

Etoiles binaires X

une banale histoire de couples... stellaires!

Drame en 6 actes

Sylvain Chaty

Université Paris Cité

sylvain.chaty@u-paris.fr

Cours Collège de France
29 janvier 2024



AAS | IOP Astronomy

Accreting Binaries

Nature, formation, and evolution

Sylvain Chaty

An American Astronomical Society and IOP Publishing partnership



IOP | ebooks



Acte I

De la naissance à l'âge adulte

L'enfance



Un jeune amas (IR-Spitzer & X-Chandra)

L'enfance

Bok Globules

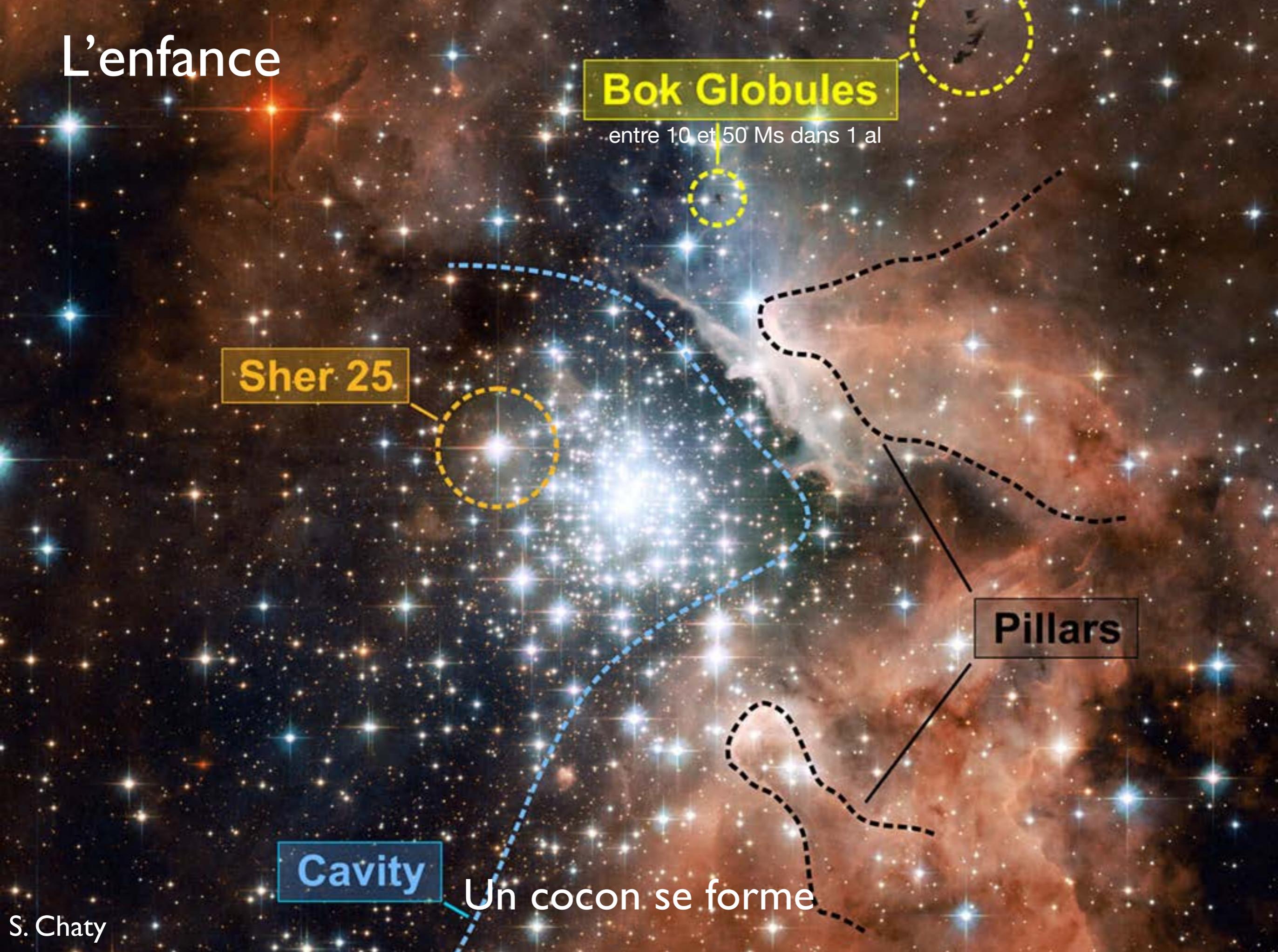
entre 10 et 50 Ms dans 1 al

Sher 25

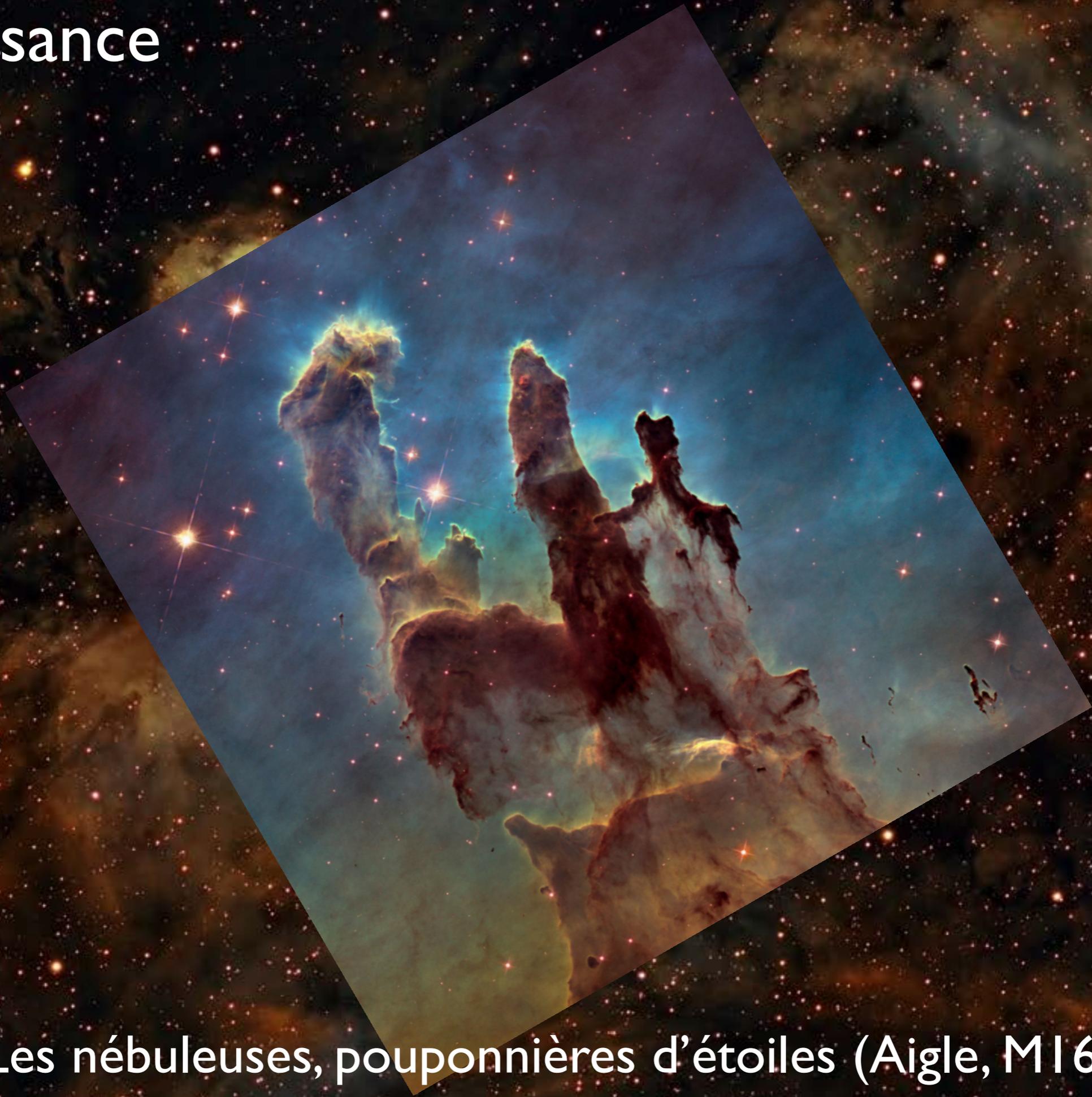
Pillars

Cavity

Un cocon se forme



La naissance



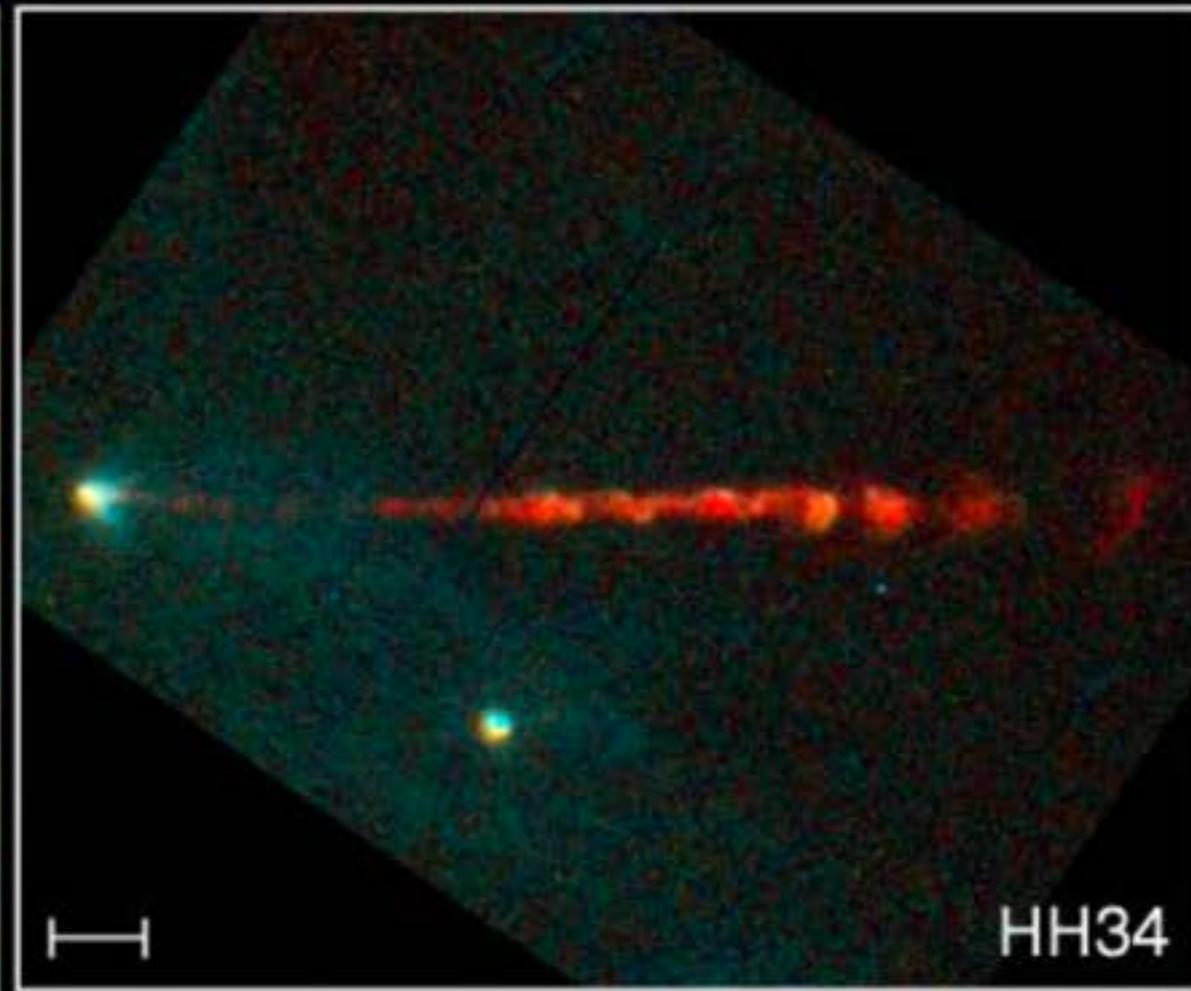
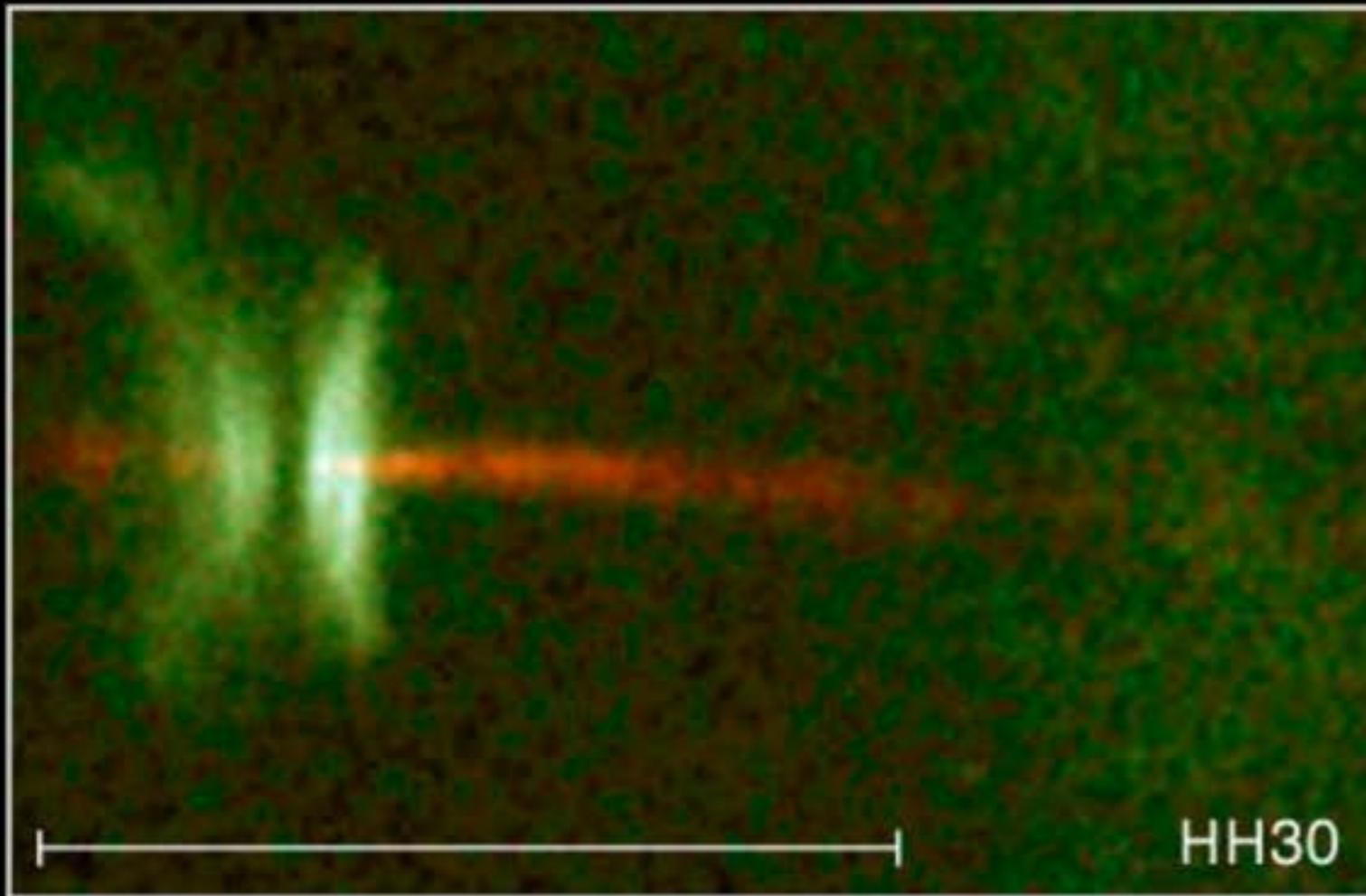
Les nébuleuses, pouponnières d'étoiles (Aigle, M16)

La naissance

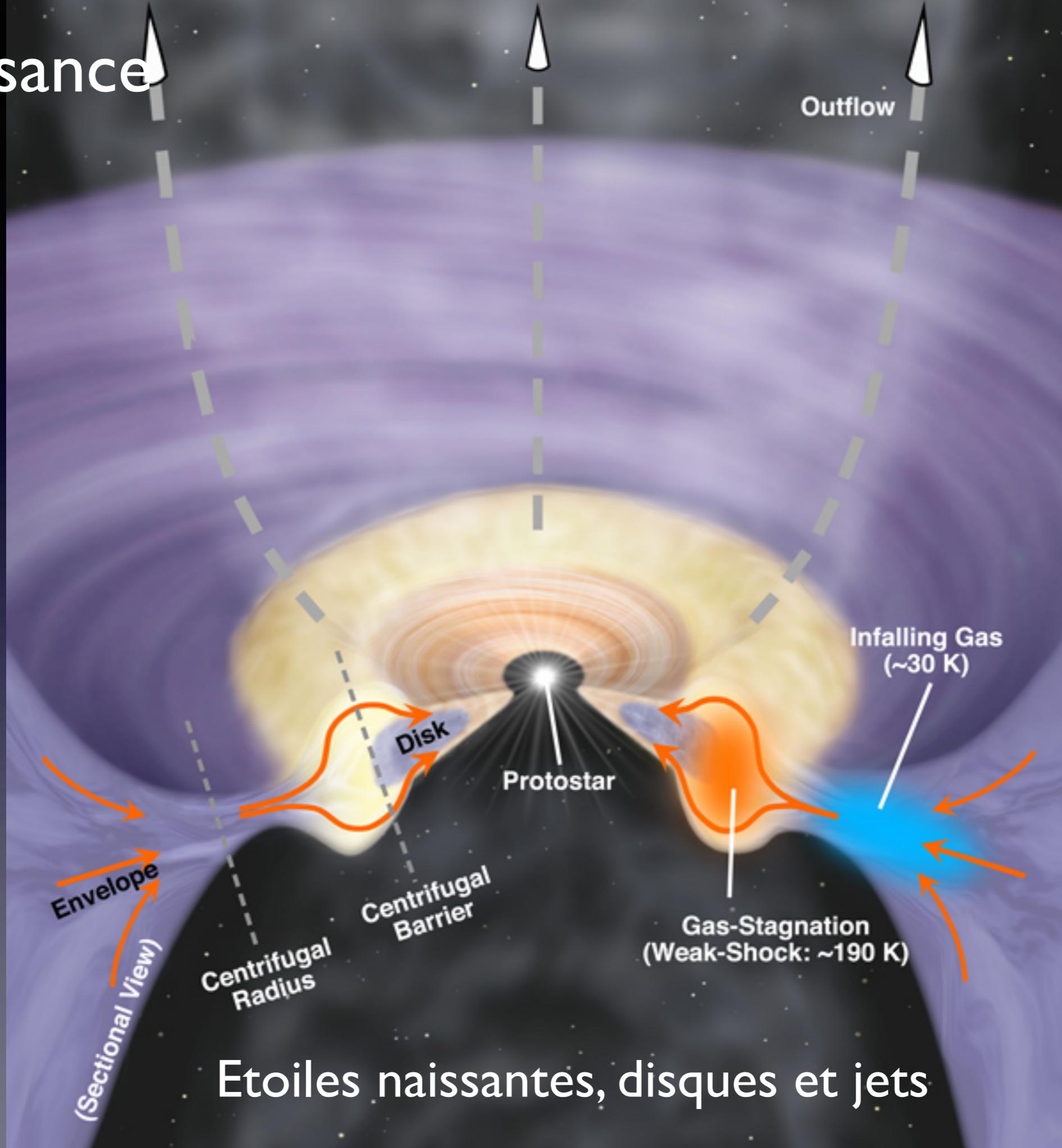


1^{er} cri d'une étoile naissante

La naissance

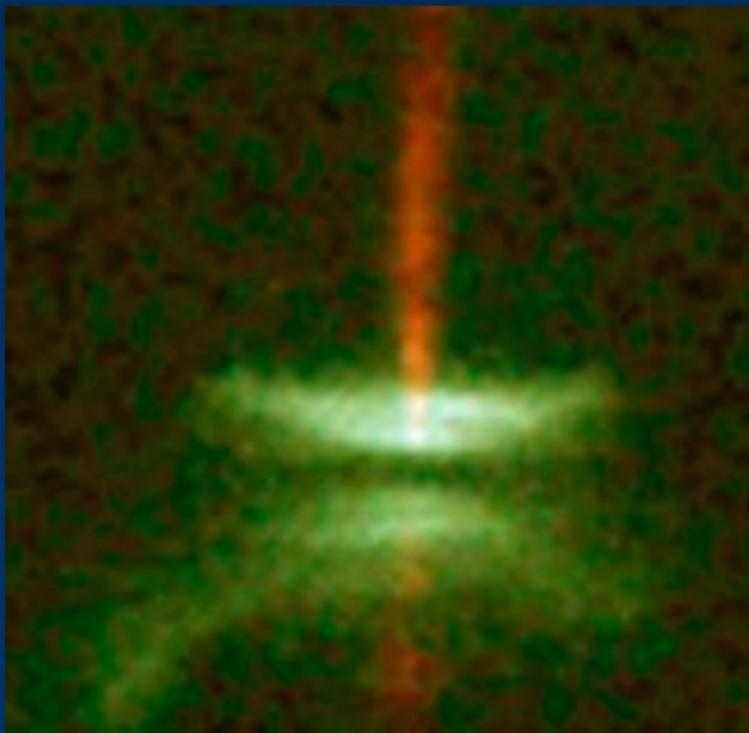
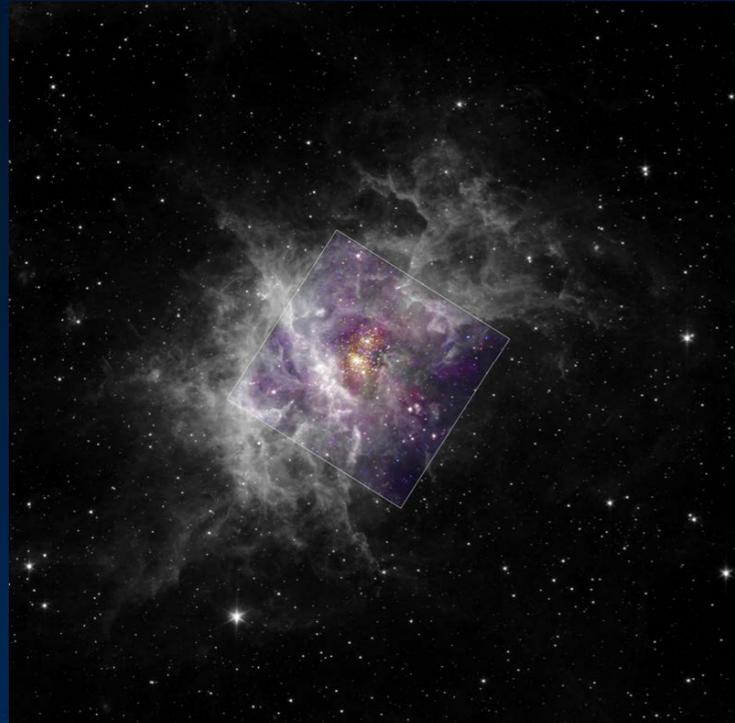


La naissance

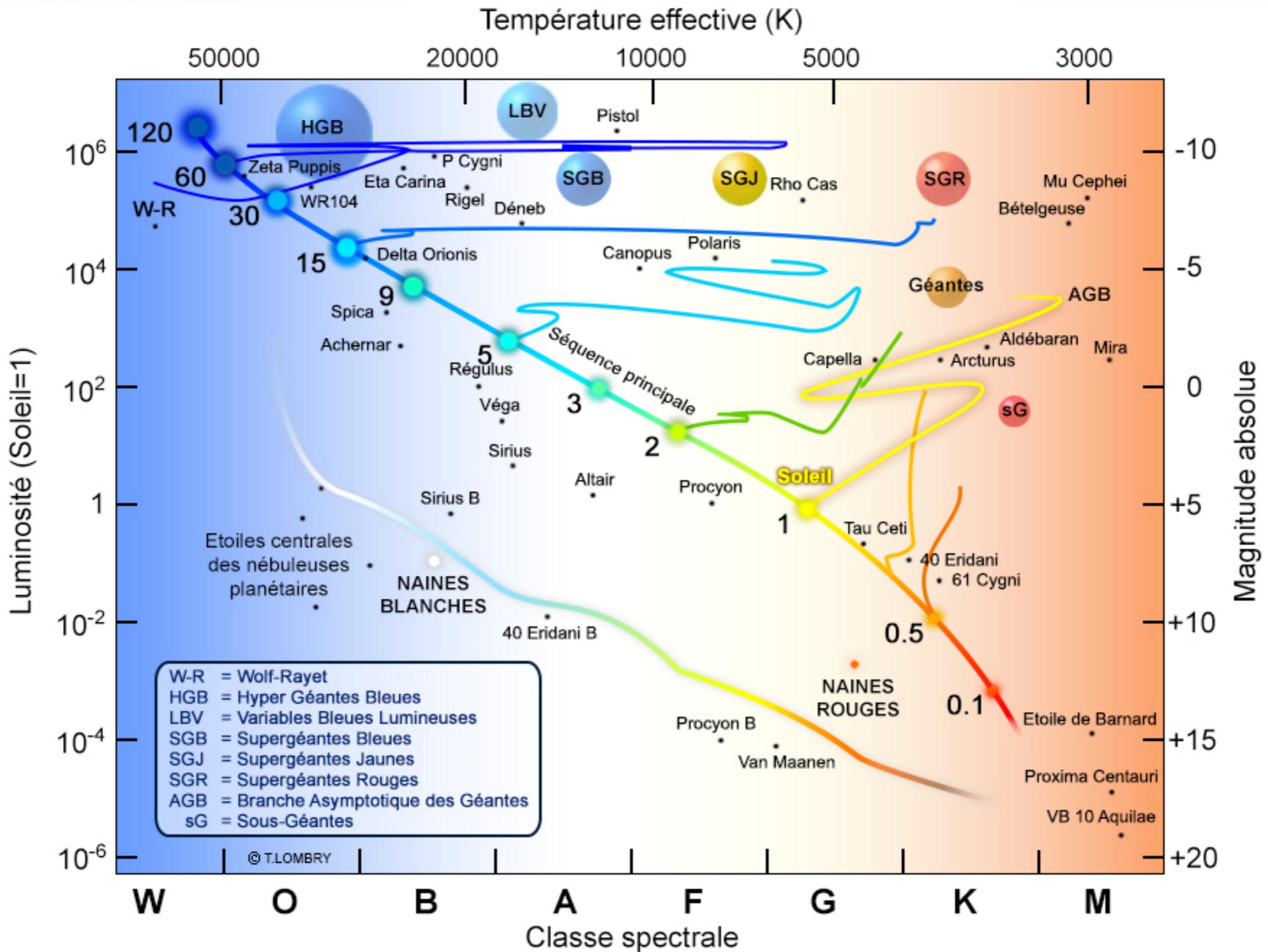


Etoiles naissantes, disques et jets

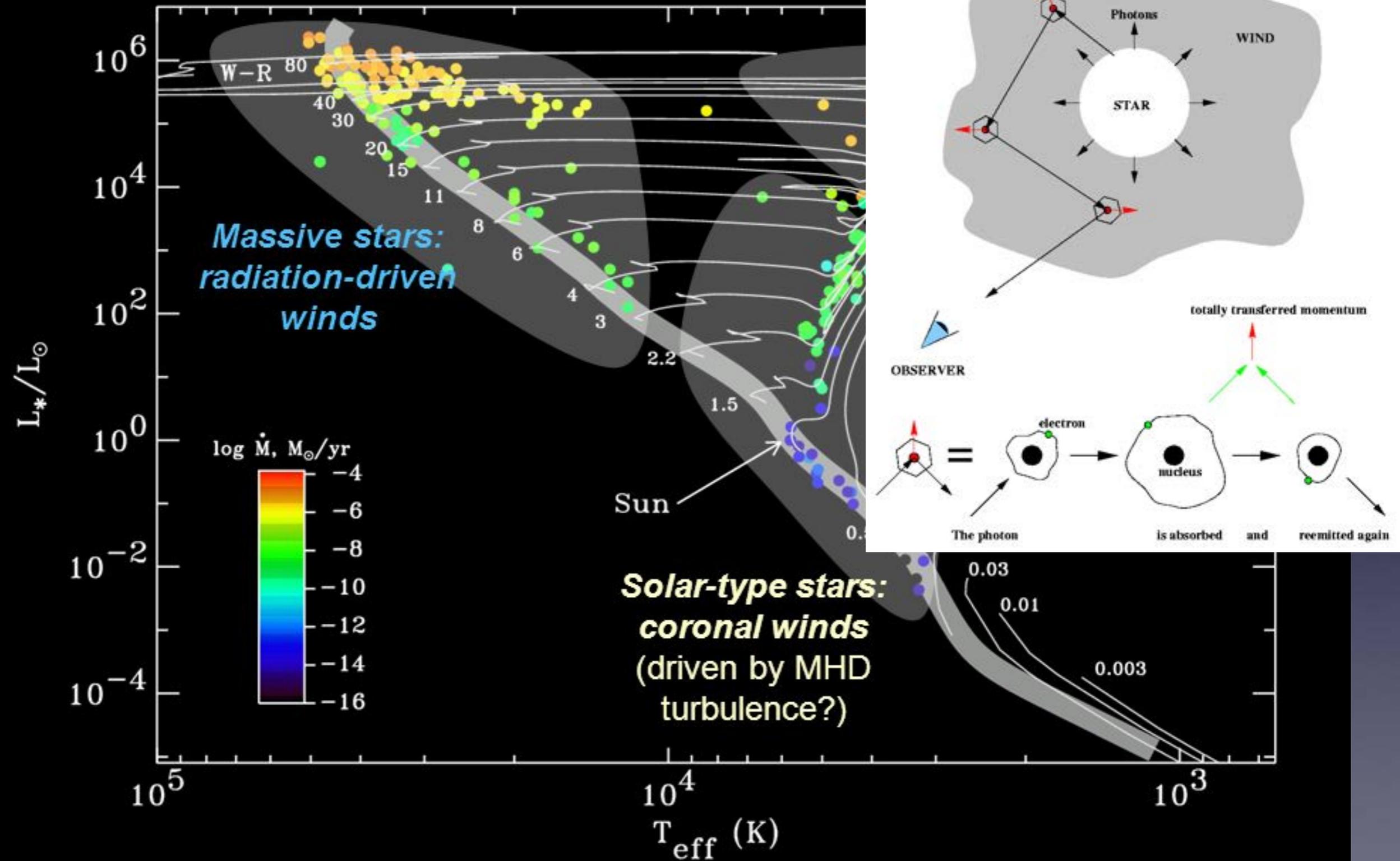
De l'enfance à l'âge adulte...



