L'univers gravitationnel: des couples stellaires aux fusions

S. Chaty
Université de Paris (AIM, CEA)
Institut Universitaire de France

Fil rouge, festival astronomie de Fleurance, 8 août 2018

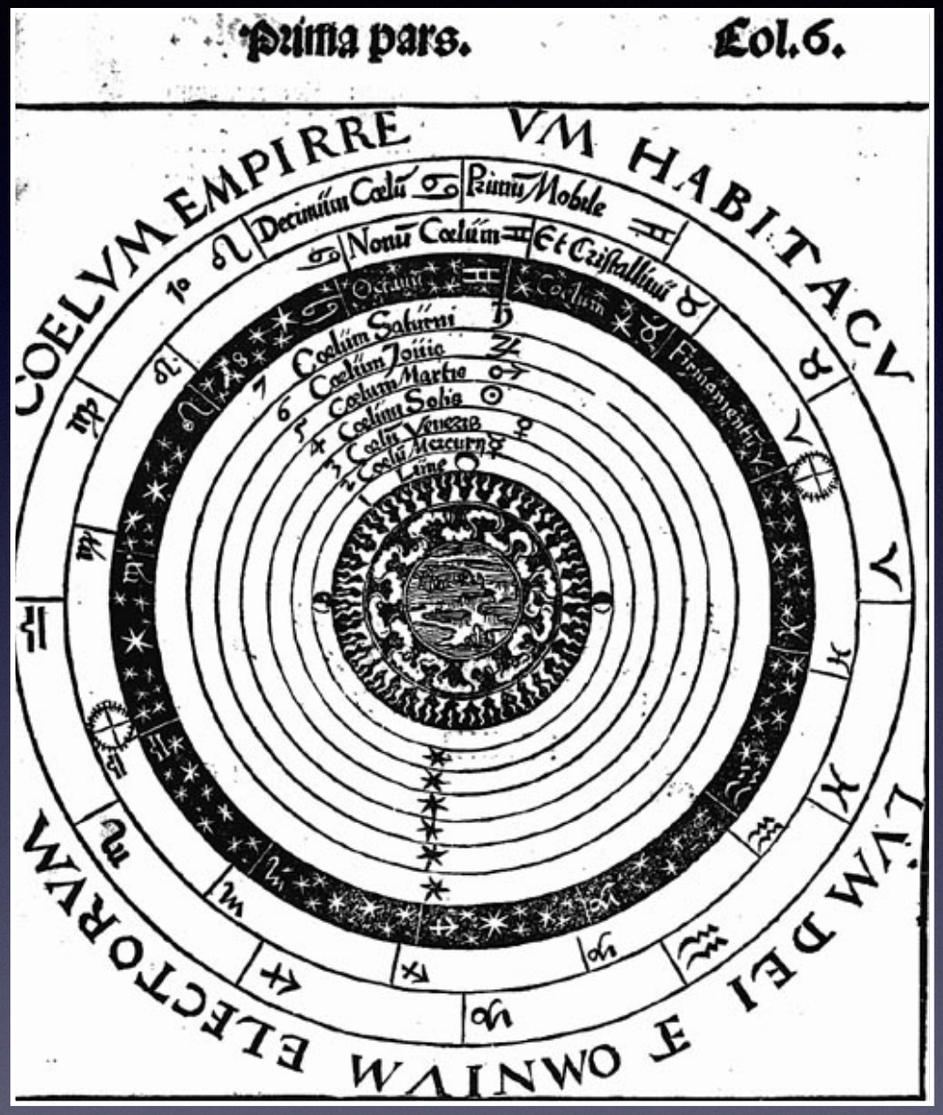
chaty@cea.fr **@sychaty**

Prélude (I)

