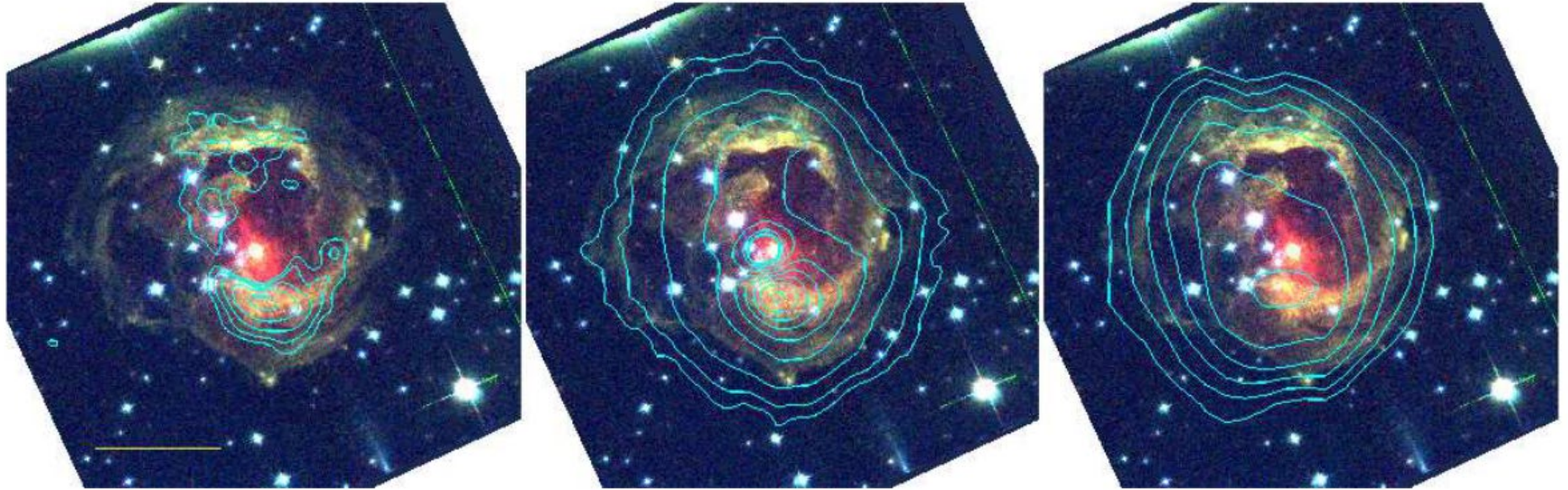
VLBI, Ortiz-Leon et al 2020



Sparks et al 2008

Emission de la poussière avec Spitzer

Images 24, 70 et 100 μm superposées à l'image HST



Masse de poussière et de gaz 40-100 M_{\odot}

→ Pas seulement des enveloppes circumstellaires, mais milieu interstellaire

V838 appartient à un amas ouvert

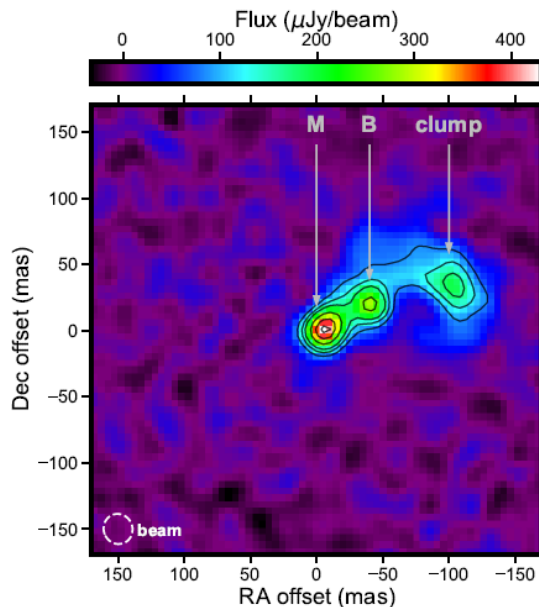
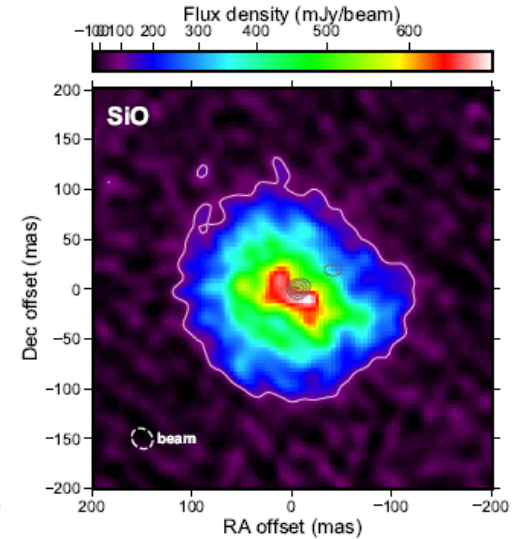
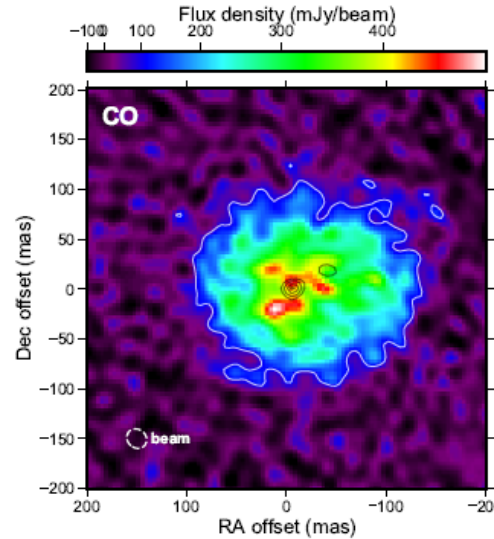
Banerjee et al 2006

ALMA: poussières et molécules

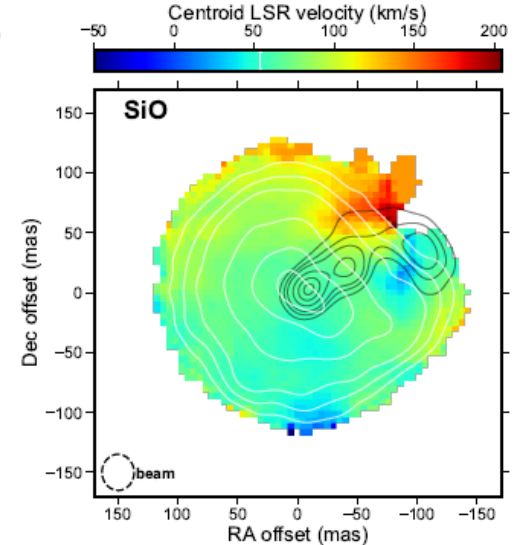
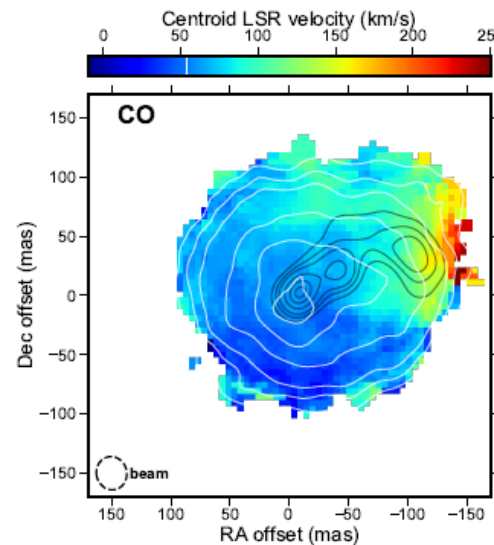
CO, SiO, SO, AlOH, SO₂, H₂S
1.3mm, Resol 25mas=148au

L'étoile B restante est à 250au
Maintenant obscurcie

ALMA 17ans après l'explosion
Outflow de 500km/s



0.1M_☉



Nouvelle catégorie de transitoires optiques

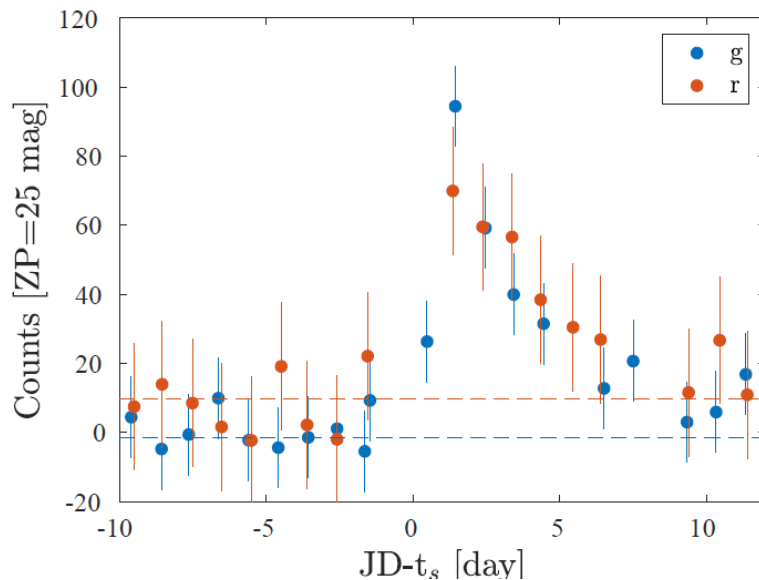
De plus en plus d'instruments dédiés, automatisés

ZTF (Zwicky Transient Factory): Le ciel en 3 nuits, (MW 2 fois /nuit)

AT2018LQH 2.1 jours au-dessus de MAX/2, $D=242$ Mpc,

0.4j/1.7j montée/descente, $7 \cdot 10^{42}$ ergs

➔ explosion éjectant à $v \sim 0.08c$ une masse de gaz $\approx 0.07M_{\odot}$
composée d'éléments radioactifs (^{56}Ni) $t_0=1.6j$



$T_{bb} \sim 10^7 \text{K}$

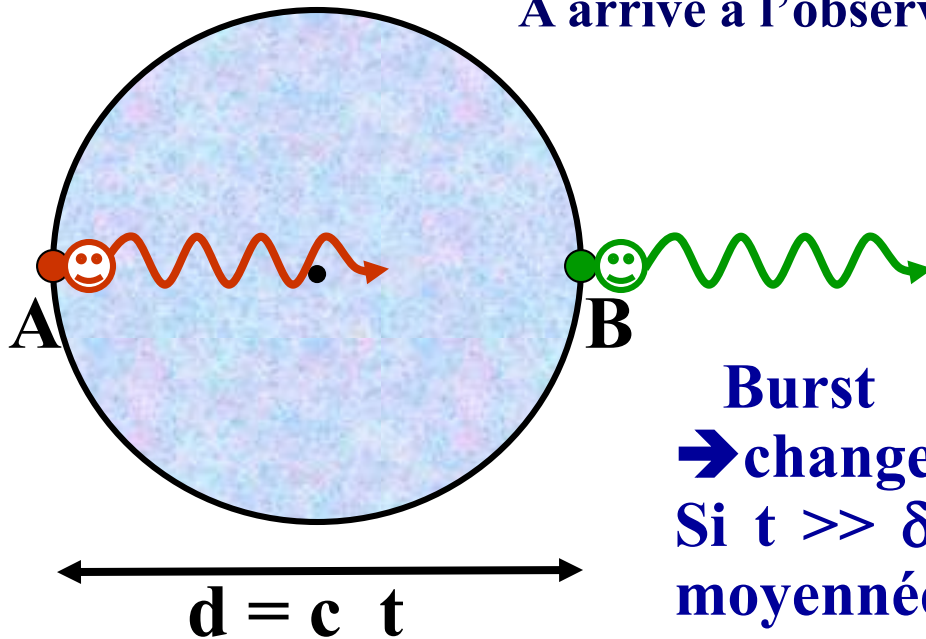
Fusion des 2 étoiles à neutrons?
Ou bien ejection de matériau
radioactif, précédant une SN?

Ofek et al 2021

Trous noirs: quasars et micro-quasars

La variabilité est une information sur la taille de la zone d'émission

Si les photons partent de A et B au même moment,
A arrive à l'observateur t ($= d / c$) plus tard



$c =$ vitesse de la lumière
 $d =$ diamètre

Burst en A/B durée δt ,
→ changement sur échelle $t + \delta t$.
Si $t \gg \delta t$, toutes les variations sont moyennées et le signal est monotone

Variation détectée si $t < \delta t$
→ taille de la région $< c \delta t$

Selon la distance au trou noir

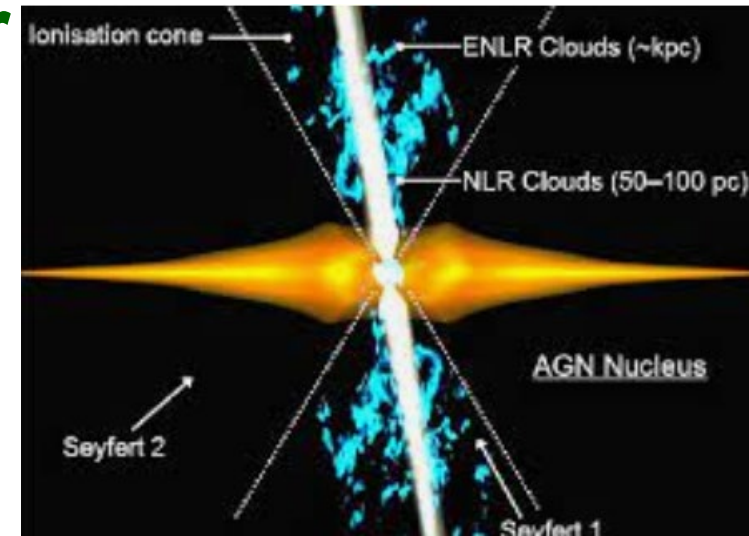
De l'AU (minutes) au pc (années)

1. Raies étroites NLR (Narrow Line Region)

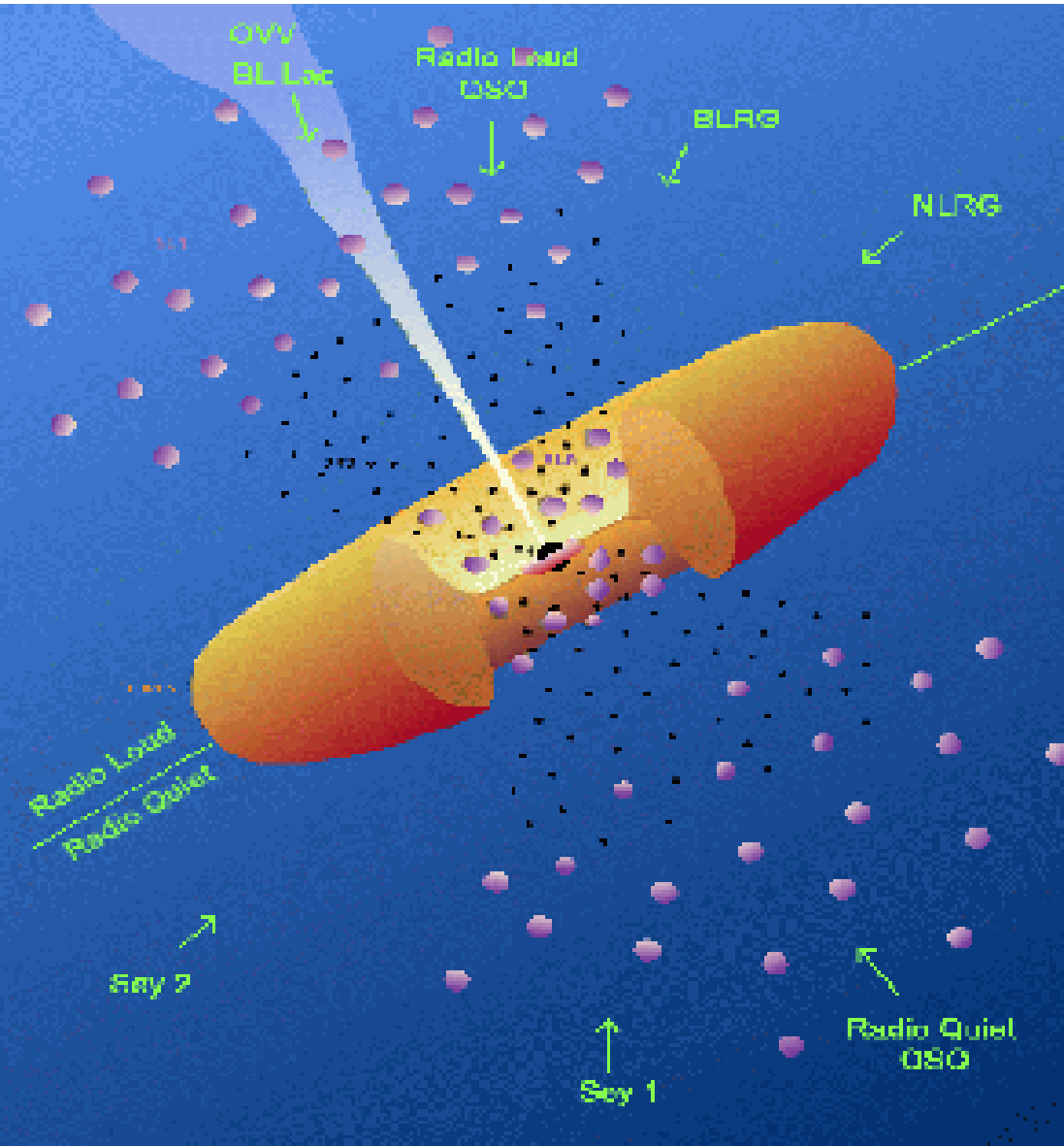
- $\Delta V < 1000$ km/s
- Etendues \sim pc-kpc dans Seyfert
- Densité, $n \sim 10^{3-6}$ cm⁻³ \rightarrow raies interdites, [OIII]
- Excitation des raies \rightarrow gas photoionisé