L'âge adulte



Stellar winds across the H-R

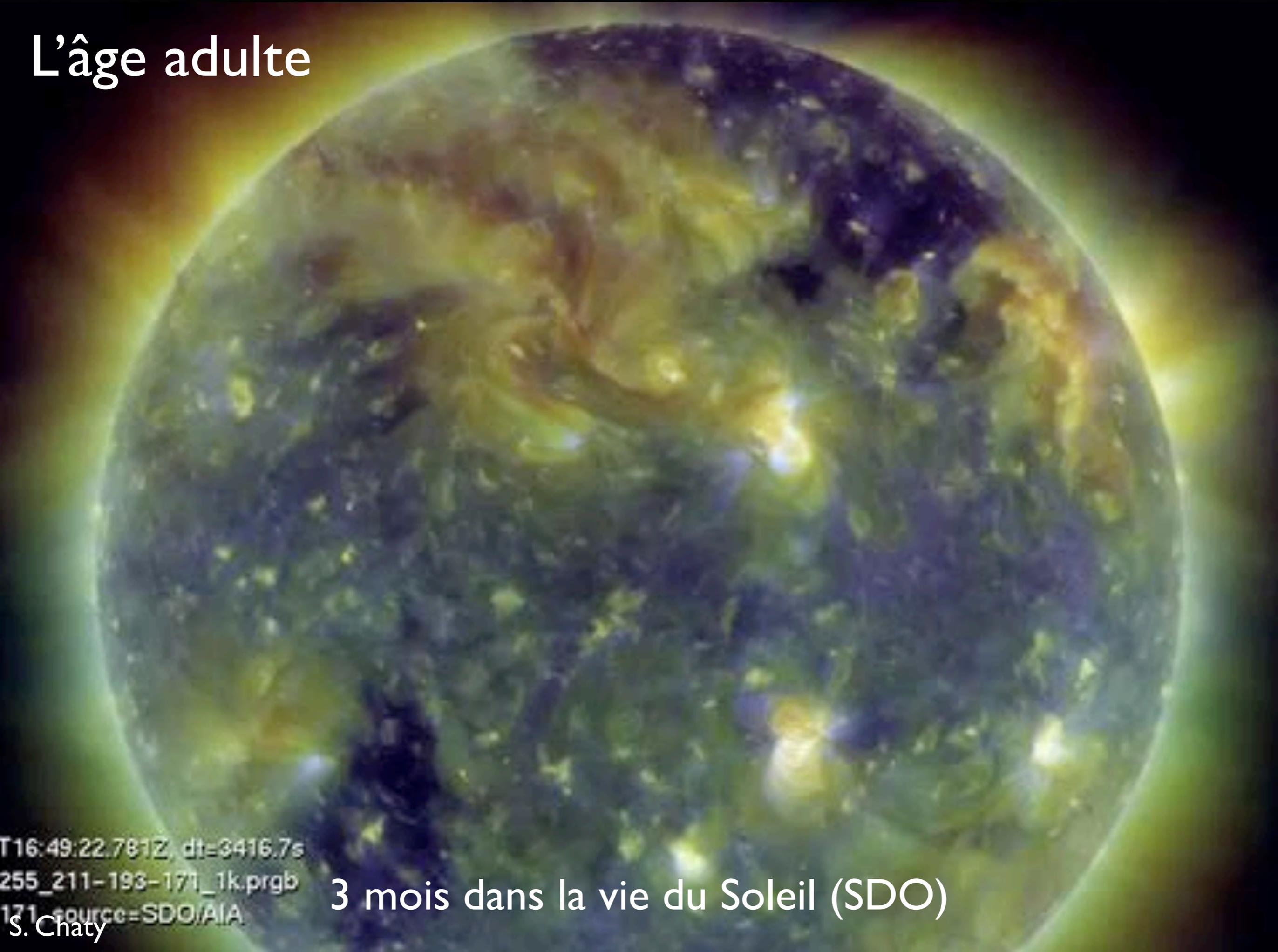


L'âge adulte

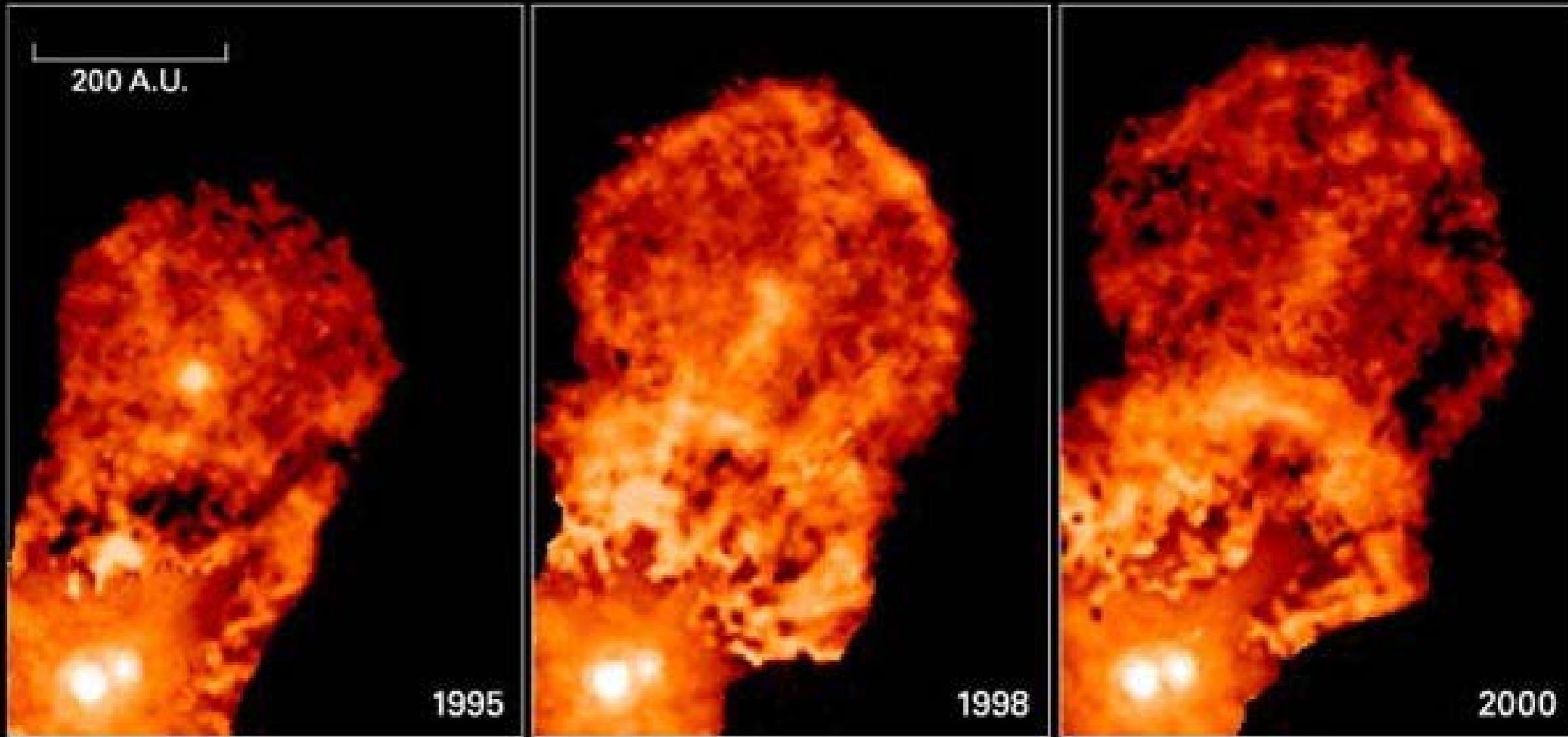
T16:49:22.781Z, dt=3416.7s
255_211-193-171_1k.prgb
171_source=SDO/AIA

3 mois dans la vie du Soleil (SDO)

S. Chaty

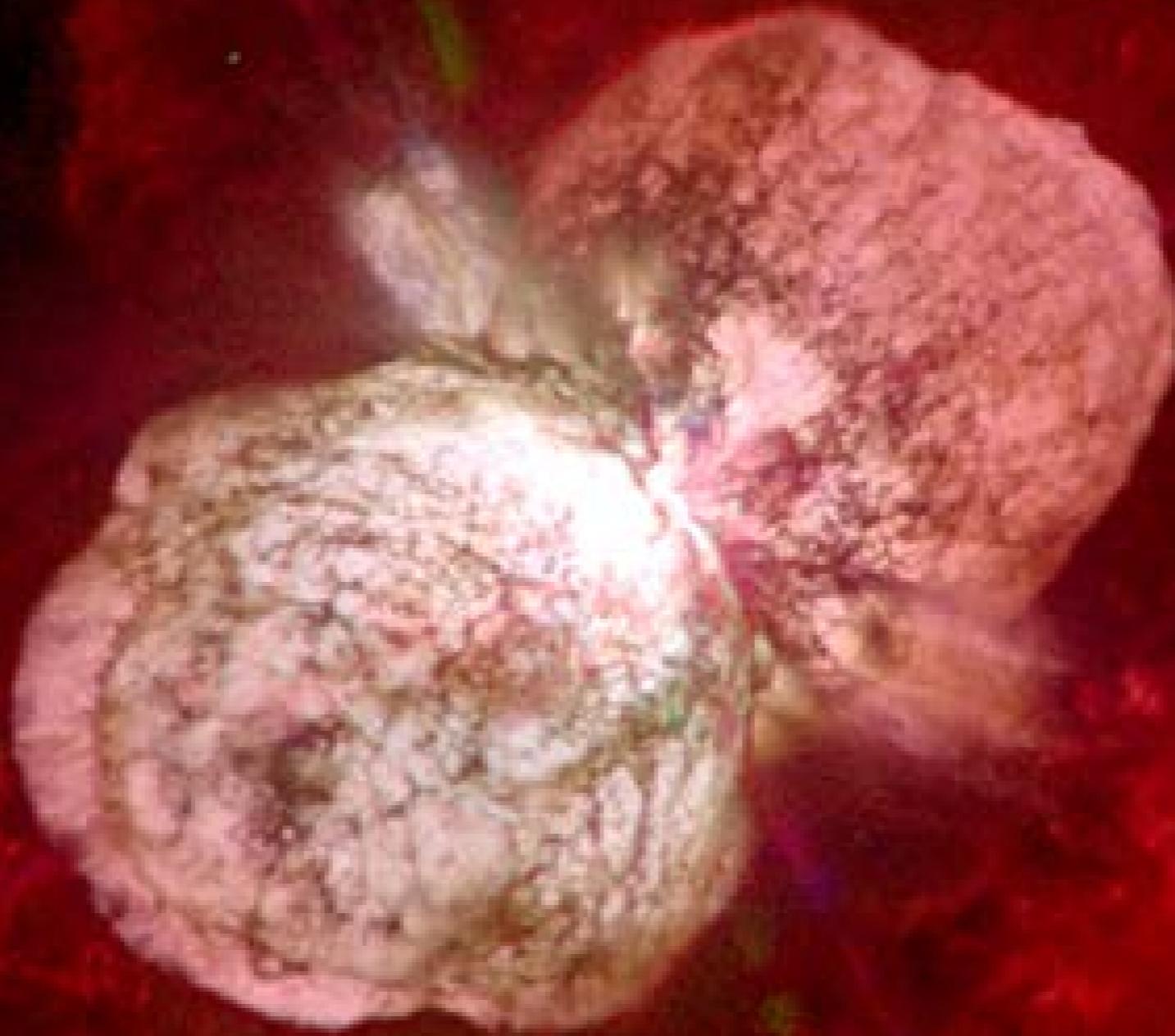


L'âge adulte



La vie n'est pas toujours un long fleuve tranquille!

L'âge adulte



La vie n'est vraiment pas un long fleuve tranquille! (Eta Carinae)
S. Chaty

The background of the slide features a dark, reddish-brown space with two prominent galaxies in the process of merging. Each galaxy has a bright, glowing yellow-orange core, likely representing a supermassive black hole. The galaxies are surrounded by intricate, swirling patterns of dust and gas, creating a complex, textured appearance. The overall scene is set against a deep, dark red background, suggesting a distant or high-energy cosmic environment.

Acte II

De la rencontre à la relation fusionnelle

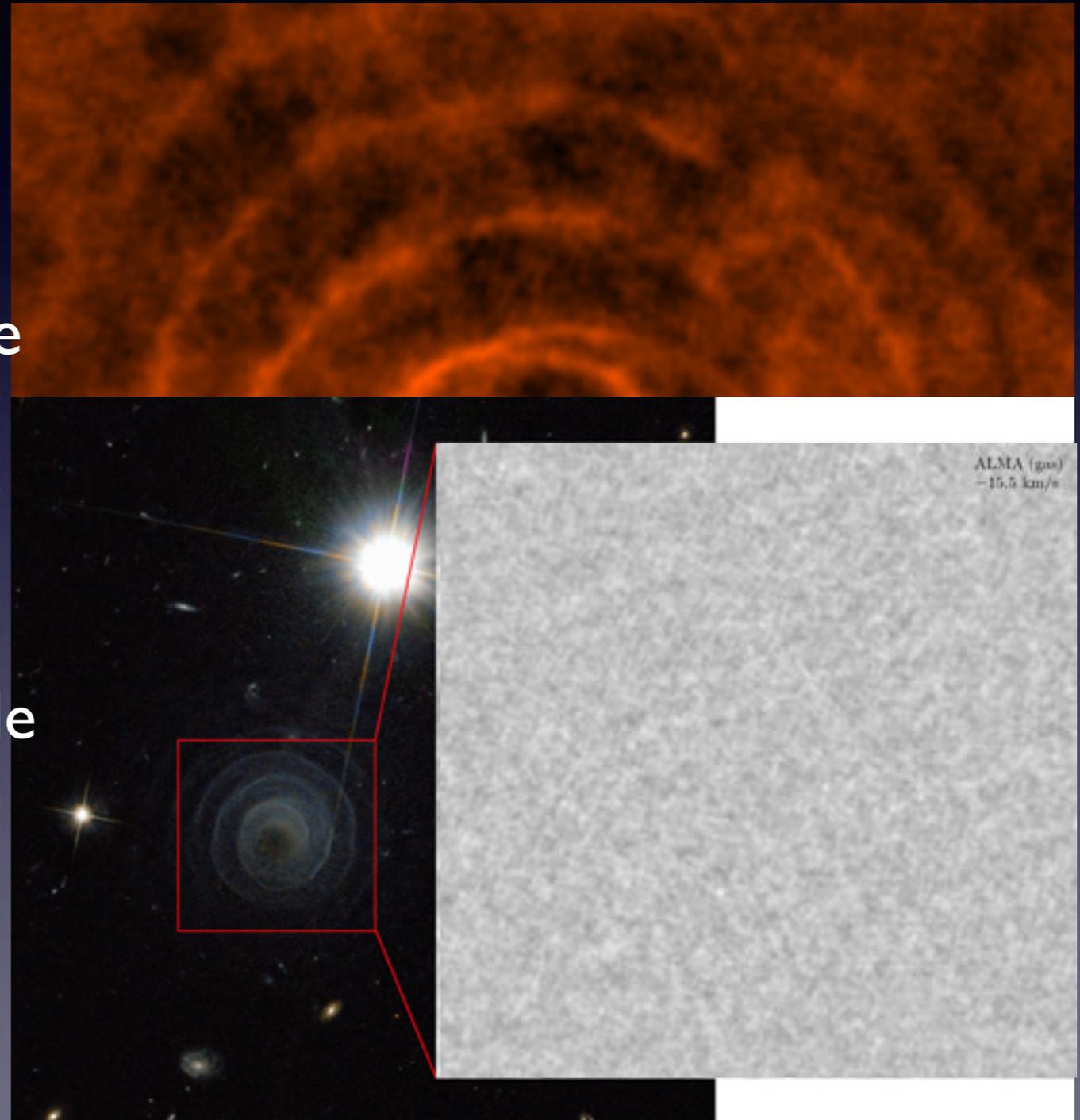
La rencontre

- Couple d'étoiles nées avec \neq axes de rotation: fragmentation de 2 nuages de gaz, distants de 30 x Soleil-Neptune
- IRAS 04191+1523, âge < 0.5 Myr (ALMA+Herschel)

Rencontre précoce: un couple lié pour la vie

La rencontre

- LL Pegasi, étoile géante avec vent fort, compagnon sur orbite très elliptique
- composantes de spirale à \neq vitesses !

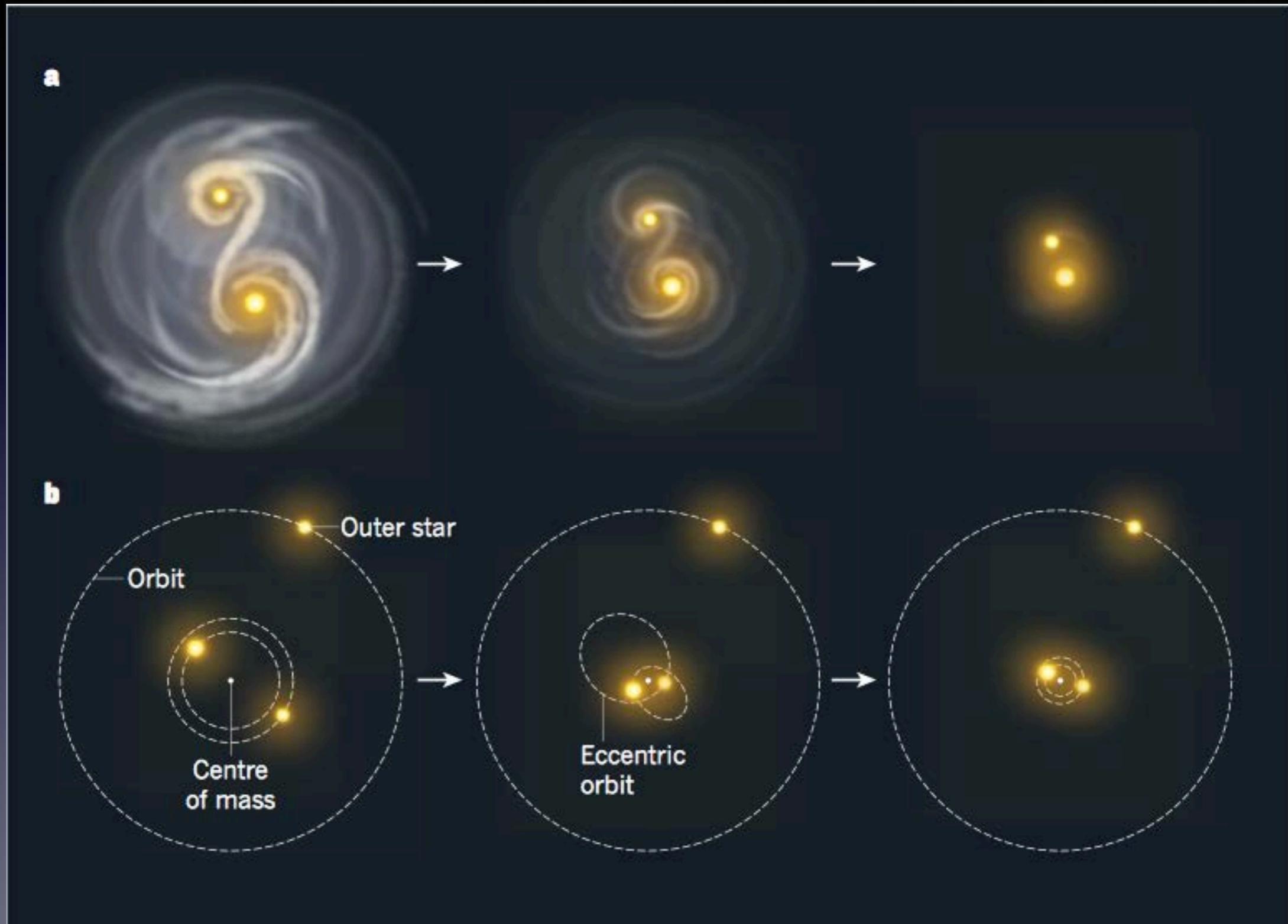


La rencontre



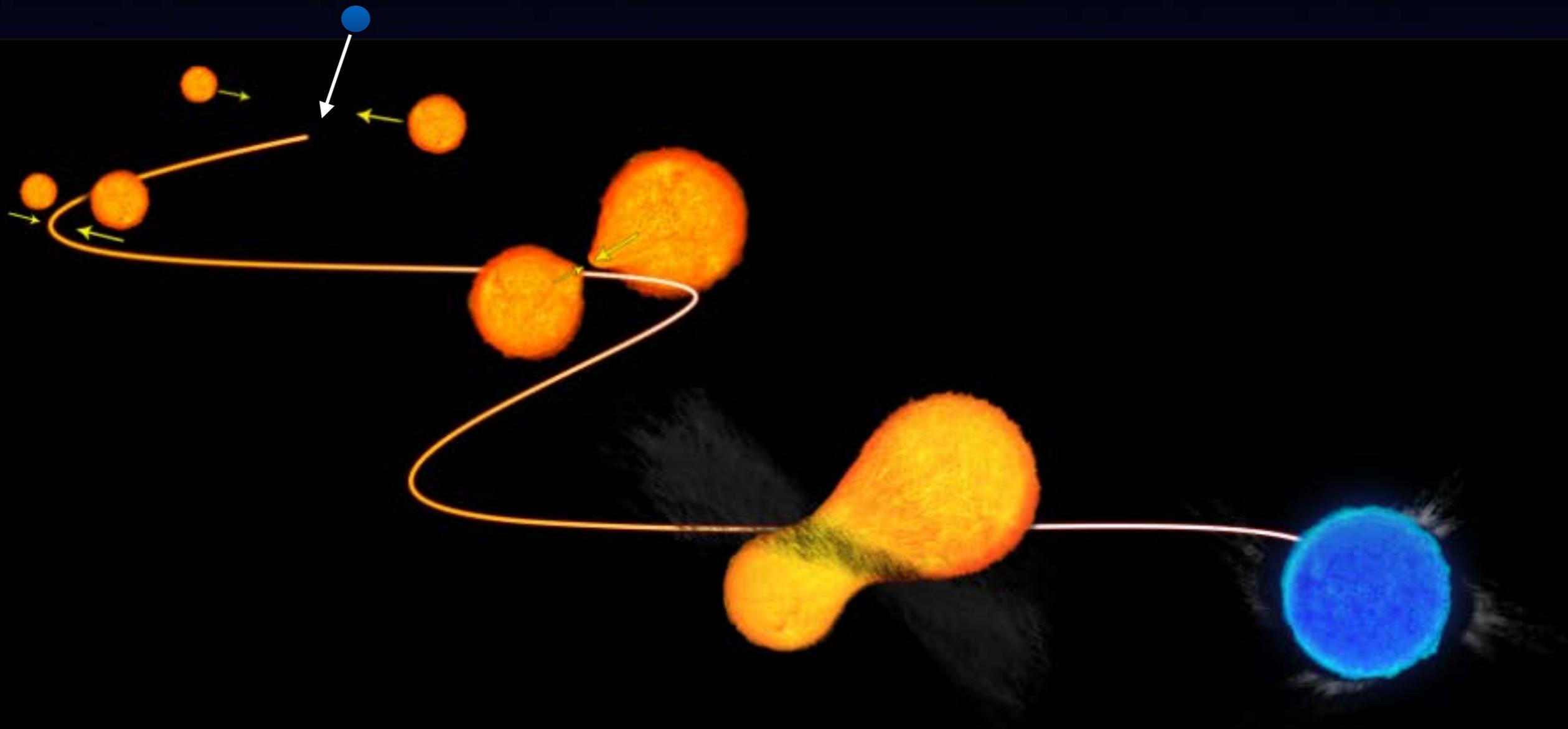
- Triple système protostellaire (ALMA): L1448 IRS3B
- 2 proto-étoiles: 61 et 183 au, âge: 150 kyr
- Structure spirale -> instabilité du disque de poussière, se fragmente en protoétoiles

La rencontre



En couple ou en ménage à trois,
l'important est d'être bien accompagné!

La rencontre



Une rencontre imprévue

La rencontre

A dense field of stars in a globular cluster, showing a concentration of stars in the center. The stars are of various colors, including yellow, orange, red, and blue, and are scattered across the frame. The background is dark, making the individual points of light stand out.

Certains endroits sont plus propices aux rencontres:
amas globulaire M13 Hercule (100 000 étoiles dans 100 al)

Evolution binaire

- Les binaires se forment et évoluent...
- ...finalement fusionnent...
- ...conduisant à l'émission d'ondes gravitationnelles (GW), tels que les événements détectés par LIGO/Virgo
- Partie émergée de l'iceberg!
« Les binaires d'aujourd'hui sont les ondes gravitationnelles de demain! »



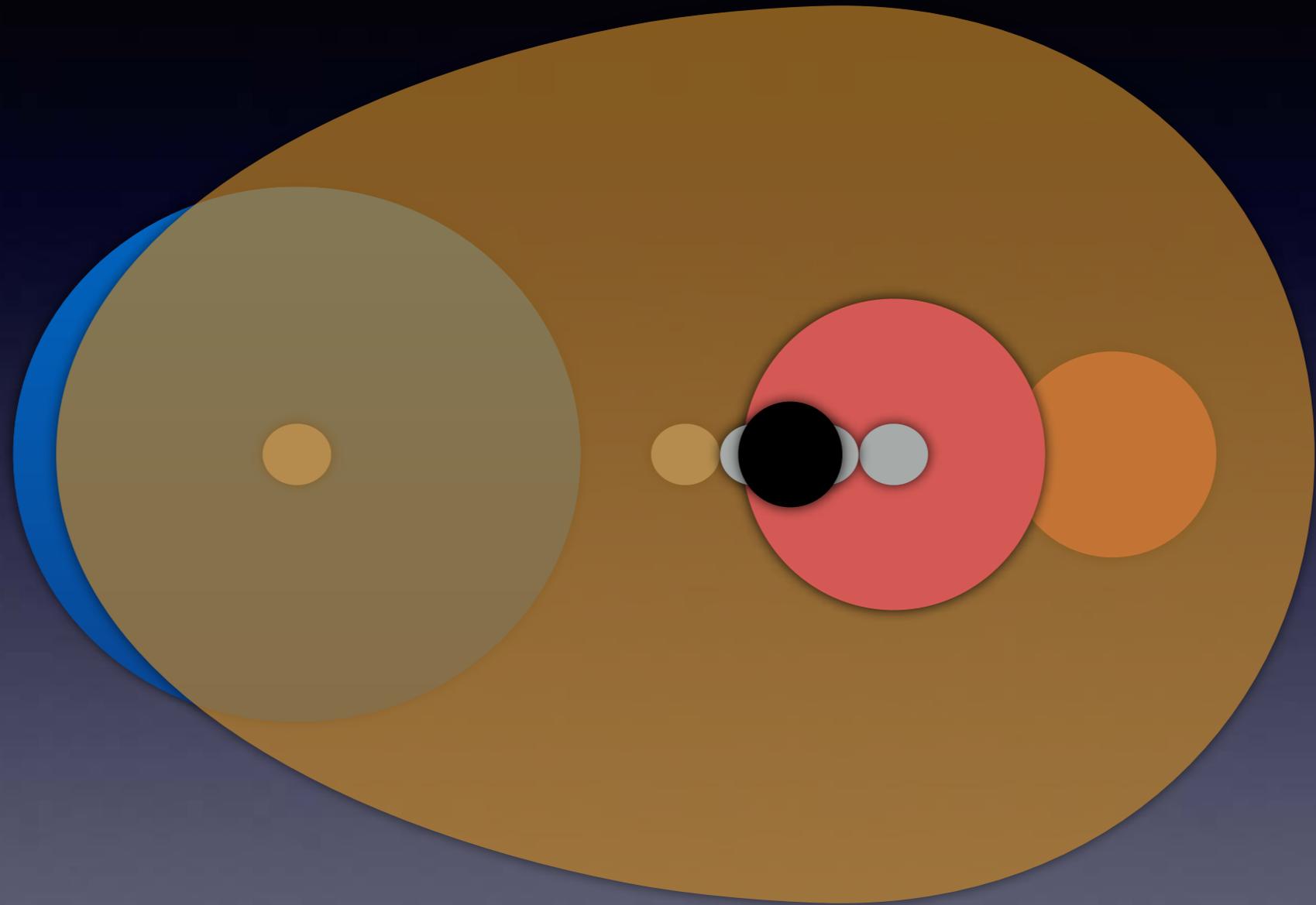
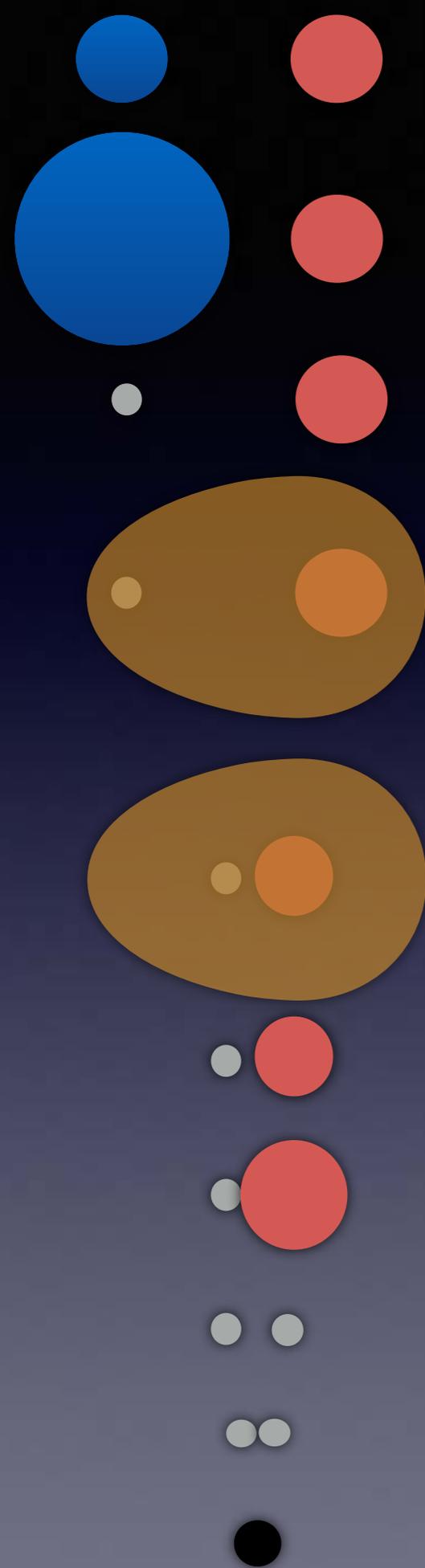
• BBH