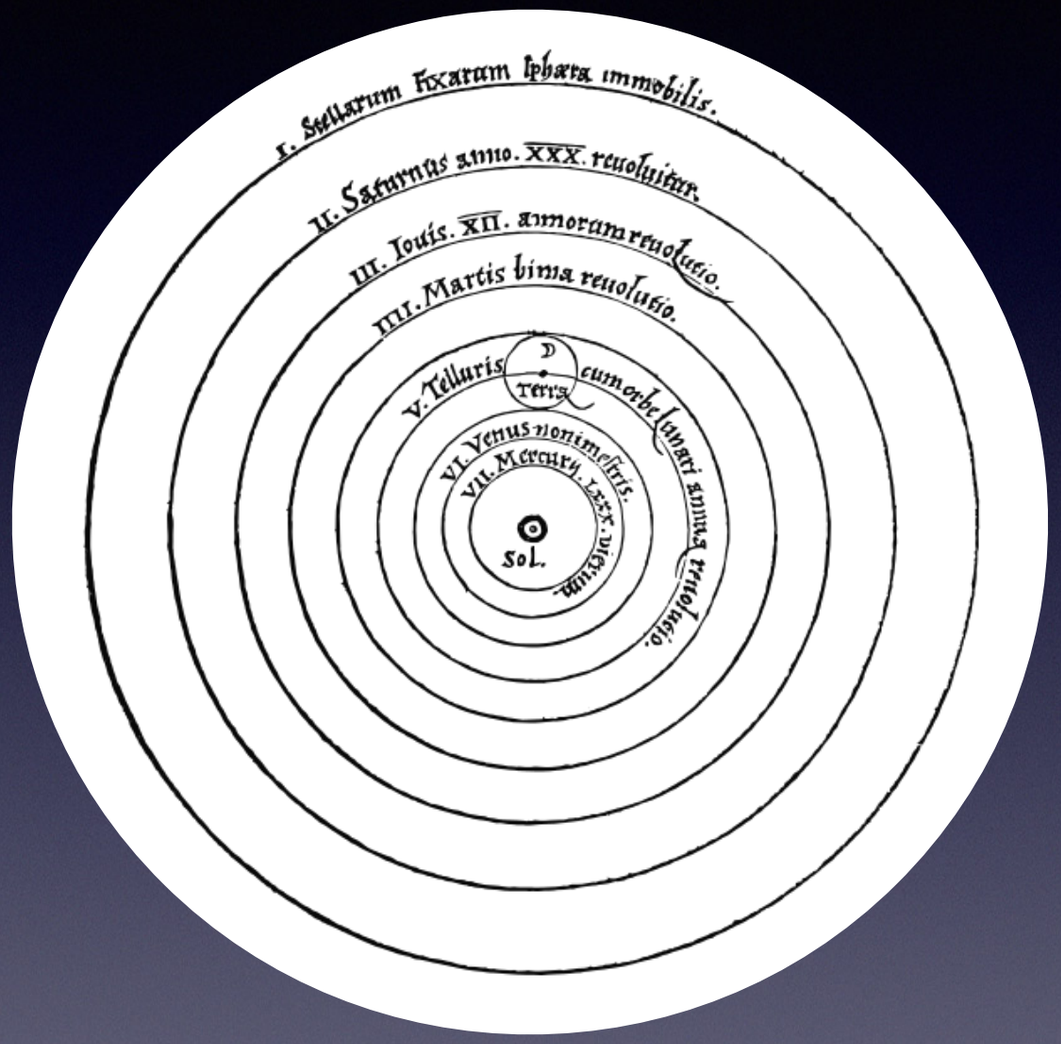
« On ne voit bien qu'avec le cœur,
l'essentiel est invisible pour les yeux ».

Le petit Prince
Antoine de Saint-Exupery

Prélude (II)



Système aristotélicien



Système copernicien

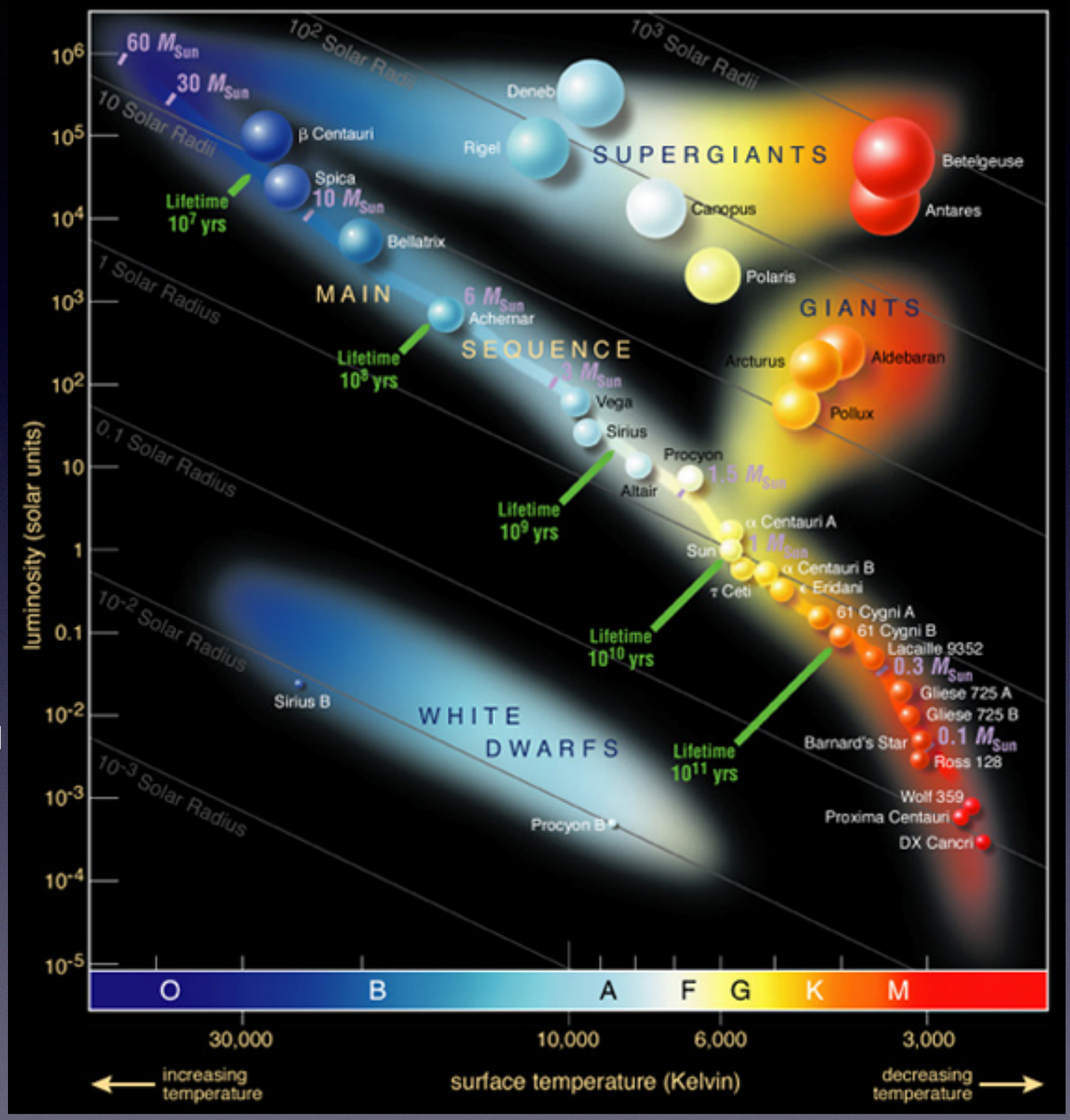
Prélude (III)