2. Région aux raies larges BLR (Broad Line Region)

- ΔV jusqu'à 40 000 km/s
- Non résolu (< 10 pc)
- Raies permises seulement, densités $n \sim 10^{9-10}$ cm⁻³
- $T \sim 10,000$ K d'après le rapport CIII 977 / CIII]1909



Tailles caractéristiques



Micro-quasars, 0.1 ms
Horizon 30km $10M_{\odot}$

Disques accrétion
 $10^5 M_{\odot}$ 0.01 AU \rightarrow 5s
 $10^9 M_{\odot}$ 100 AU \rightarrow heures
à jours

BLR < 1 pc mois-année

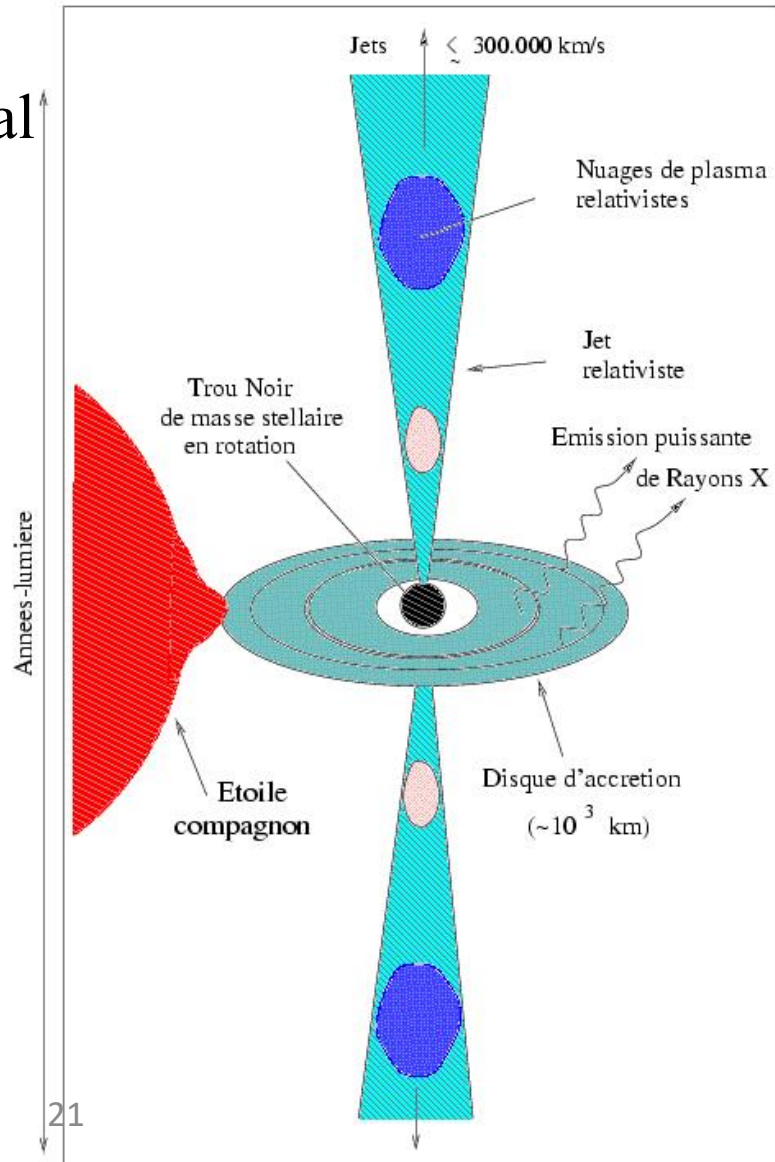
NLR très peu variable
Sauf micro-quasar

Analogie Microquasars et Quasars

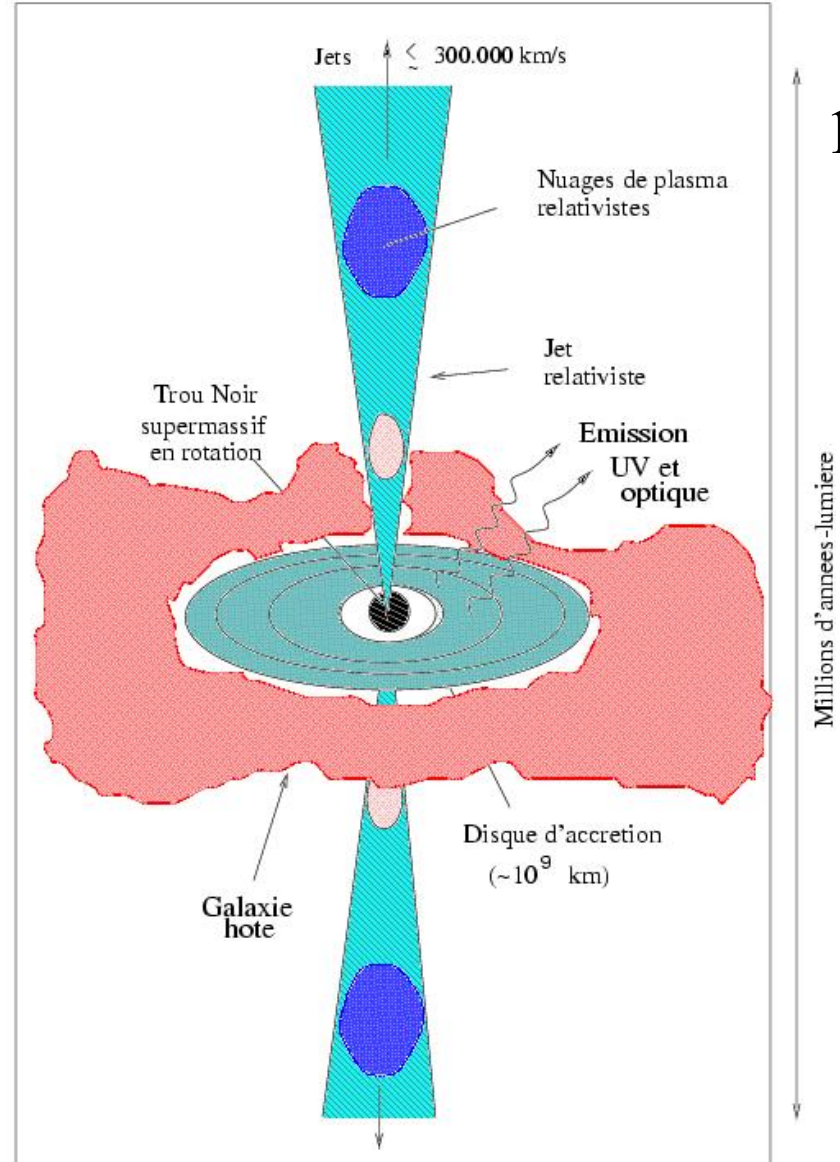
MICROQUASAR

QUASAR

1 al



10^6 al



Millions d'annees-lumiere

Trous noirs et étoiles à neutrons

Dans les binaires X variables, l'objet compact peut-être soit un trou noir, soit une étoile à neutrons

Difficile de trancher (par la masse?)

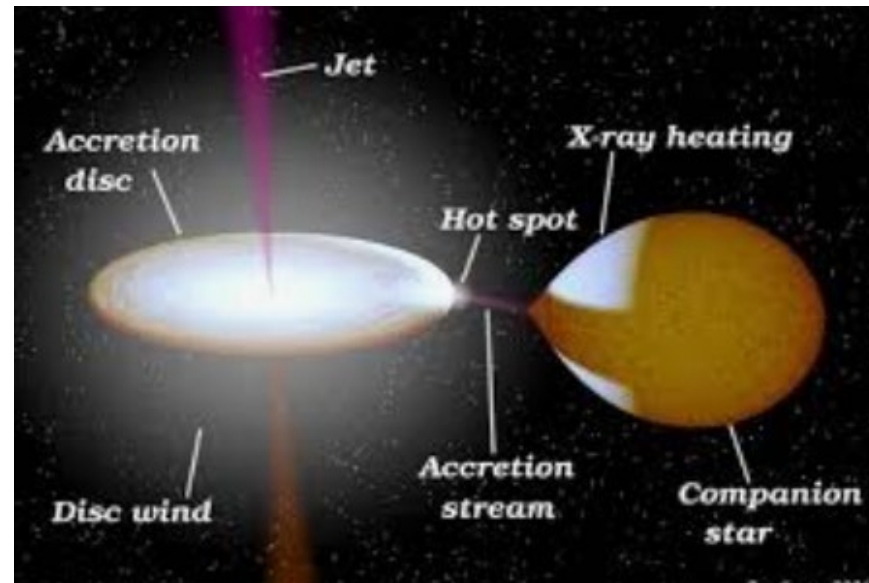
Le disque d'accrétion est mince, efficace pour rayonner, lorsque le flux de gaz est élevé
Ou bien, peu alimenté, le disque devient épais, peu efficace, la température monte → jet

→ Trou noir, tout est absorbé

→ Etoile à neutron: pas d'horizon, Donc plus brillante

Si fort **B**, accrétion par les poles

Les rayons X proviennent du jet



ADAF étoiles à neutron ou trou noir

Binaires X, micro-quasars, avec horizon ou non

En absence d'horizon (NS), l'énergie reste au voisinage de la surface

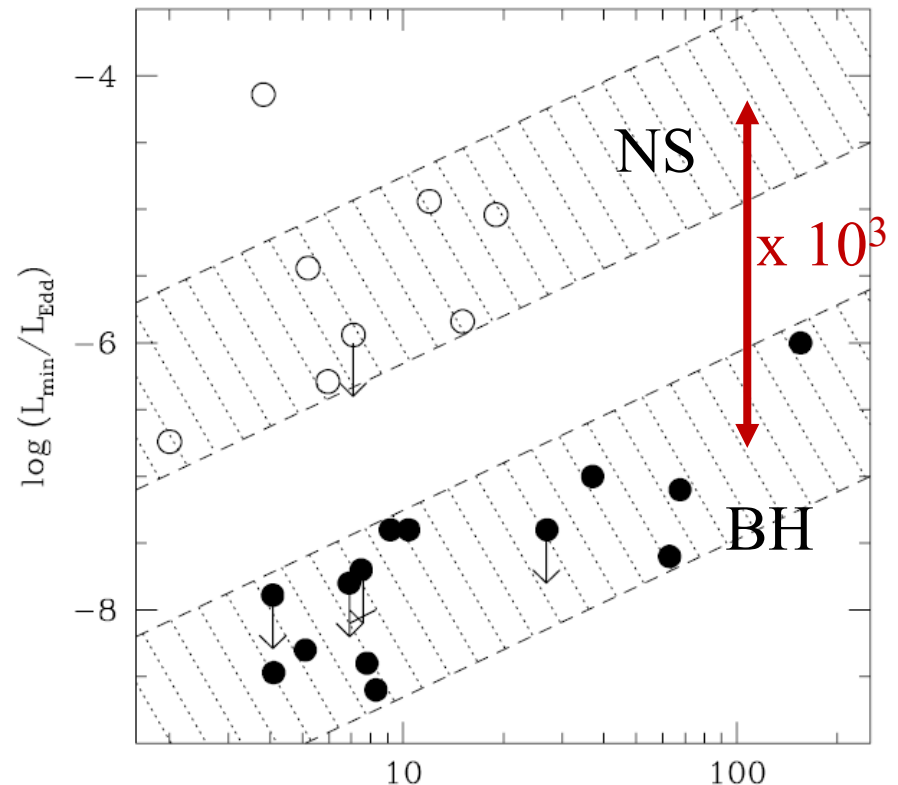
→ 100-1000 fois plus lumineux

Quand $L/L_{\text{Edd}} < 1\%$ → ADAF

$$L_{\text{Edd}} = 1.3 \cdot 10^{38} \text{ erg/s } (M/M_{\odot})$$

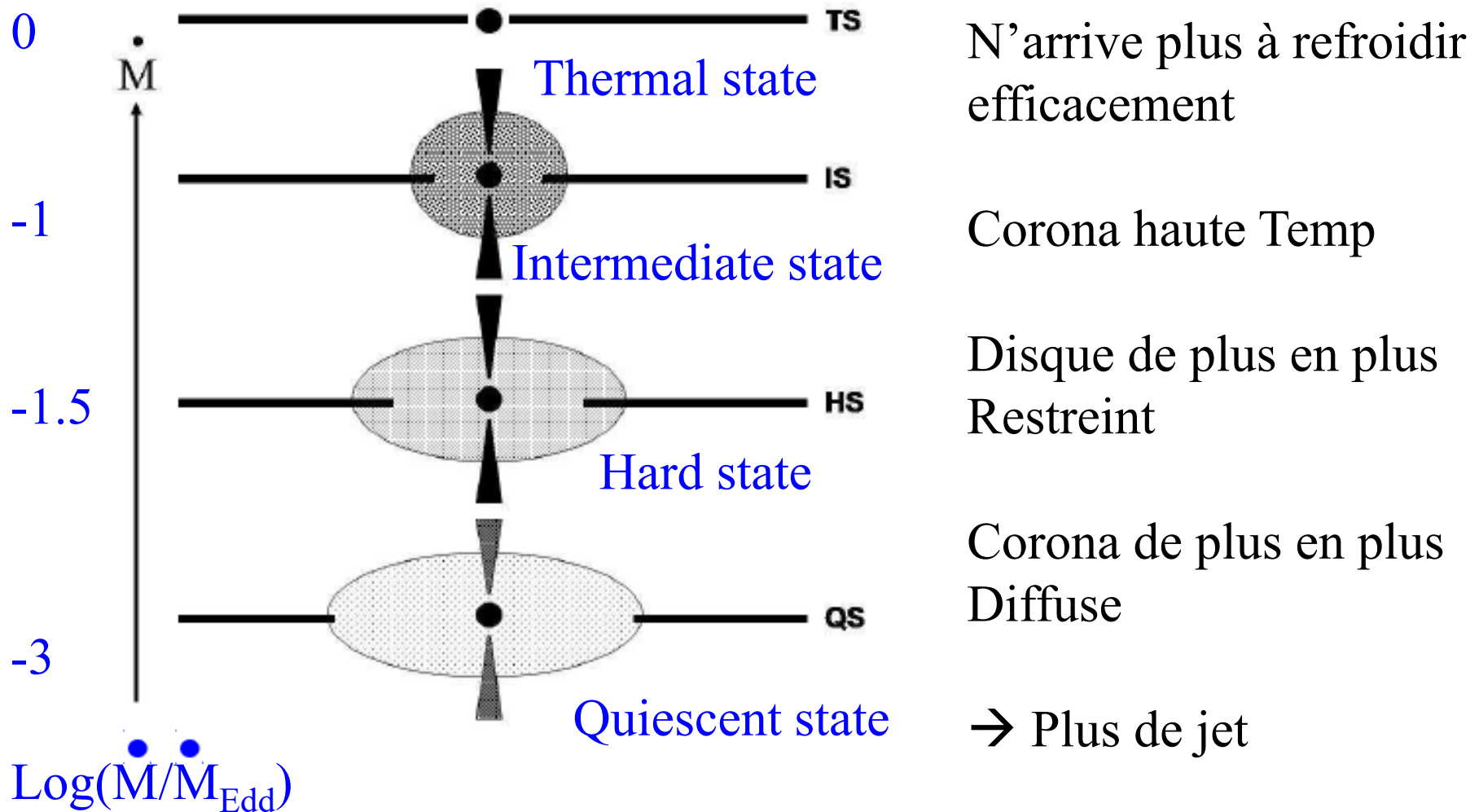
ADAF $T \sim 10^{12} \text{ K}$

$L_{\text{min}}/L_{\text{edd}} (0.5-10\text{keV})$



Période orbitale (heures)