• BNS



Une relation fusionnelle



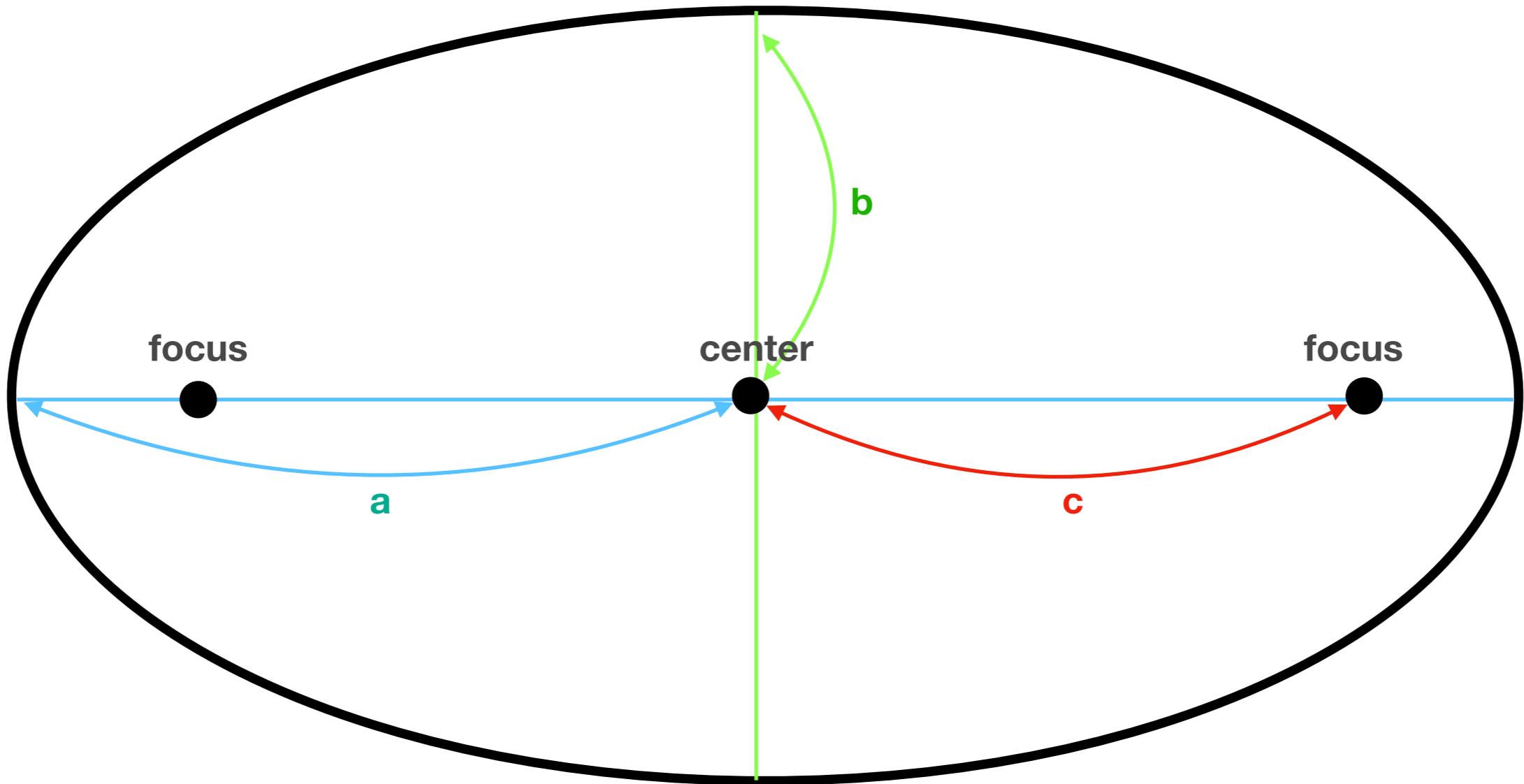
Histoire d'une relation au long cours



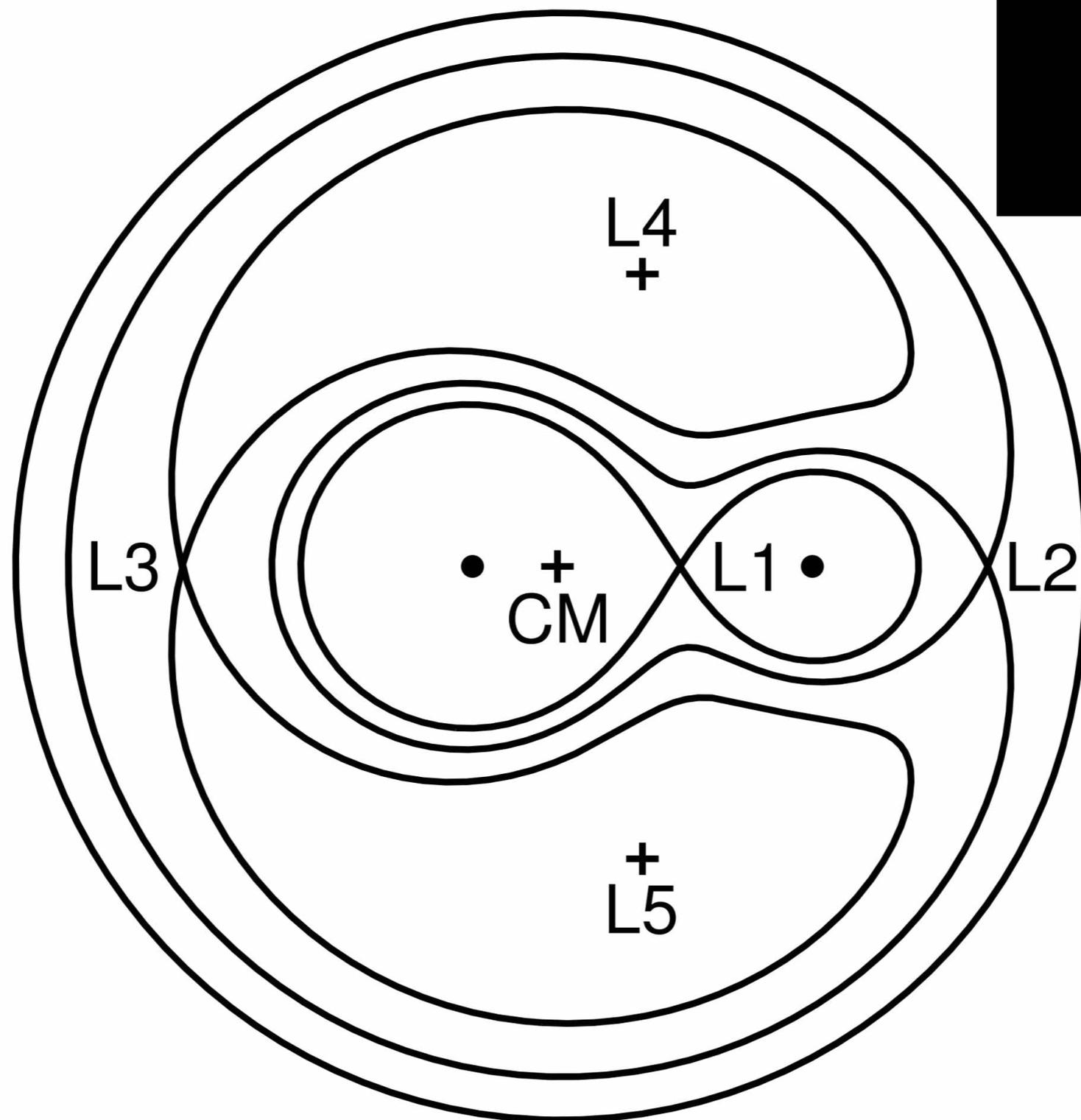
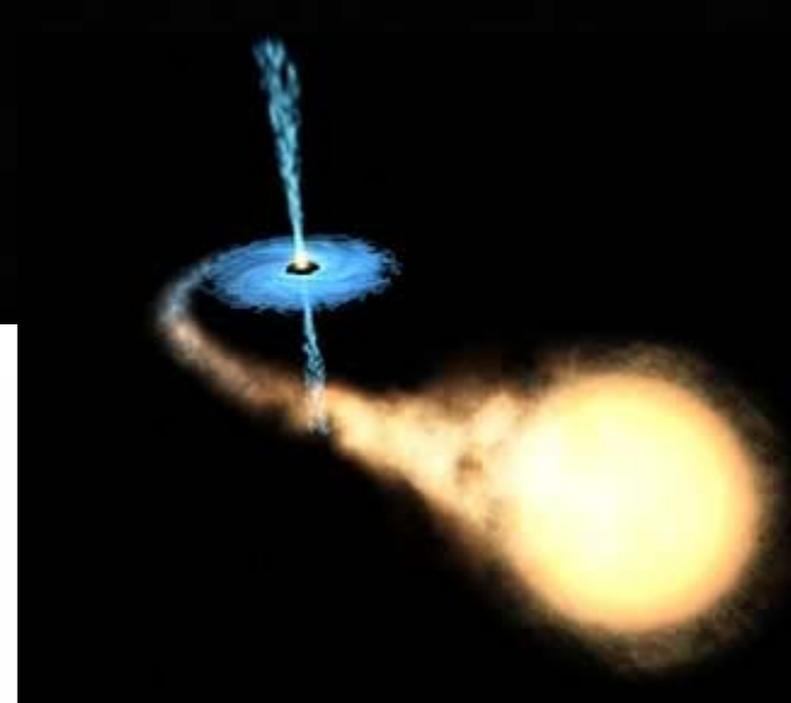
Acte III

Une histoire d'attraction

Ellipse



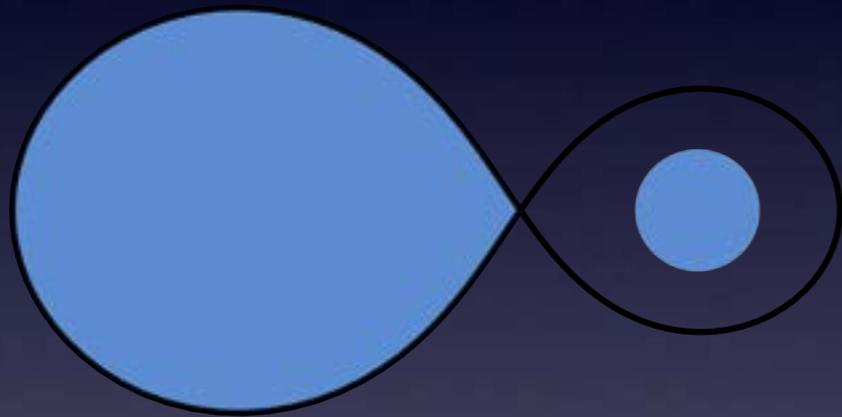
Géométrie de Roche



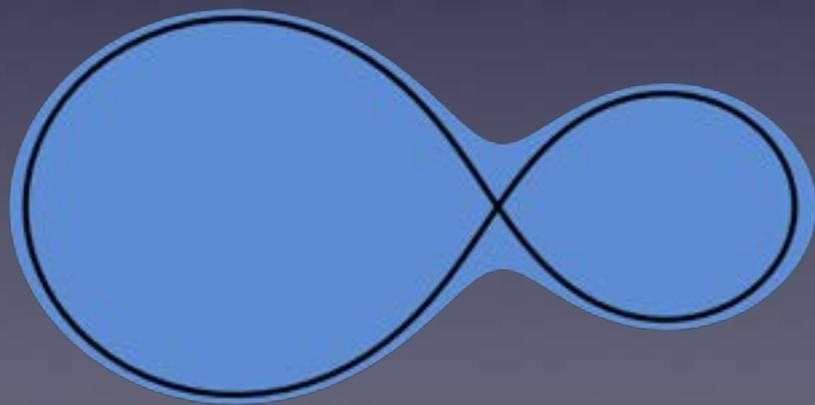
Une relation fusionnelle



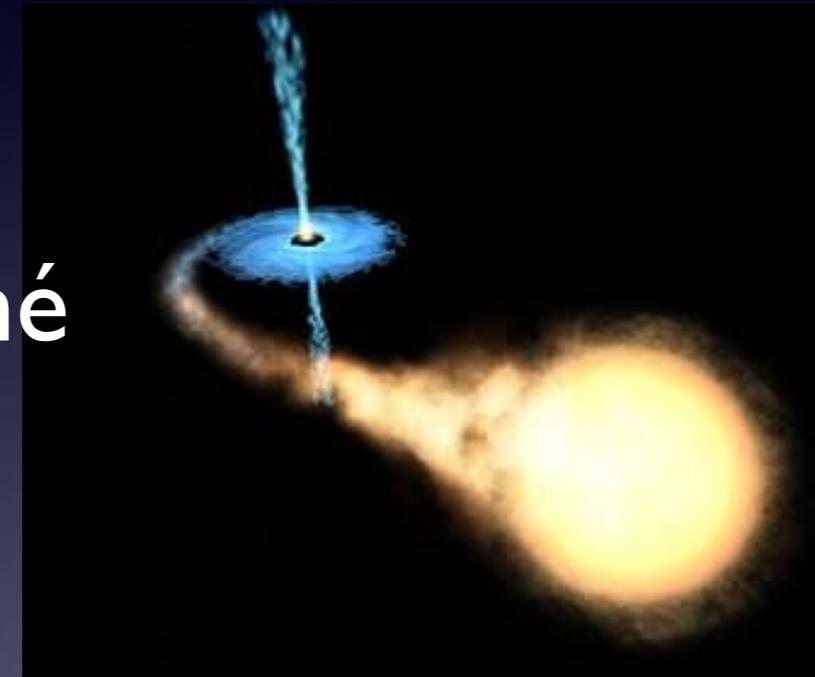
Couple détaché



Couple semi-détaché



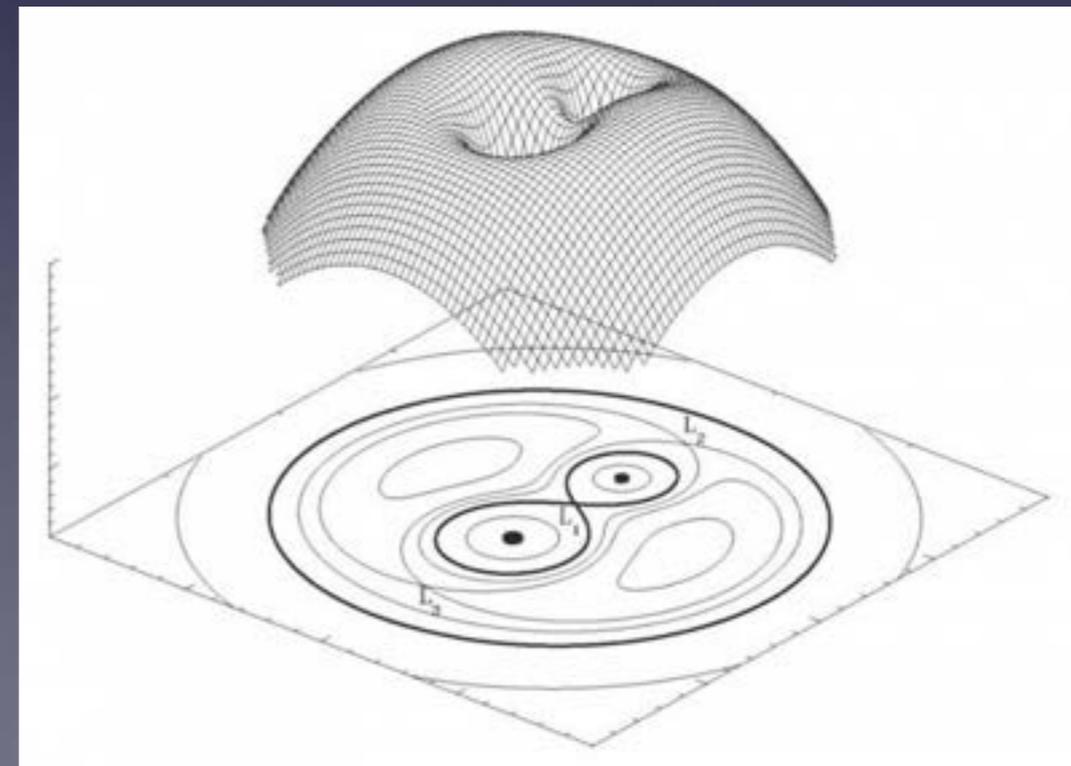
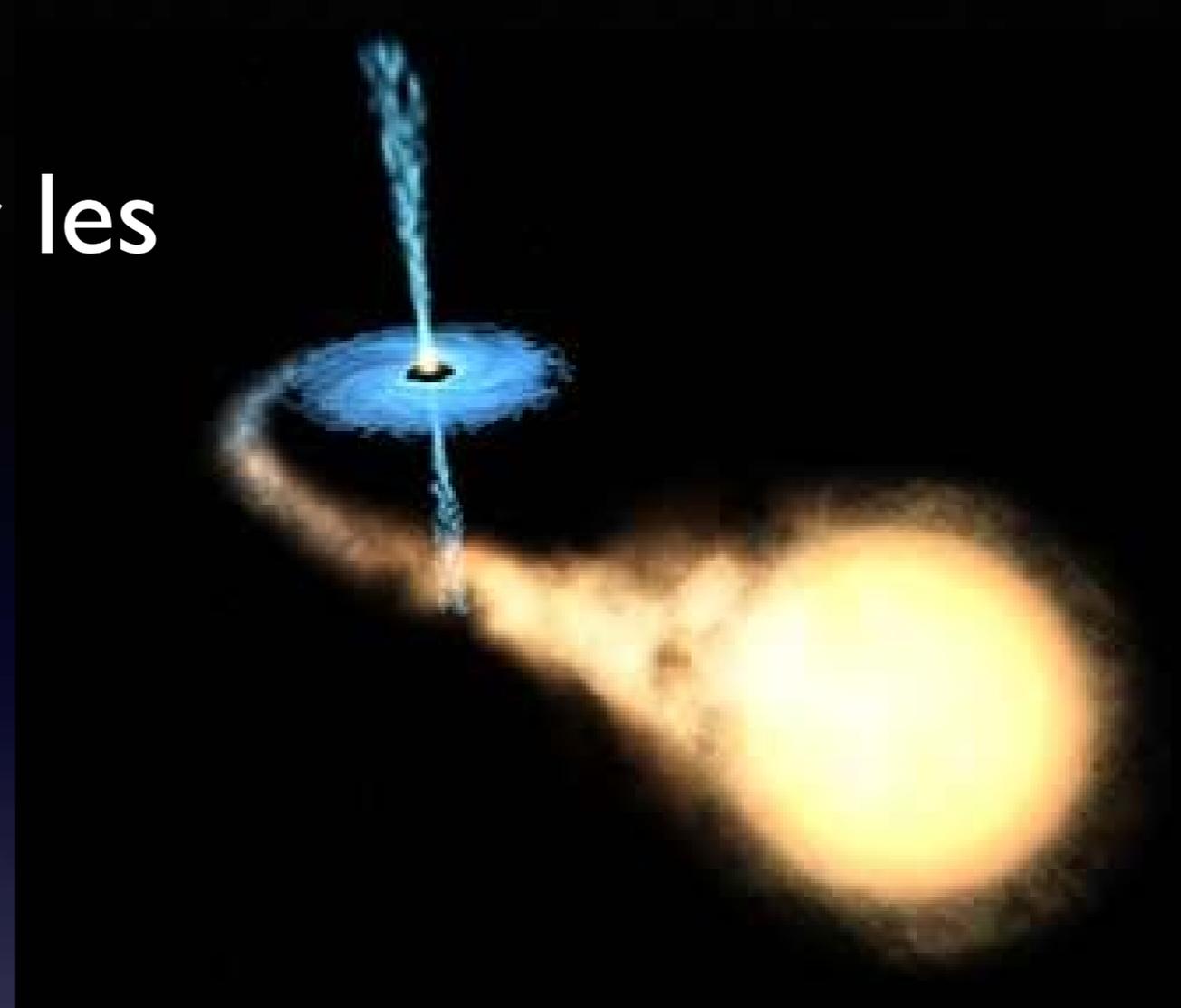
Couple en contact



Toutes les vies de couple ne se ressemblent pas...

Comment détecter les trous noirs ?

- Les trous noirs isolés sont invisibles (différence avec étoile à neutron)
- Mais s'ils sont à côté d'une étoile... la matière est happée par le trou noir!
- Détection des premiers couples stellaires en 1960 dans les binaires X: émission de rayons X due à accrétion de matière (« accrétion/éjection ») (Nobel de Physique: R. Giacconi 2002)



Cygnus X-1: 1er trou noir détecté (1965)!

THÉMA

LE VAMPIRE ET LA GÉANTE BLEUE

Cygnus X1, c'est la fin d'un couple stellaire : une supergéante bleue lentement dévorée par un trou noir, issu de l'effondrement d'une étoile massive. De leurs échanges, nous ne percevons que des bouffées de rayons X émis par la matière avant d'être avalée par l'astre compact.

LE TROU NOIR

Il n'a pas de surface, et dans un rayon infime, concentre l'équivalent de 15 masses solaires. C'est le vestige d'une étoile supergéante d'au moins 40 masses solaires qui, en quelques dizaines de millions d'années, a perdu beaucoup de masse, dont une partie a probablement été accrétée par l'étoile compagne.

PERTE DE MASSE

L'étoile perd de sa masse sous deux formes : du gaz et un vent de particules. Une quantité constante du premier passe vers le disque d'accrétion, tandis que le vent stellaire, qui souffle dans toutes les directions, est d'intensité variable.

DÉFORMATION

La puissance gravitationnelle du trou noir déforme l'étoile compagne, qui prend l'aspect d'un œuf dont le bout pointu est dirigé vers le trou noir.

JETS

Toute la matière n'est pas absorbée par le trou noir ; 10 % sont expulsés sous forme de jets. Les particules légères (surtout des électrons) suivent des lignes de champ magnétique et sont propulsées dans l'espace à une vitesse proche de celle de la lumière.

Gaz de l'étoile attiré par le trou noir

Trou noir

LIMITE INTERNE

C'est la dernière orbite stable, celle où la matière tourne encore très rapidement avant d'approcher l'horizon des événements.

DISQUE D'ACCRÉTION

Son diamètre est 10 à 15 fois celui du Soleil. Il est très fin et visqueux, mais n'est pas homogène. Le frottement des particules, qui engendre des températures de 10 à 15 millions de degrés, est responsable de l'intense émission de rayons X.

HORIZON DES ÉVÉNEMENTS

C'est le bord du trou noir, là où la matière tombe en chute libre et disparaît dans le trou noir. Il tourne très vite sur lui-même : 800 tours par seconde ! Son rayon est de 50 km.

LIMITE EXTERNE

Le disque d'accrétion commence là où l'influence gravitationnel du trou noir prend le pas sur celle de l'étoile HD 266868.

L'ÉTOILE GÉANTE BLEUE

Baptisée HD 226868 dans le catalogue stellaire Henry Draper, cette étoile supergéante bleue fait entre 20 et 30 masses solaires pour un rayon 16 fois supérieur à celui du Soleil. Elle est 300 000 à 400 000 fois plus brillante que celui-ci.

LEXIQUE

Étoile à neutrons

Astre issu de l'effondrement du cœur d'une étoile massive. Cet objet très compact est composé principalement de neutrons.

Naine blanche

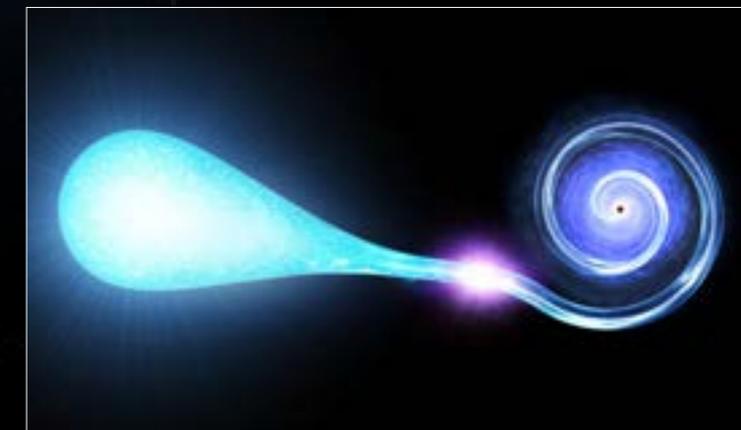
Étoile en fin de vie qui, après avoir épuisé son combustible, s'effondre sur elle-même. Les plus massives d'entre elles évoluent en étoiles à neutrons ou en trous noirs.

Géante bleue

Étoile de 10 masses solaires et plus, très chaude et lumineuse. Ces astres massifs ont une courte durée de vie, quelques dizaines de millions d'années, avant d'exploser en supernova.

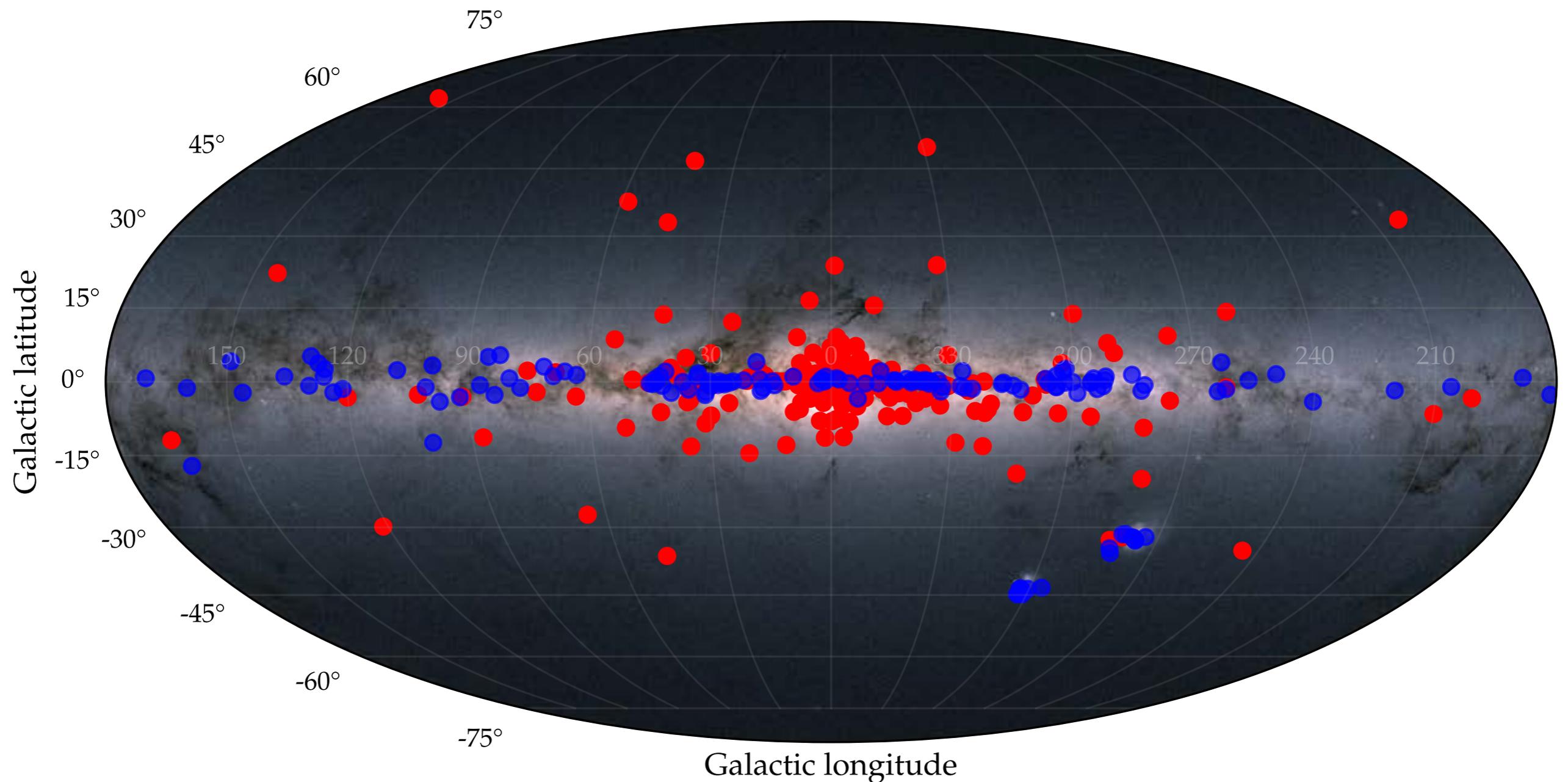
Trou noir

Astre dont la gravité est si puissante qu'aucune matière ni lumière ne peut s'en échapper. Ces astres invisibles ne se détectent que par leurs effets sur leur environnement — par exemple, la matière qu'ils vampirisent brille en rayons X.



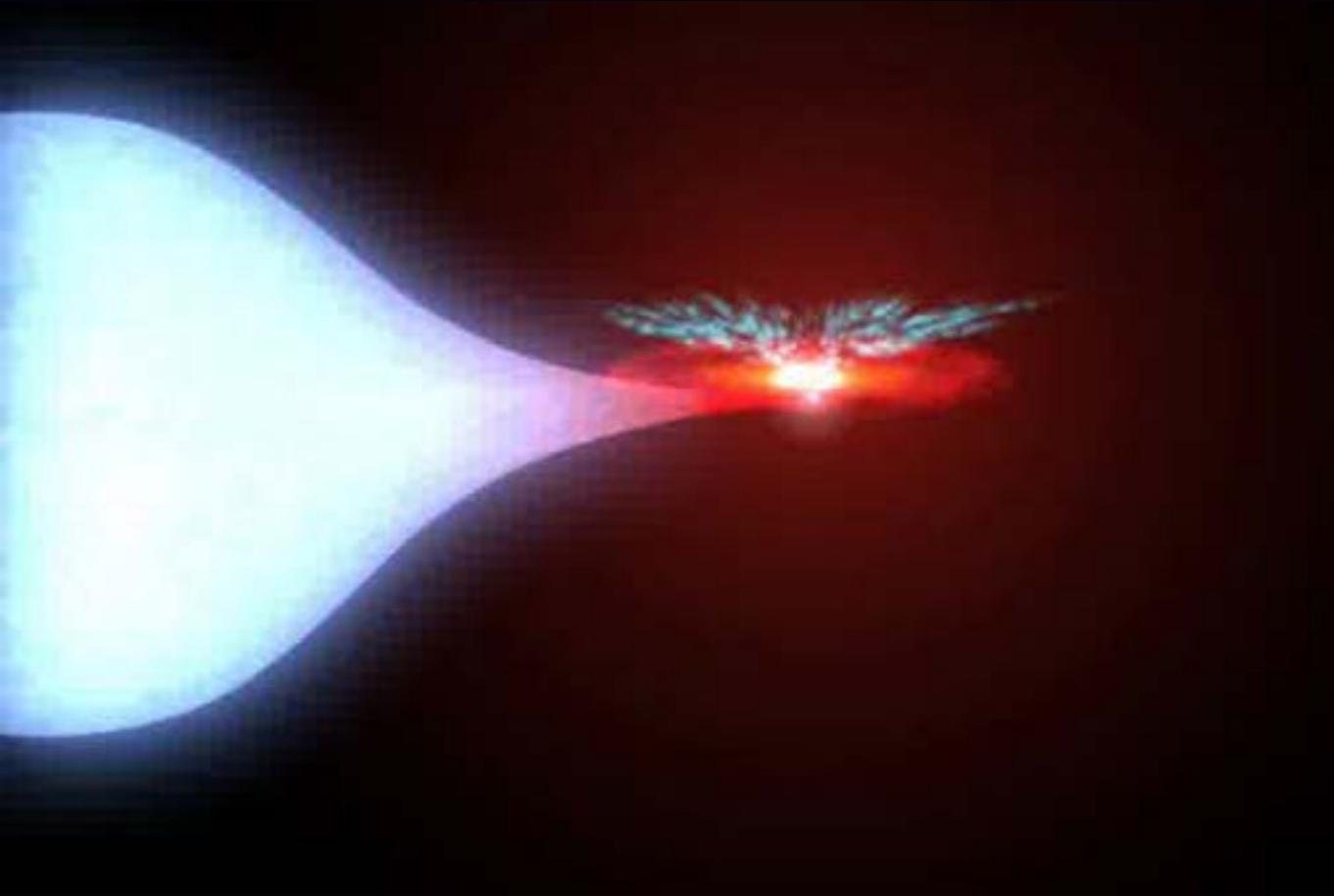
Illustrations de Pierre Guichard pour Ciel & Espace

Couples stellaires



Distribution galactique des binaires (LMXB et HMXB)

Une relation fusionnelle



THE MOST OBSCURED
HIGH ENERGY SYSTEMS
OF OUR GALAXY

BY SYLVAIN CHATY

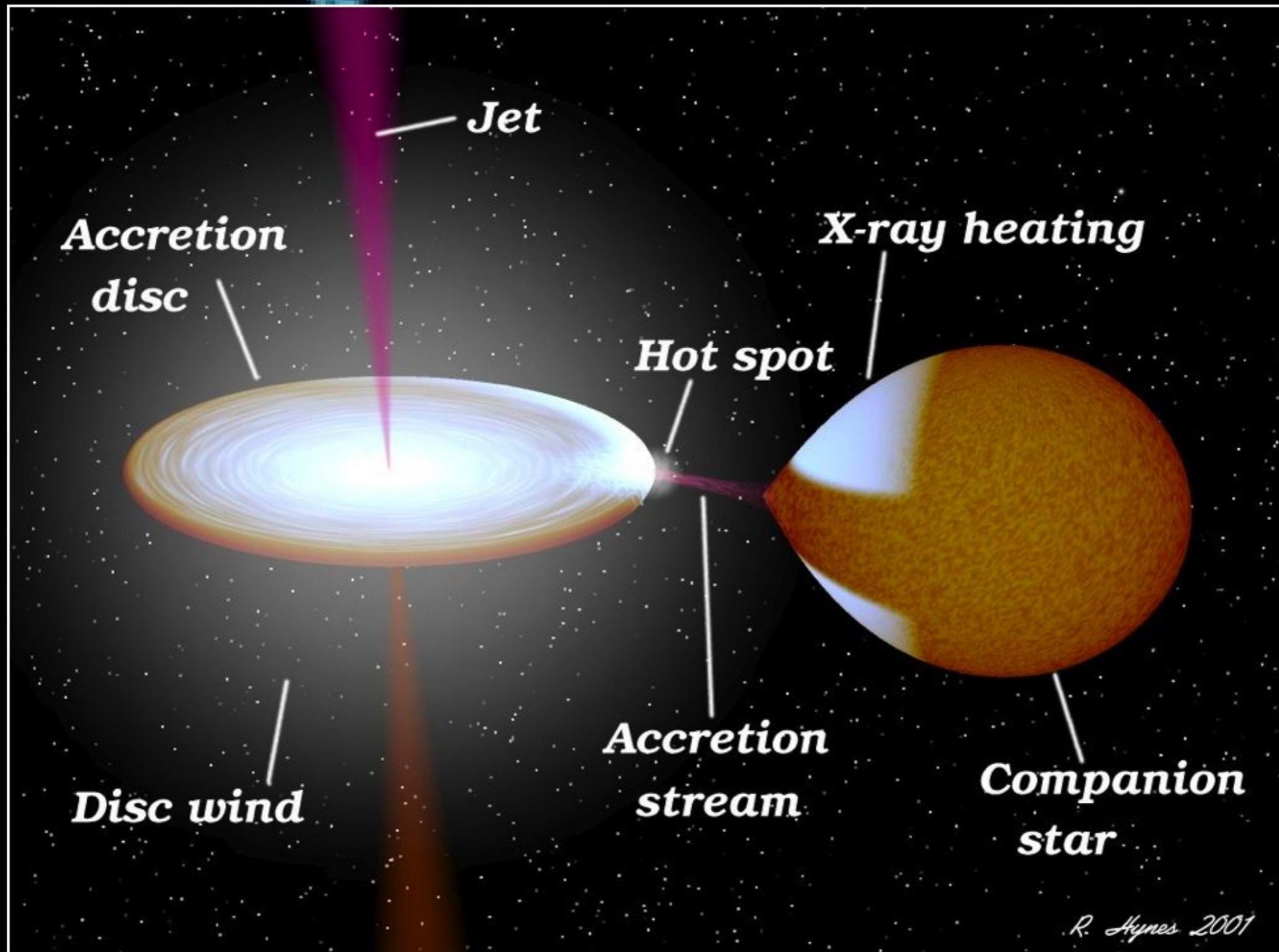
~340 couples de faible masse
(70% de LMXB)