« De Stella Nova »: Découverte de supernova,
Ophiuchus 12 mois (Kepler, 1604)

S. Chaty

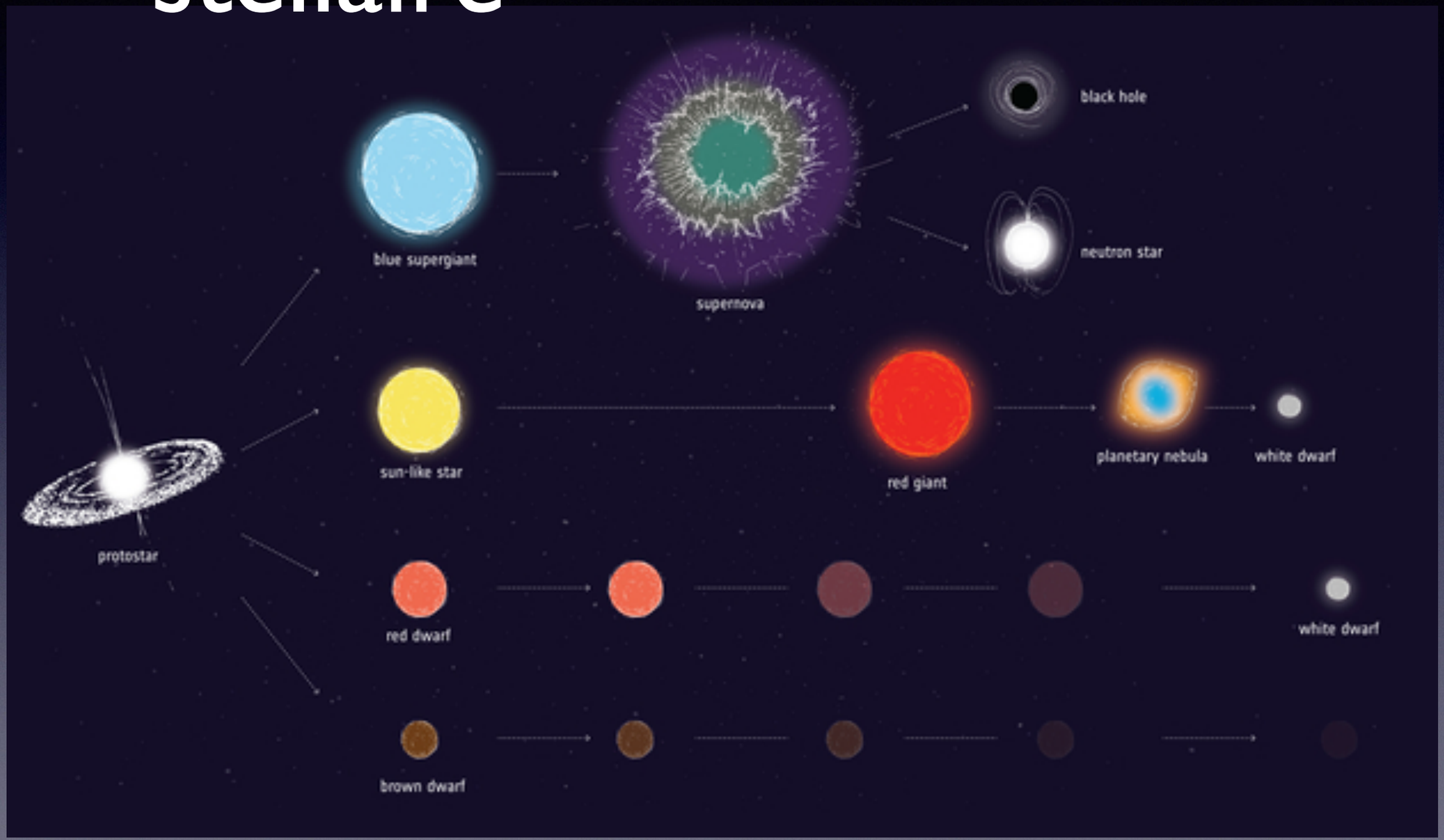
Evolution stellaire

- Diagramme HR décrit l'évolution des étoiles isolées…
- …pourtant >70% des étoiles massives ont une interaction binaire au cours de leur vie, dans des systèmes binaires, ou même triples (Sana+2012)
- Transfert de matière/moment cinétique: énorme impact sur l'évolution stellaire