ADAF: disque disparaît progressivement



Maximum Tb $\sim 10^{12}$ K

Source radio **opaque**

Synchrotron self-absorbé

$$F(\text{cut-off}) \propto \text{Surface} b^{2/5} B^{1/5}$$

Catastrophe de l'inverse Compton
Si $T_b > 10^{12}$ K, refroidissement
rapide

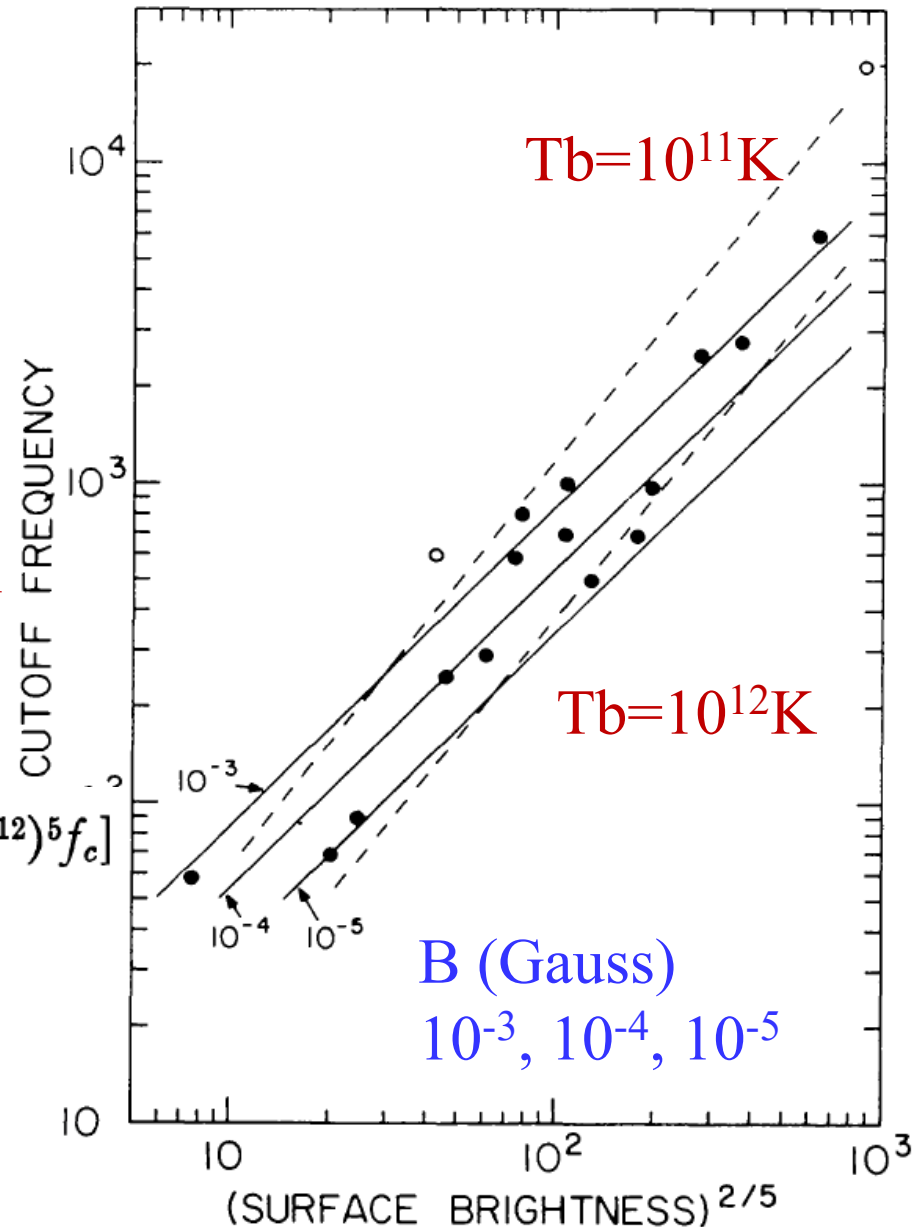
$$L_C/L_s \sim \frac{1}{2}(T_{\text{max}}/10^{12})^5 f_c [1 + \frac{1}{2}(T_{\text{max}}/10^{12})^5 f_c]$$

Double diffusion

$$L_C/L_s \sim (T_{\text{max}}/10^{11})^{10}$$

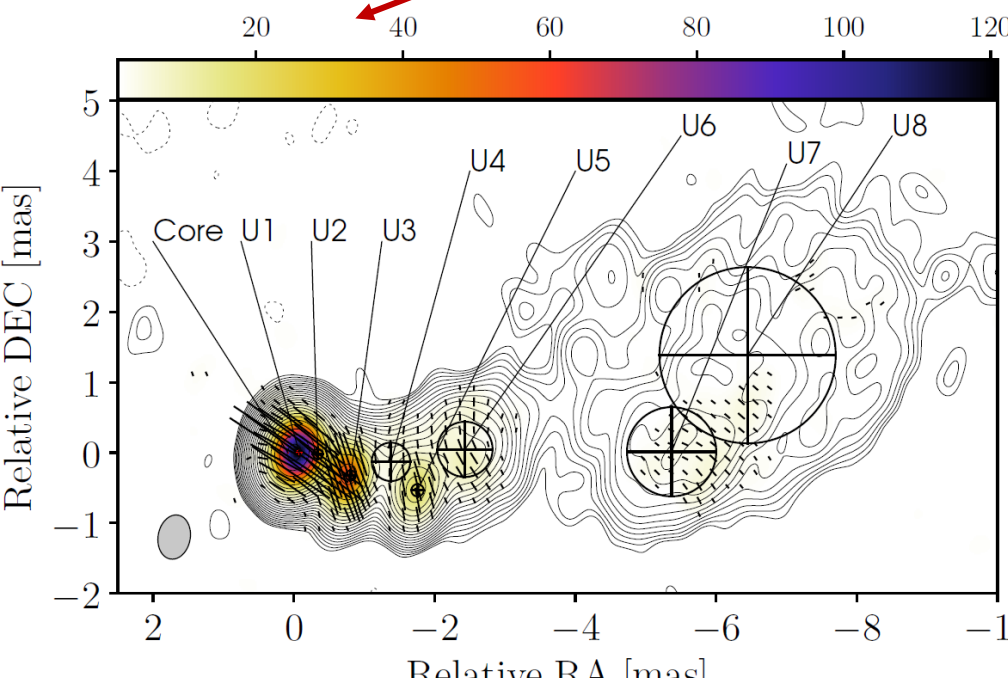
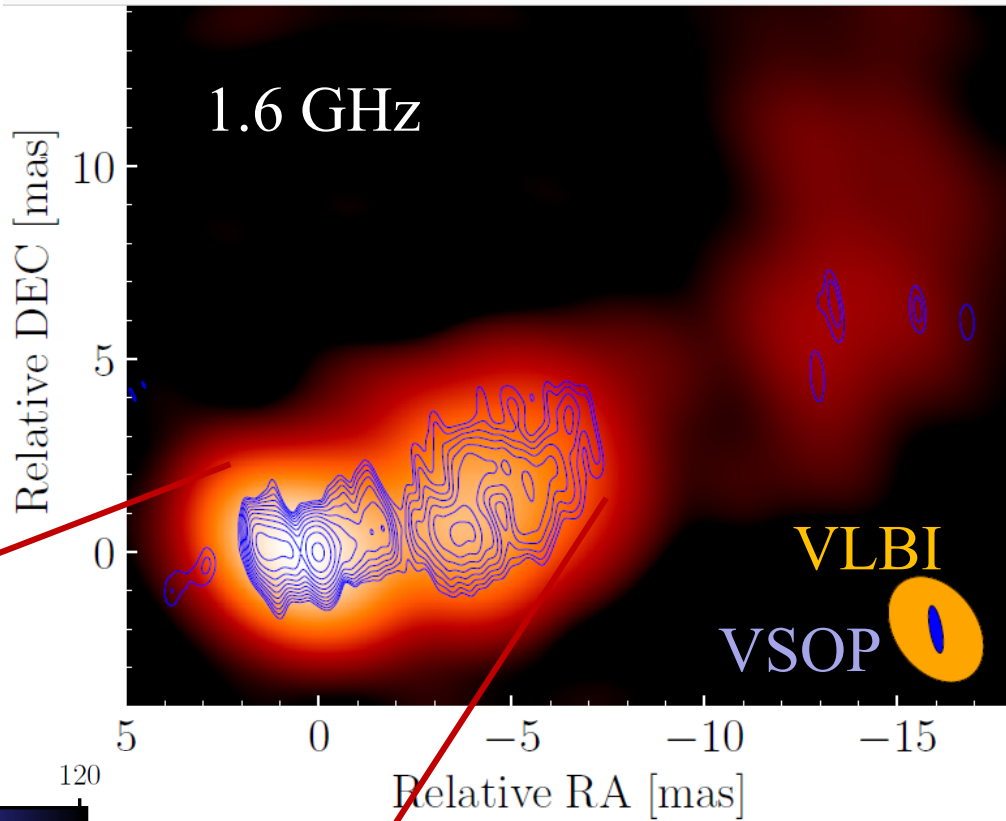
Durée des e^- à 10^{12} K = 1 jour!

Kellermann Pauliny-Toth 69



Tb dans 3C345

VLBI + VSOP 350 000 km
(elliptical orbit)
0.3 mas de résolution
1.6GHz, 15GHz
 $T_b > 10^{12}$ K



Δ Dop variable ?
Burst et réaccélération des
Particules
B perpendicular to jet
→ helicoidal?

Potzi et al 2021

Tb dans le blazar 3C3445



$$T_b(\text{obs}) = \Delta T_{\text{int}} / (1+z), \text{ Boost relativiste } \Delta = 9$$

$$\Delta = \sqrt{(1-\beta^2) / (1-\beta \cos\theta)}$$

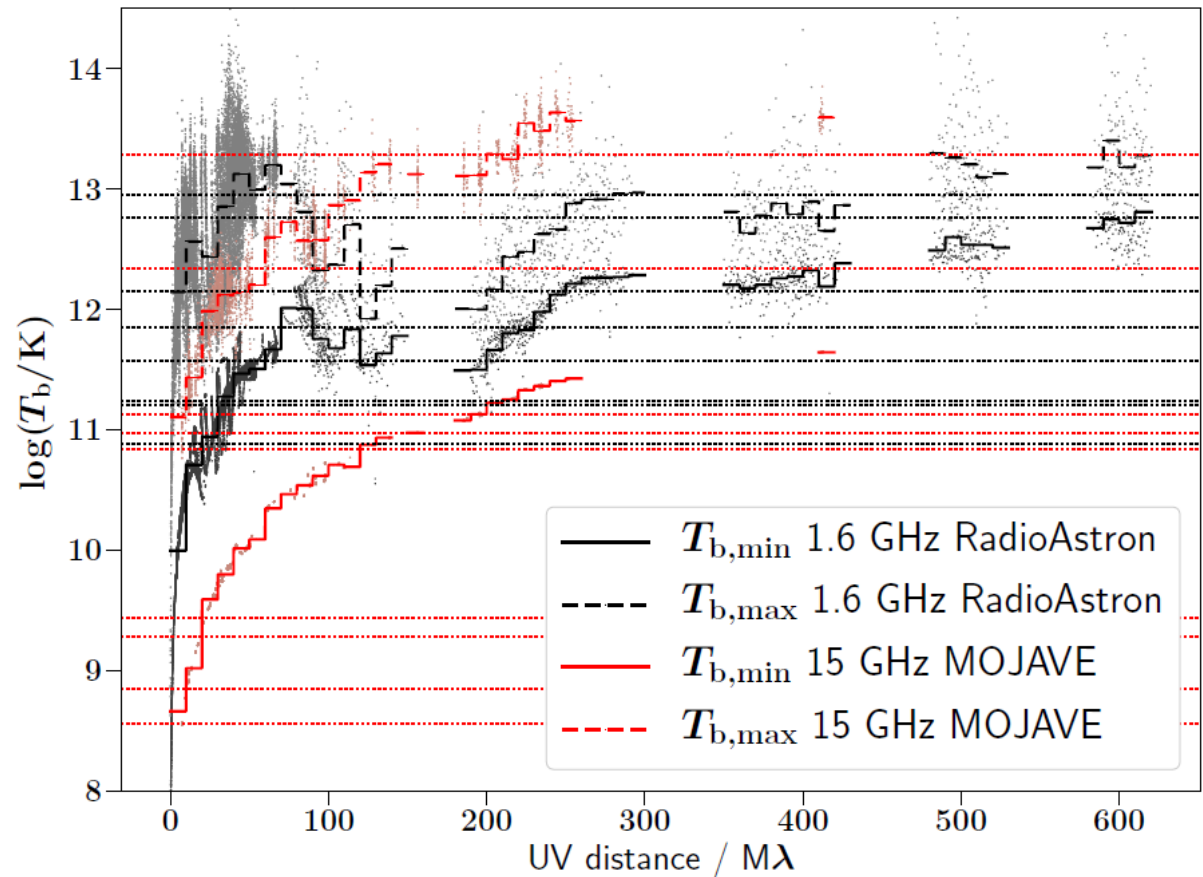
$$T_b > 10^{12} \text{ K}$$

Résolution 0.3mas

$\sim 10^3 R_g$

Variabilité

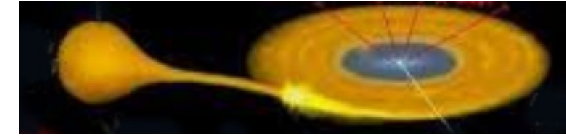
Jours- mois



Résolution spatiale

Oscillations quasi-périodiques: QPO

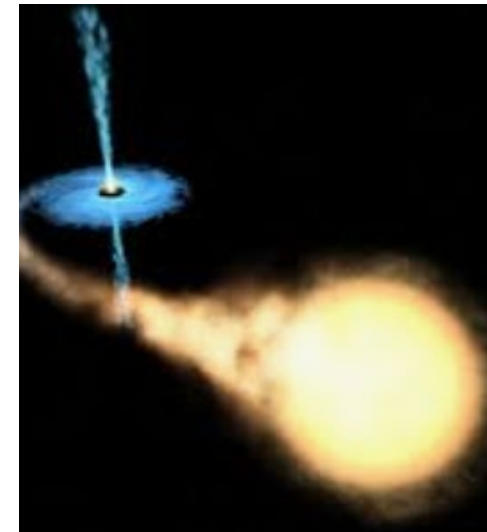
LMXB (Low Mass)



Binaires X, soit des étoiles à neutron (**NS**), soit des trous noirs (**BH**)
de masse stellaire

HMXB (High Mass)

Etoile compagnon: flot de masse
→ Disque d'accrétion, émetteur X



QPO observées en rayons X, échelle: ms-sec

Haute fréquence $> 60\text{Hz}$, kHz (surtout NS)

Basse fréquence $< 30\text{ Hz}$ (surtout BH)

Lobe de Roche
ou vent stellaire

Transformée de Fourier → spectre de puissance

Types C, B, A pour les trous noirs (flux décroissant)

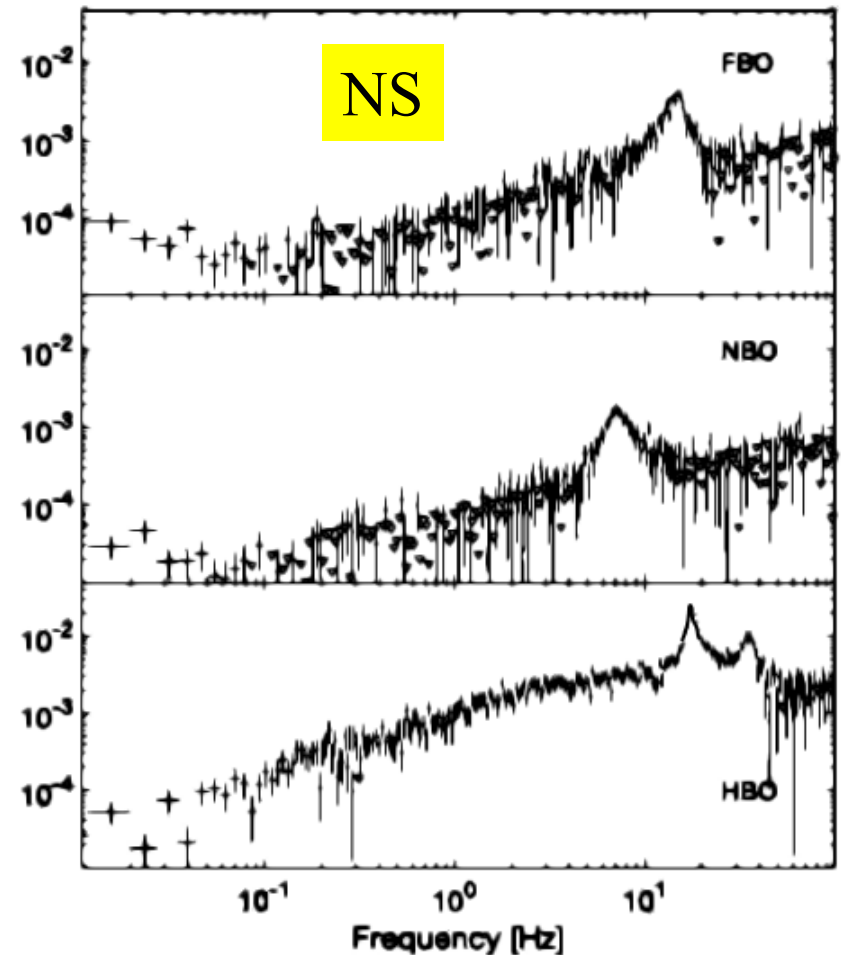
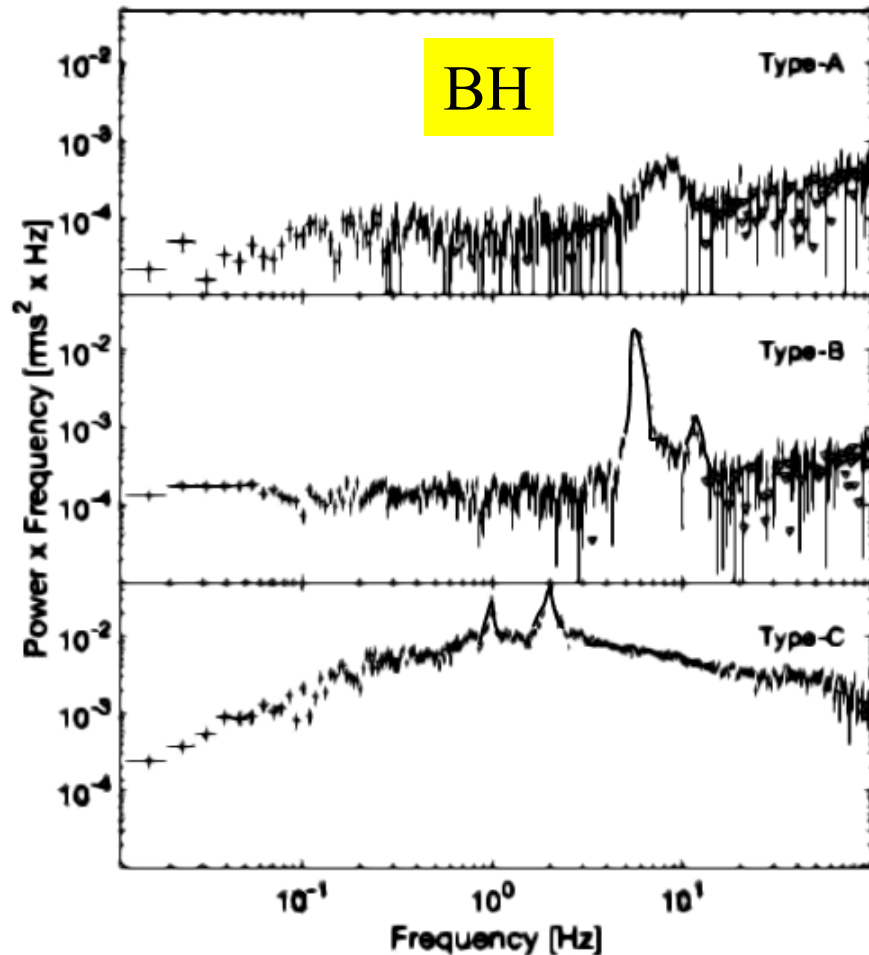
HBO (Horizontal Branch), NBO (Normal Branch), FBO (Flaring Branch)