~150 couples de grande masse
(30% de HMXB)

Recensement

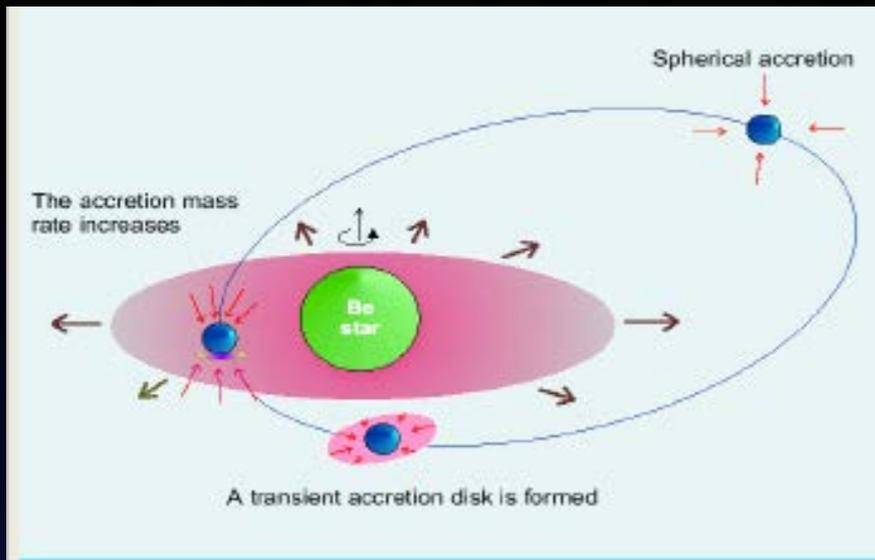
(Fortin, Garcia, Simaz Bunzel, Chaty, 2023; Fortin, Kalsi, Garcia, Simaz Bunzel, Chaty, 2024)

Une relation fusionnelle

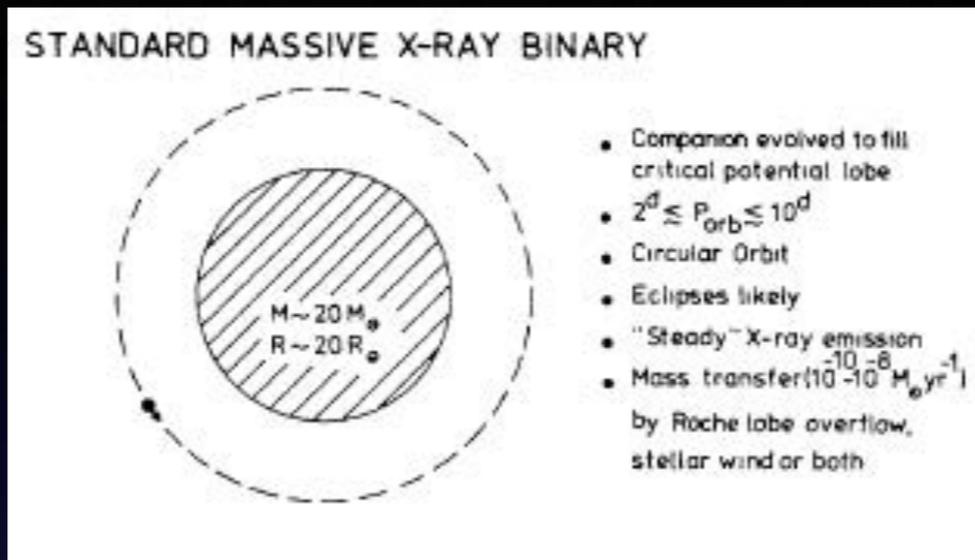


Binaires de faible masse (Chaty et al. 2022)

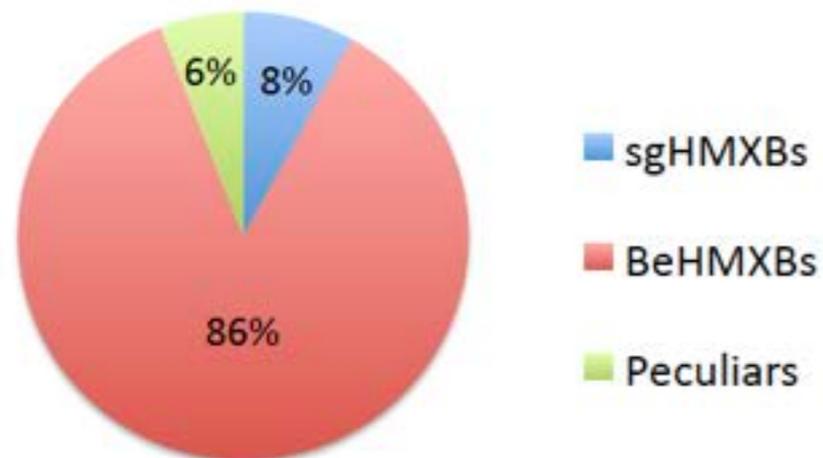
Une relation fusionnelle



BeHMXB



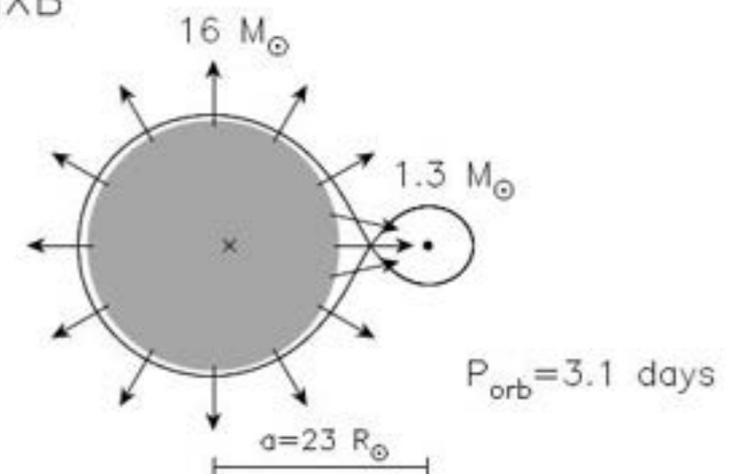
sgHMXB



Before INTEGRAL

RLO-HMXB

HMXB



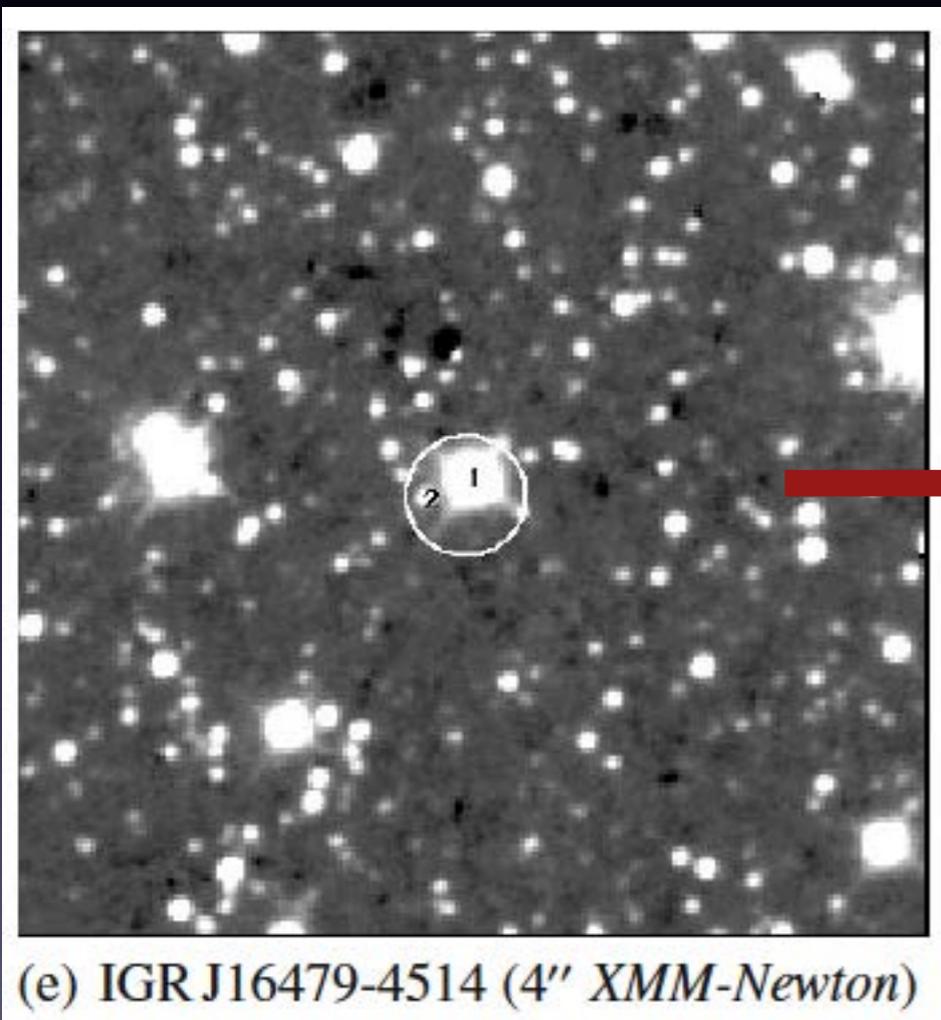
Binaires de grande masse (Chaty et al. 2022)

Etude multi-longueur d'onde de binaires X

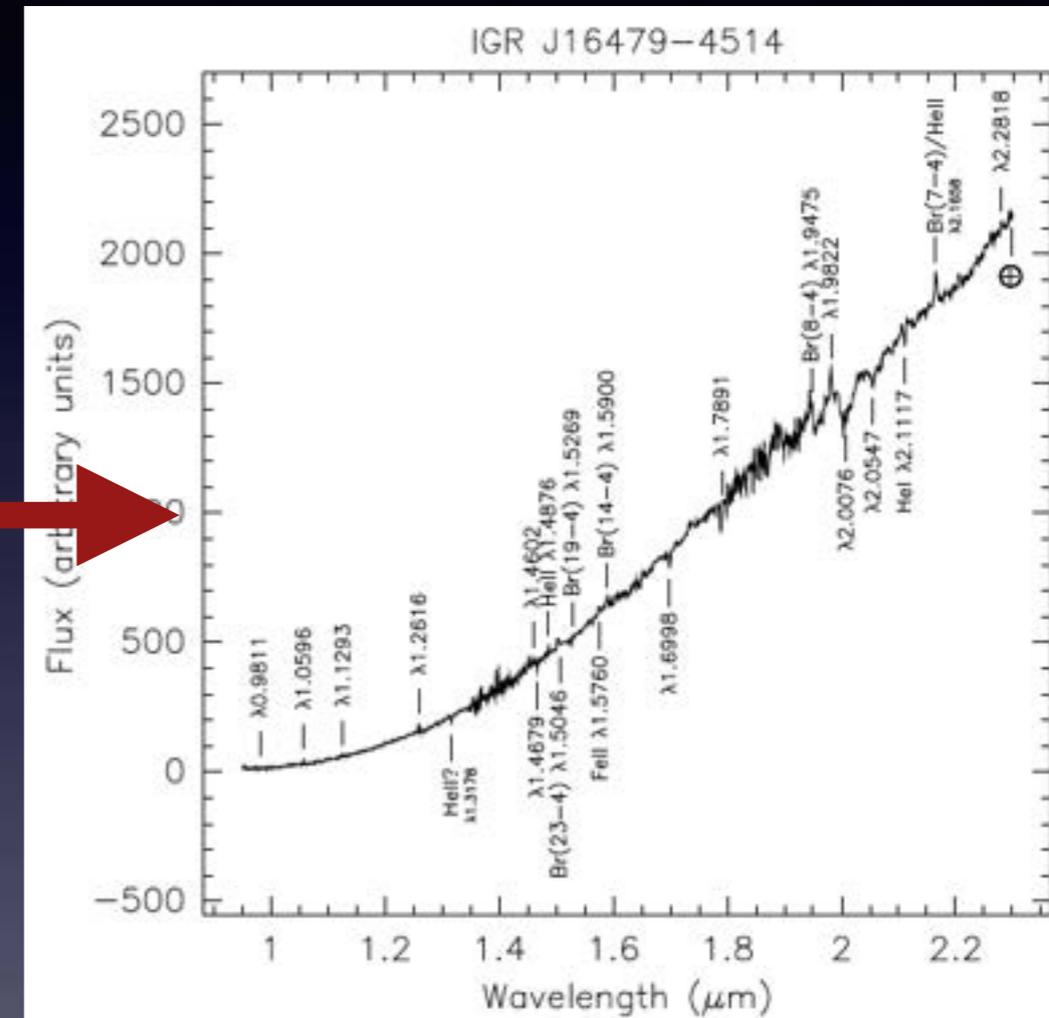
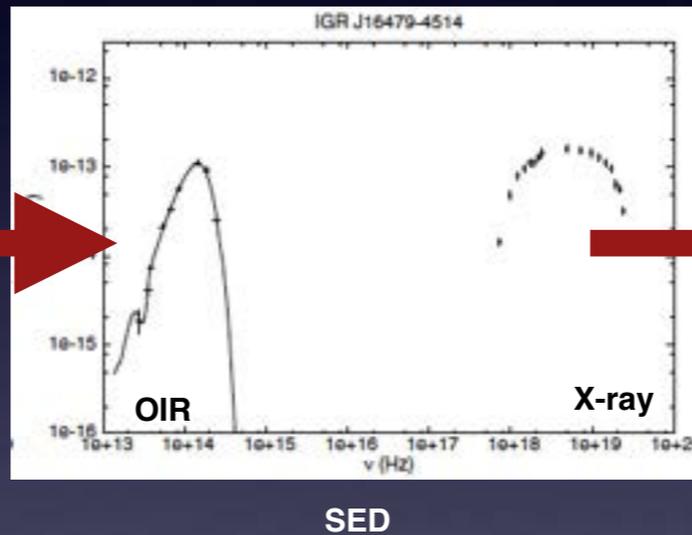


- découverte *INTEGRAL* -> localisation *Chandra/XMM/Swift* -> ESO obs

Etude multi-longueur d'onde de binaires X



Identification



- Observations **ESO (La Silla & Paranal)** visible/infrarouge en photométrie et spectroscopie

Catalogue HMXB



Binary rEvolution

From evolving binaries to the merging of compact objects

Maintained by @Binary-rEvolution

A Catalogue of High-Mass X-ray Binaries in the Galaxy

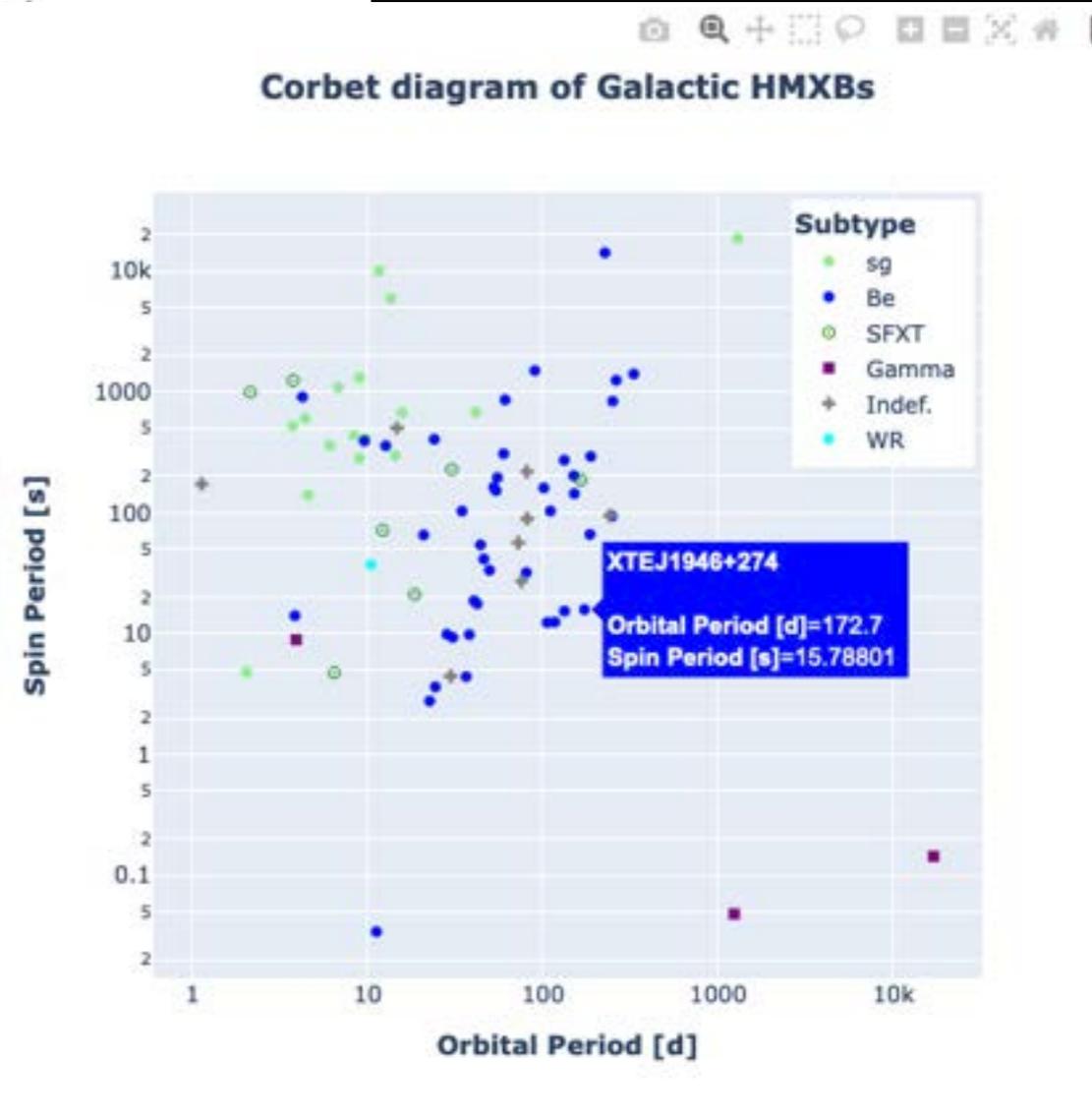
From the INTEGRAL to the Gaia era

HOME HMXB CATALOGUE NOTES DOWNLOADS CONTRIBUTING SWITCH TO LMXB

Search HMXB:

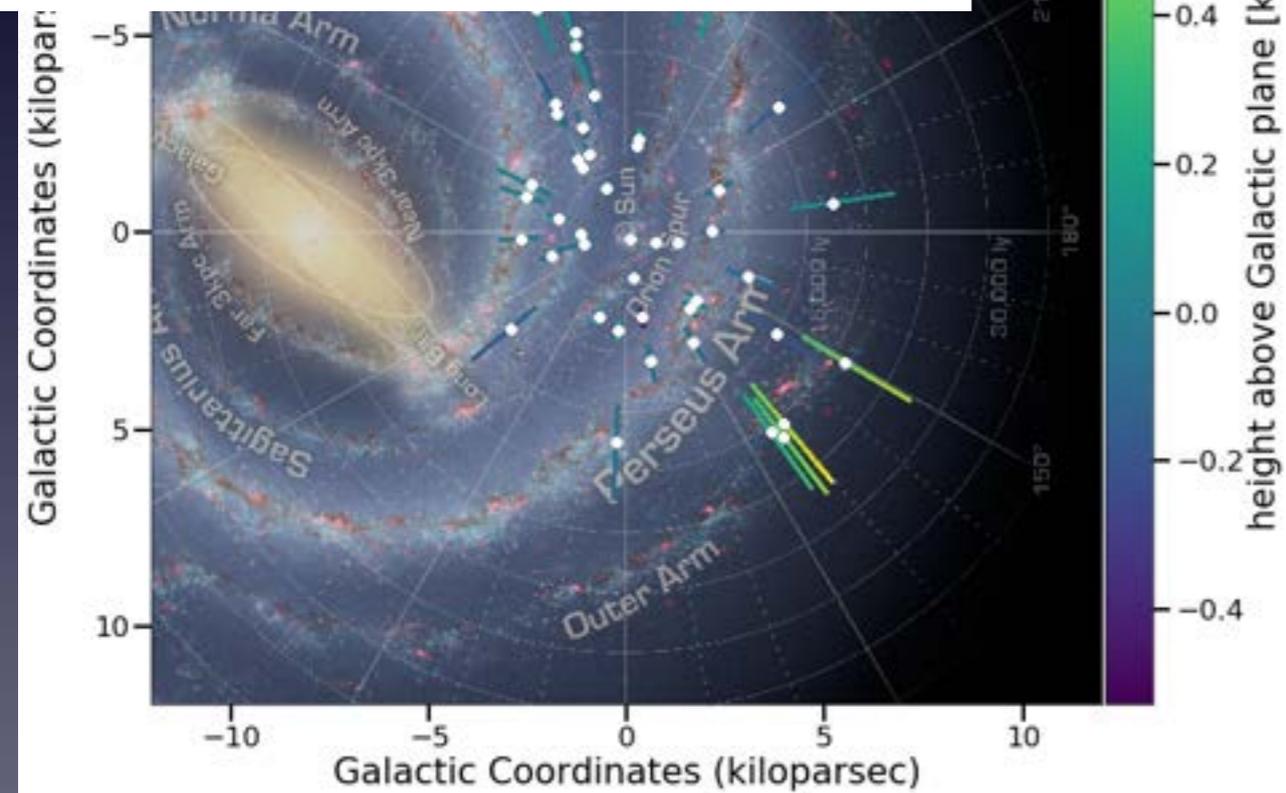
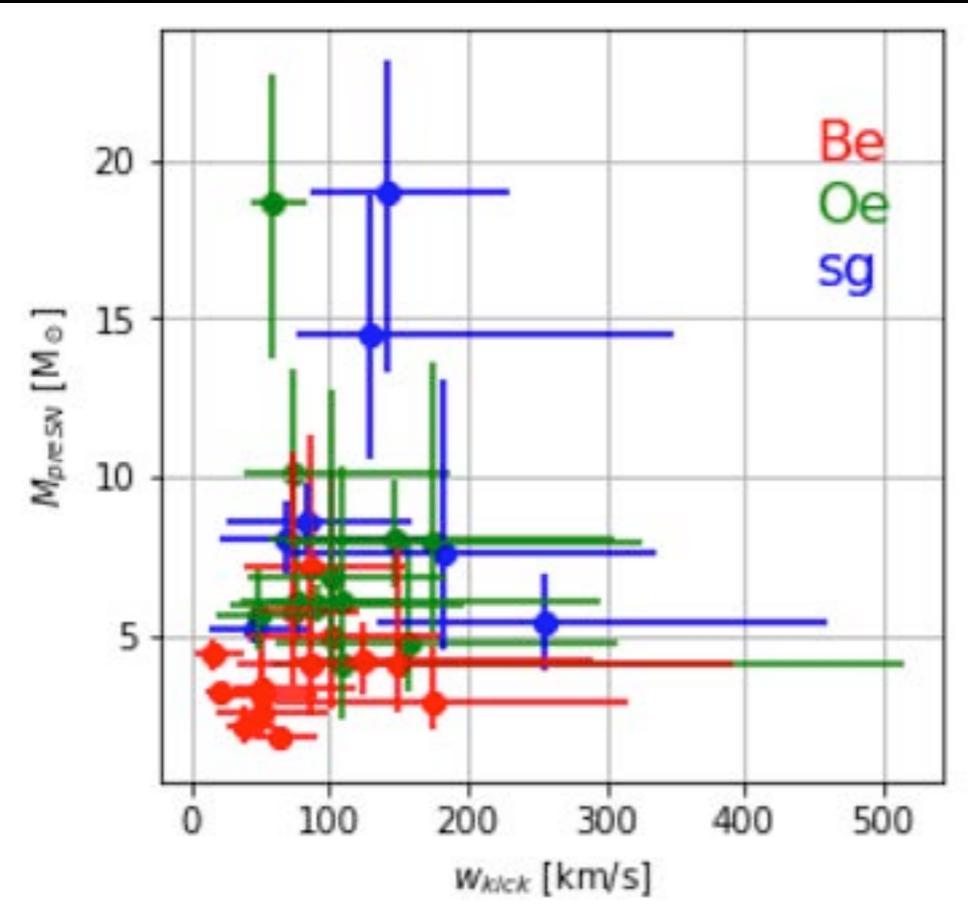
Query tip: any identifier known by Simbad will work!

<input type="checkbox"/>	Main ID [Field of View]	Spectral type	Class	Right Ascension [J2000]	Declination [J2000]	Error radius [mas]	Distance [pc]	Mx [Msun]	Mo [Msun]
<input type="checkbox"/>	IGR J00370+6122 [FoV]	B0.7 Ib 2014A&A...566A.131G	sg	9.29013	61.3601	0.008	3401 (-171,+186)		22.0 2014A&A...563A...
<input type="checkbox"/>	gam Cas [FoV]	B0.5IVpe 2011ARep...55...31S	Be	14.17745	60.7167	1.8			13.0 2000A&A...364L...
<input type="checkbox"/>	EM* AS 14 [FoV]	B2 1960zKry...24...160B		18.99604	59.1539	0.011	2592 (-140,+156)		
<input type="checkbox"/>	2S 0114+650 [FoV]	B1Iae 2015A&A...579A.111K	sg	19.51123	65.2916	0.007	4475 (-183,+217)		16.0 +/- 2.0 2017ApJ...844...1...
<input type="checkbox"/>	4U 0115+634 [FoV]	B0.2Ve 2001A&A...365...108N	Be	19.63319	63.7425	0.011	5787 (-453,+817)		17.5 1996MNRAS.280...
<input type="checkbox"/>	IGR J01363+6610 [FoV]	B1Ve 2005A&A...440...637R	Be	23.95772	66.212	0.007	5816 (-407,+413)		12.5 1996MNRAS.280L...31P 159.0 +/- 2.0 2010ATel.3079...1C

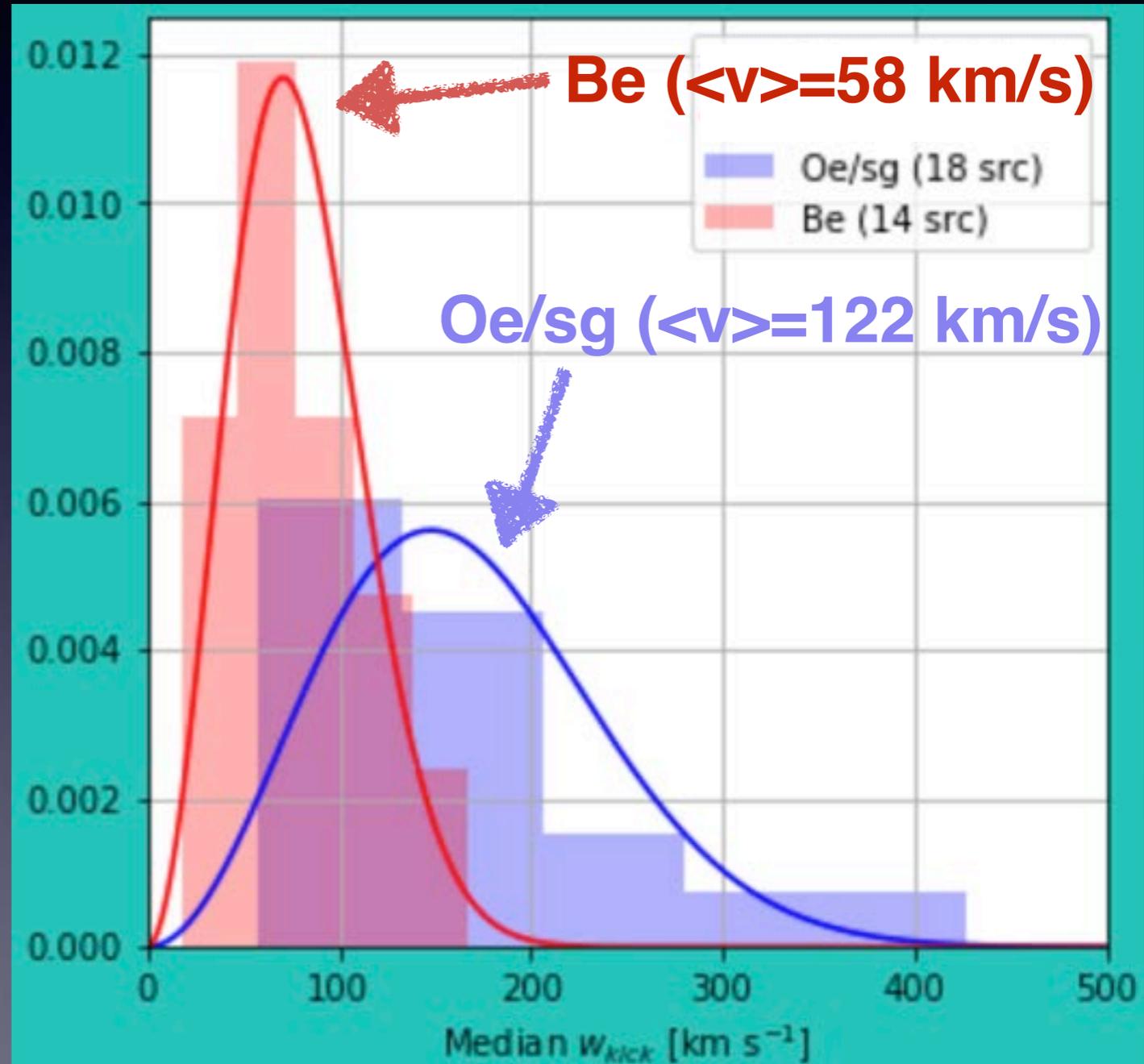


- **Un nouveau catalogue de binaires X HMXB :**
(on-line catalogue on github)

« Natal kick »