S. Chaty

Evolution stellaire



S. Chaty

Rémanents stellaires: I. Les naines blanches

Abell 39, ø6al, âge ~kyr, D7000al

- Etoile faible masse (<1.4 M_s) ayant épuisé He: T_{coeur} trop faible pour fusionner C
- Contraction gravitationnelle du cœur, stoppée par répulsion coulombienne des électrons (pression de dégénérescence, principe de Pauli)
- Naine blanche = ½ M_{soleil} dans volume Terre: 10^9 kg/m^3: 1 cuillère à café =1 tonne!

=

- Géante rouge => Nébuleuse planétaire => Naine blanche

Rémanents stellaires:
II. Les étoiles à neutron

- Etoile massive (M>1.4 M_{soleil}) condensée dans une sphère
  R = 10 km (champ gravitationnel: 300 000 g)
- Contraction gravitationnelle du cœur (e-+p=>n),
  stoppée par pression de dégénérescence des neutrons
- 1 000 000 000 000 000 000 kg/m³: 1 cuillère à café pèse 10^9 tonnes… (10^9 fois + que naine blanche!)

=1 000 000 000

- Champ magnétique d'une étoile à neutron:
  ~1 000 000 000 000 fois celui de la Terre!
- Supergéante rouge -> Supernova => Etoile à neutron

Rémanents stellaires:
III. Les trous noirs

- Etoiles + massives que Soleil ($3<M<40\ M_s$)
- Même les neutrons compactés ne peuvent pas supporter le poids de ces étoiles très massives.
- Rien n'arrête l'effondrement => Trou noir
  M_{soleil} (R=700 000 km) dans sphère R = 3 km
- 10 000 000 000 000 000 000 000 kg/m^3 (~infinie)
  1 cuillère à café pèse 10 milliards de tonnes…

=10 000 000 000

Bref historique des trous noirs

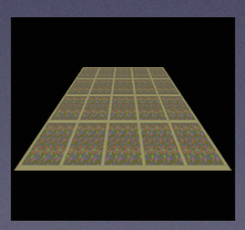
- Invention: « astres occlus », physique newtonienne (John Michell, Marquis Pierre-Simon de Laplace, 1796)
- Prédiction: « singularité » de la relativité générale (Karl Schwarzschild, 1915)
- Réapparition: « étoile gelée » (Lev Landau), « étoile effondrée », « trous noirs » (John Wheeler, 1967)

Caractéristiques des trous noirs

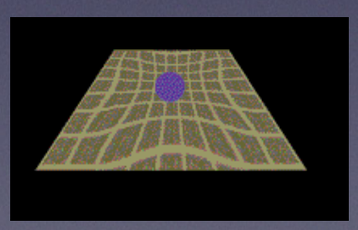
- Les objets les plus simples de l'Univers (quoique…!)
  - Définis (uniquement!) par 3 paramètres:
    Masse M, Rotation a, Charge électrique Q
  - M/R tel que vitesse libération > c:
    même la lumière ne peut s'en échapper!
  - Rayon de Schwarzschild (Horizon des événements):
    vitesse de libération $c = (2GM/R)^{1/2} \Rightarrow R=2GM/c^2$
  - «*A black hole has no hair*»

Déformations de l'espace-temps

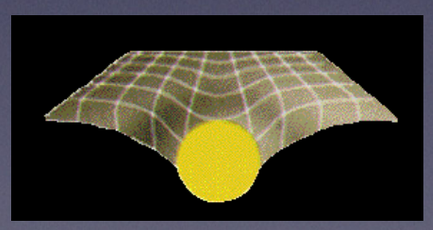
- Relativité générale: Espace-Temps à 4D:
  la matière courbe l'espace.
- Analogie: espace à 2D: feuille de papier plate,
  déformée par un poids.