A → FBO
 B → NBO
 C → HBO

Spectres de puissance $F(t) \rightarrow P(\nu)$

$$F(t) = \exp(-t/\tau) \cos(2\pi\nu_0 t) \rightarrow P(\nu) \propto 1 / [(\nu - \nu_0)^2 + (\lambda/2)^2]$$

Avec $\lambda = 1/(\pi\tau)$



C et B: harmoniques + continuum (bruit)

Couleur-couleur

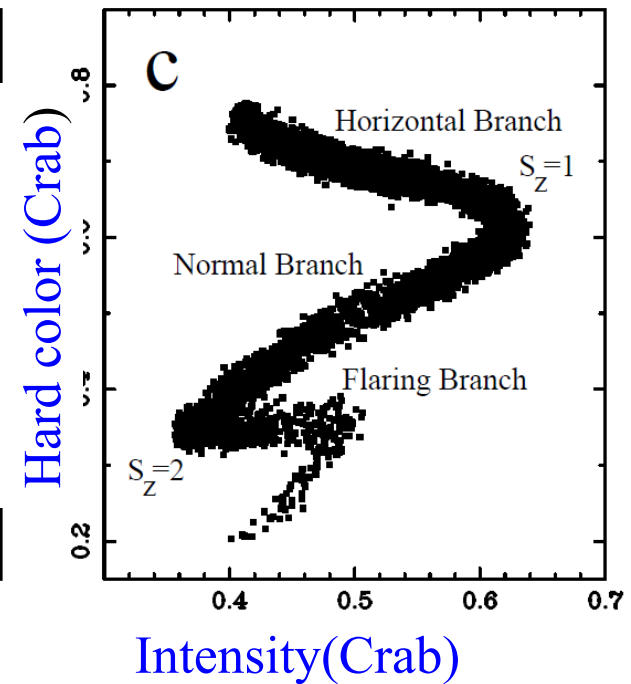
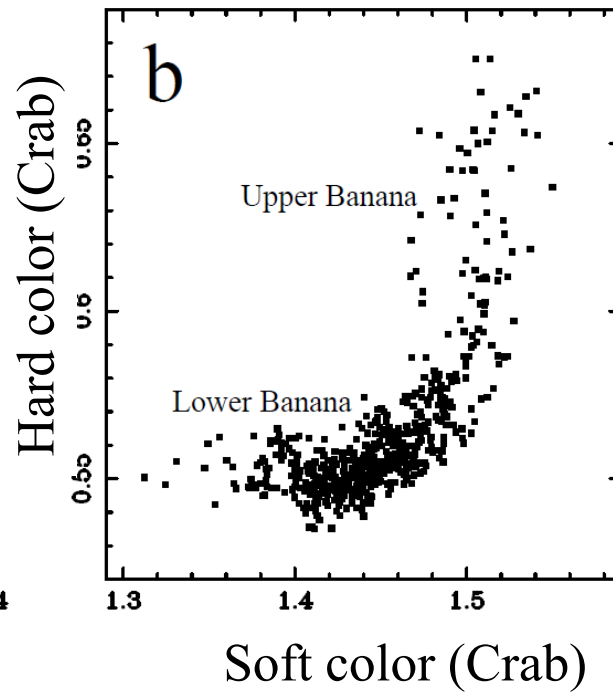
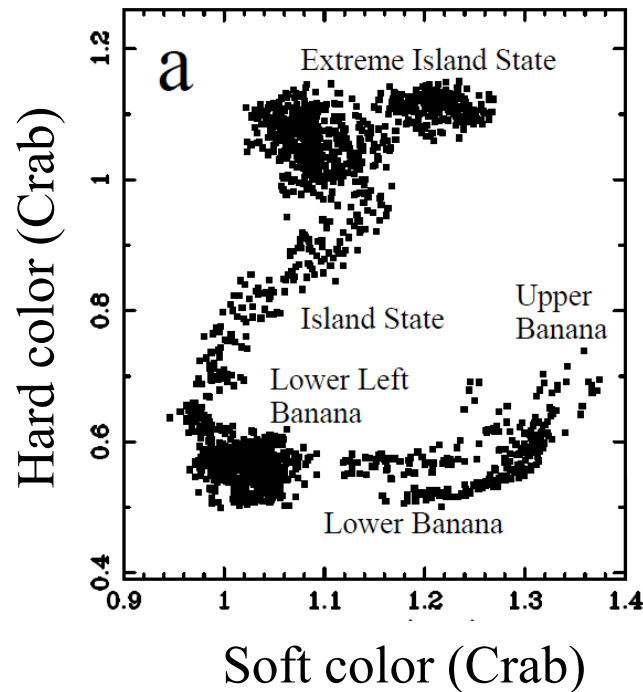
Intensité-couleur

Etoiles à neutrons plus complexes: l'émission thermique de l'étoile s'ajoute à celle du disque d'accrétion et de la corona

atoll source
4U1608-52

GX atoll source
GX 9+1

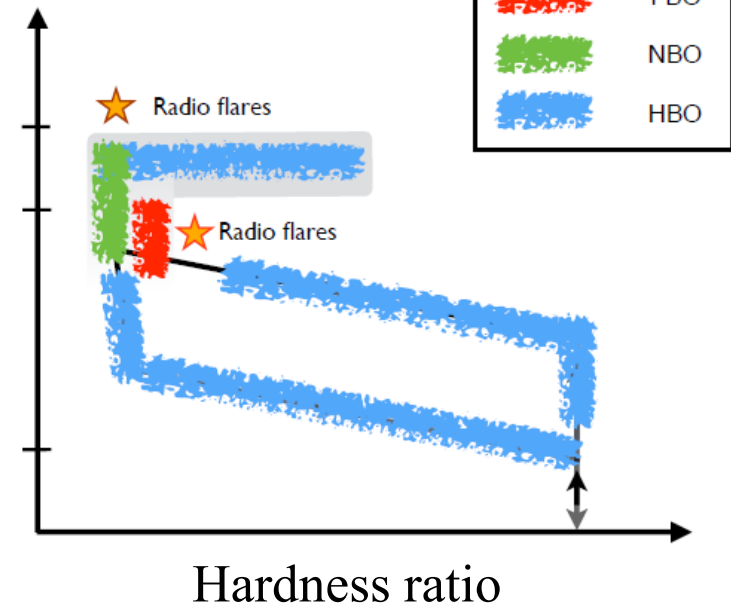
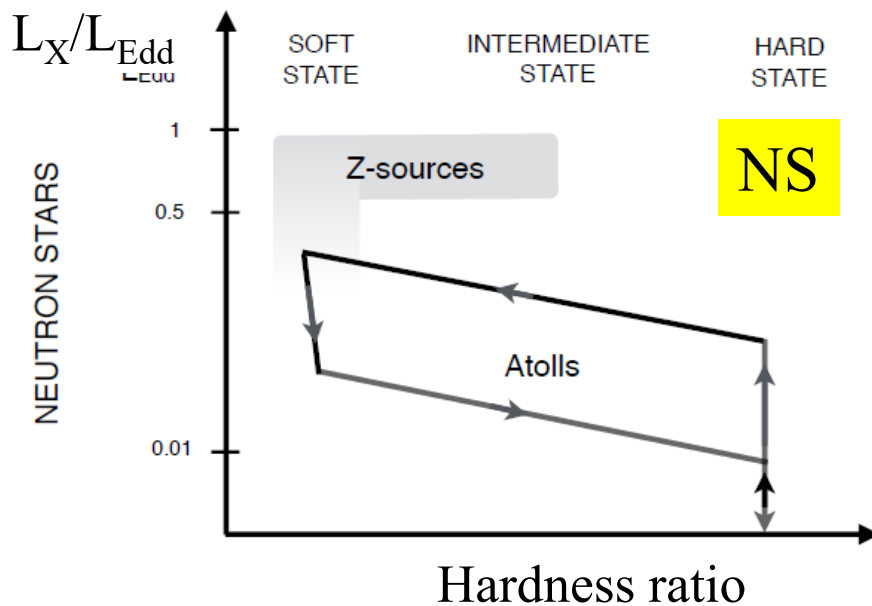
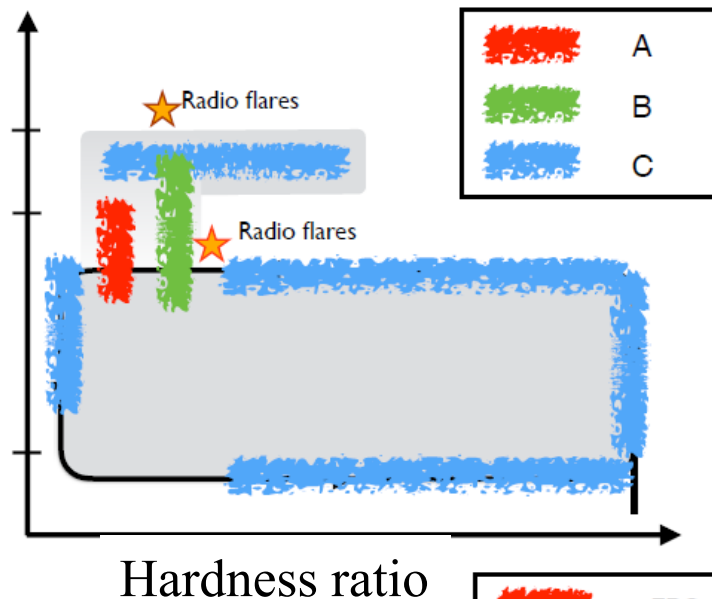
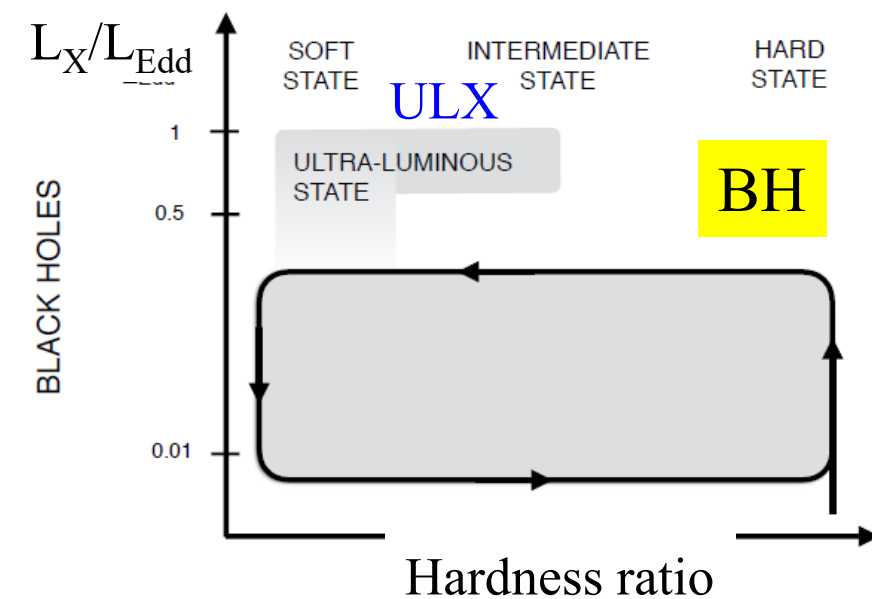
Z source
GX340+0



Van der Klis 2006

Classification des QPO

Soft= X-thermique
Hard= X-Compton



Distinction trou noir ou étoile à neutrons (NS)

Difficile à séparer: $R(\text{NS}) = \text{qqes rayons de Schwarzschild}$

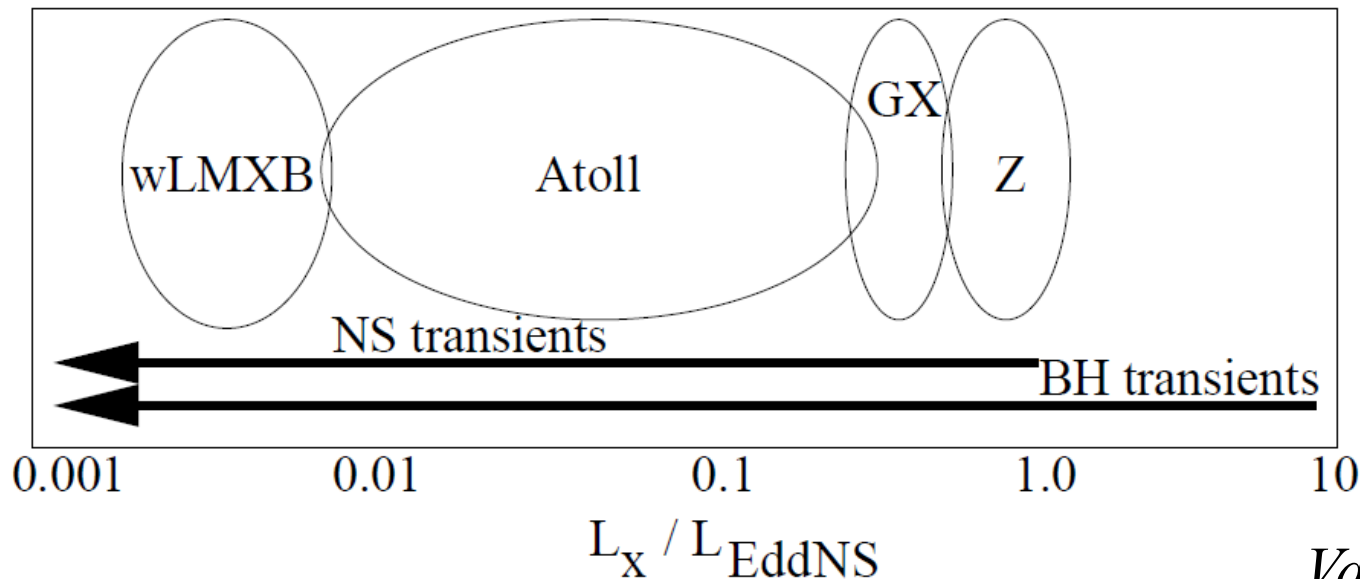
Séparation par la masse

BH toujours transitoires, NS peuvent être persistants

Pulsations \rightarrow pulsars \rightarrow NS

Champ magnétiques faibles ou forts ($> 10^{12}\text{G}$)

ULX dans M82: une NS! (Bachetti et al 2014)



Paramètre
Clef dM/dt

Interprétation du cycle des QPO

Les états C (ou HBO) ont la plus forte intensité

Leur fréquence de QPO varie avec M_{BH} , M_{NS}

→ Fréquences orbitales et épicycliques autour du trou noir ou étoile à neutrons

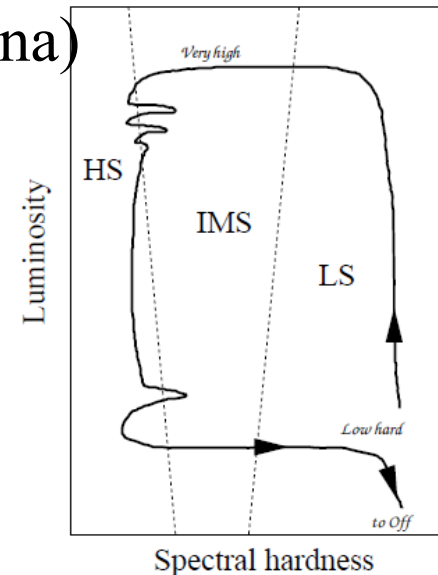
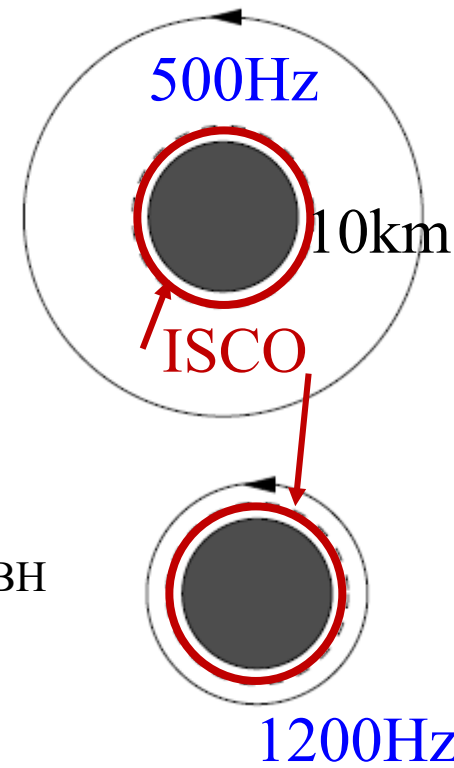
B & A : moins intenses, fréquence indépendante de M_{BH}

→ Autre phénomène physique?