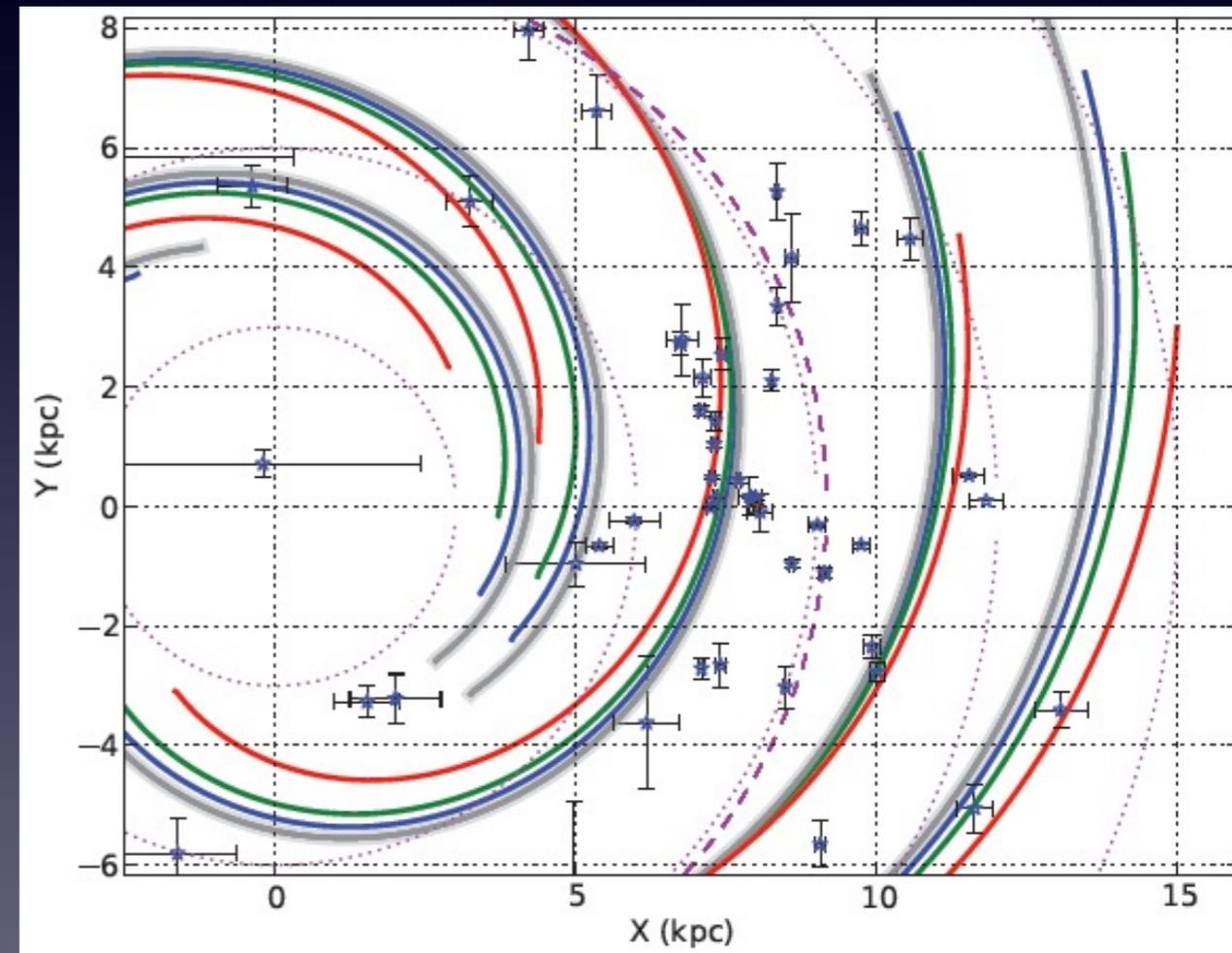
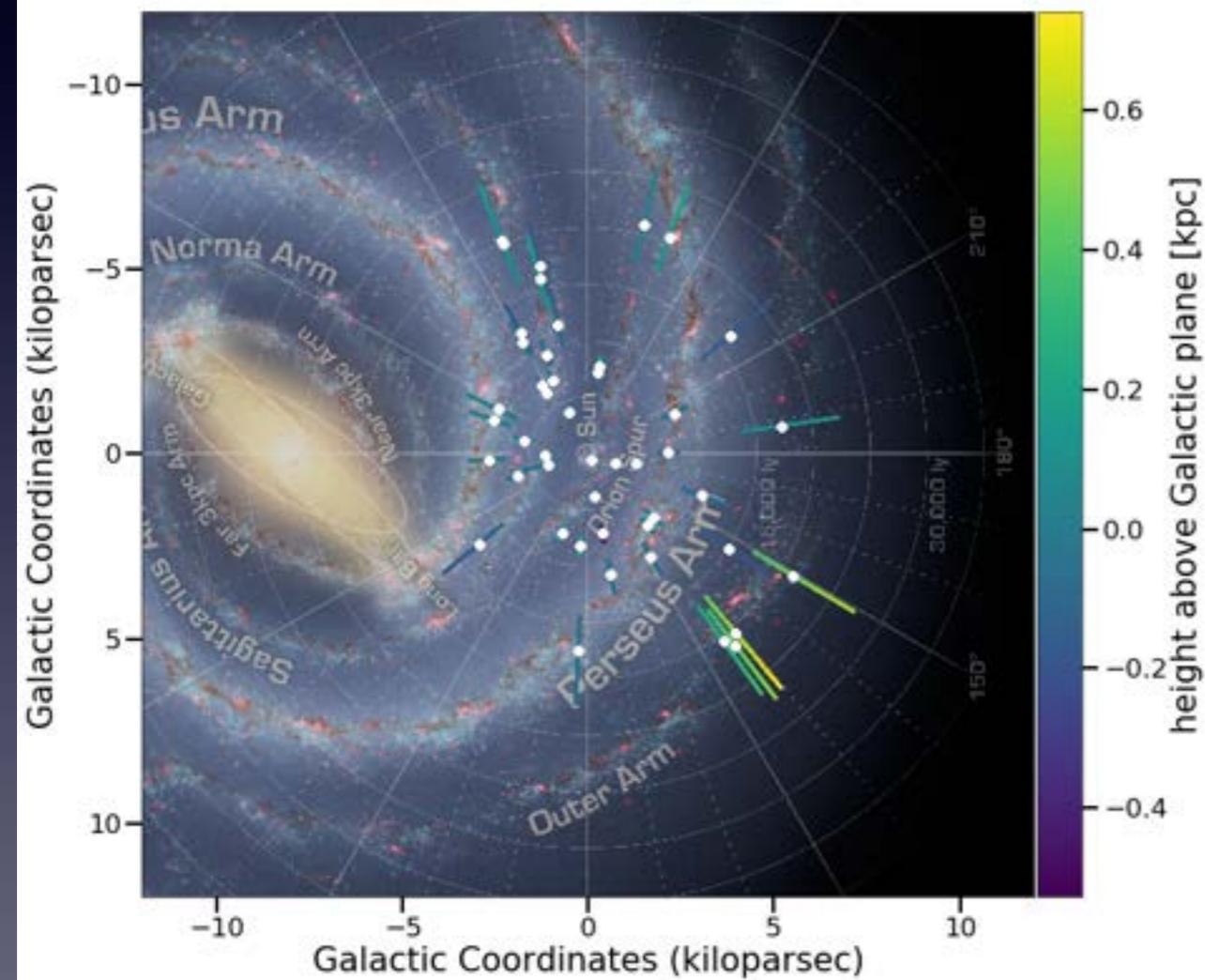


Galactic distribution of 39 NS-HMXB (Gaia DR2)

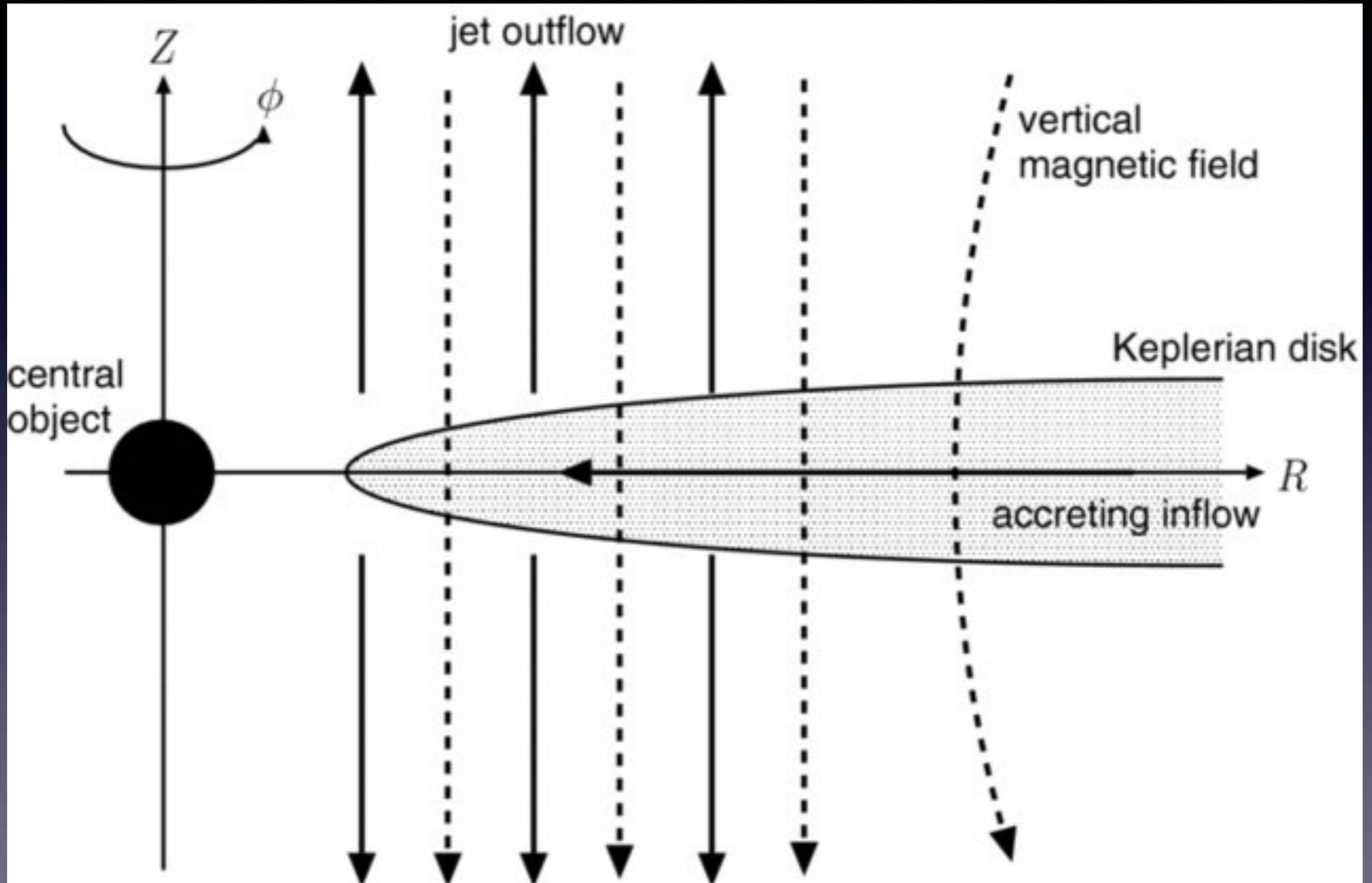


Distribution Galactique des HMXB

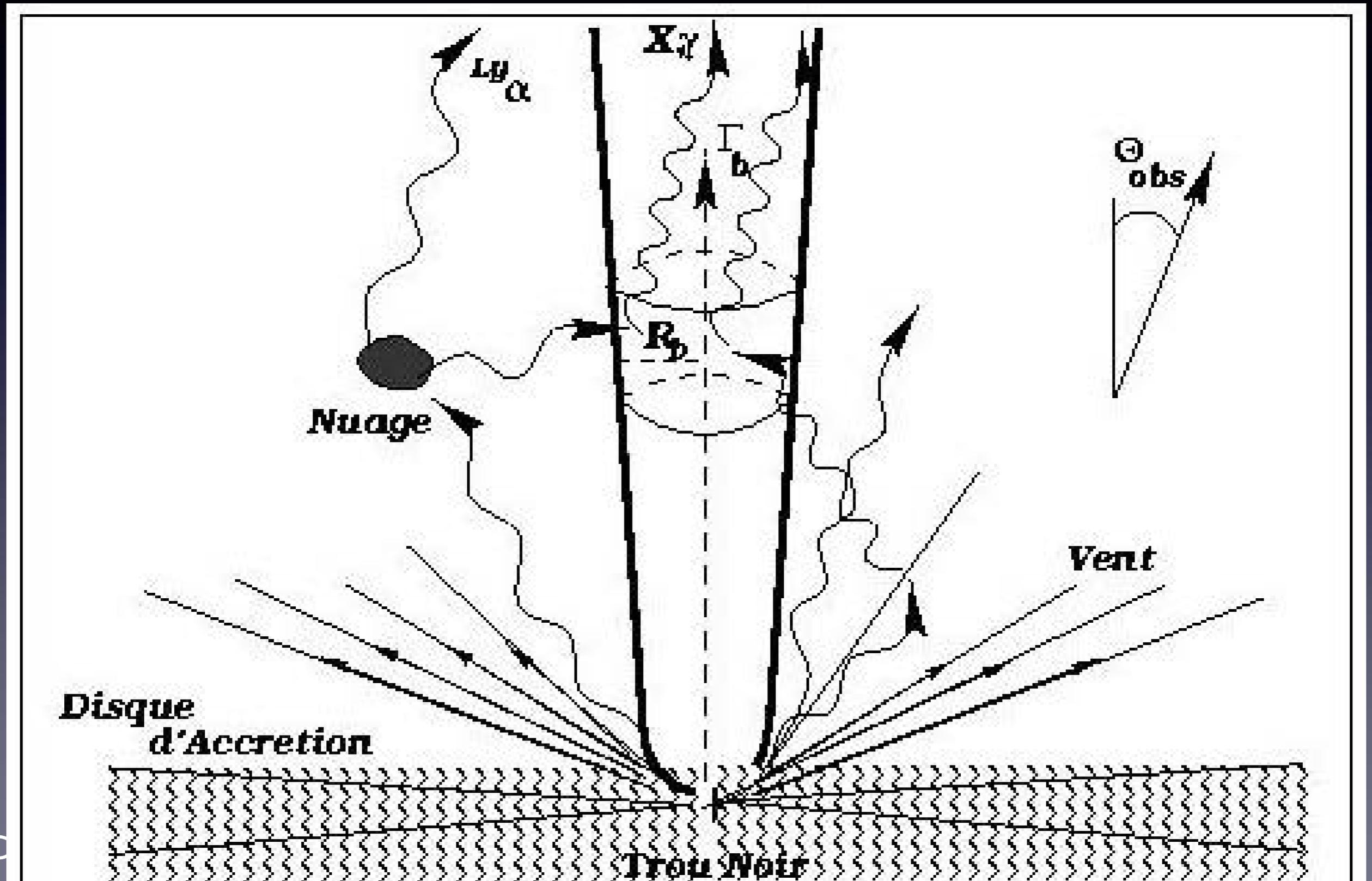
Gaia view of HMXBs in the Milky Way



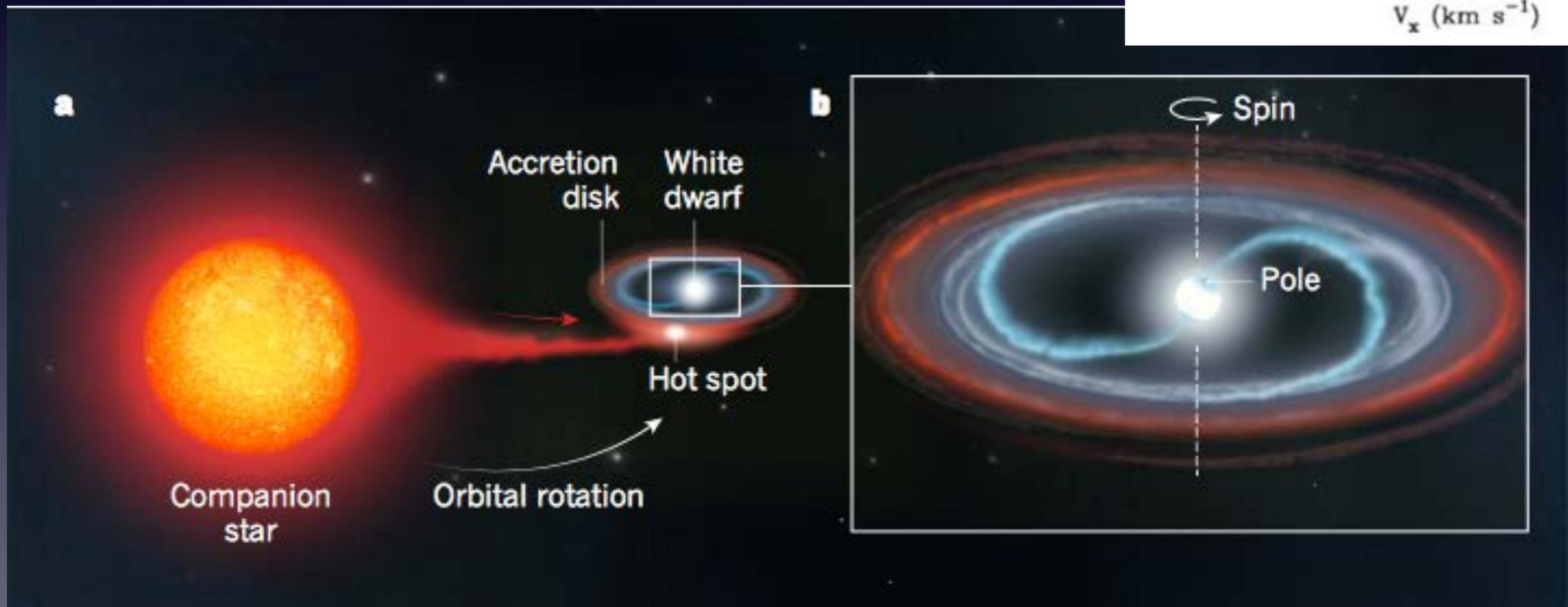
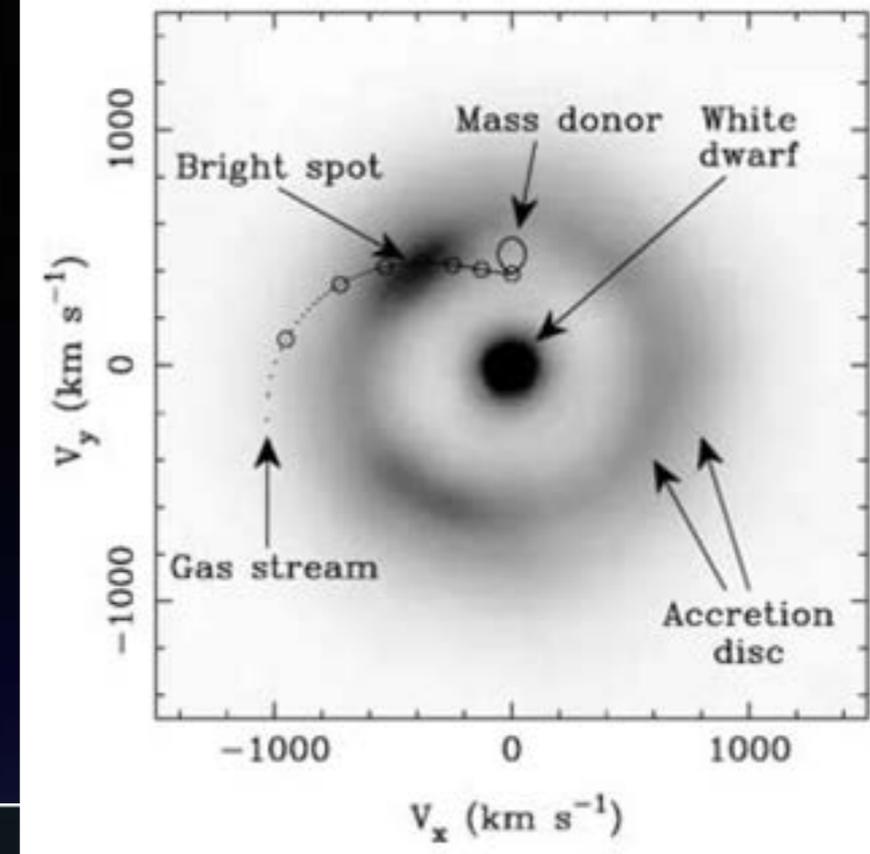
Structure d'un disque d'accrétion



Processus d'accrétion-éjection

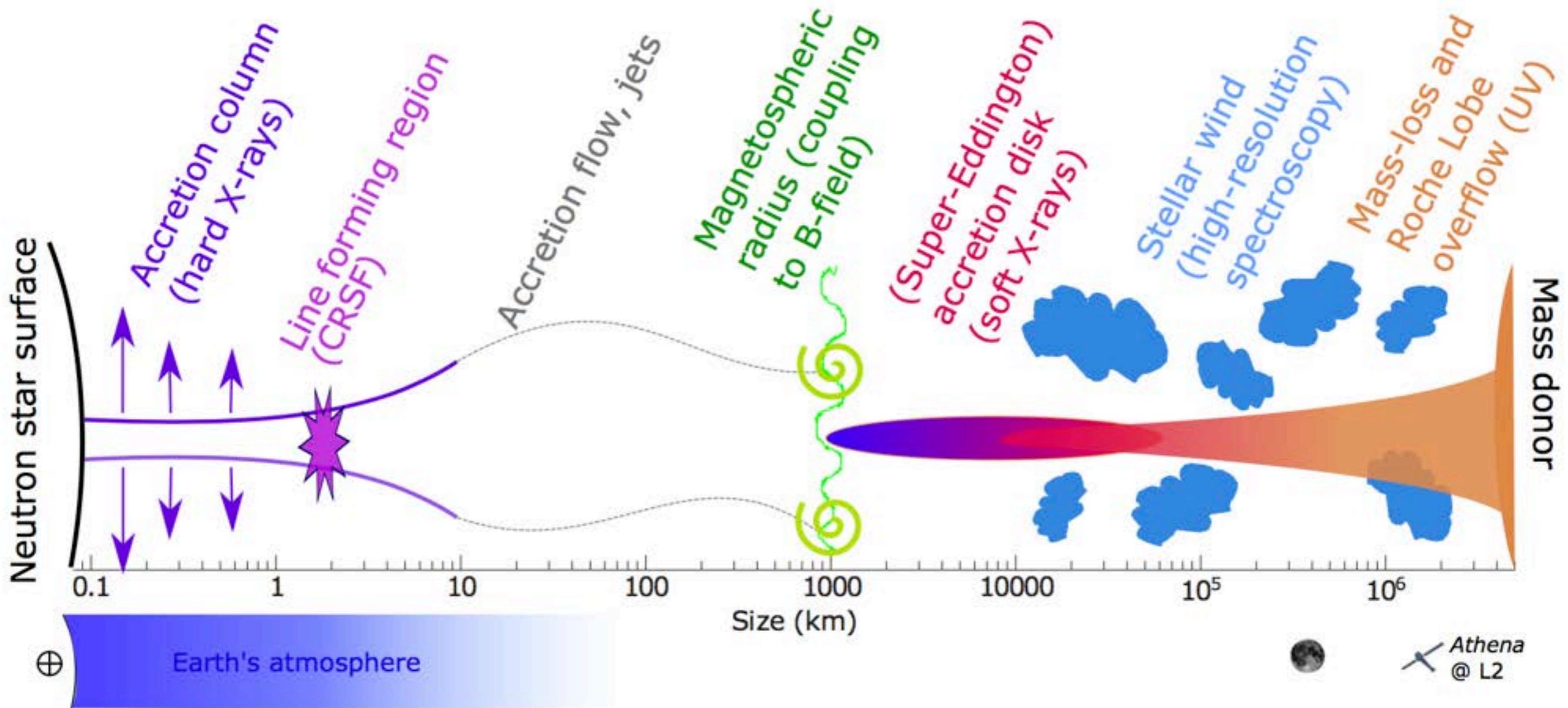


Binaire étoile - naine blanche



- Variables cataclysmiques (systèmes binaires) : étoile en orbite autour de naines blanches, avec disque d'accrétion

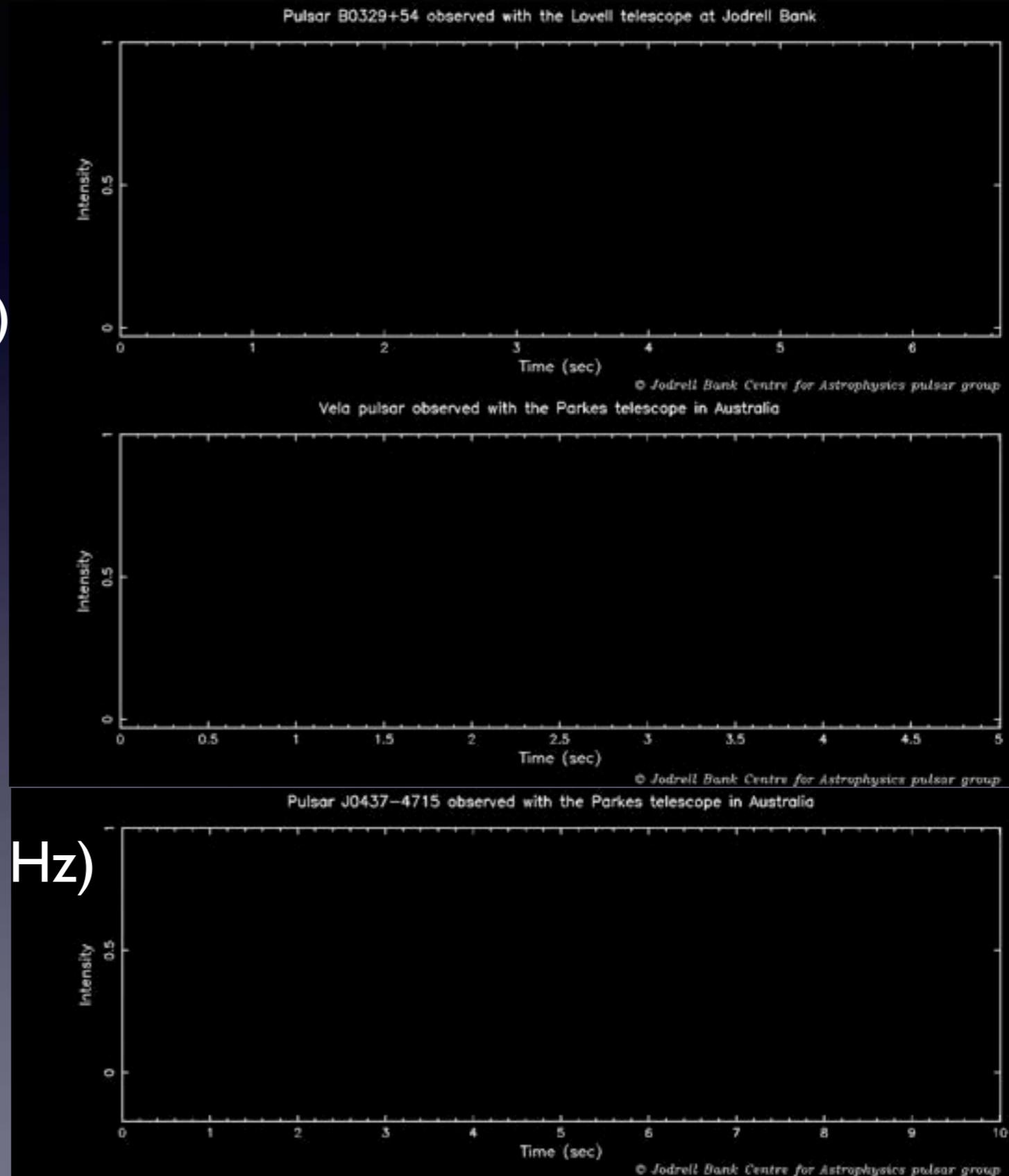
Binaire étoile - étoile à neutron



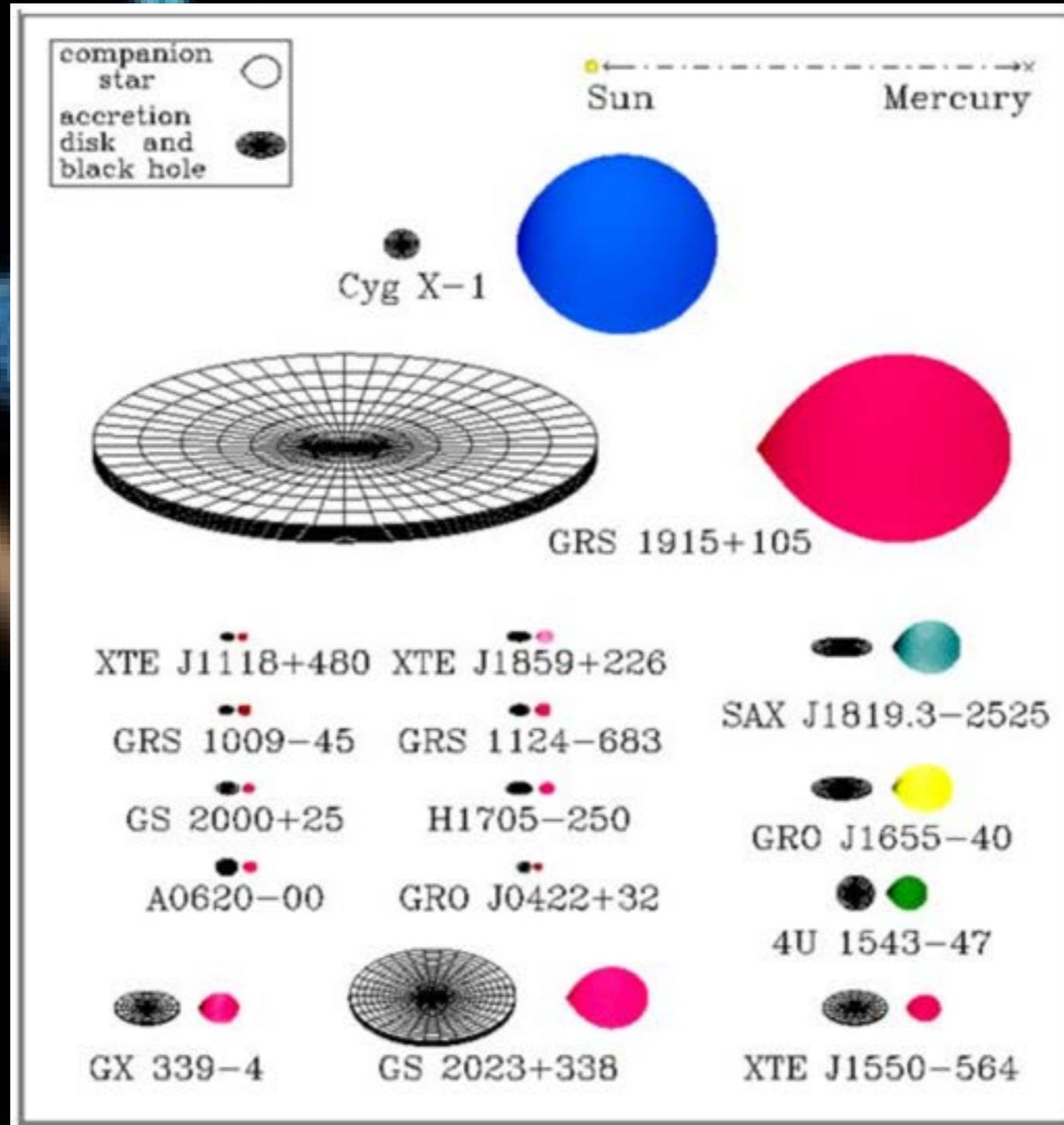
- Systèmes binaires: étoile en orbite autour d'étoiles à neutron

Écoutons les pulsars en radio

- PSR B0329+54 (1.4 Hz)
- PSR Vela (11.2 Hz)
- PSR J0437-4715 (173.7 Hz)