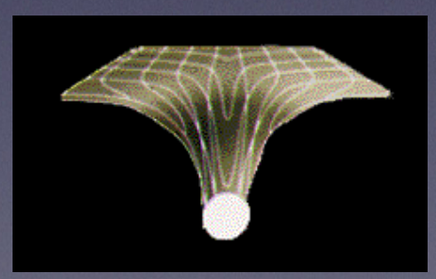
Vide



Terre

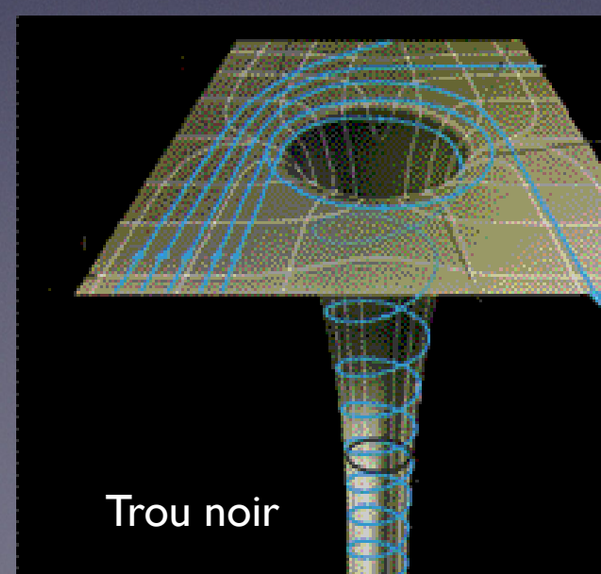


Soleil



Naine blanche

Etoile à neutron

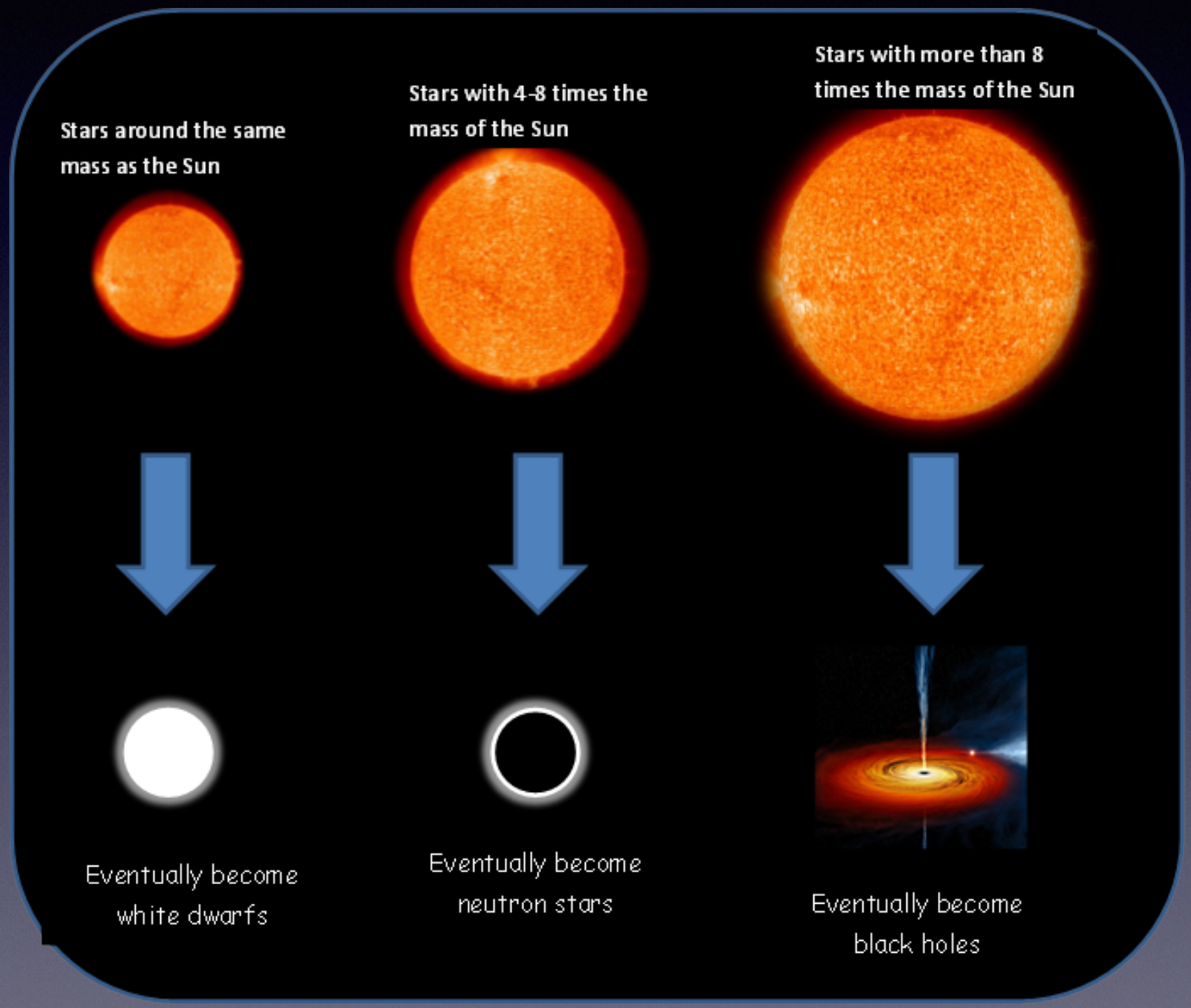


Trou noir

S. Chaty

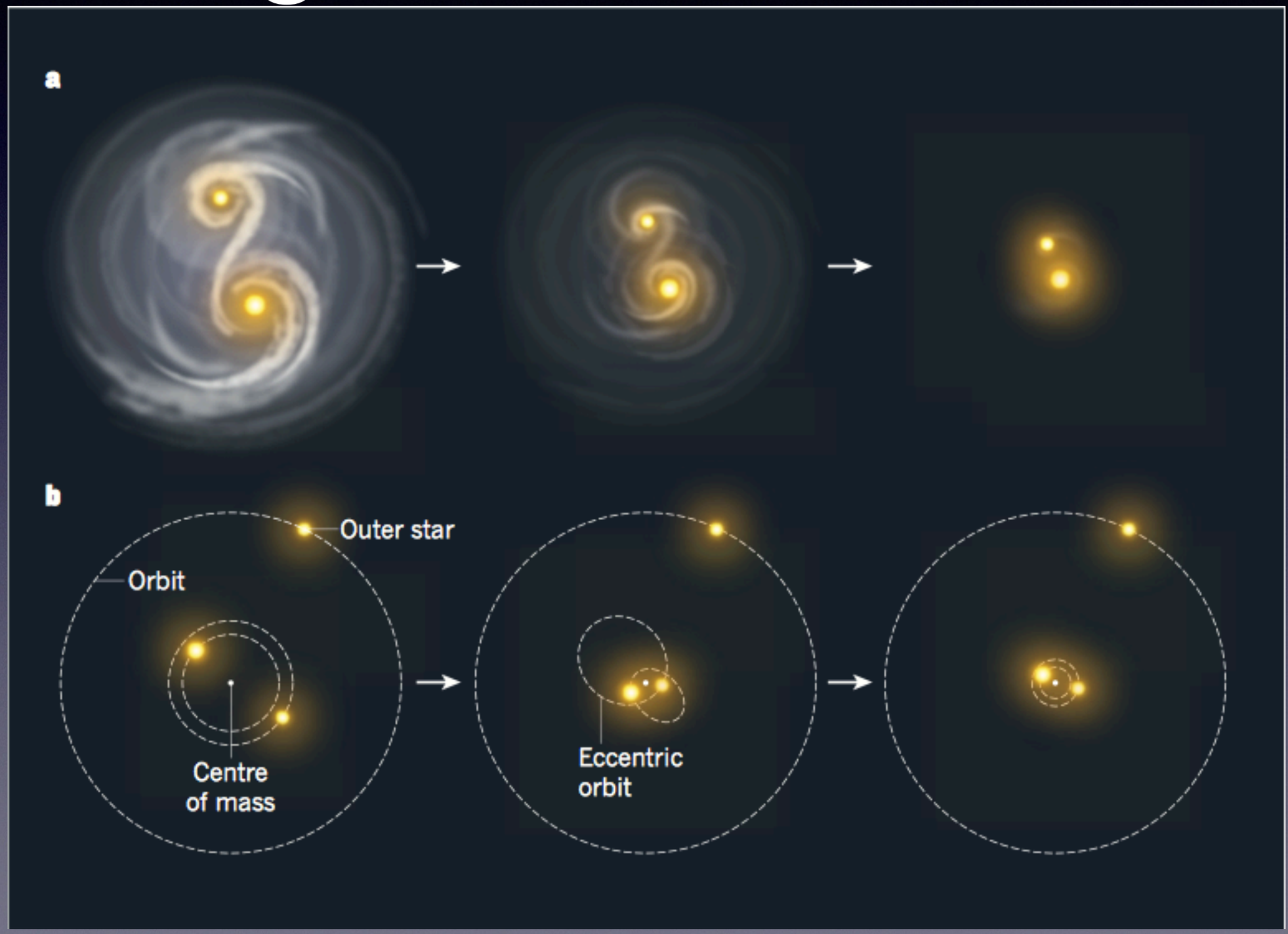