Evolution en **cycle**: du « High-soft » (disque mince) au « Low-hard » (ADAF, accréation peu efficace, corona)

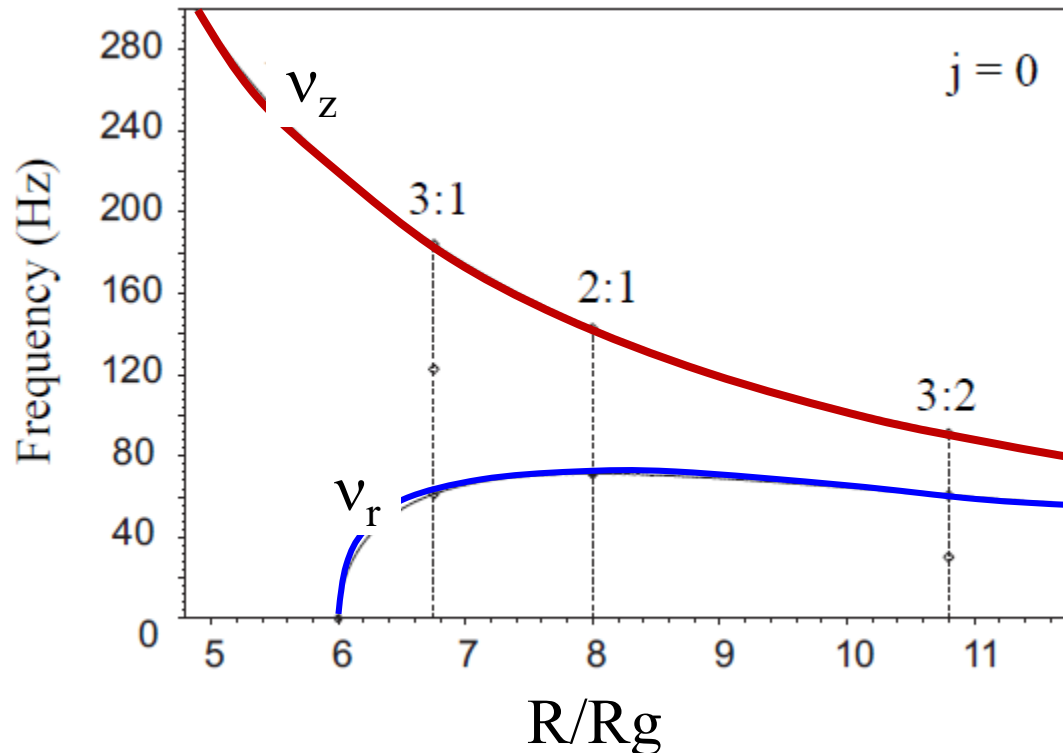
Les rayons X mous prennent de l'énergie aux électrons de la corona (Compton inverse)

Cycle avec hystéresis: chemins non symétriques



Orbites et épicycles relativistes

Classique $v_\phi = \Omega/2\pi = (GM/r^3)^{1/2}/2\pi = 1184\text{Hz} (r/15\text{km})^{-3/2} \quad M=1.4 M_\odot$
 $v \propto 1/M$ $= 184\text{Hz} (r/100\text{km})^{-3/2} \quad M=10 M_\odot$
 pour $r \sim r_{\text{ISCO}} = 6 r_g$



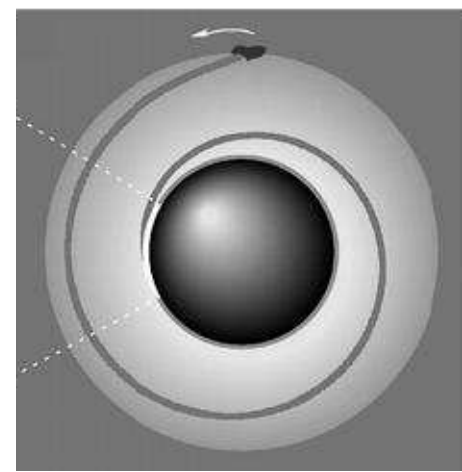
En Relativité générale, les fréquences épicycliques radiale, verticale, sont différentes de v_ϕ

Résonances 3:2

$$2v_z = 3v_r$$

→ QPO 2 pics 3:2

Orbites non closes



Précession au péri-astre de $\nu_{\text{péri}} = \nu_{\phi} - \nu_r$

Orbite tiltée en z, autour d'un trou noir en rotation

$$\nu_{\text{nodal}} = \nu_{\phi} - \nu_z$$

$\nu_{\text{péri}}$ et ν_{nodal} toujours positives, → **precessions progrades**

Pour un trou noir de Kerr $a = Jc/GM^2$, $0 < a < 1$

Fréquence orbitale $\nu_{\phi} = \nu_{\text{Kepler}} / (1 + a (r_g/r)^{3/2})$ $r_g = GM/c^2$

On peut définir une fréquence haute et basse,
corresp. ISCO de $a=1$ et -1 r_g , et $9 r_g$

Existence de **2 pics QPO** → **résonances et détermination de M**

Parfois la fréquence de QPO n'a rien à voir avec les fréquences orbitales

Précession de Lense-Thirring

$$\text{Précession } v_{LT} = v_{\text{nodal}} = v_{\phi} - v_z = a c / (\pi r_g r^3)$$

Précession différentielle avec r , le disque incliné va se gauchir
L'effet est de forcer le disque à tourner et s'aligner, avec le spin du trou noir (ou NS)

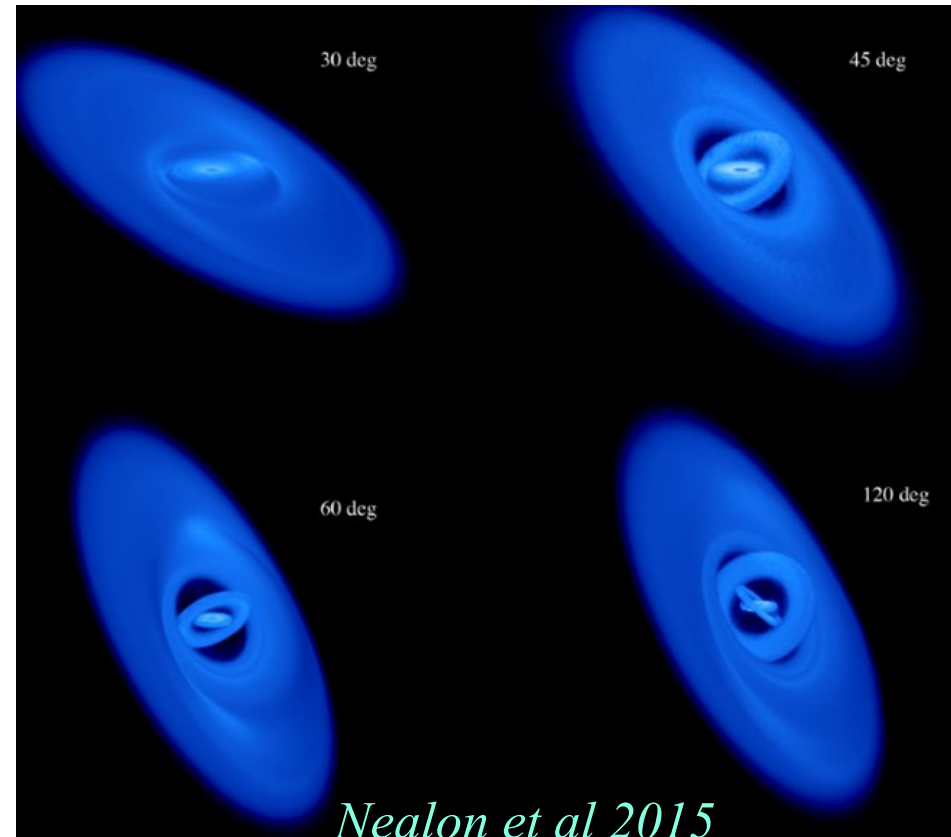
Forte viscosité

Diffusion $\alpha > H/R$

Ou ondes de torsion $\alpha < H/R$

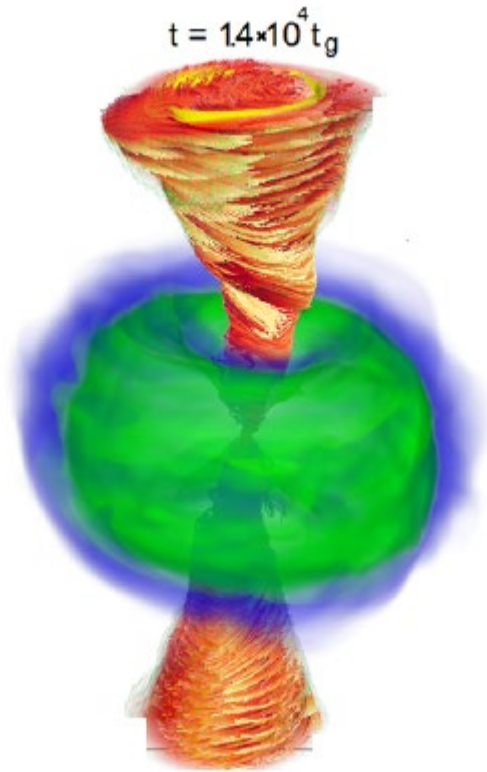
Papaloizou & Pringle 83

Effet Bardeen-Petterson (75)

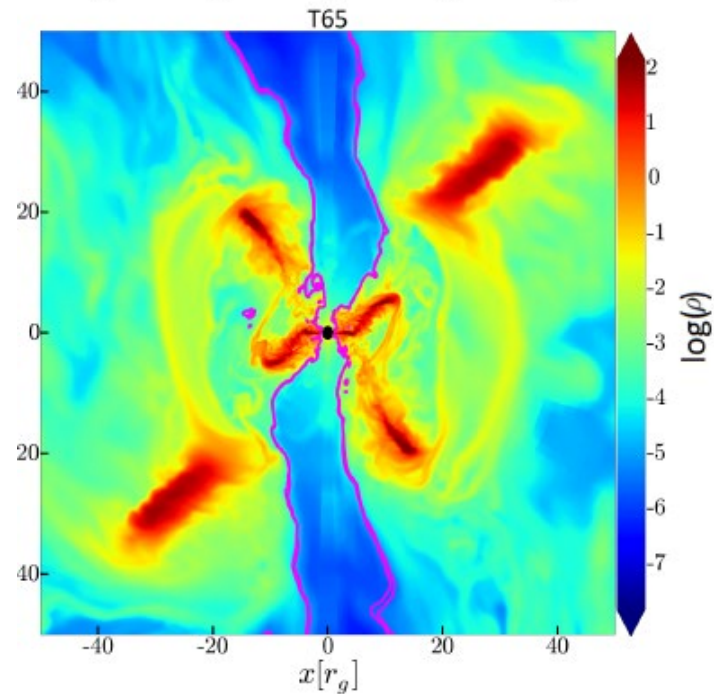
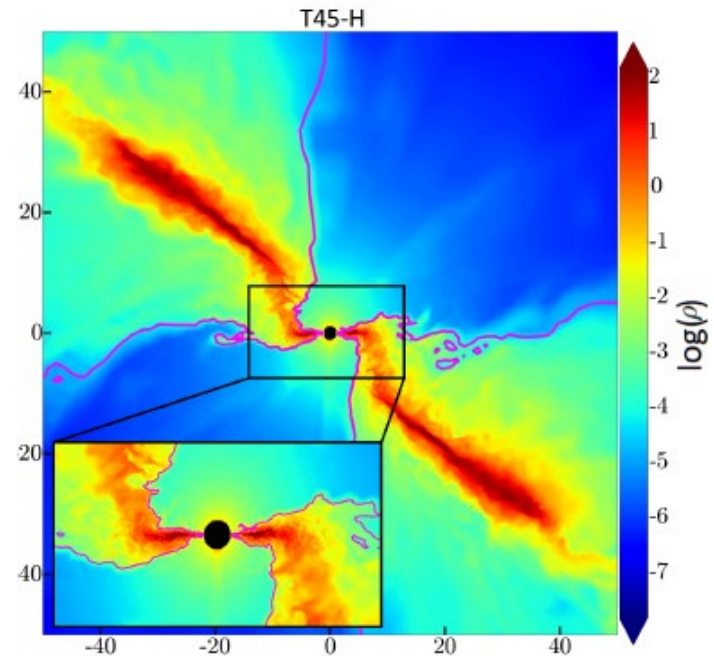


Simulation de la précession

Les fréquences observées de QPO
Pourraient être reliées à cette précession



Liska et al 2018, 2021



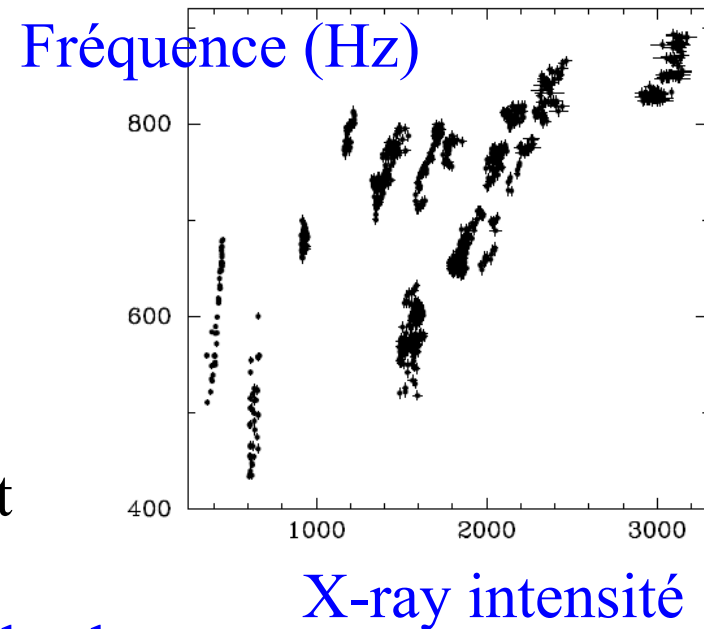
Précession privilégiée

Possible de trancher, avec 3 fréquences
Détermination de M_{BH} , du spin,
et rayon où le disque précesse et se gauchit

Fréquences orbitales relativistes pour les plus hautes,
précession Lense-Thirring pour les plus basses
QPO triplet dans le micro-quasar GRO J1655-40

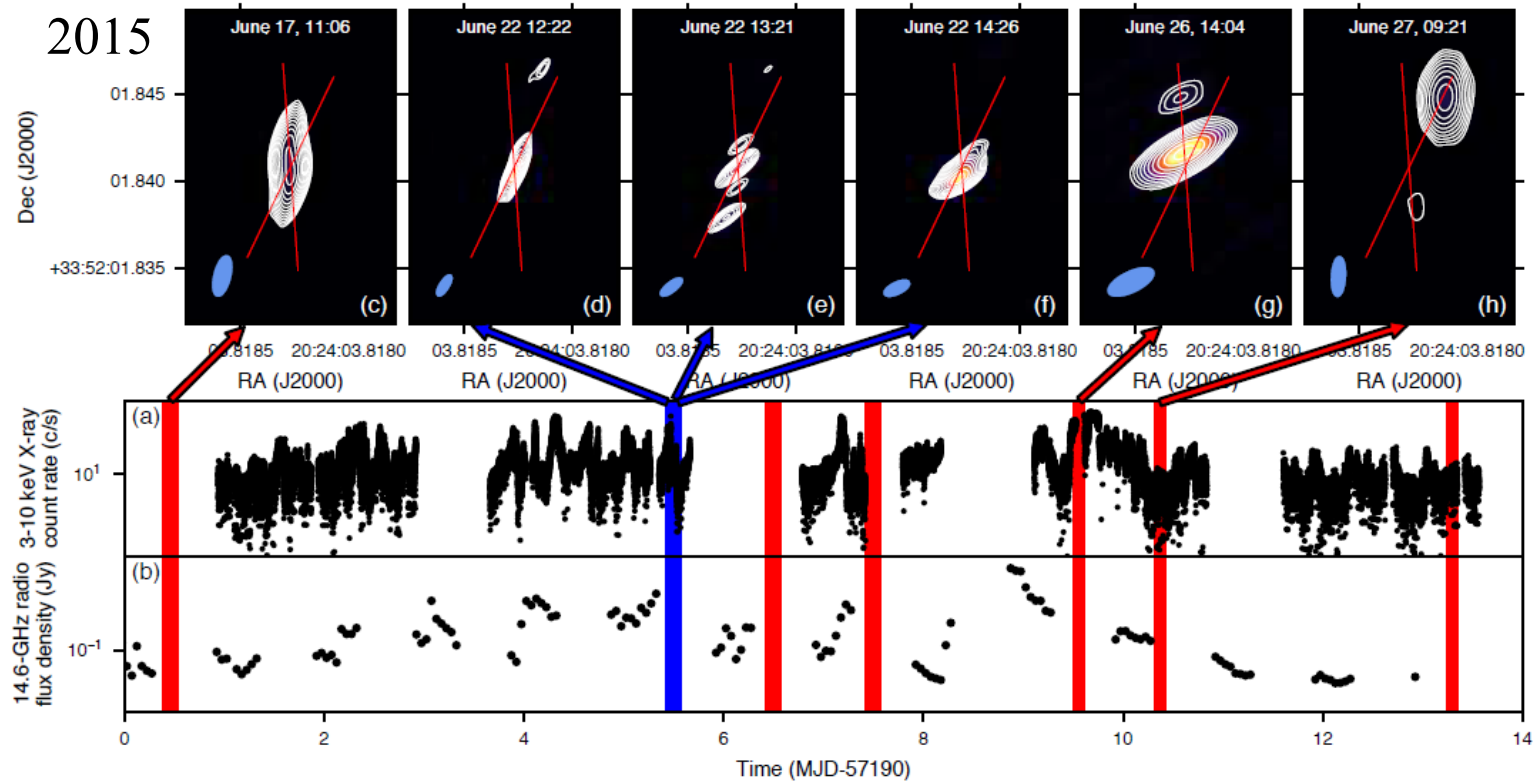
La fréquence croît, dans l'état haut-soft, et le disque
diminue de rayon (moins de corona)

Type-C seraient dûs à la précession du disque, et type-B à la
Précession du jet?, de la corona?