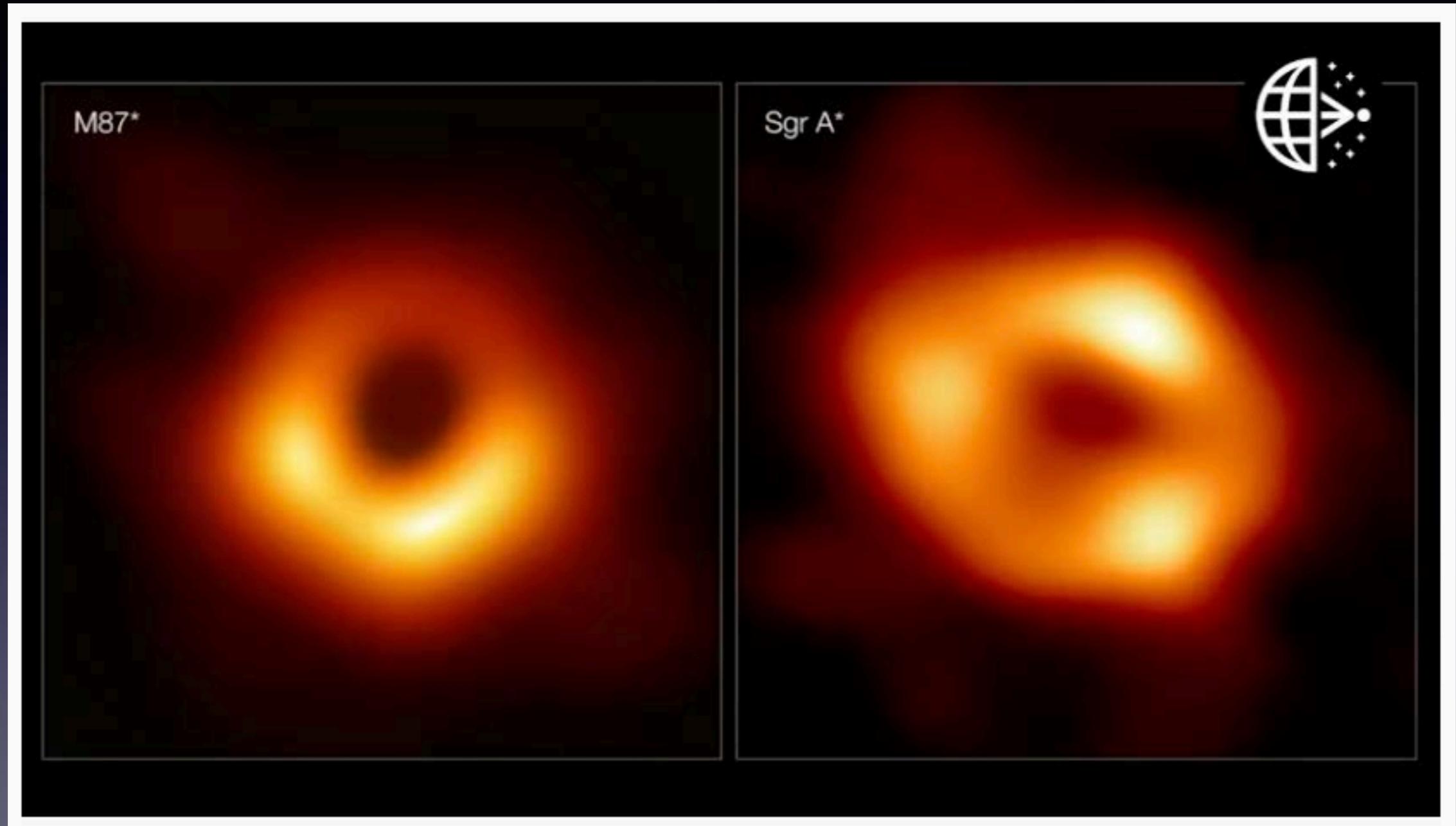


Binaire étoile - trou noir



- Systèmes binaires de faible masse: étoile en orbite autour de trous noirs (Chaty et al. 2022)

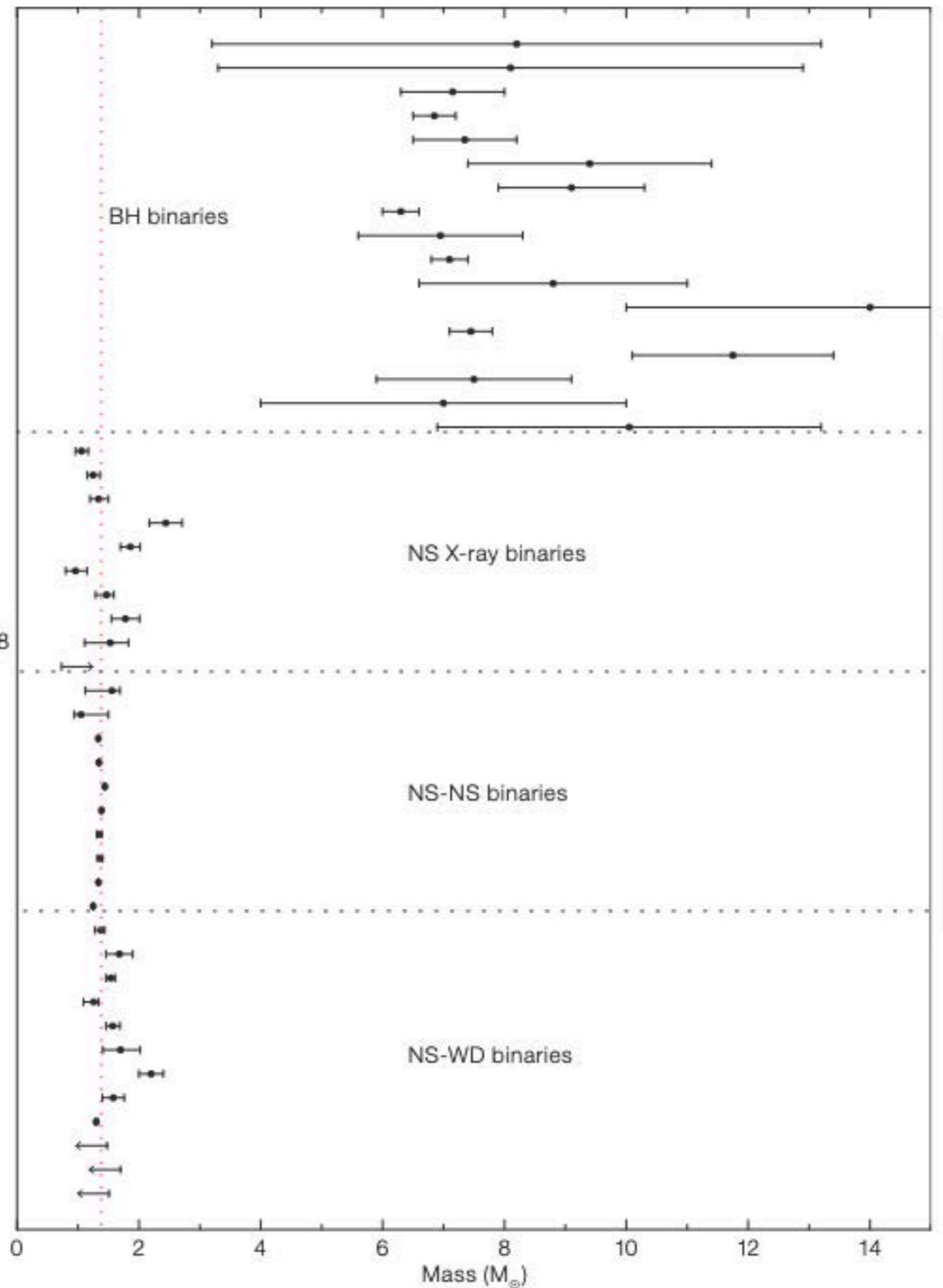
Observations de trou noir (SM) : M87* vs Sgr A*



- EHT: M87* ($6 \times 10^9 M_{\odot}$ à 55×10^6 al) / Sgr A* ($4 \times 10^6 M_{\odot}$ à 30 000 al) : taille d'anneau de photon < 50 micro-secondes d'arc

Couples stellaires

0422+32
 0620-003
 1009-45
 1118+480
 1124-684
 1543-475
 1550-564
 1655-40
 1705-250
 1819.3-2525
 1859+226
 1915+350
 2000+251
 2023+338
 LMC_X-3
 LMC_X-1
 Cyg_X-1
 SMC X-1
 LMC X-4
 Cen X-3
 4U 1700-37
 Vela X-1
 4U 1538-52
 Her X-1
 Cyg X-2
 XTE J2123-058
 2A 1822-371
 1518+49
 1518+49
 1534+12
 1534+12
 1913+16
 1913+16
 2127+11C
 2127+11C
 J0737-3039A
 J0737-3039B
 B2303+46
 J1012+5307
 J1713+0747
 B1802-07
 B1855+09
 J0621+1002
 J0751+1807
 J0437-4715
 J1141-6545
 J1045-4509
 J1804-2718
 J2019+2425



Digression : masse des trous noirs

**Les trous noirs
stellaires de la Voie
lactée ont une
masse:
 $5 \leq M_{\text{BH}} \leq 21 M_{\odot}$**

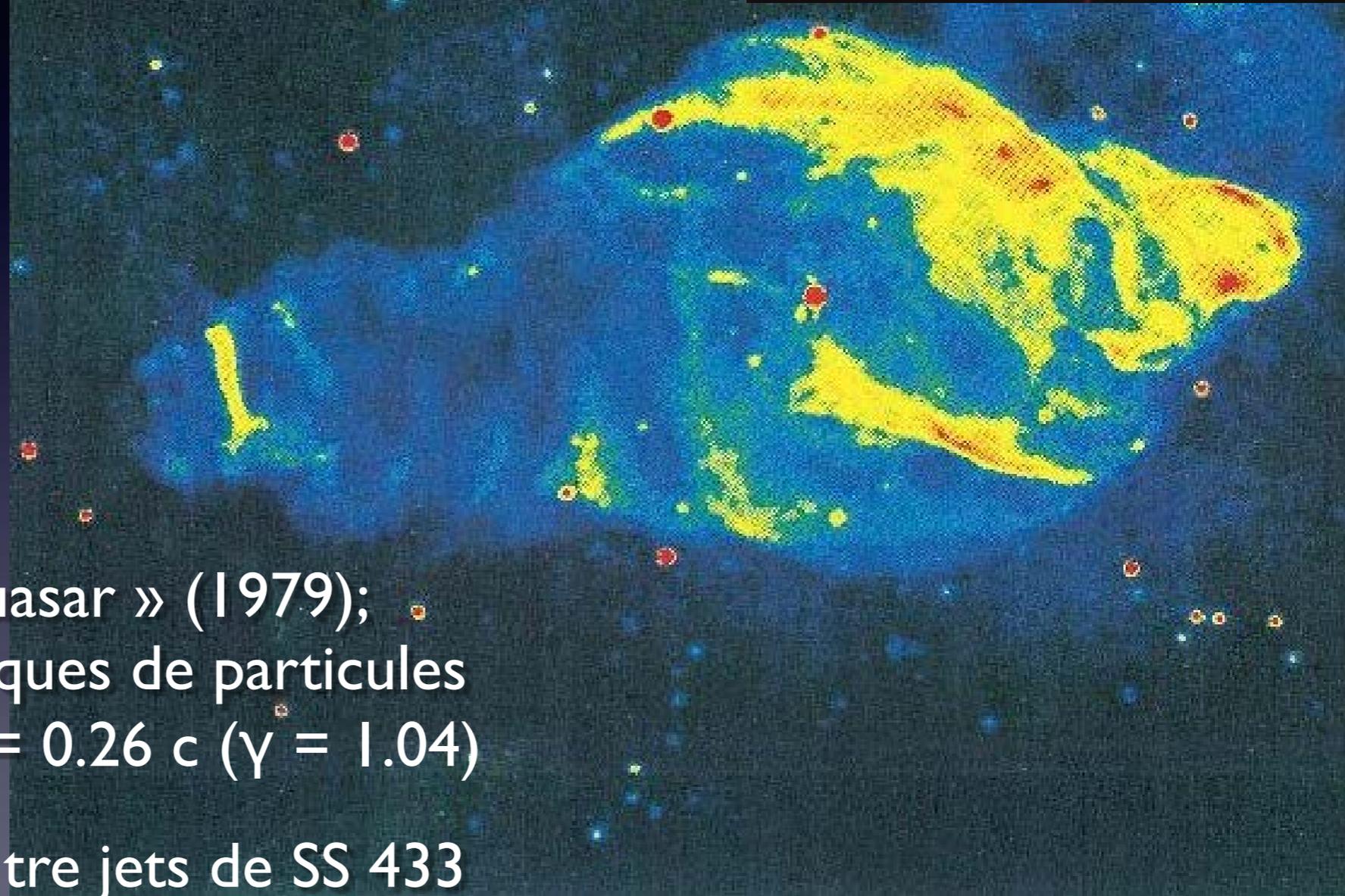
Name	BH mass [M_{\odot}]	BH spin
M33 X-7	$15.65^{+1.45}_{-1.45}$	$0.84^{+0.05}_{-0.05}$
Cygnus X-1	$21.20^{+2.20}_{-2.20}$	> 0.983
LMC X-1	$10.90^{+1.40}_{-1.40}$	$0.92^{+0.05a}_{-0.07}$
Swift J1357.2-0933	> 8.9	—
XTE J1650-500	< 7.3	$0.79^{+0.01}_{-0.01}$
XTE J1118+480	$7.55^{+0.65}_{-0.65}$	—
XTE J1859+226 (V406 Vul)	> 5.42	—
SAX J1819.3-2525 (V4641 Sgr)	$6.40^{+0.60}_{-0.60}$	—
XTE J1550-564	$11.70^{+3.89}_{-3.89}$	$0.34^{+0.37b}_{-0.45}$
GRO J1655-40 (N. Sco 94)	$6.00^{+0.40}_{-0.40}$	$0.70^{+0.10c}_{-0.10}$
GRS 1009-45 (N. Vel 93)	> 4.4	—
GRS 1915+105	$12.00^{+2.00}_{-2.00}$	$0.88^{+0.06d}_{-0.13}$
GRO J0422+32	$8.50^{+6.50}_{-6.50}$	—
GRS 1124-684 (N. Mus 91)	$5.65^{+1.85}_{-1.85}$	$0.63^{+0.16}_{-0.19}$
GS 2023+338 (V404 Cyg)	$9.00^{+0.20}_{-0.60}$	> 0.92
GS 2000+251 (QZ Vul)	$7.15^{+1.65}_{-1.65}$	—
GS 1354-64 (BW Cir)	> 6.9	> 0.98
H 1705-250 (N. Oph 77)	$6.40^{+1.50}_{-1.50}$	—
3A0620-003	$6.60^{+0.30}_{-0.30}$	$0.12^{+0.19}_{-0.19}$
1H J1659-487 (GX 339-4)	> 6.0	> 0.95
4U 1543-475 (IL Lup)	$9.40^{+1.00}_{-1.00}$	$0.67^{+0.15e}_{-0.08}$
GRS 1716-249	$6.45^{+1.55}_{-1.55}$	> 0.92
LMC X-3	$6.98^{+0.56}_{-0.56}$	$0.25^{+0.20}_{-0.29}$
XTE J1652-453	—	$0.45^{+0.02}_{-0.02}$
XTE J1752-223	—	$0.92^{+0.06}_{-0.06}$
Swift J1910.2-0546	—	> 0.32
MAXI J1836-194	—	$0.88^{+0.03}_{-0.03}$
XTE J1908+094	—	$0.75^{+0.09}_{-0.09}$
Swift J1753.5-0127	—	$0.76^{+0.11}_{-0.15}$
4U 1630-472	—	> 0.97
SAX J1711.6-3808	—	$0.60^{+0.20}_{-0.40}$
EXO 1846-031	—	> 0.99



Cyg X-1

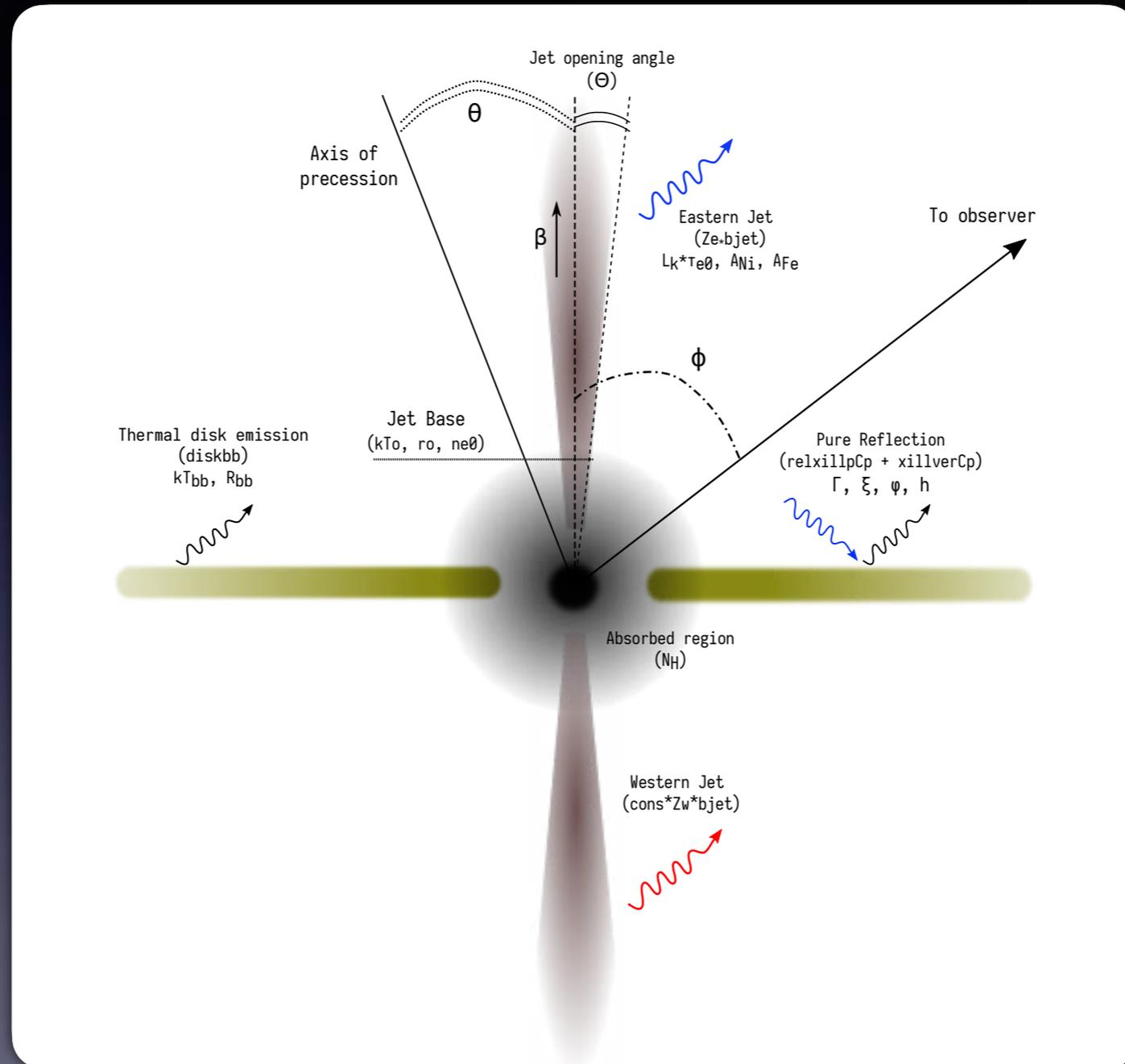
R. Hynes 2000

Microquasar SS 433



- 1er « microquasar » (1979);
2 jets symétriques de particules relativistes, $v = 0.26 c$ ($\gamma = 1.04$)
- Interaction entre jets de SS 433 et reste de SN:W 50 (éjections balistiques, collisions relativistes)

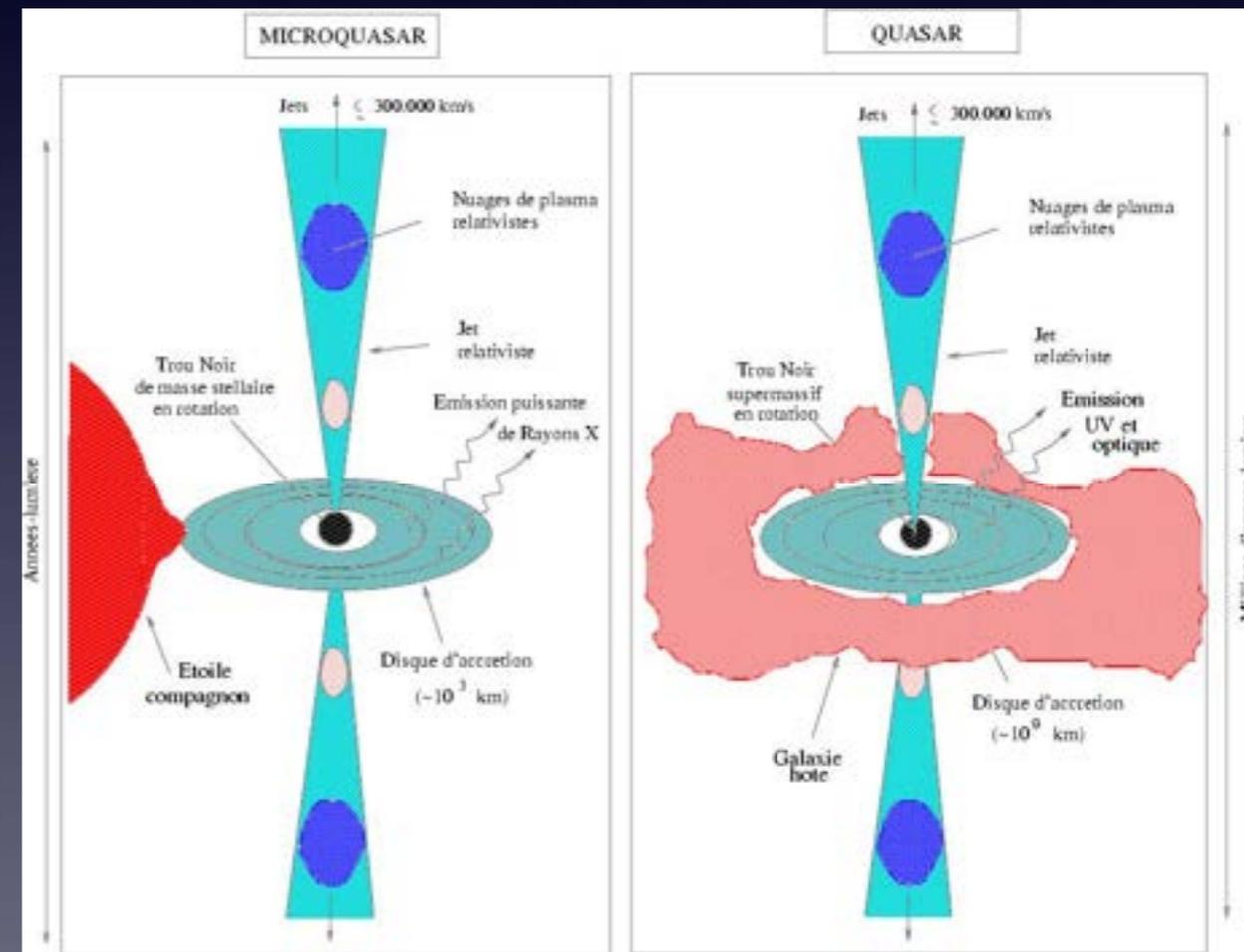
Microquasar SS 433



- Etude en rayons X avec *NuSTAR* du microquasar SS 433 : contraindre les paramètres géométriques du système

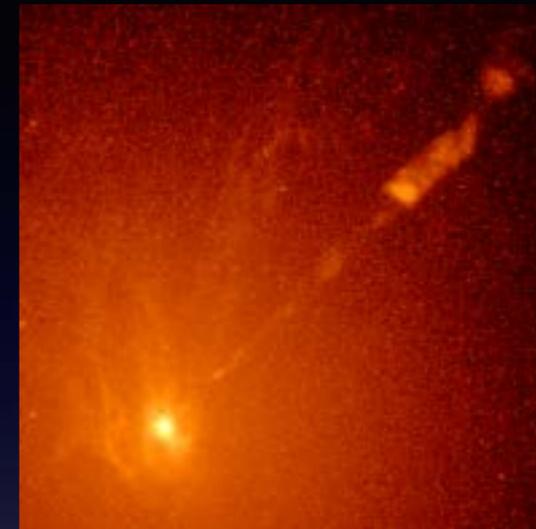
Analogie quasars/ microquasars

- Différence de masse et de taille entre quasars et microquasars
- 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

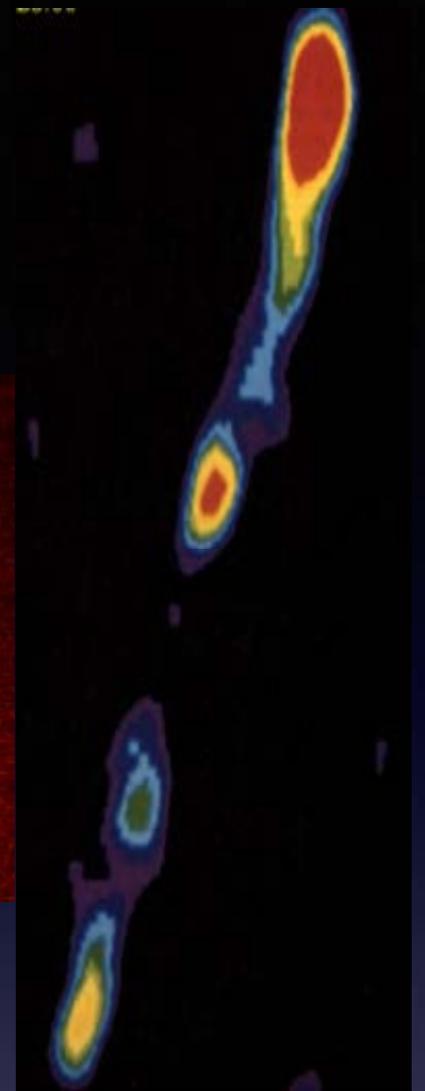


Ejection de matière: microquasars/quasars

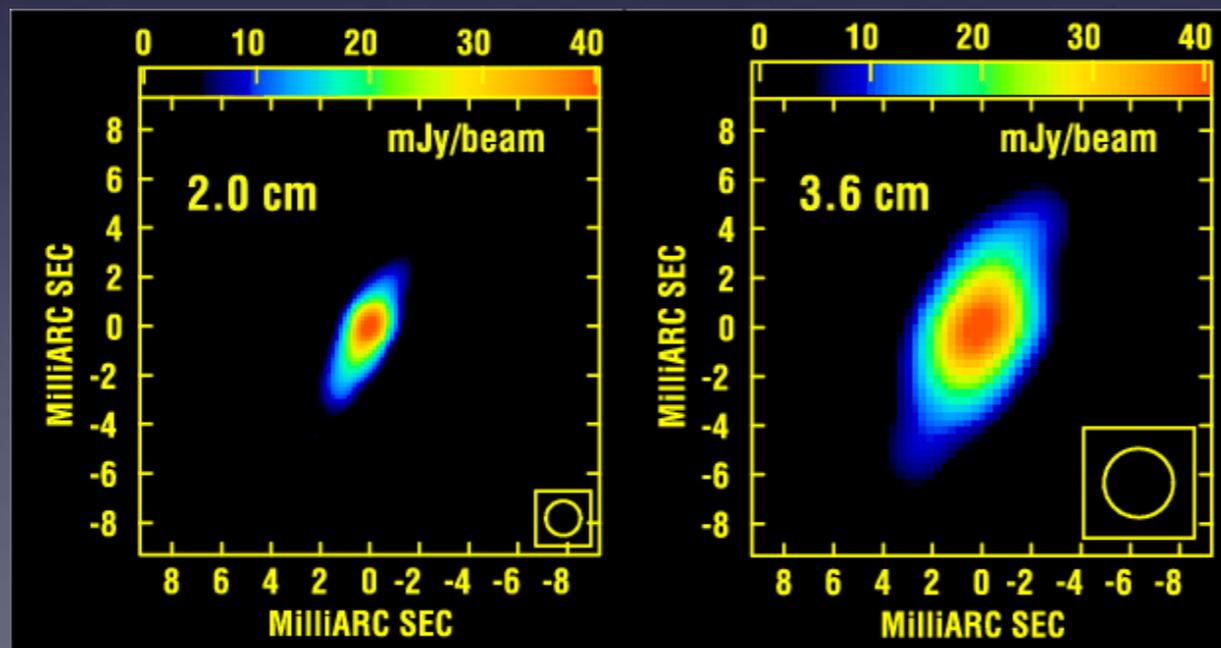
- Jets collimatés sur qq a.l. (microquasars)
vs 100 000 a.l. (quasars)



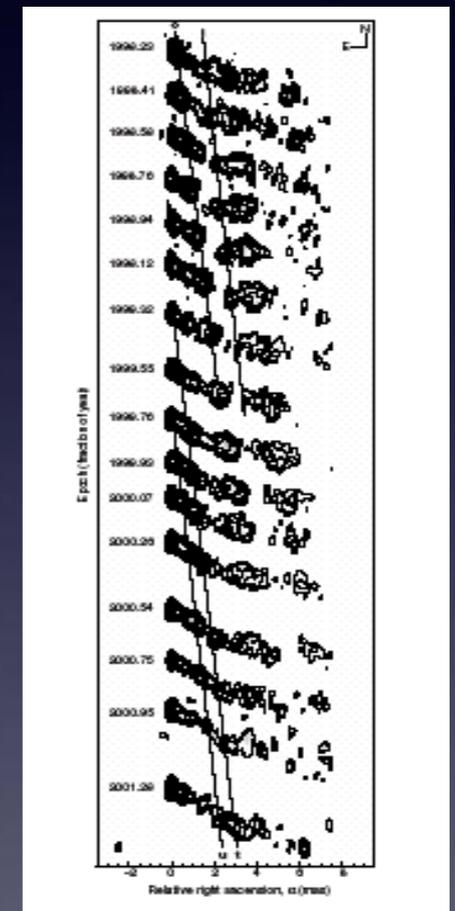
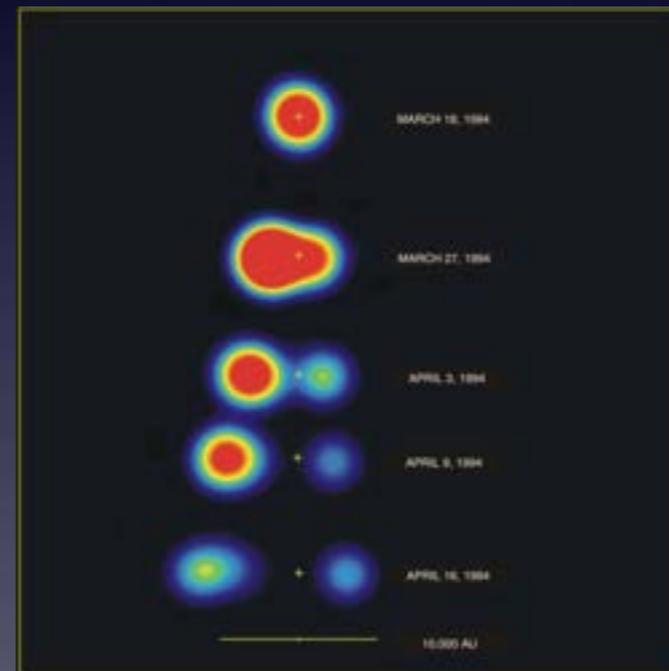
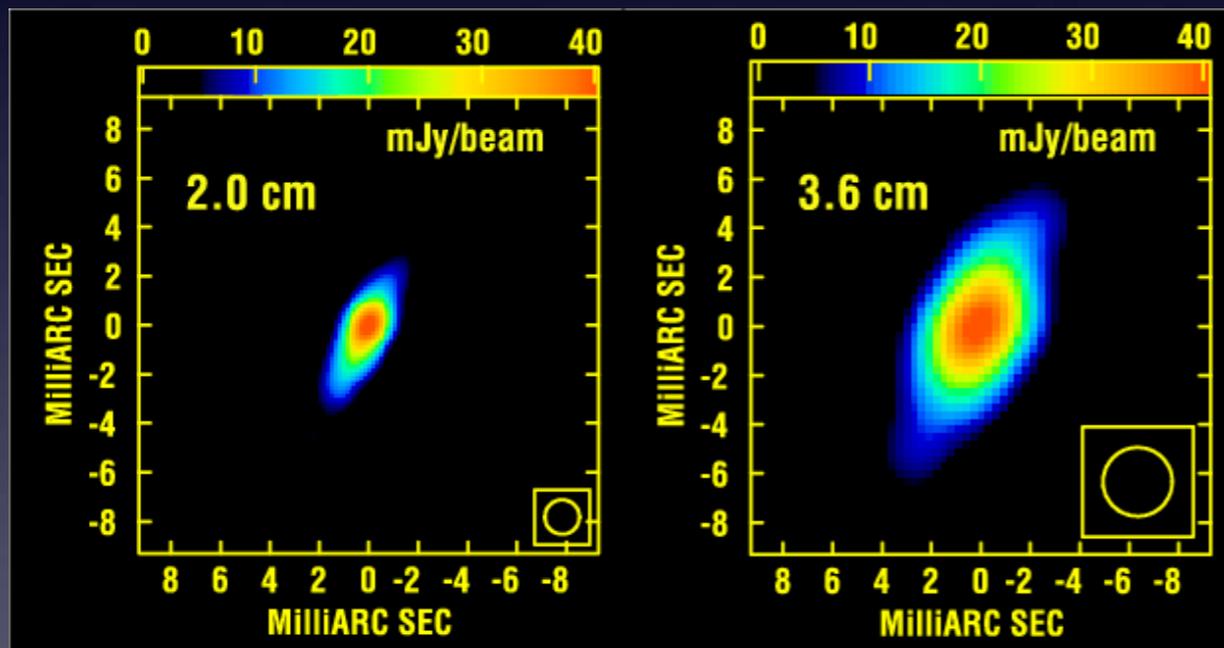
M87



IE 1740.7-2942



Microquasars



3C120 observée sur 3 ans
Marscher et al. 2002

- 1 mas représente 10 ua.