Evolution stellaire

- Naines blanches
- Etoiles à neutron
- Trous noirs



S. Chaty

Couples stellaires et ménages à trois!

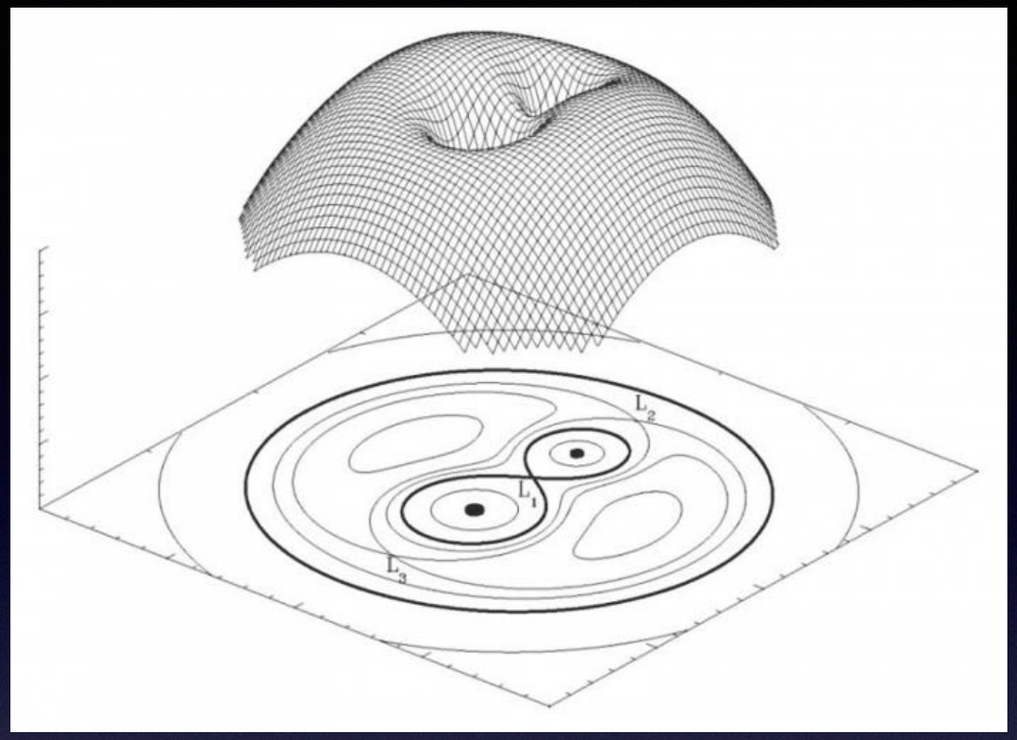


S. Chaty

Collision stellaire entre deux étoiles!