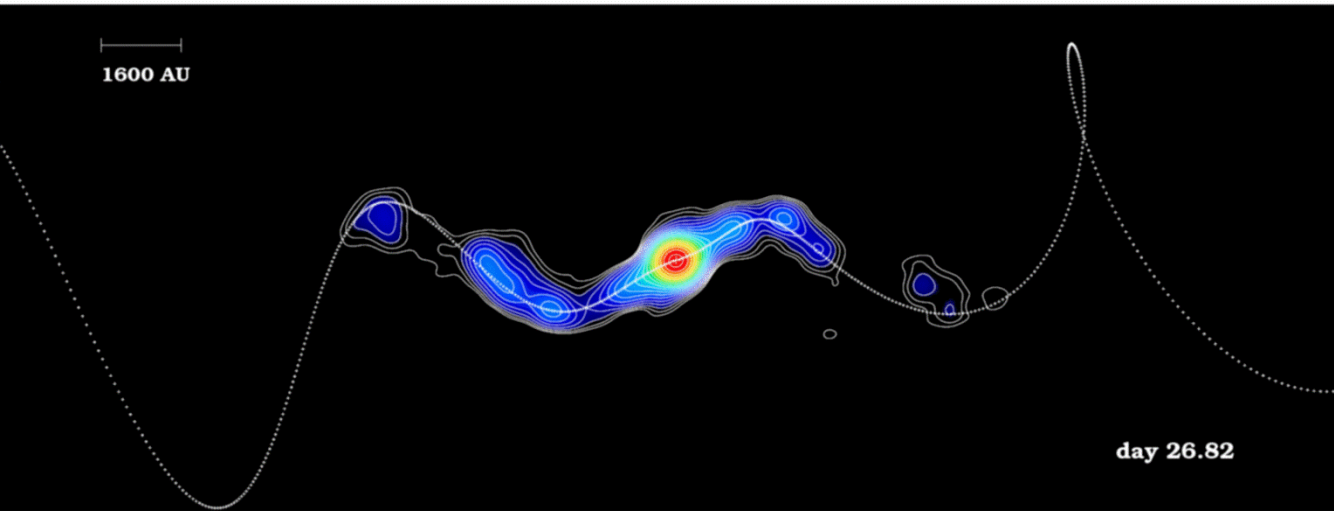
Jets radio variables en VLBI : V404 Cygni BH

Variable en qqes heures Représente la **précession Lense-Thirring** d'un disque à plusieurs fois l'accrétion d'Eddington -- $\beta = v/c = 0.35$
Ré-orientation du jet \rightarrow impact sur l'environnement ($9M_{\odot}$)
Précession en 1sec -2h, ouverture 18° (QPO 56sec)



Miller-Jones et al 2019: 5mas = 12 AU resolution

Précession du jet du micro-quasar SS433



SS433 VLBA 15GHz,
1mas= 3AU
Mioduszewski et al.
2006
Jet interne 5mas
7-10mas/jour

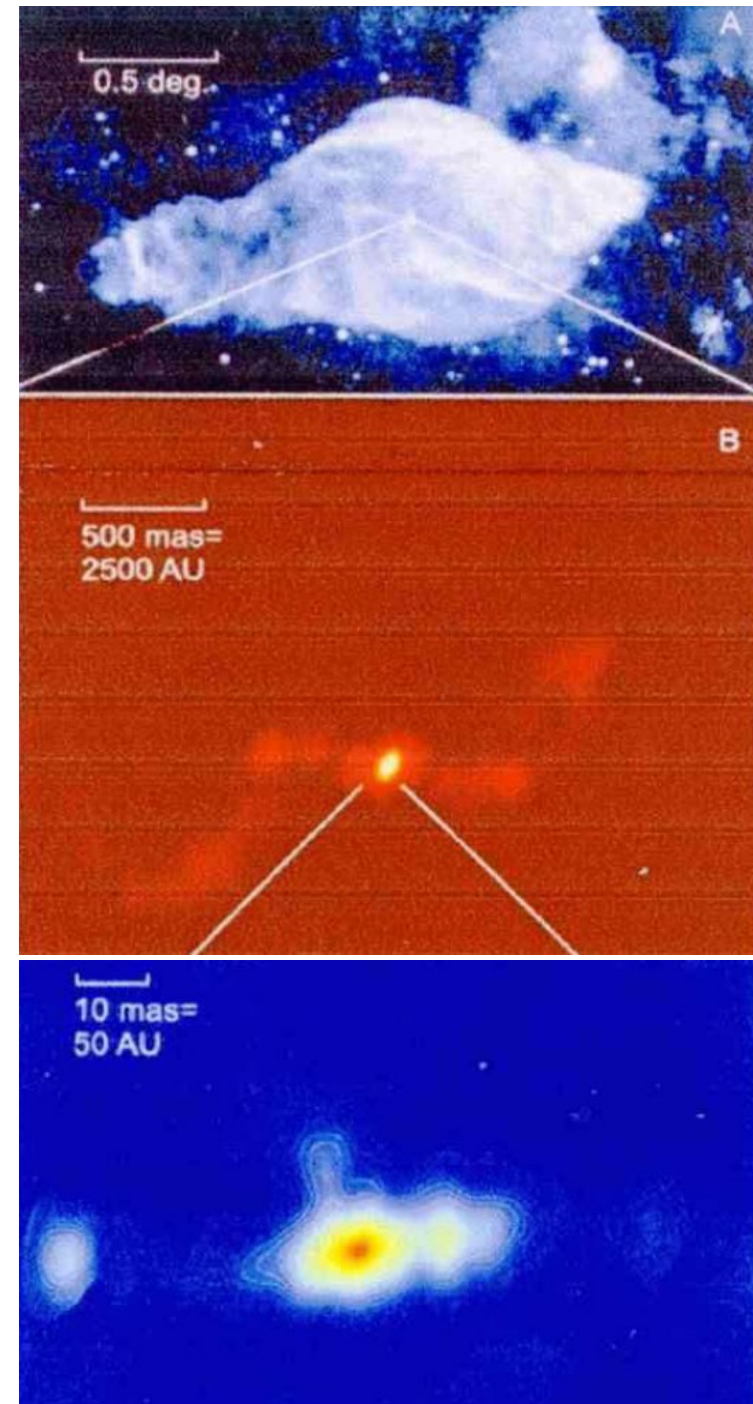
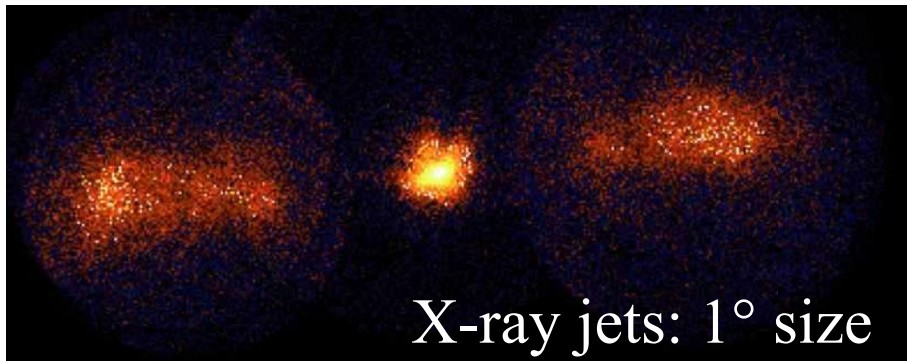
Accretion super-Eddington (10^3), disque et jet précessent $\beta=0.27$
Binaire (BH) à éclipse période 13jours

Accretion de $10^{-4} M_{\odot}$, avec des sursauts (Optique, X-ray, radio..)
Ouverture des jets 1.2°

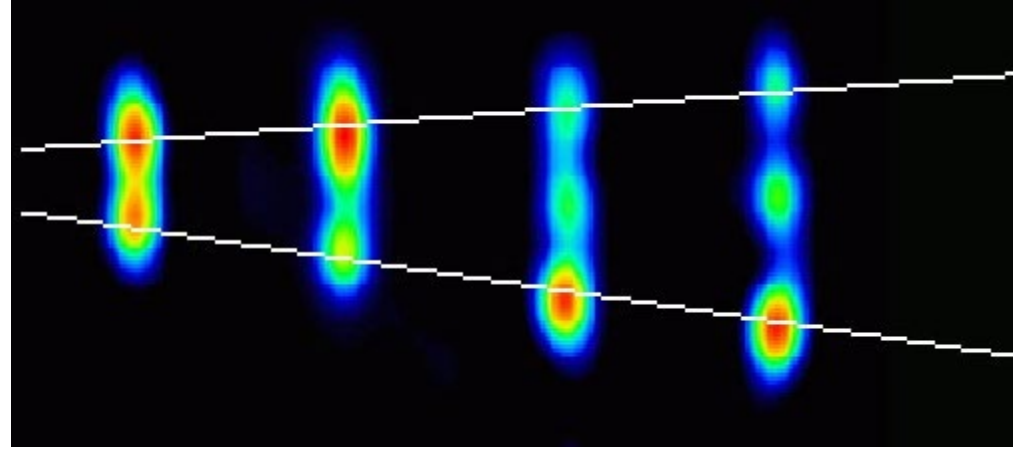
The SS433 micro-quasar

Reste de supernova
entourée par la nébuleuse W50:
Période de nutation 6 jours
= variation des jets (optique, radio)

Durant les sursauts très grande variabilité
Due à l'interaction jet-disque



Micro-quasar GRS 1915 Vitesse superluminique



← Echelle: un mois →

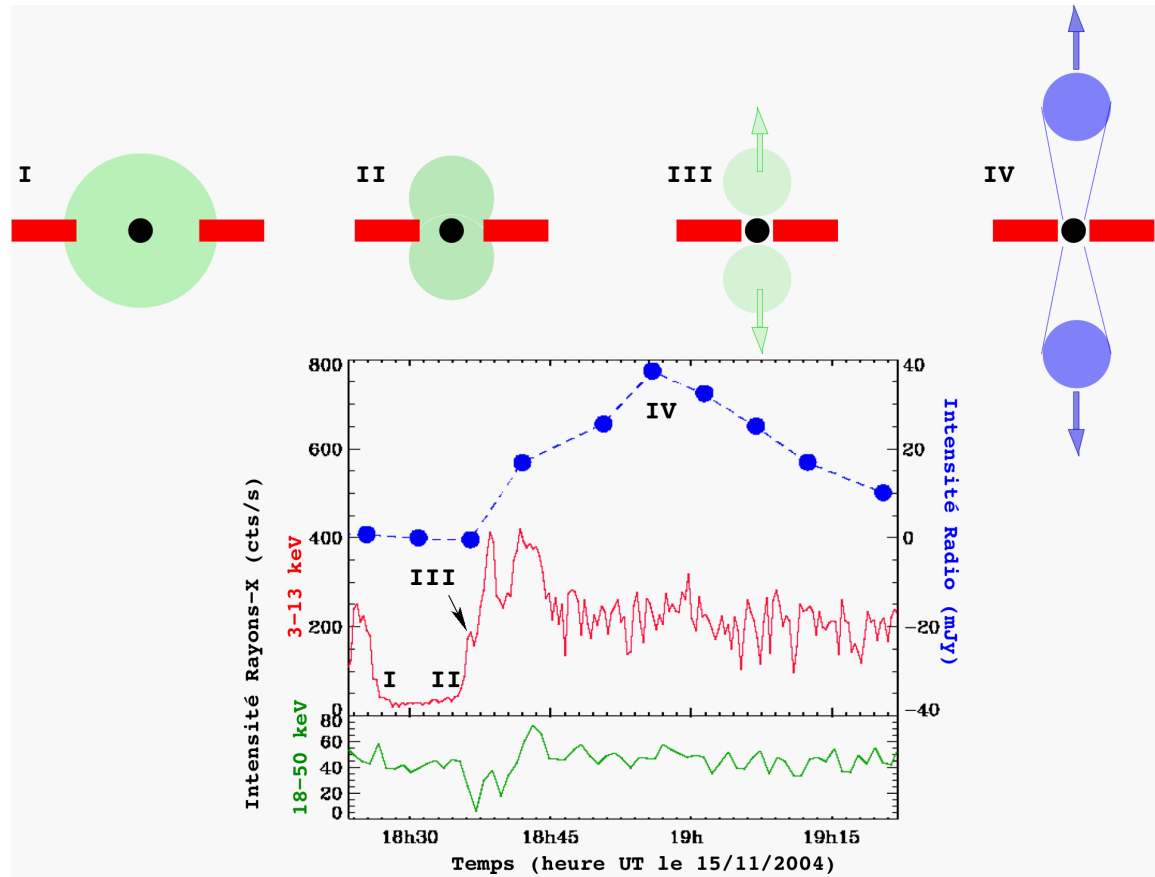
Rayons-X: rouge

Rayons gamma: vert

Radio : bleu

Cycles d'éjection
d'une heure environ

Une dizaine par jour

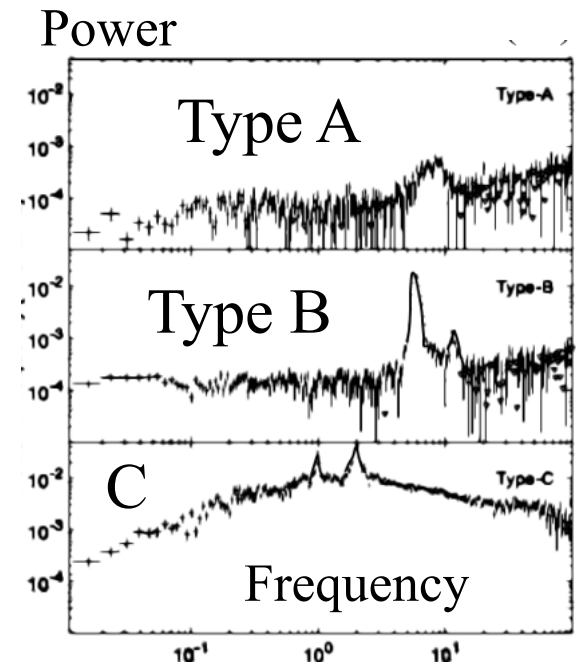


Classes des QPO

Type-B durent qq secondes, associées à des éjections, quand le type C devient « soft »

Type A sont très rares, larges en $\Delta\nu/\nu$

Les QPO à très haute fréquence sont rares, et surviennent dans les sources à haut flux



Sources NS: plus complexes, interaction avec champ B de surface

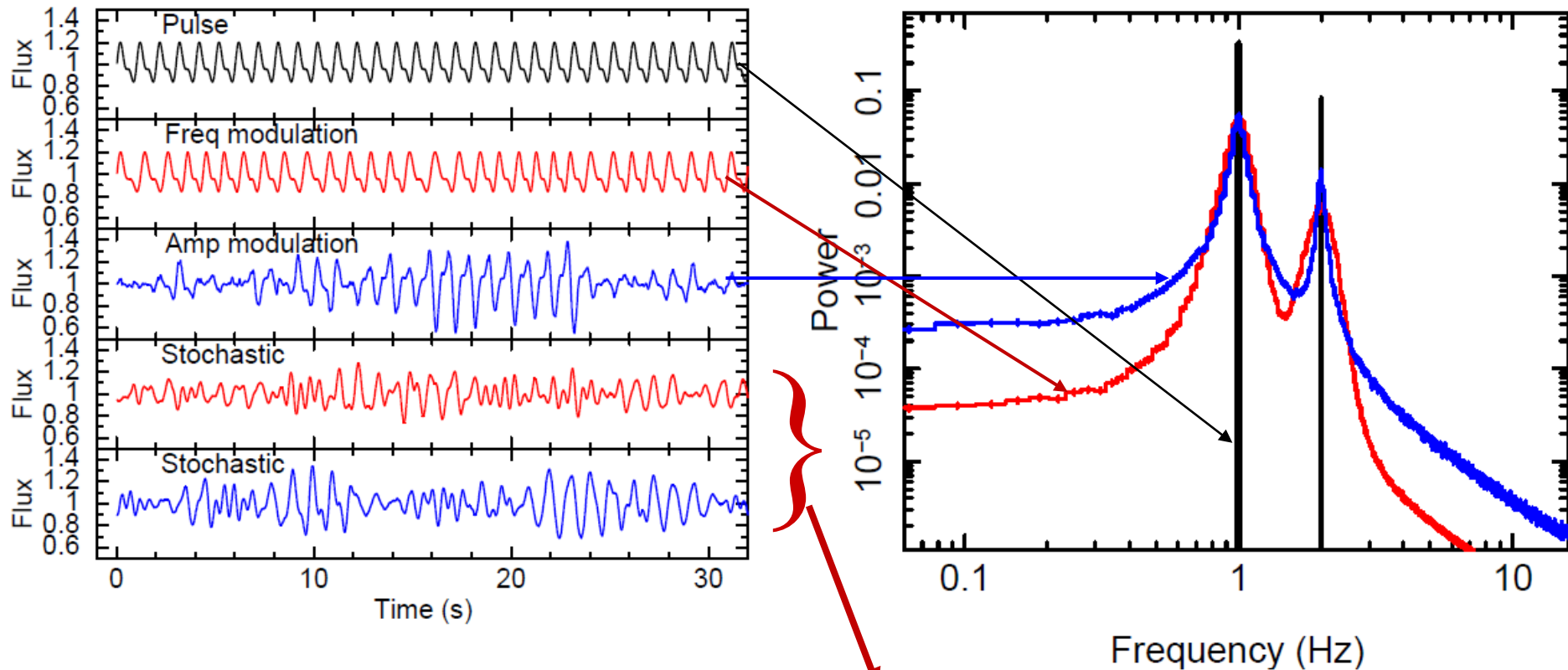
Sources Z: super Eddington, passage rapide soft-hard