GRS 1915+105 observée sur 1 heure / 1mois

Jets relativistes

Source	Objet compact	$V_{app}^{(2)}$	$V_{int}^{(3)}$	$\Theta^{(4)}$
GRS 1915+105	trou noir	1.2c-1.7c	0.92c-0.98c	66°-70°
GRO J1655-40	trou noir	1.1c	0.92c	72°-85°
XTE J1748-288	trou noir	0.9c-1.5c	>0.9c	
SS 433	étoile à neutron ?	0.26c	0.26c	79°
Cygnus X-3	étoile à neutron ?	~0.3c	~0.3c	>70°
CI Cam	étoile à neutron ?	~0.15c	~0.15c	>70°
Circinus X-1	étoile à neutron	≥0.1c	≥0.1c	>70°
1E1740.7-2942	trou noir			
GRS 1758-258	trou noir			
Sgr A*	trou noir			

(2) V_{app} vitesse apparente de la composante la plus rapide de l'éjecta.

(3) V_{int} vitesse intrinsèque de l'éjecta.

(4) Θ angle entre la direction du mouvement et la ligne de visée.

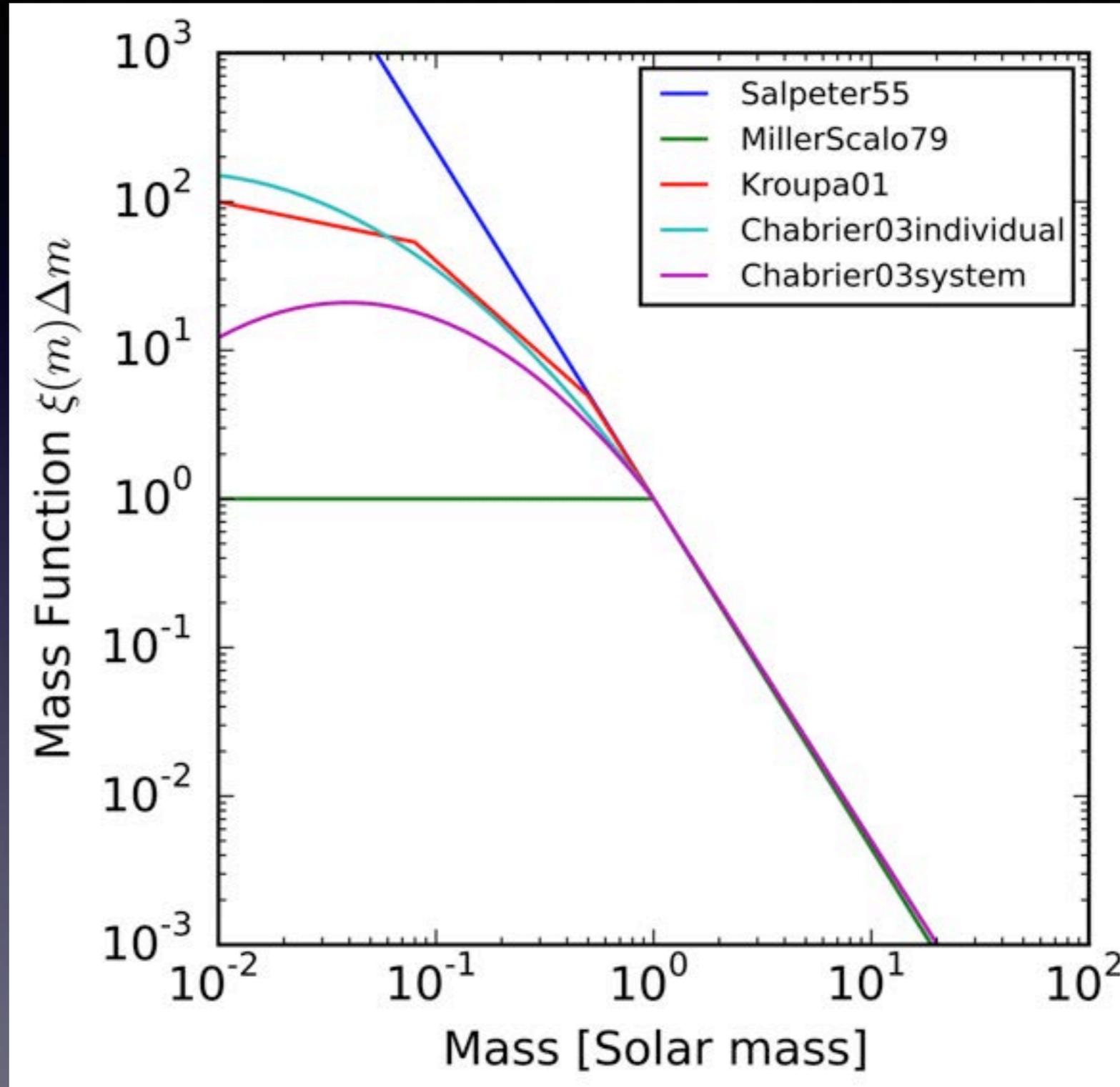
Objet	V_{jet}	$V_{jet}/V_{Liberation}$	Exemple
Etoiles jeunes	100-350 km/s	~ 1	HH30, HH34
Sources X supersoft	800 - 5500 km/s	~ 1	RX J0925-4758
Binaires X (étoiles à neutron)	~ 0.3c	~ 1	SS 433, Cyg X-3
Trous noirs transitoires	~ 0.9c	~ 1	GRO 1655-40 GRS 1915+105
Noyaux actifs de galaxies	$\gamma \geq 3$	~ 1	M87



Acte IV

Le début de la fin

Digression : masse des étoiles



- Relativement peu d'étoiles de grande masse

Les premiers doutes

Stars around the same mass as the Sun



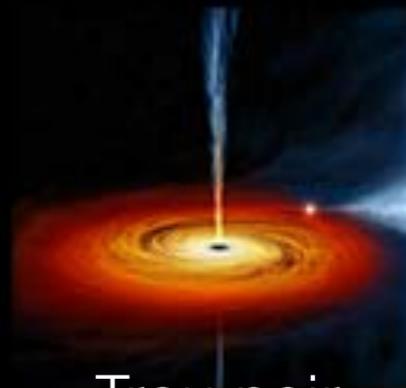
Naine blanche

Stars with 4-8 times the mass of the Sun



Etoile à neutron

Stars with more than 8 times the mass of the Sun



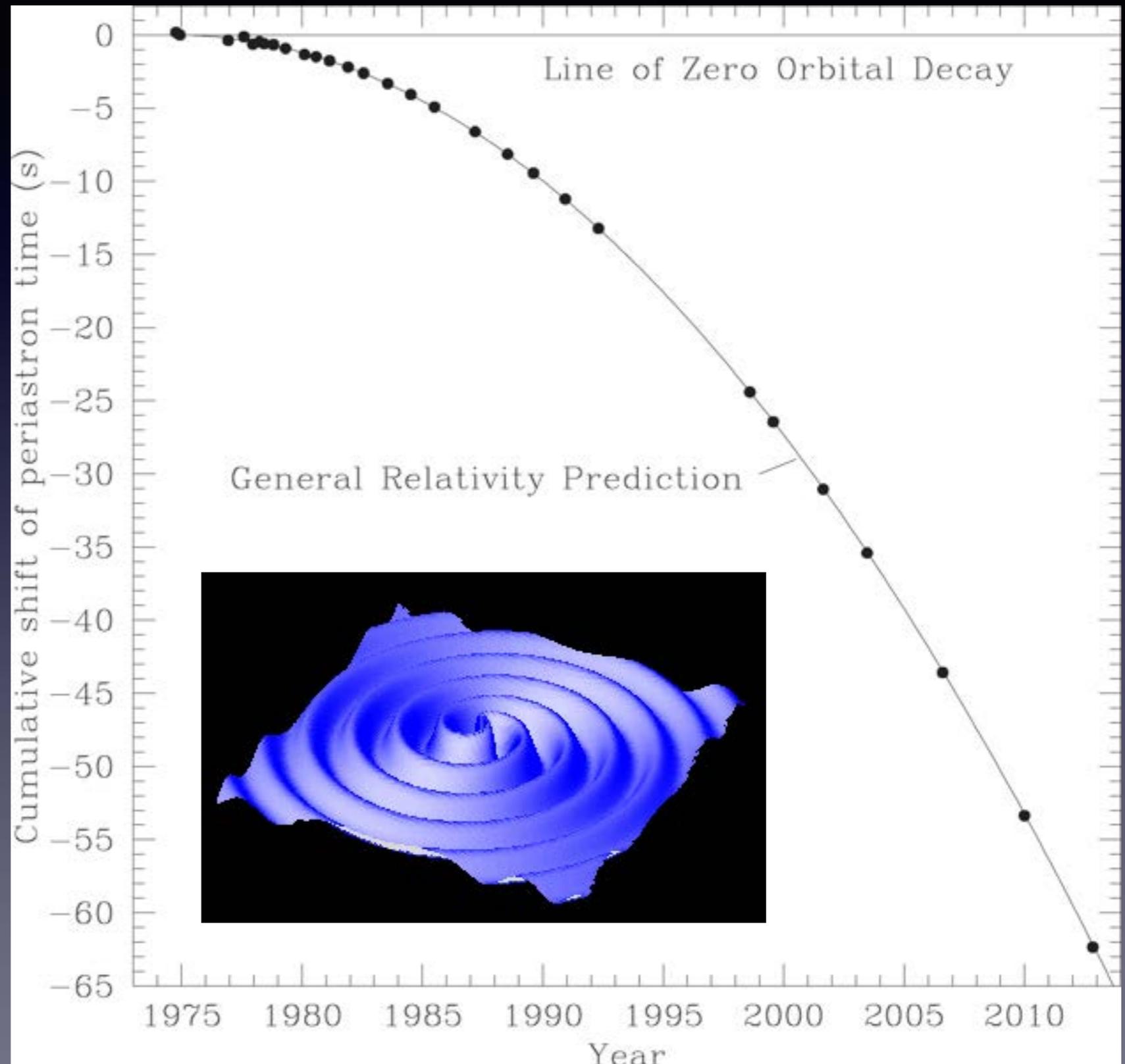
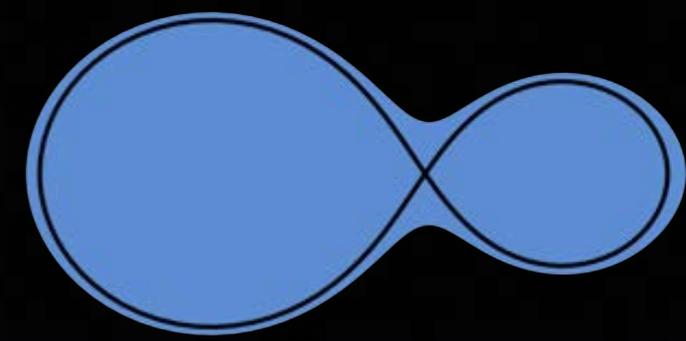
Trou noir

Noces d'or

PSR B1913+16
(pulsar binaire)

$\Delta a = -3$ mm/orbite,
 ~ 3.5 m/an
(Terre-Soleil: 1fm)

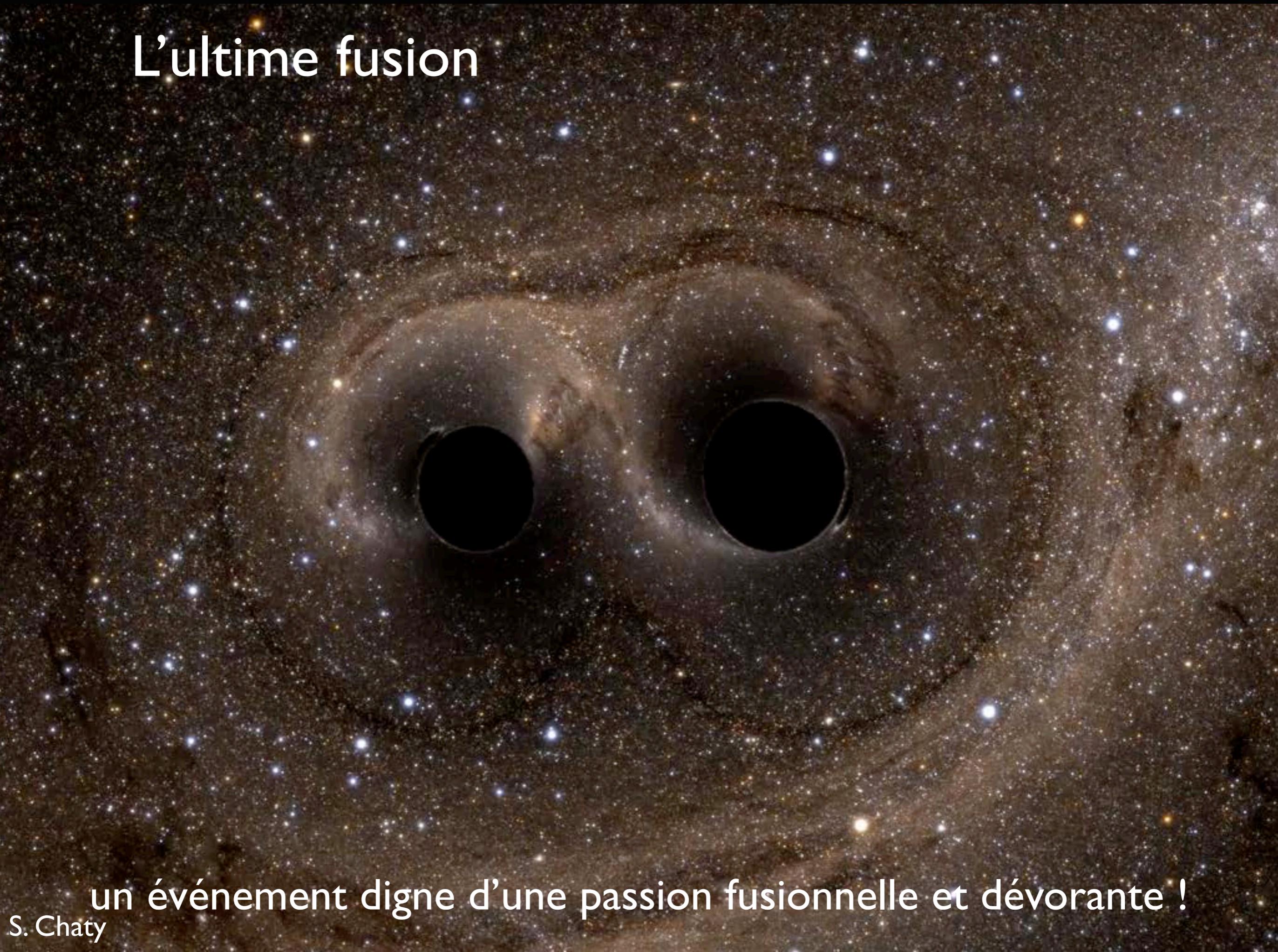
Fusion ~ 300 Mans



The background is a deep blue, star-filled sky. A large, dark, circular area is centered in the frame, containing the text. The text is white and reads "Acte V" on the top line and "La fusion ultime!" on the bottom line. The stars are of various colors, including white, yellow, and blue, and are scattered across the entire field of view.

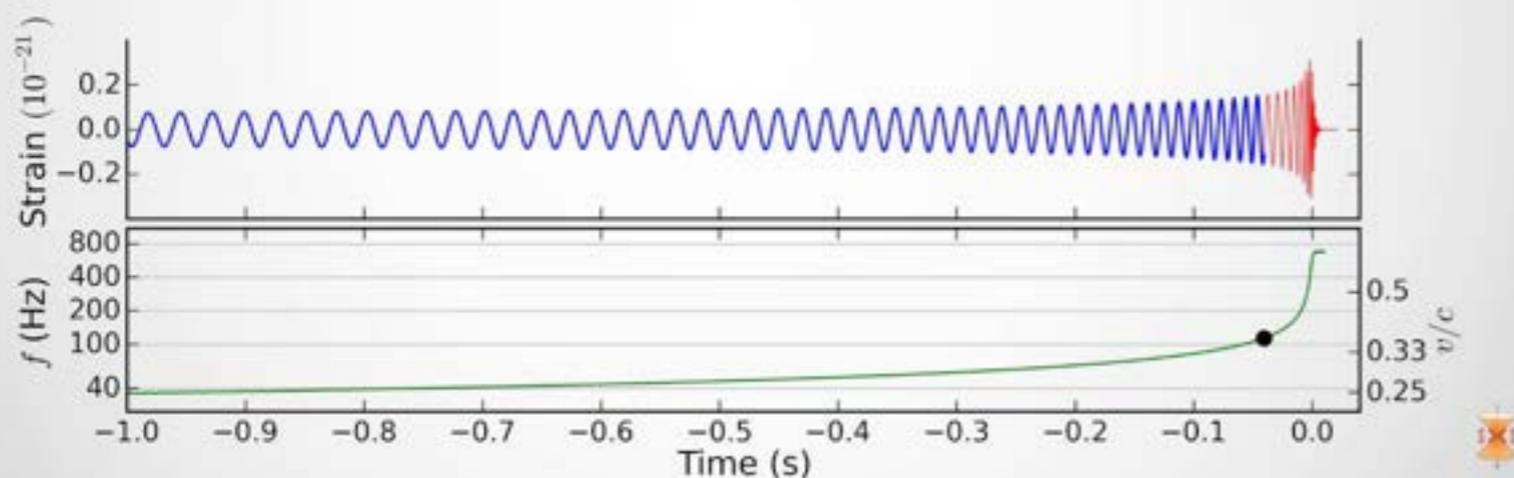
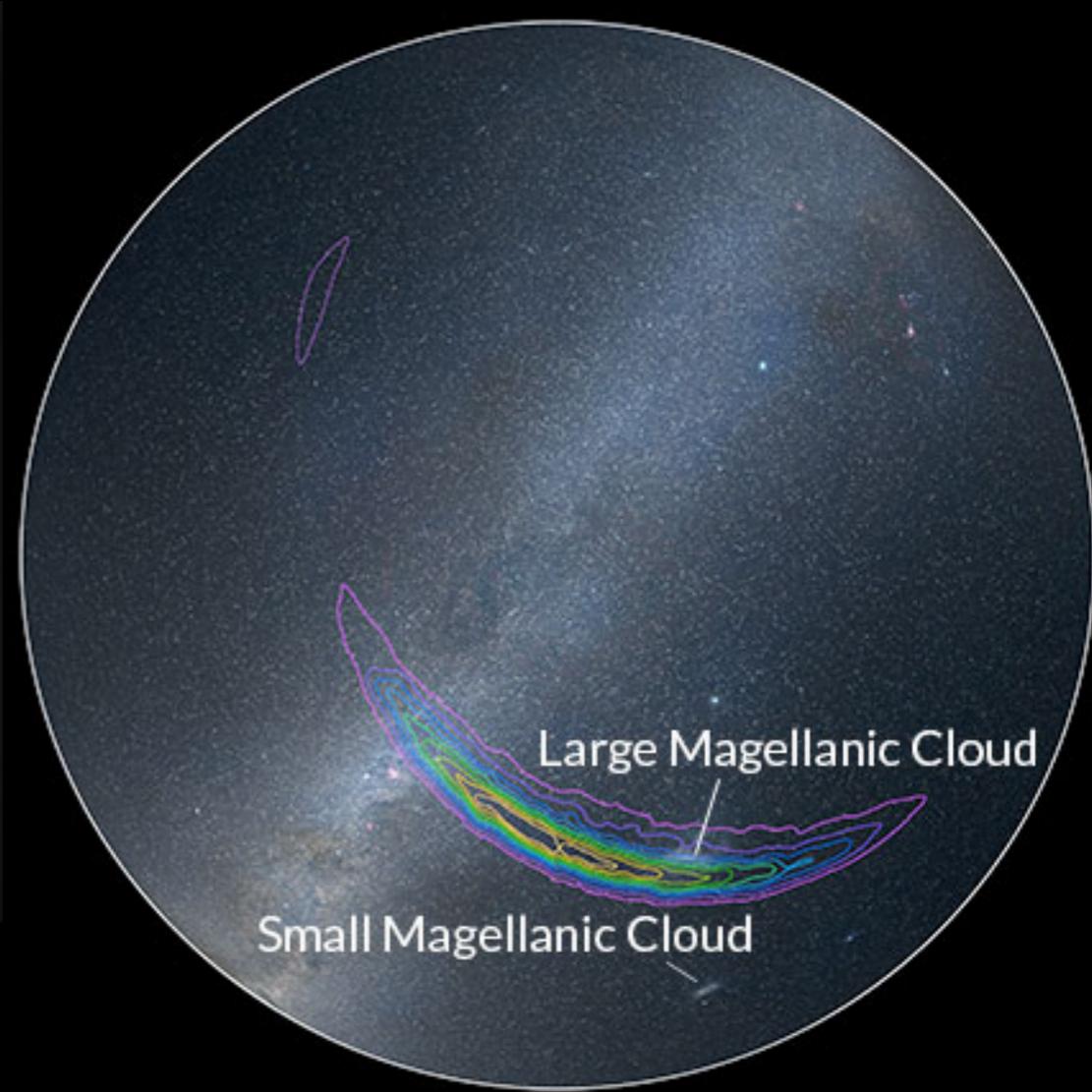
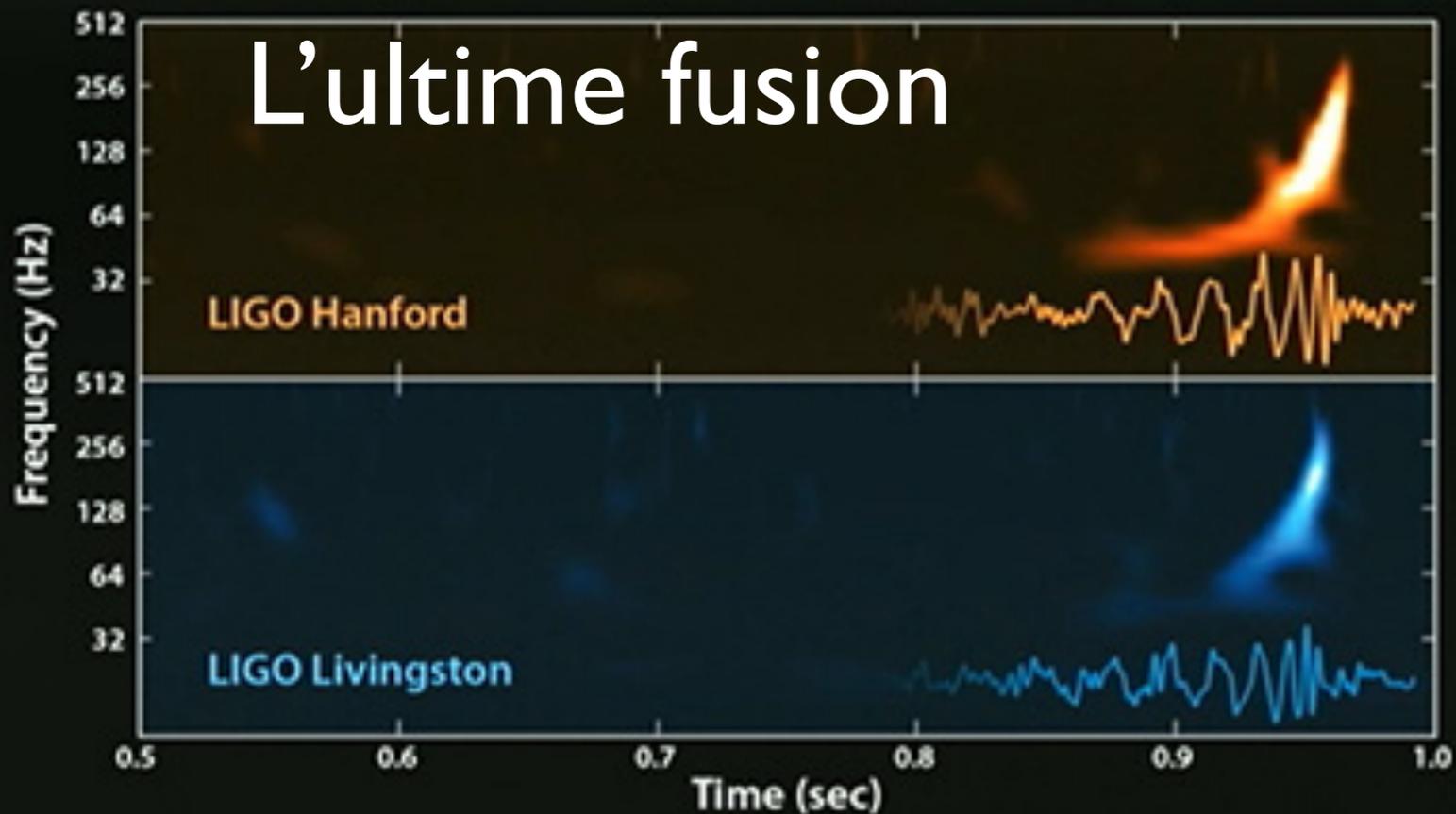
Acte V
La fusion ultime!

L'ultime fusion



un événement digne d'une passion fusionnelle et dévorante !

L'ultime fusion



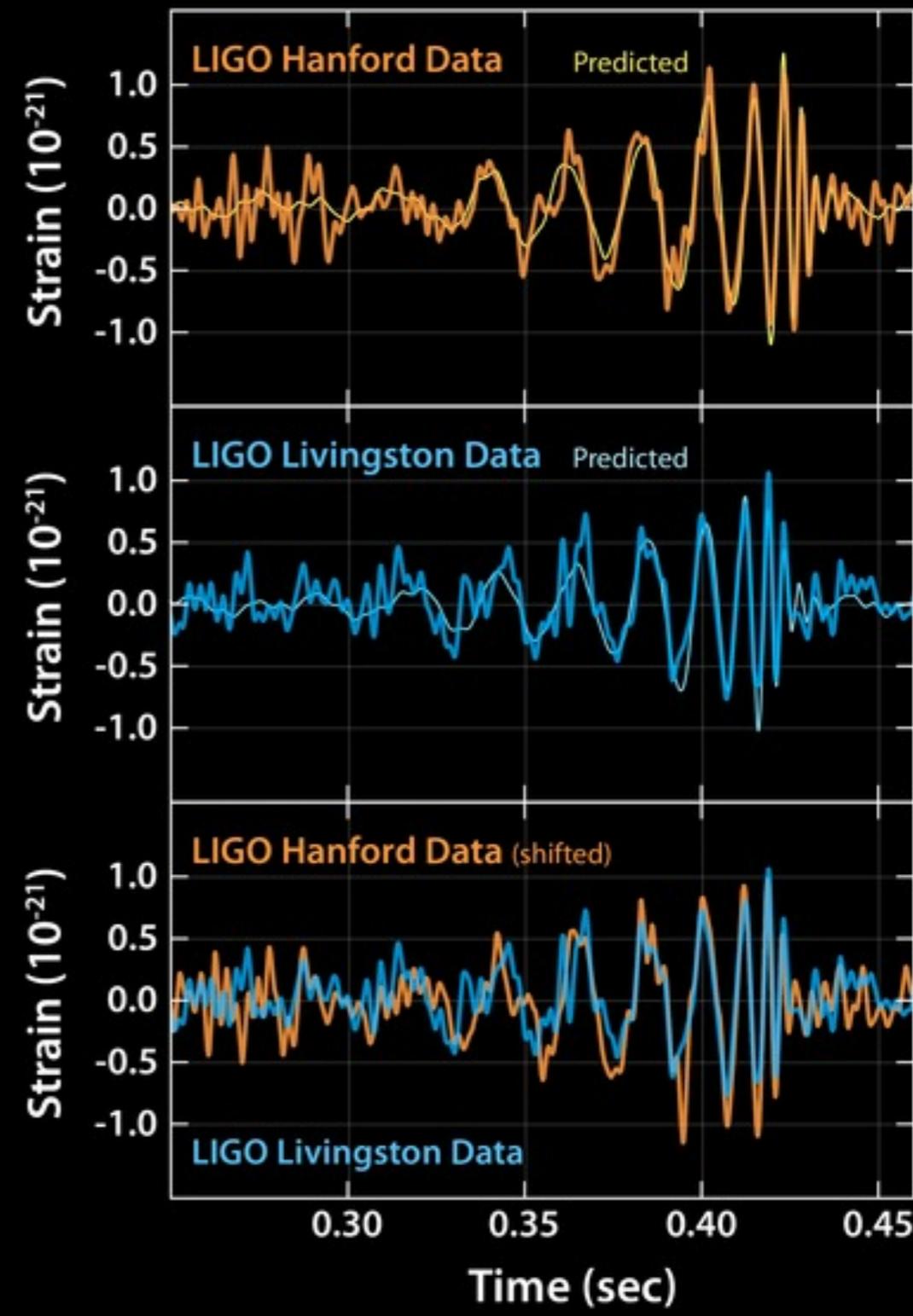
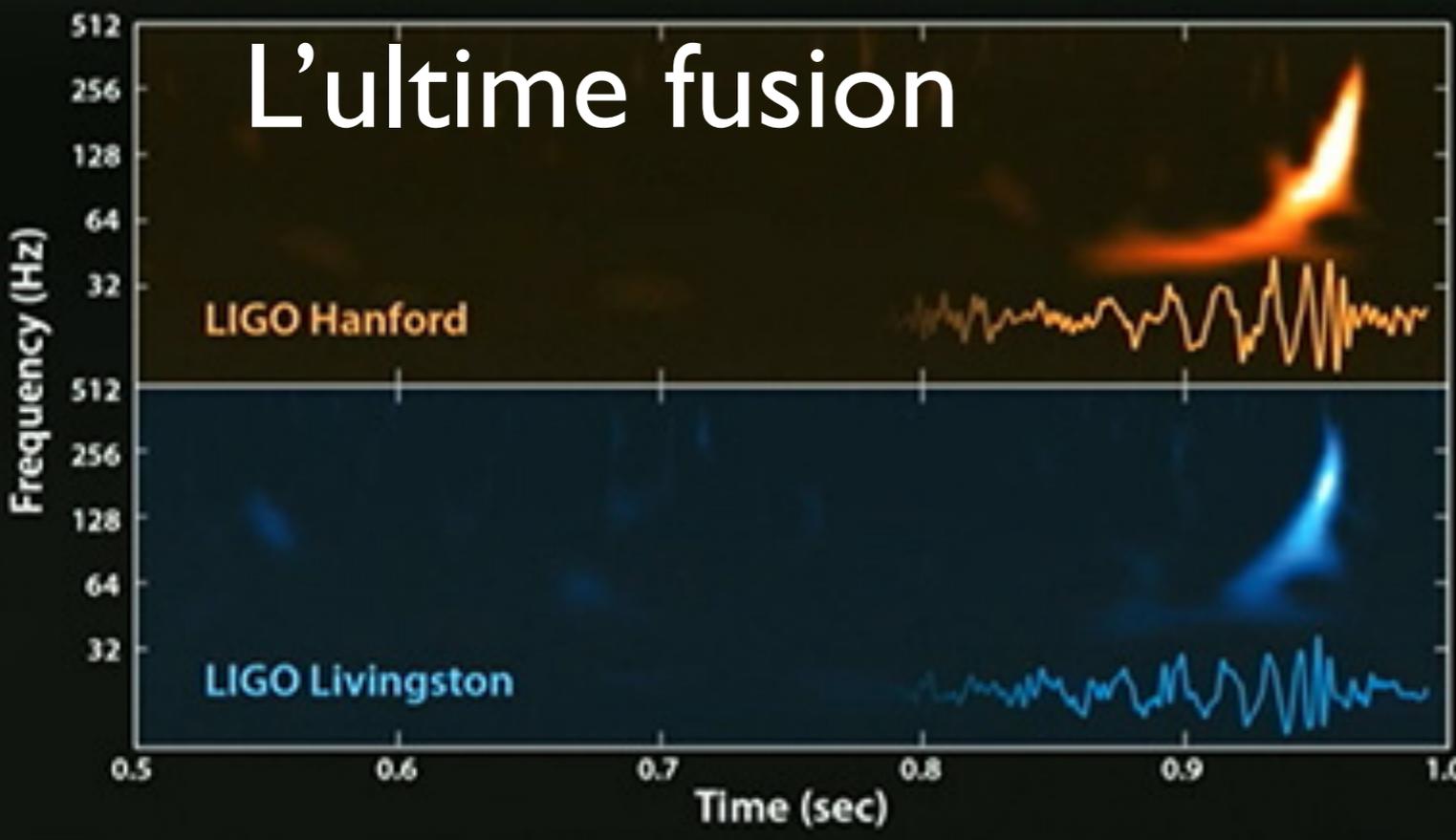
2 BH $R_s=90\text{km}$, $a=350\text{km}$, 75 orbites/s, collision à la moitié de la vitesse de la lumière!