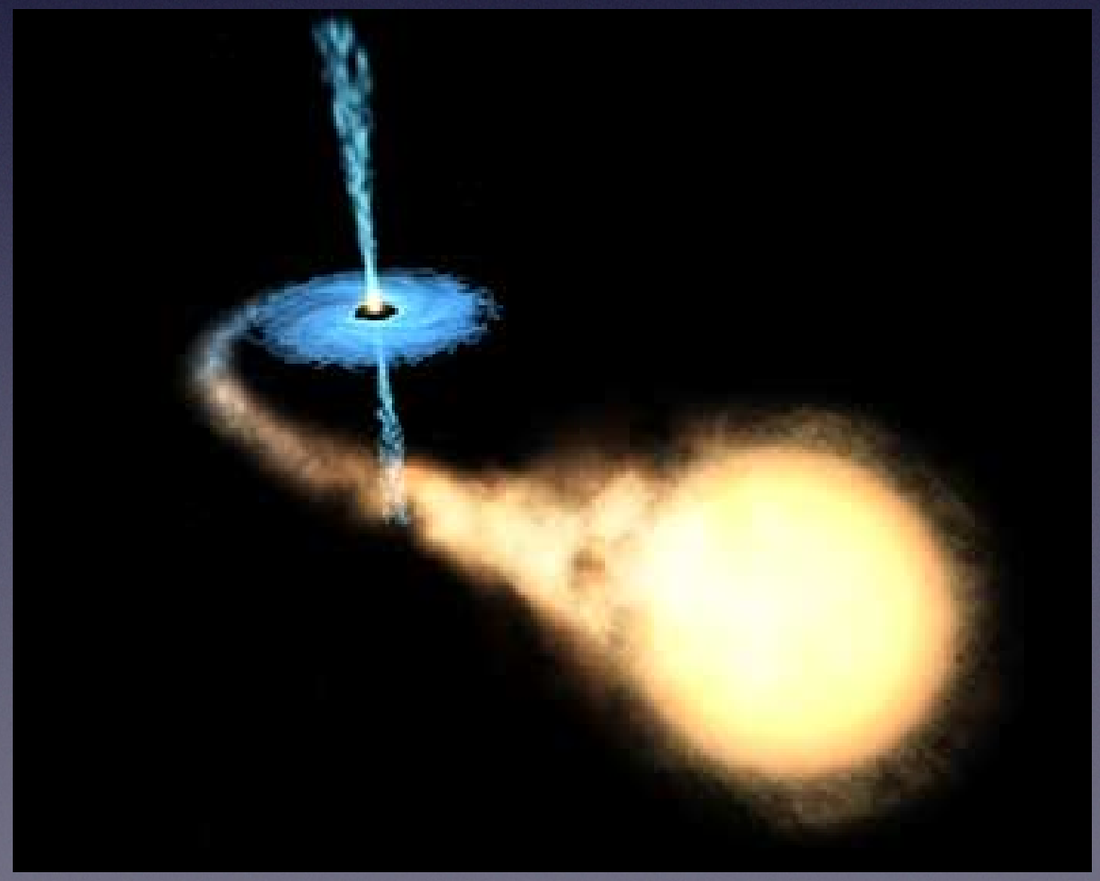
S. Chaty

Détection des premiers couples stellaires



- Découverte des systèmes binaires de rayons X: accrétion de matière d'une étoile compagnon

- 1ères observations de binaires X en 1960's! (Nobel de Physique Giacconi 2002)



Cygnus X-1: 1er trou noir détecté (en 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.

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.

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.

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.

La partie externe du disque est plus froide et tourne plus lentement que son centre.

LIMITE INTERNE

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

Gaz de l'étoile attiré par le trou noir

Trou noir

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.

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.

La matière tombe en spiralant vers le trou noir

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.

COUPLE SERRÉ

La distance entre le trou noir et l'étoile compagne est faible : moins de 30 millions de kilomètres, soit le cinquième de la distance Terre-Soleil.

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.

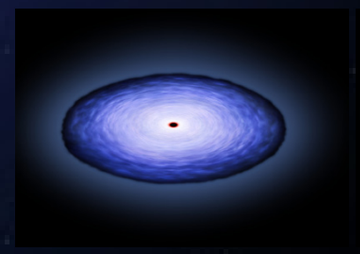
LEXIQUE

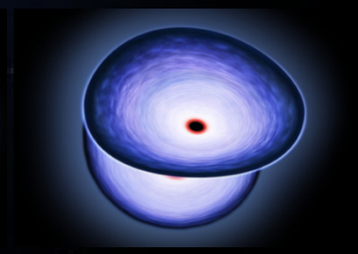
Étoile à neutrons
Astre issu de l'effondrement du cœur d'une étoile massive. Cet objet très compact est composé principalement de neutrons.