Sources Atoll: grande hystéresis

AGN: fréquence varie comme $1/M_{\text{BH}}$, QPO attendus avec périodes de mois/années. Très hautes fréquences, quelques heures

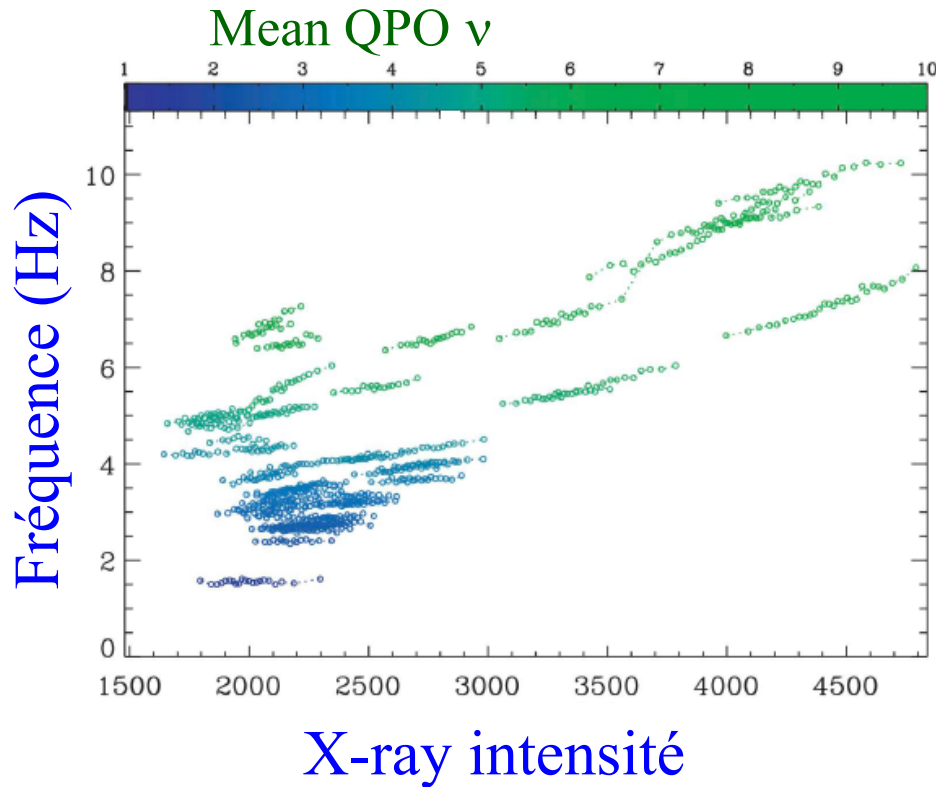
Pourquoi quasi-périodiques?

Influence de modulations de fréquence et d'amplitude
Dégénérescence car la phase n'est pas conservée



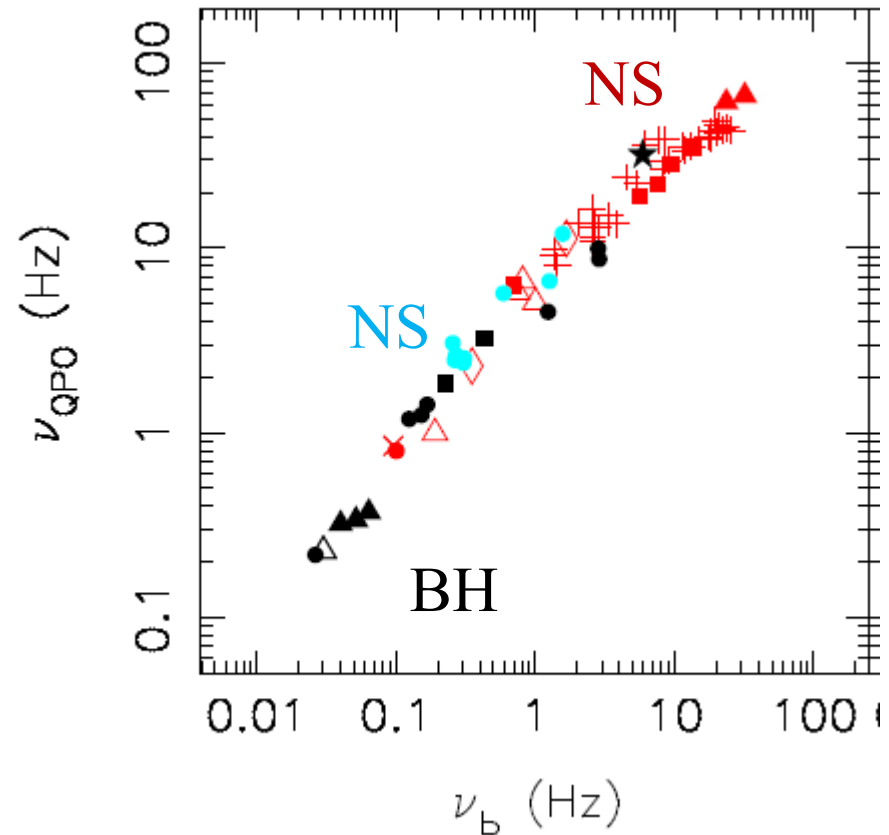
Les 2 signaux « stochastiques » ont la même signature
avec spectre de bruit

Relations d'échelle



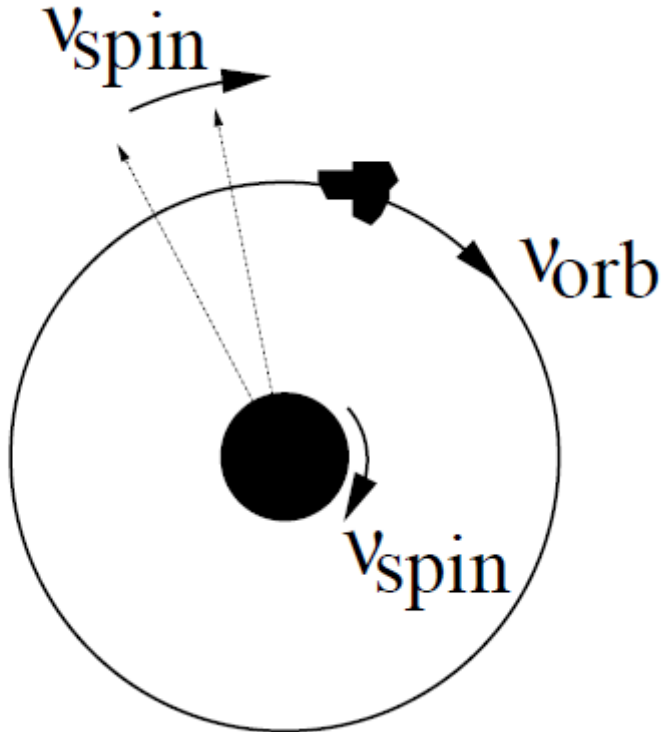
Plus haute fréquence, à fort flux
Phase d'accrétion rapide?

Type C QPO, les plus fréquentes
Intermédiaire-hard



Fréquence basse de coupure

Résonances avec le spin



Soit à la surface de l'étoile à neutrons
Soit dans le flot d'accrétion du BH

Clump qui résonne avec v_{spin} ou $v_{spin}/2$

Introduit battement dans les QPO v_{beat}

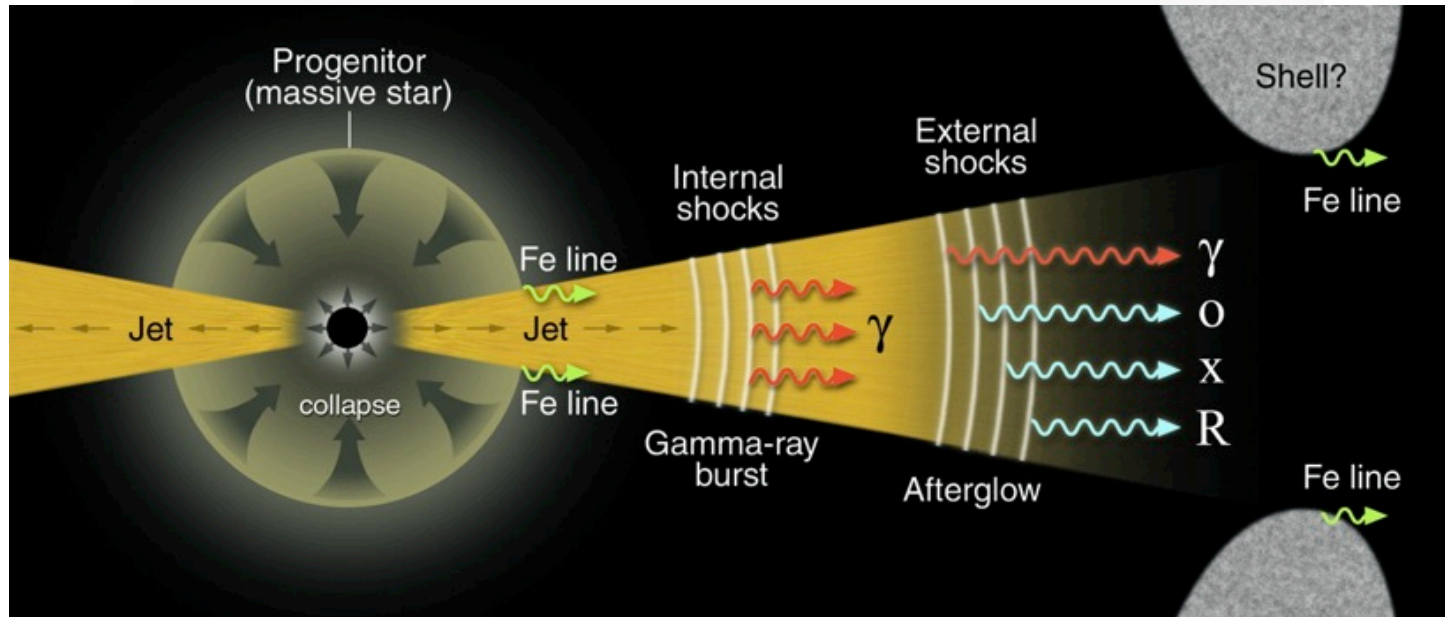
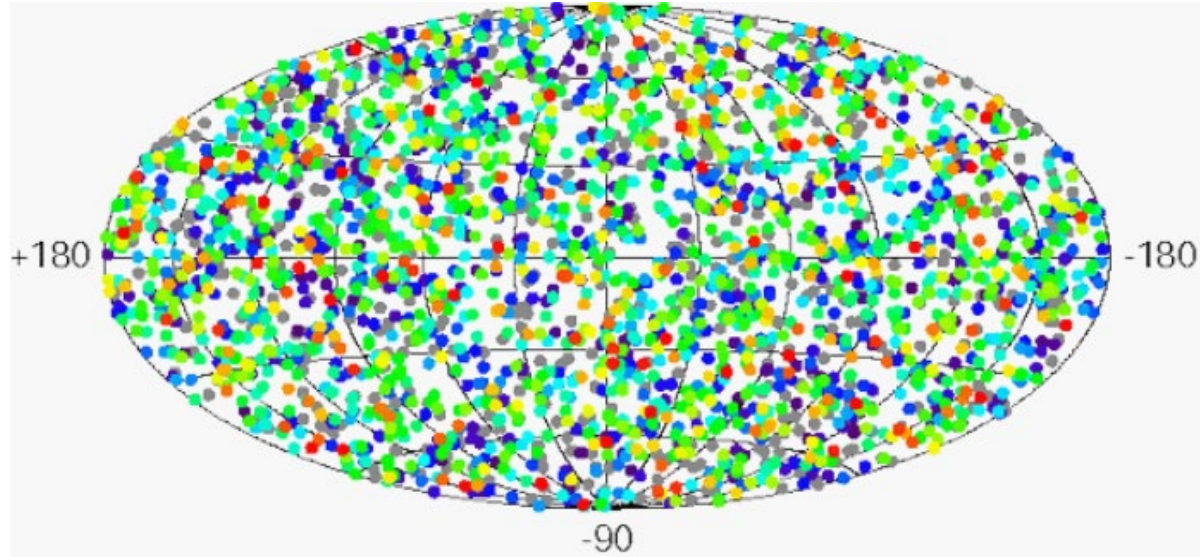
$$v_{beat} = v_{\phi} - v_{spin}$$

Se complique lorsque le clump
spirale vers le centre

Quasi-périodicité due à la durée de vie courte des clumps

Sursauts Gamma (GRB)

Découverts en 1973, mystère jusqu'à BATSE (1992-96) sur GRO



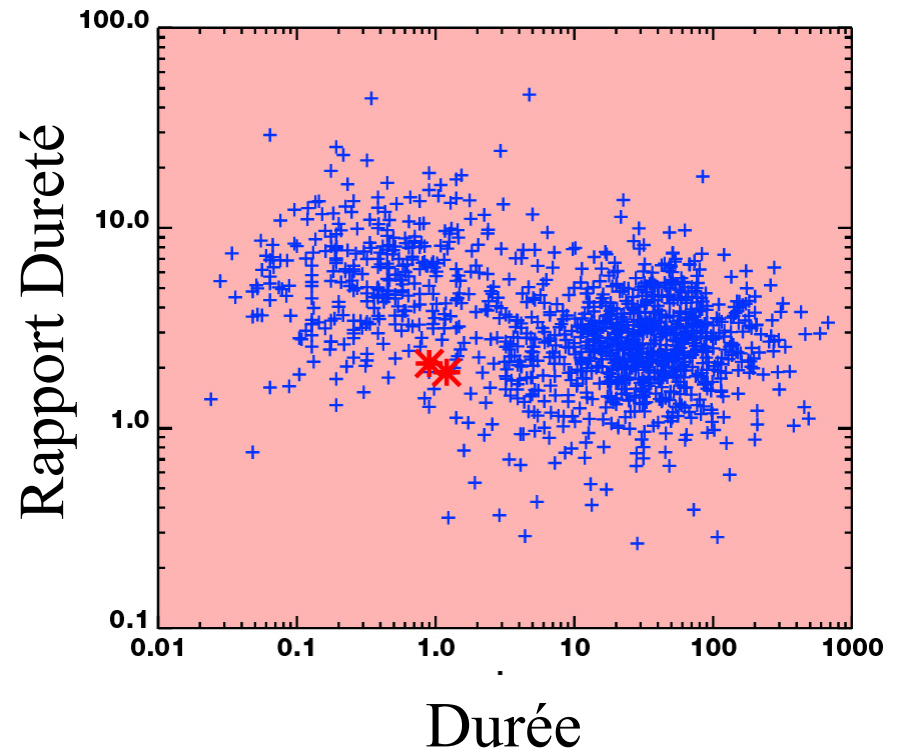
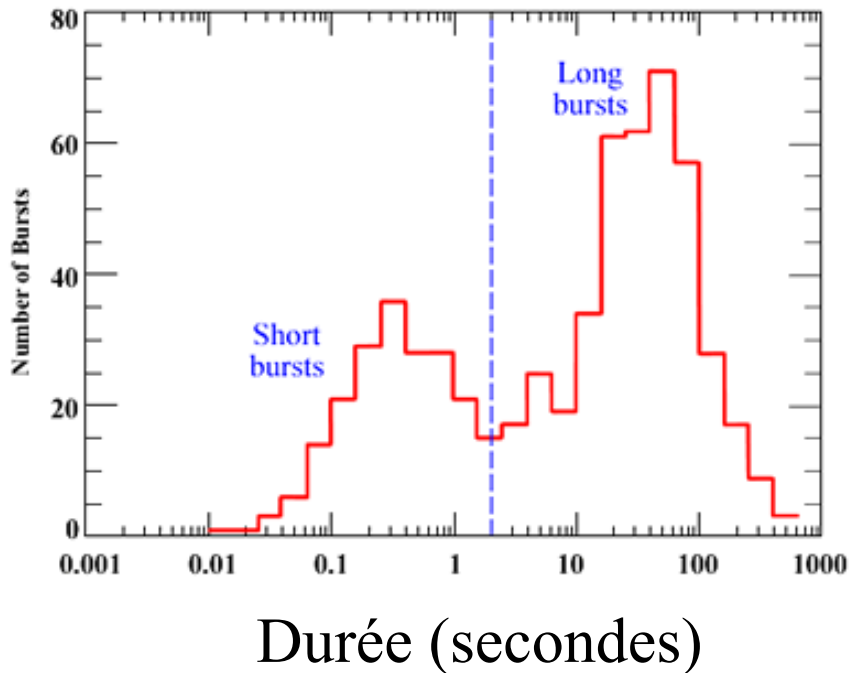
Deux types de sursauts

Les **courts** (durée inférieure à 2sec), spectre plus dur

Les **longs** (2s jusqu'à 15min), spectre plus mou, plus nombreux

10^{50} - 10^{54} erg en une courte période, 10^{51} erg SN (1 mois)

Soleil 10^{33} erg/s, $3 \cdot 10^{40}$ erg en 1 an



Propriétés des GRB

Durée de milli sec à minutes

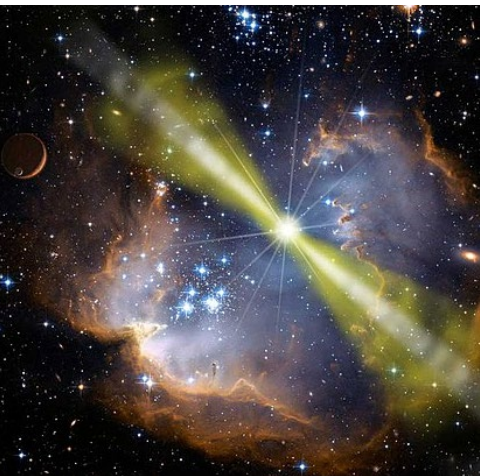
Plus de 100x énergie de supernovae

Il reste une émission « Afterglow » pendant plusieurs jours et à d'autres fréquences (optique, radio..)