GW150914: Un couple de trous noirs ($36 + 29 M_{\odot} \Rightarrow 62 M_{\odot}$) $D= 1 \text{ Gal}$

$3 M_{\odot}$ converties en ondes gravitationnelles ($E=mc^2$)

Dans la dernière seconde avant la fusion, $L_{\text{GW}} > L^*$ de l'univers entier!

L'ultime fusion

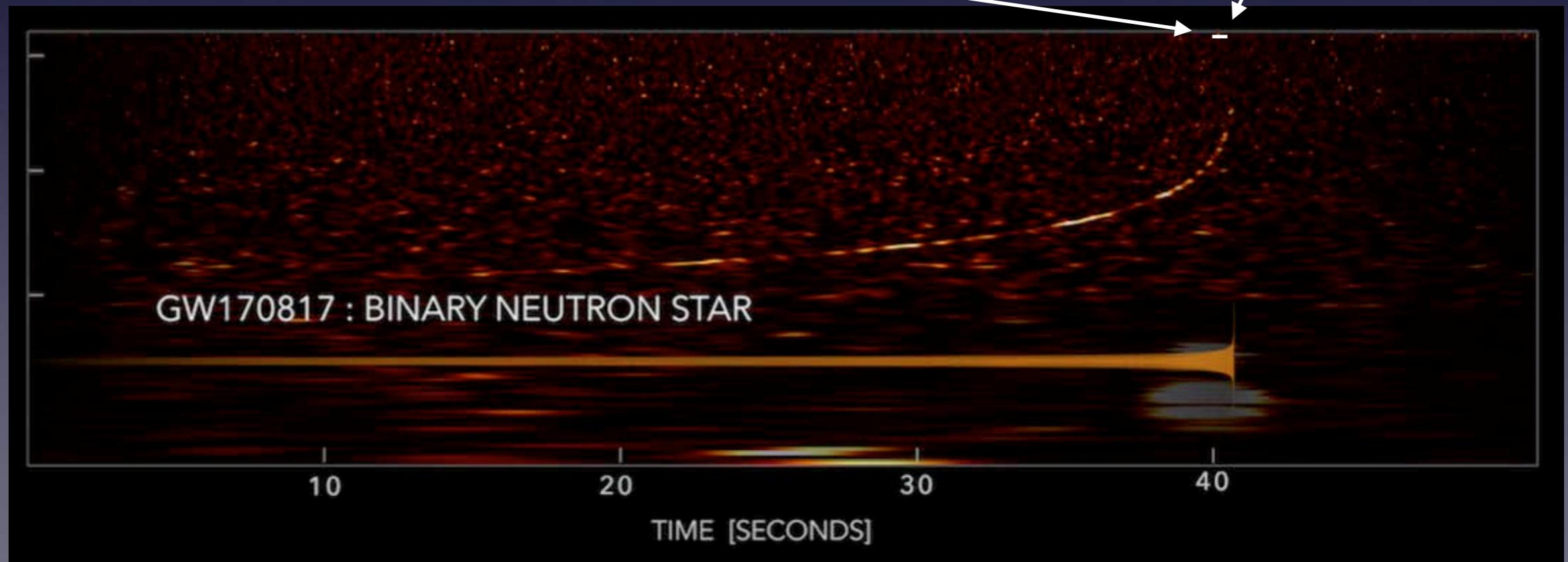
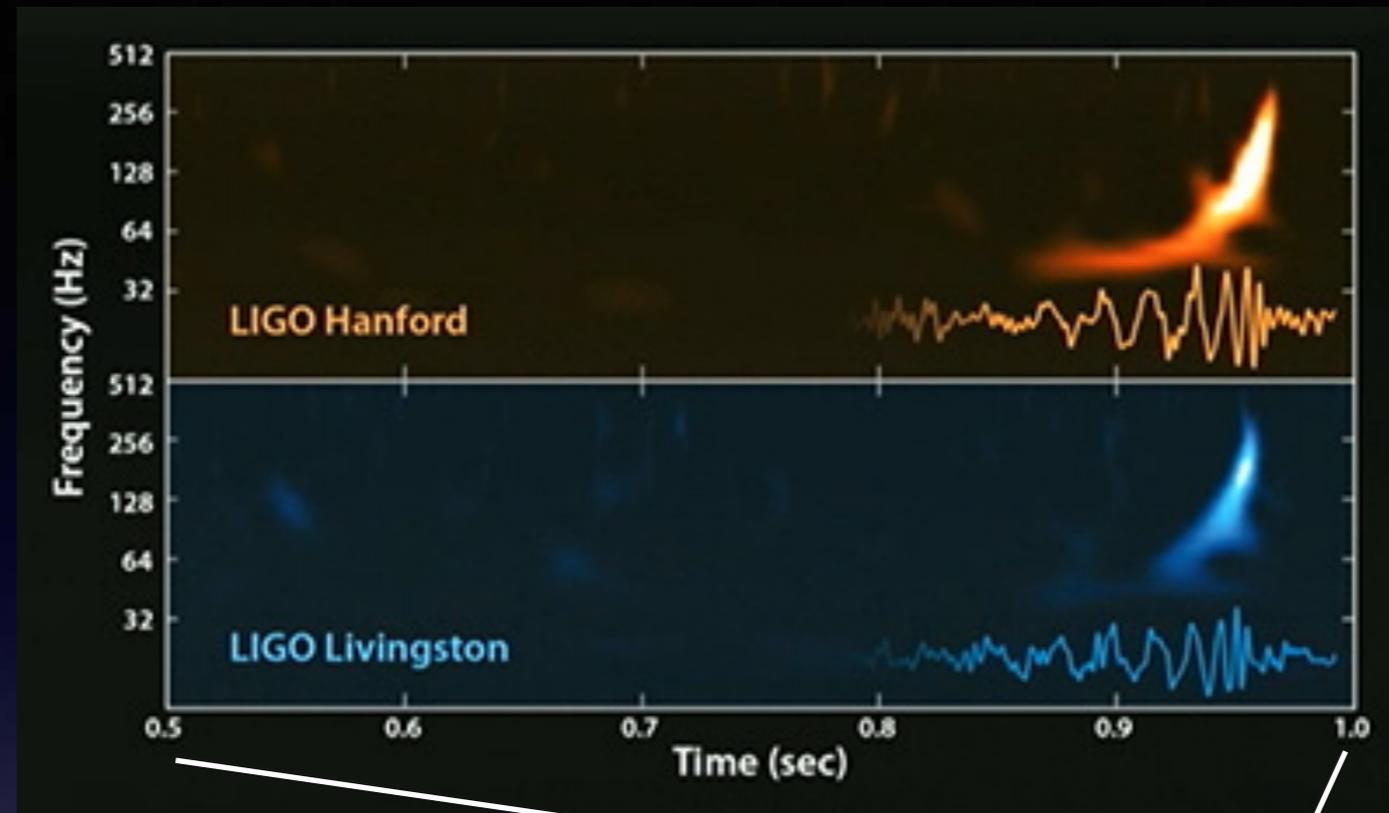


Déformation espace $\sim 10^{-21}$:
 = taille atome sur distance Terre-Soleil,
 = taille noyau atomique sur \varnothing Terre,
 = 1/1000e taille proton sur 4 km!

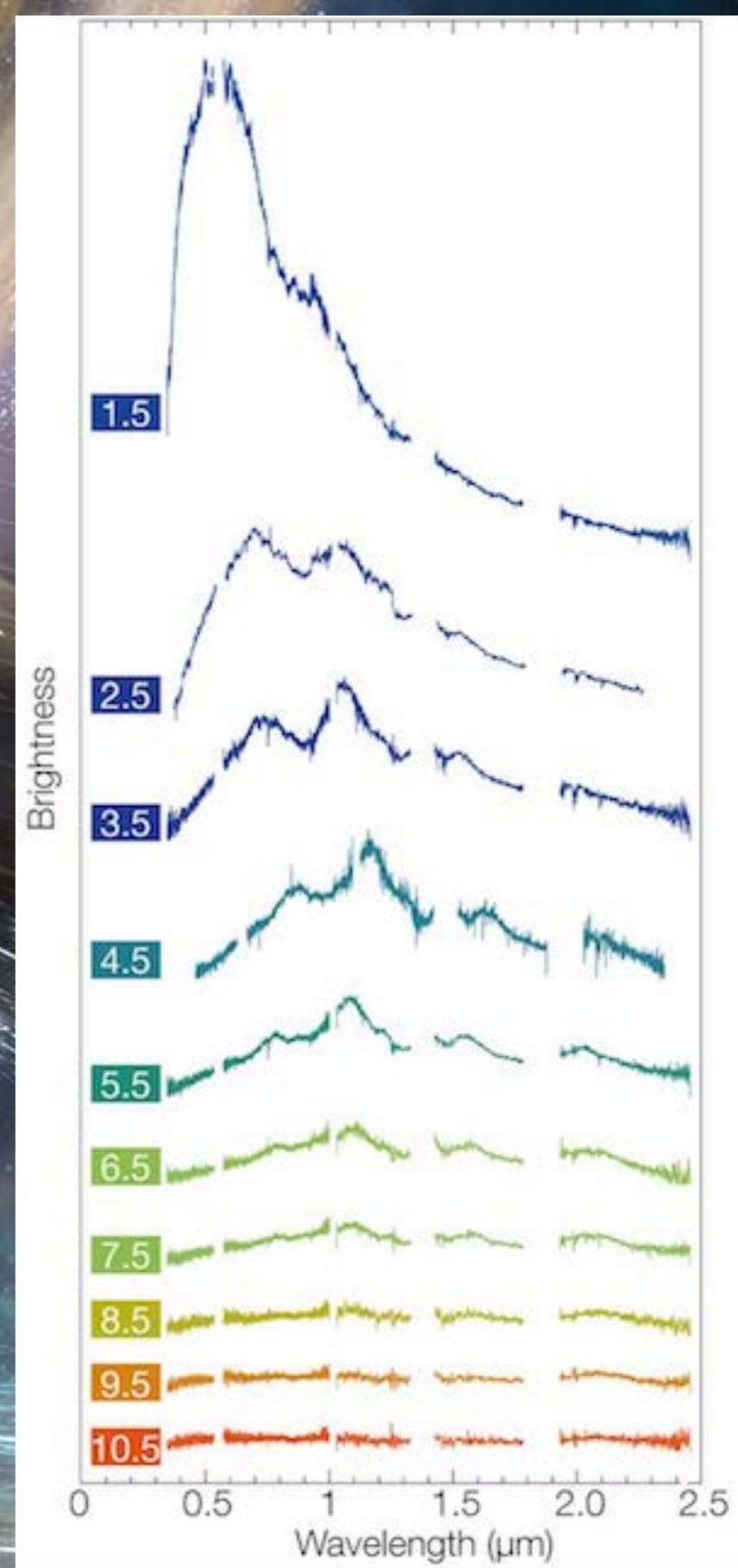
Normally, the two light beams travel paths of identical lengths, so that they cancel each other out when they recombine

When a gravitational wave passes LIGO, the tunnels deform slightly and the distance travelled by each beam changes so that they no longer cancel

Binaire de trous noirs
GW150914



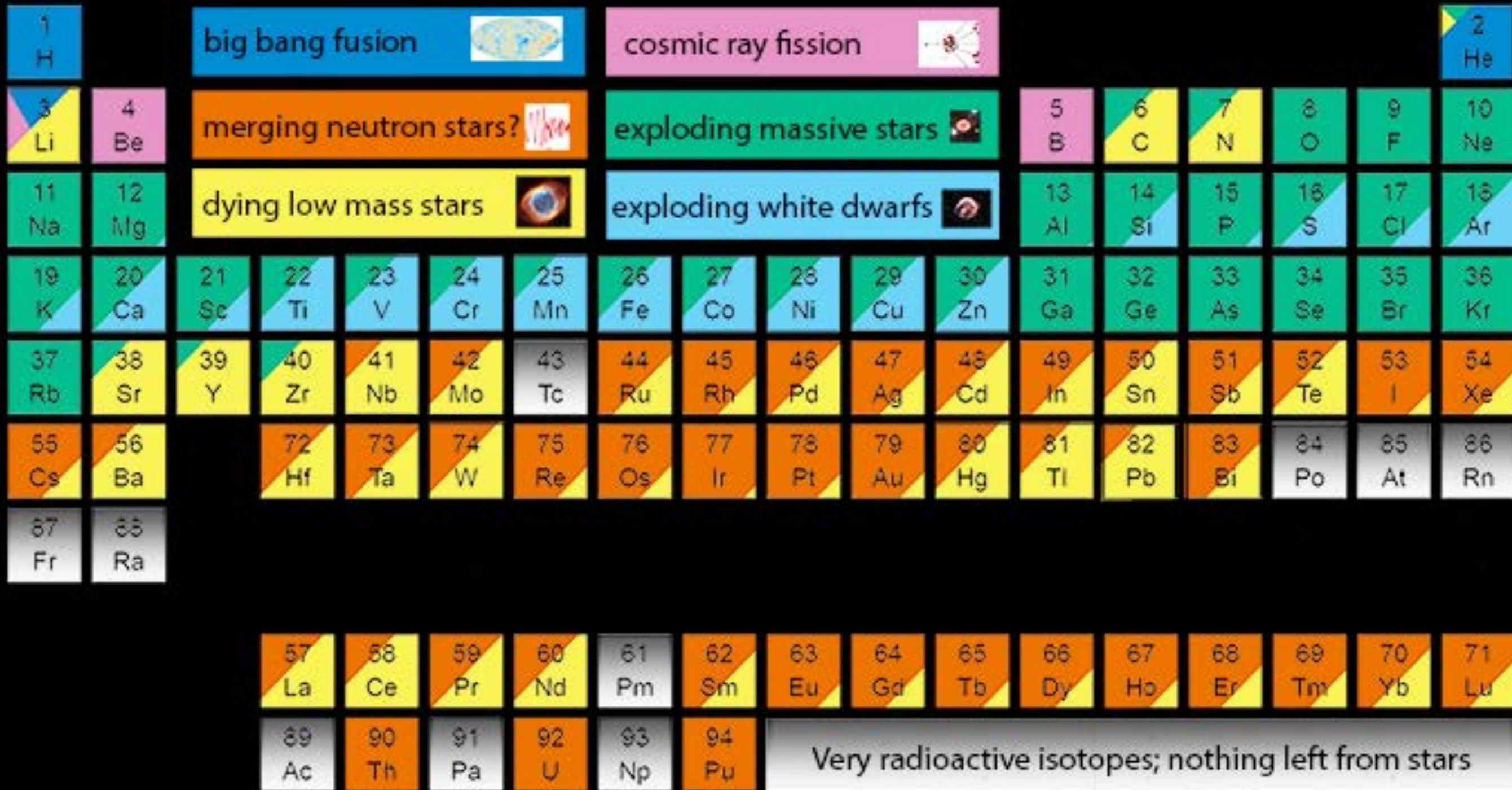
L'ultime fusion



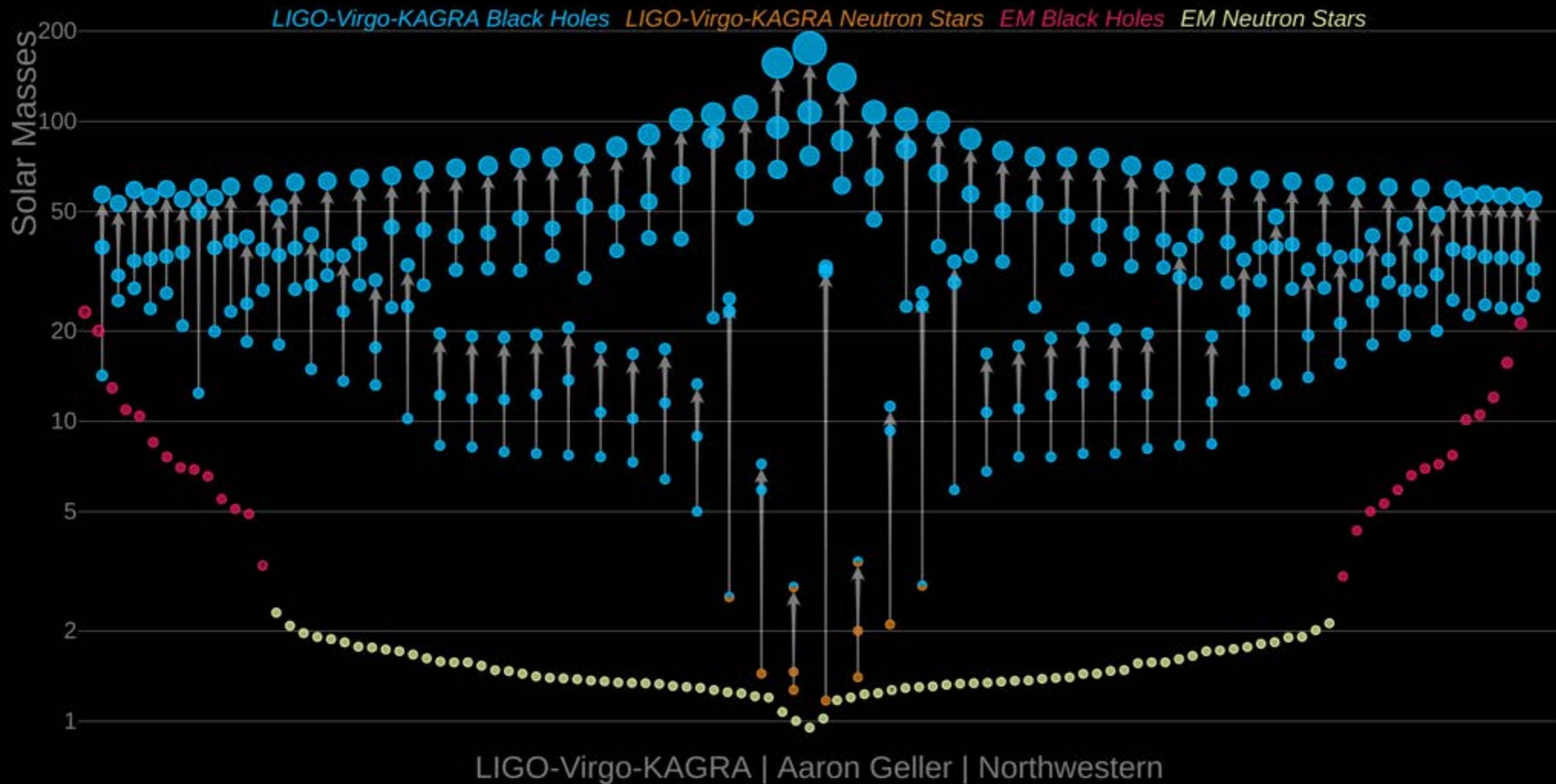
Quand deux étoiles à neutron se rencontrent...
elles fabriquent pléthore d'atomes lourds!

L'héritage

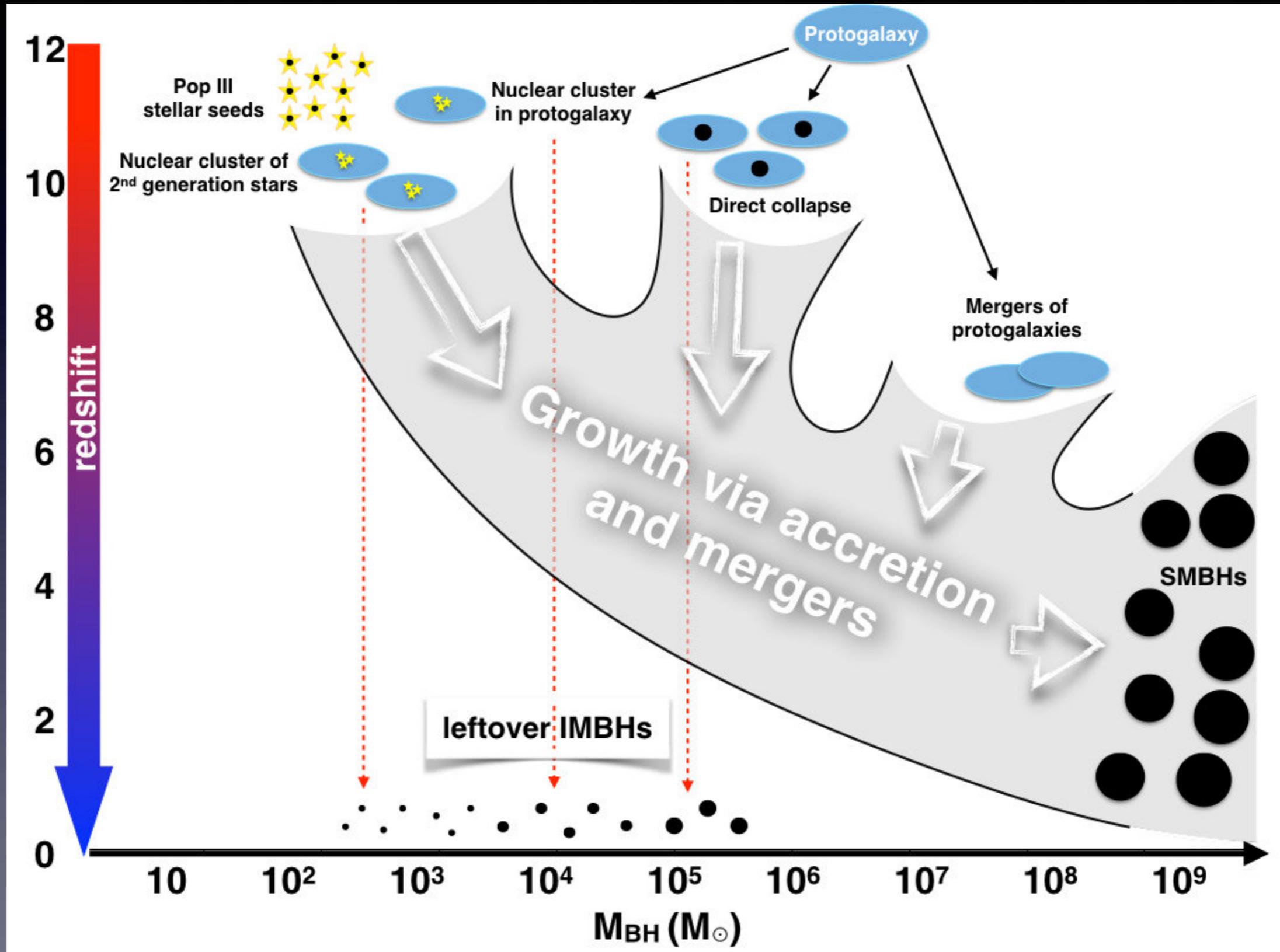
The Origin of the Solar System Elements



Détections de O1 à O3 (GWTC-1+2+3, 09/2015-03/2020): 90 événements BBH/BNS/NSBH



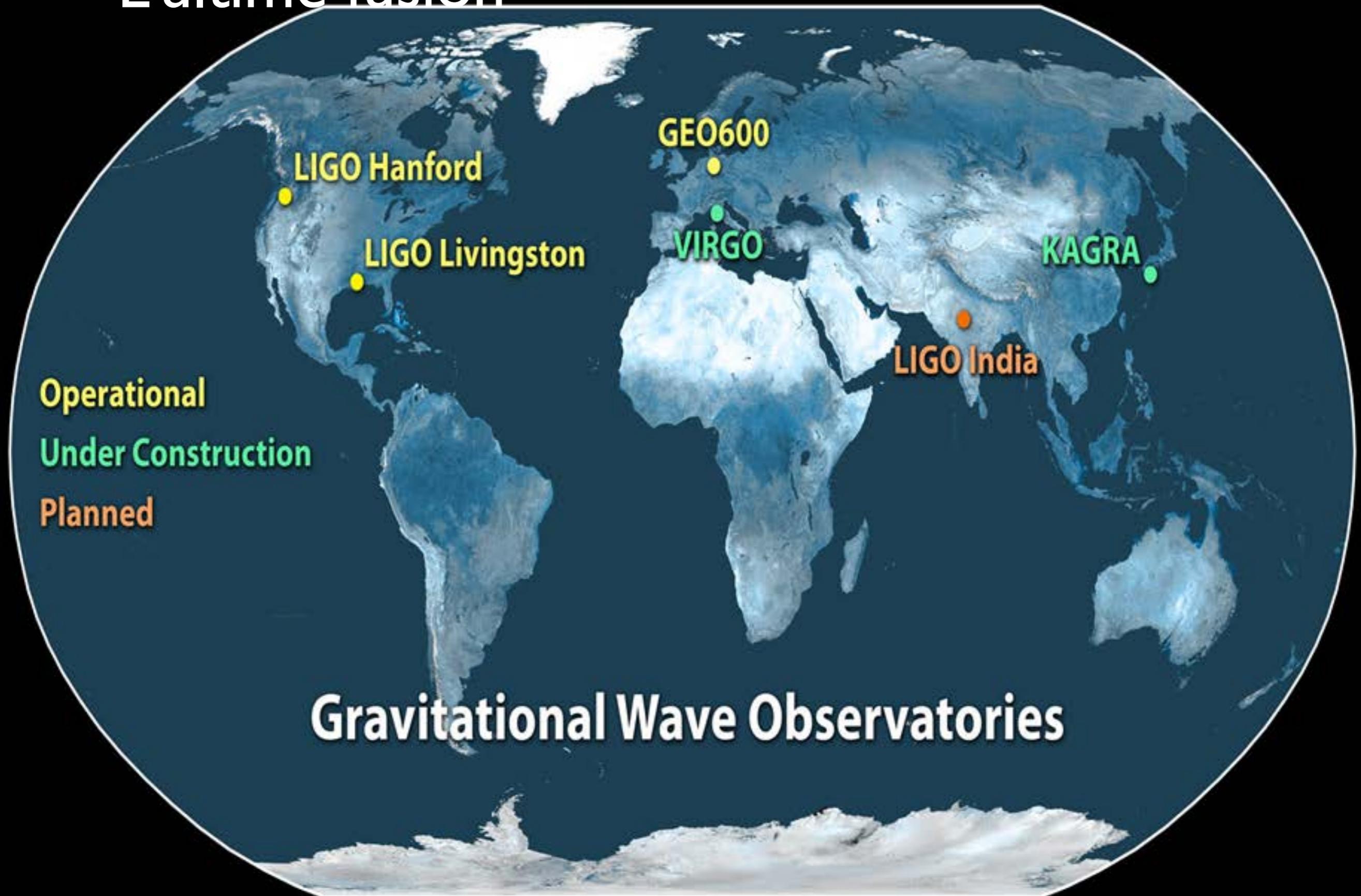
Formation des trous noirs intermédiaires



The background is a deep blue, star-filled night sky. A large, dark, circular shape is centered in the frame, resembling a planet or a void. Inside this circle, the text "Acte VI" is written on the top line and "Epilogue" on the bottom line, both in a clean, white, sans-serif font. The stars are of various colors, including white, yellow, and blue, and are scattered across the entire field of view.

Acte VI
Epilogue

L'ultime fusion



« Réseau d'observatoire gravitationnel de couples stellaires »

Le futur

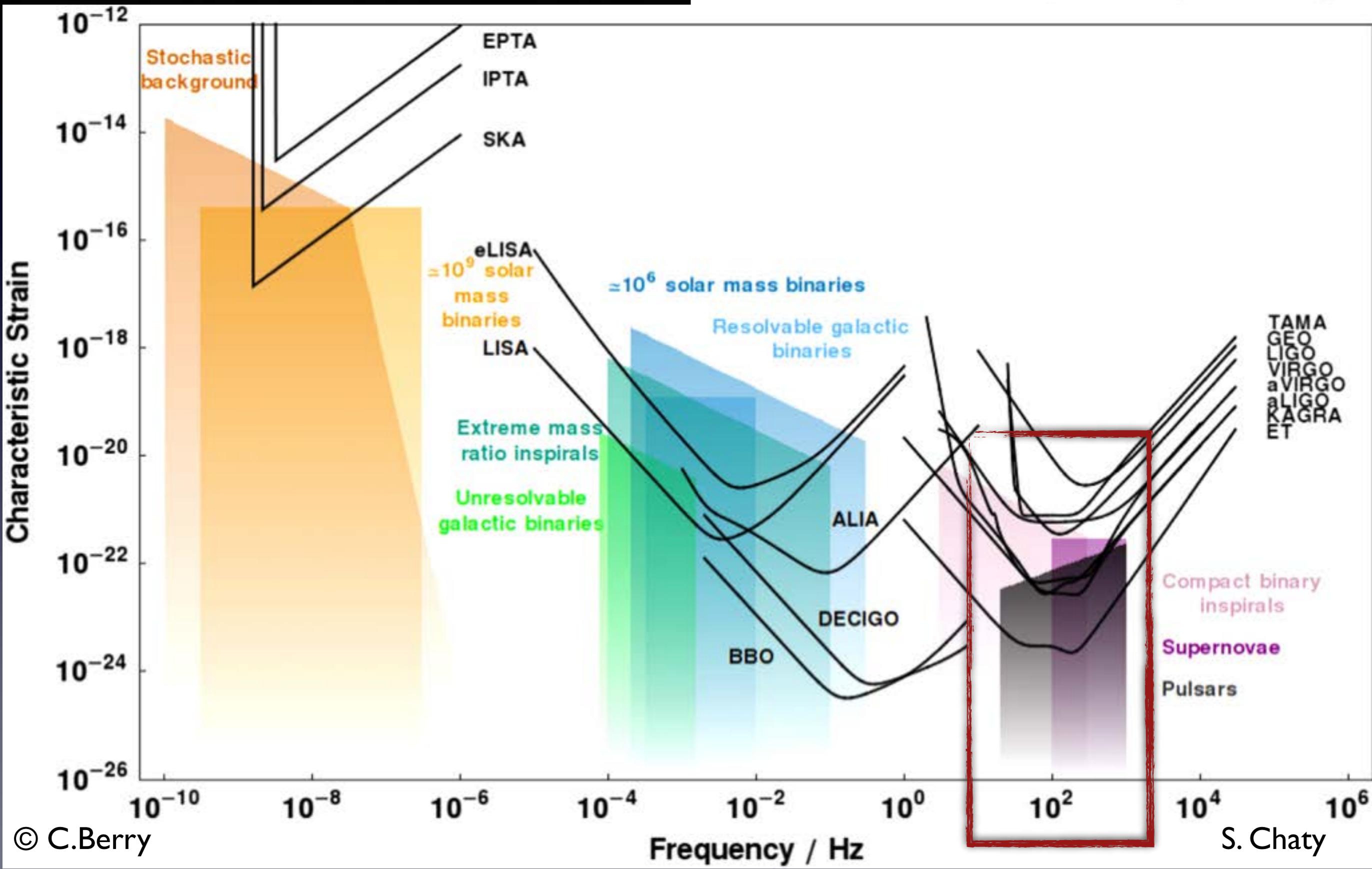


$$f \propto 1/M$$

10^7 to $10^9 M_{\text{sun}}$

10^4 to $10^6 M_{\text{sun}}$

> 1 to few $100 M_{\text{sun}}$



Etoiles binaires X

une banale histoire de couples... stellaires!

Drame en 6 actes

Sylvain Chaty

Université Paris Cité

sylvain.chaty@u-paris.fr

Cours Collège de France
29 janvier 2024



Bibliographie

- Trous noirs et distorsions du temps - K.S.Thorne, Flammarion
- Une brève histoire du temps - S. Hawking, Poche
- Astrophysique - J. Heyvaerts, Dunod
- Stellar evolution, Cambridge University Press
- Accreting binaries, S Chaty, IOP-AAS, 2022