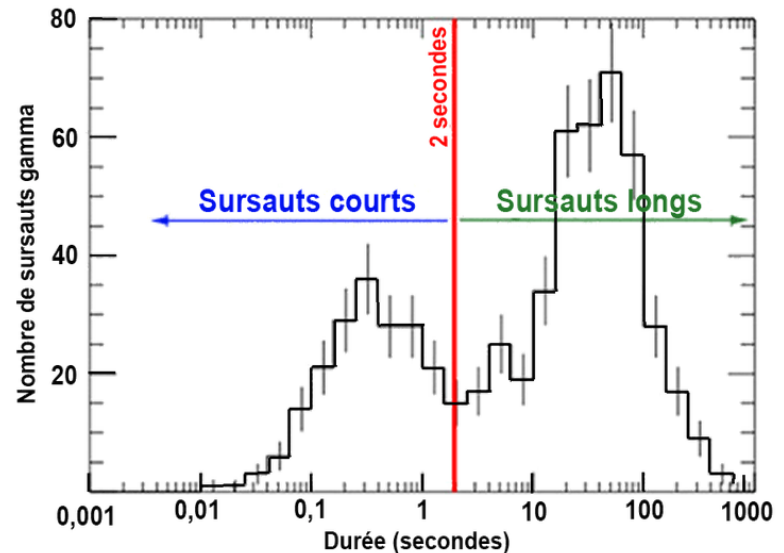
Sursauts longs, liés à la mort d'étoiles massives

→ Etoiles à neutrons, trou noirs

Sursauts courts: binaires dont la fusion donne un trou noir



GRB z=8.2
plus loin que le QSO
z=7.5



Sursauts et absorption sur la ligne de visée

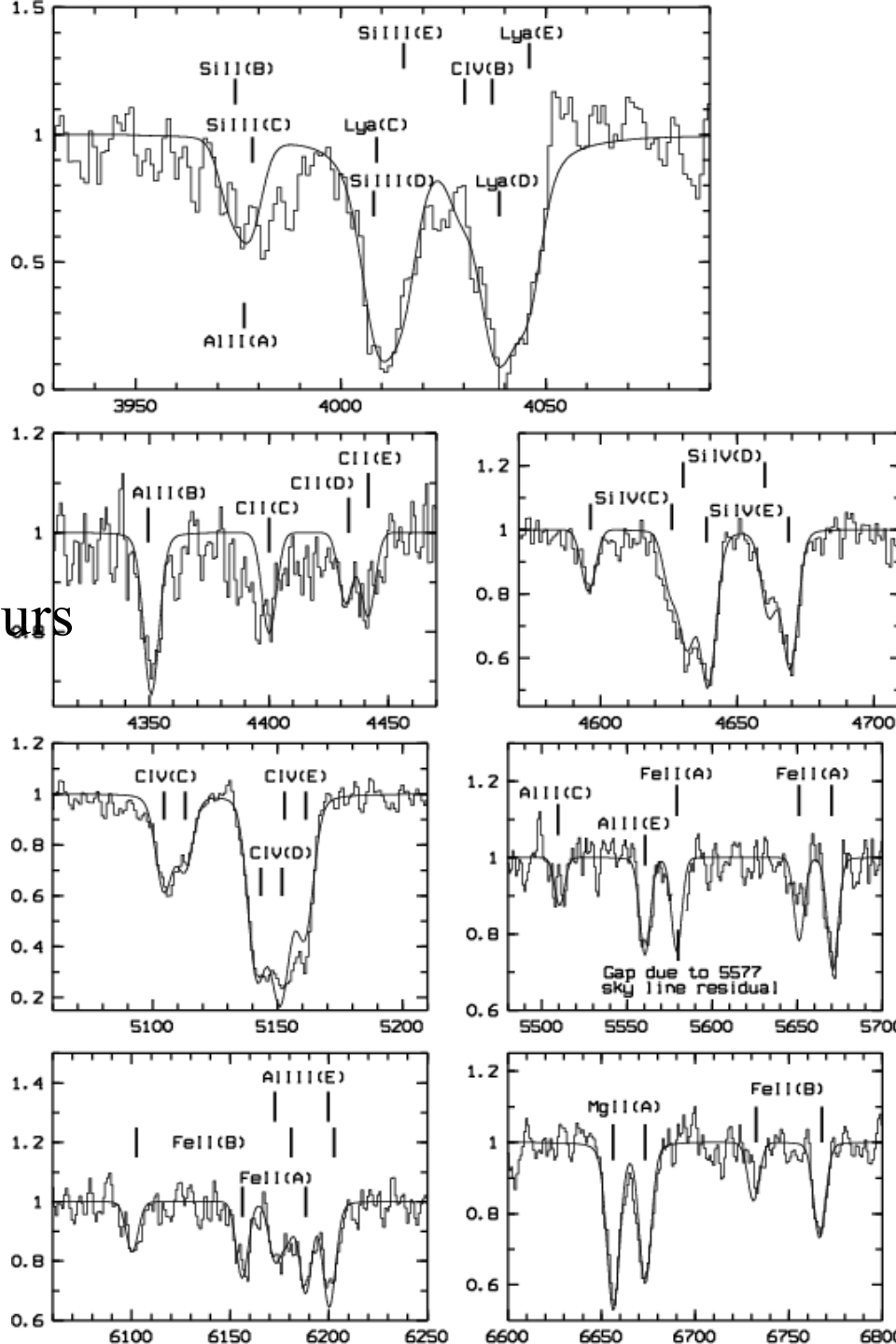
Les GRB sont des émissions brèves mais très intenses

Il reste une émission pendant qq jours

Ici 5 systèmes abs détectés à $z=$
1.3806, 1.6039, 2.2983, 2.3230,
 $z(\text{GRB})= 2.3292$

Un est un DLA (galaxie LBG)

Intégration d'1h, 10h après le sursaut, *Moller et al 2002*



Sursauts Radio (FRB)

Découverts en 2007, mystère encore aujourd'hui
Très courts, de l'ordre de la milliseconde

Objets compacts: étoile à neutrons, trou noir
Certainement extra-galactique

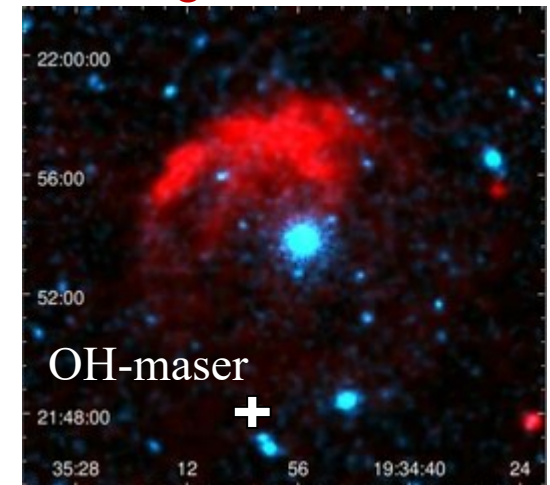
Aujourd'hui > 600 FRB connus, 25 répéteurs
15 galaxies hôtes

Traceurs du milieu intra-galaxies

Détection d'un FRB dans la magnétar
Galactique SGR 1935+2154, D=9kpc
SNR, + GRB Swift-BAT CHIME 2020

Bleu X-ray

Rouge= VLA-1.4GHz



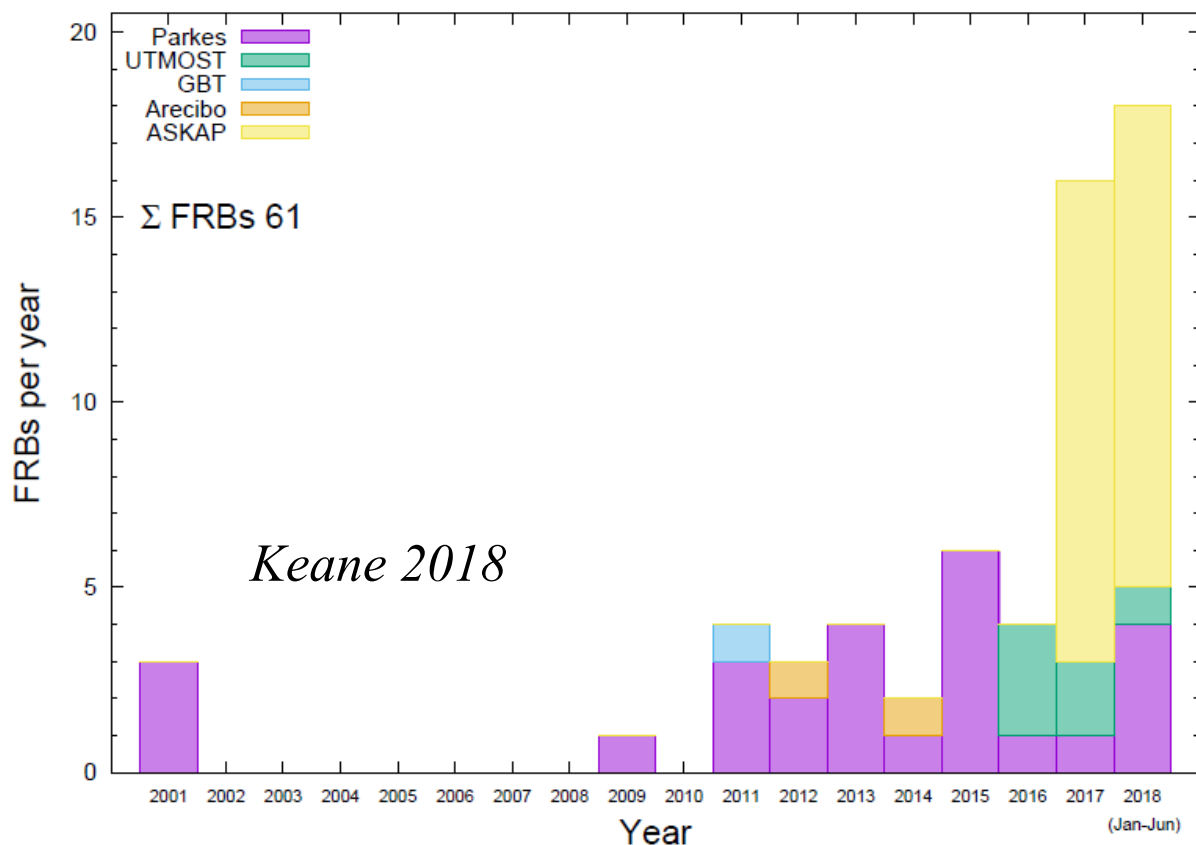
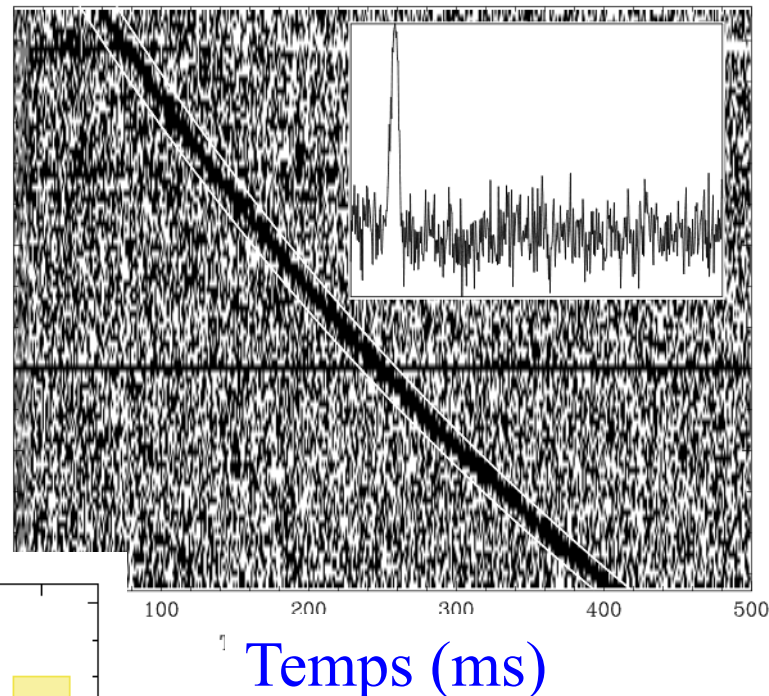
FRB: Fast Radio Bursts

Avec SKA-MID, 100 FRB/yr
avec localisation précise

Détections par ASKAP, CHIME

→ 540 détectées (~800/day/sky)

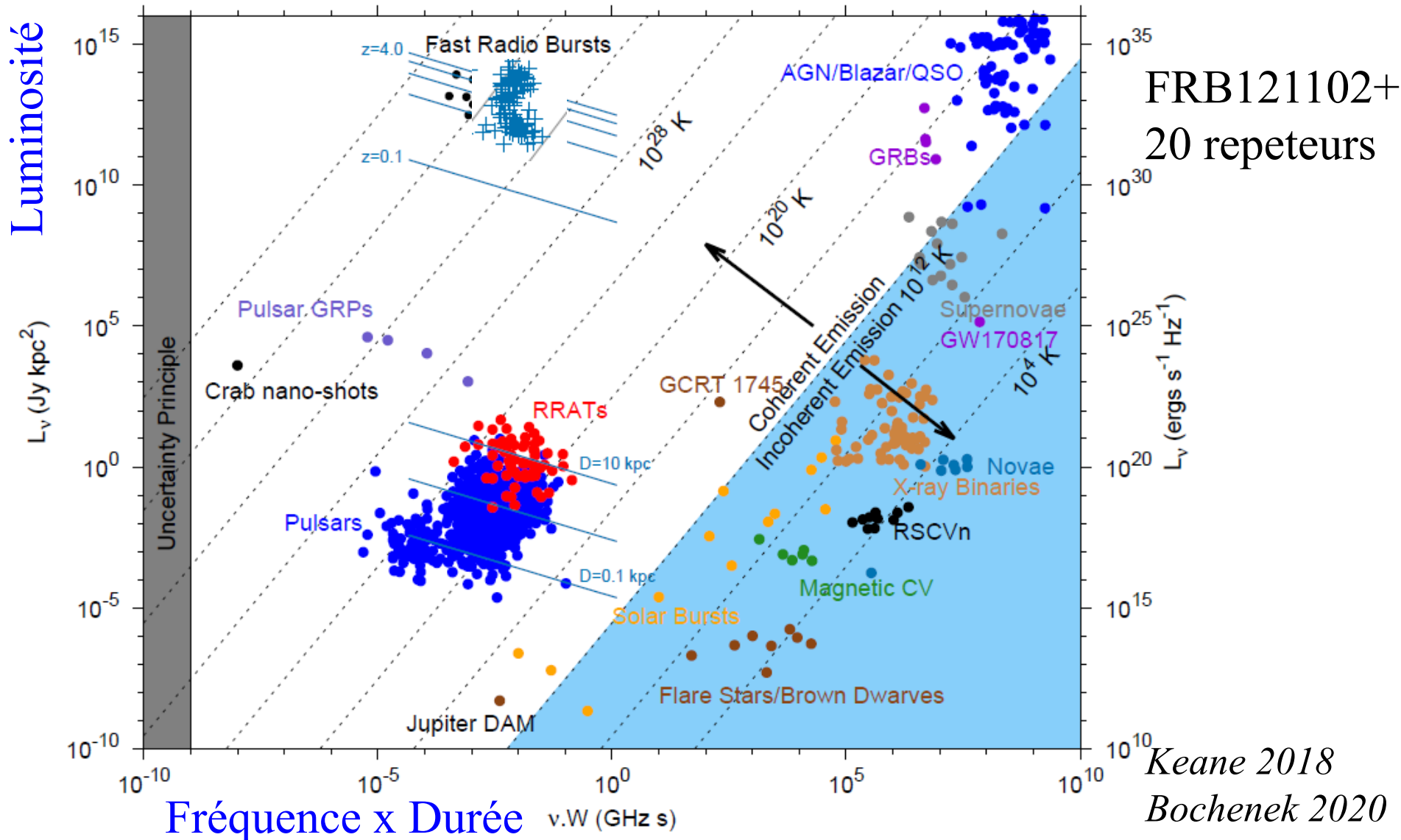
Fréquence (GHz)



Lorimer et al 2007
Grande DM → distants
Objets puissants
dans les galaxies
10 μ s variabilité
→ Objets compacts
Champ B fort
→ magnétars

FRB dans le diagramme transients, $L-\nu\Delta t$

Seront utilisés pour tracer la nature de Univers \rightarrow tomographie



Telescopes et domaine temporel



Zwicky Transient Facility: ZTF, Palomar, Californie, Schmidt 1.22m

Depuis 2018: 16 CCDs de 6144×6160 pixels, 47°

Tout le ciel en trois nuits, balaie la Voie lactée deux fois par nuit

Asteroides, comètes (2I/Borisov), SNe, etc

Vera Rubin Telescope (LSST)

8m, Cerro-Tololo, Chile

Tout le ciel en trois nuits

Après 10 ans, magnitude 27

1^{ere} lumière 2022



Résumé et suite des cours



Les phénomènes variables sont très divers et utiles:

**Etoiles (Céphéides, RR-Lyrae), SNIa, échos de lumière
Pulsars, trous noirs et fusions (ondes gravitationnelles)**

→ Micro-quasars, binaires X

→ AGN, blazars

→ Changements de look

→ Destruction d'étoiles

→ Sursauts Gamma (GRB)

→ Sursauts radio (FRB)