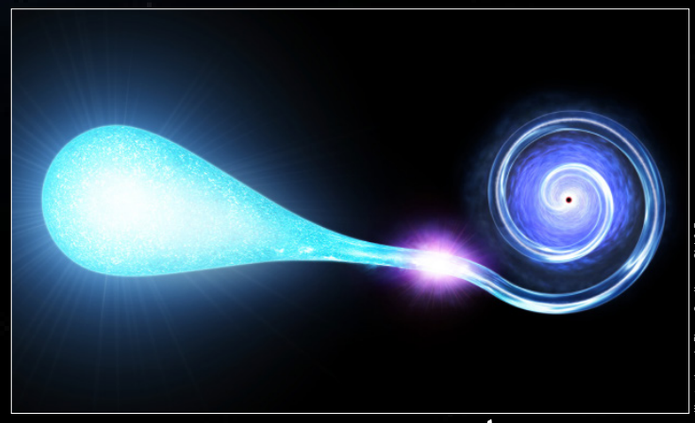
Naine blanche
Étoile en fin de vie qui, après avoir épuisé son combustible, s'effondre sur elle-même. Les plus massives d'entre elles évoluent en étoiles à neutrons ou en trous noirs.

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.





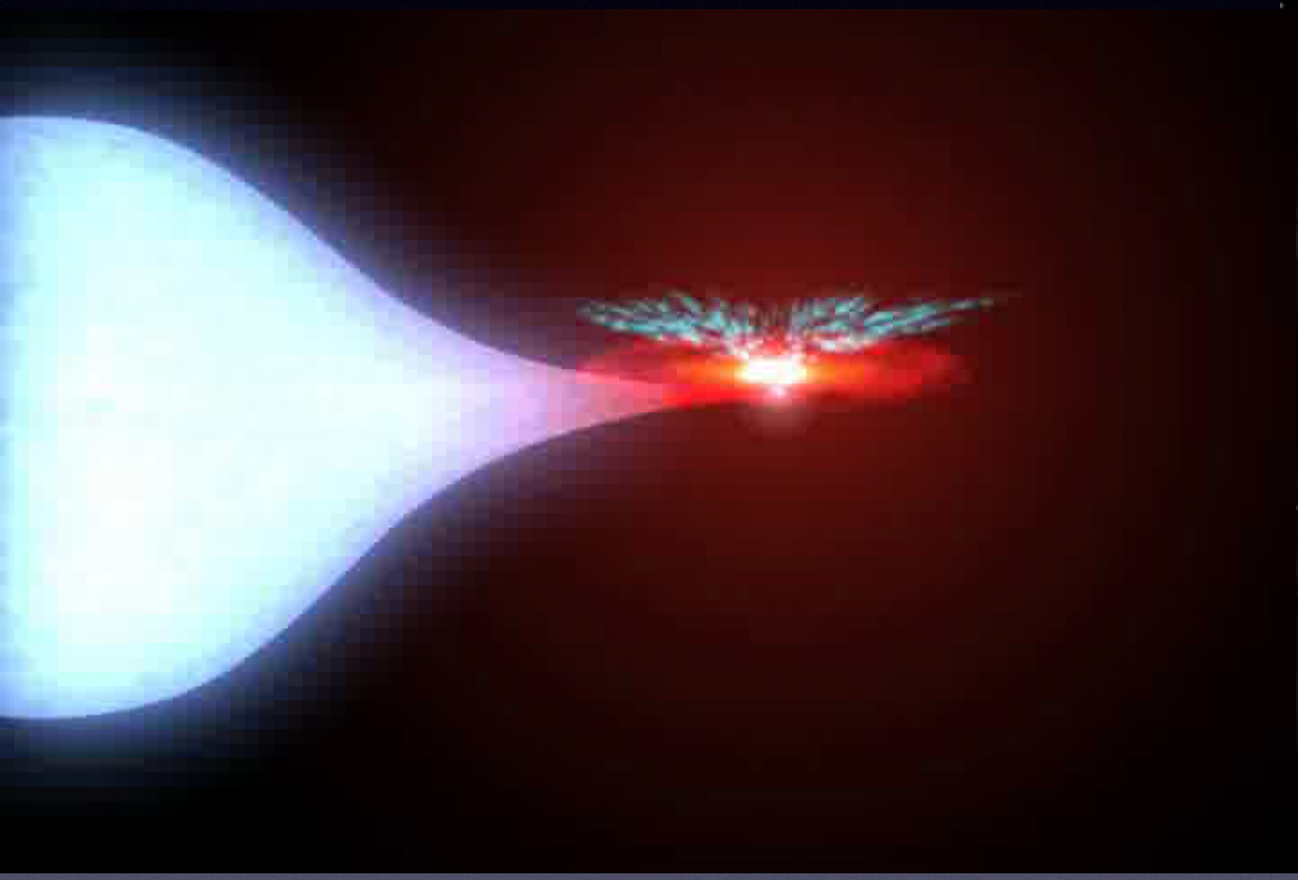


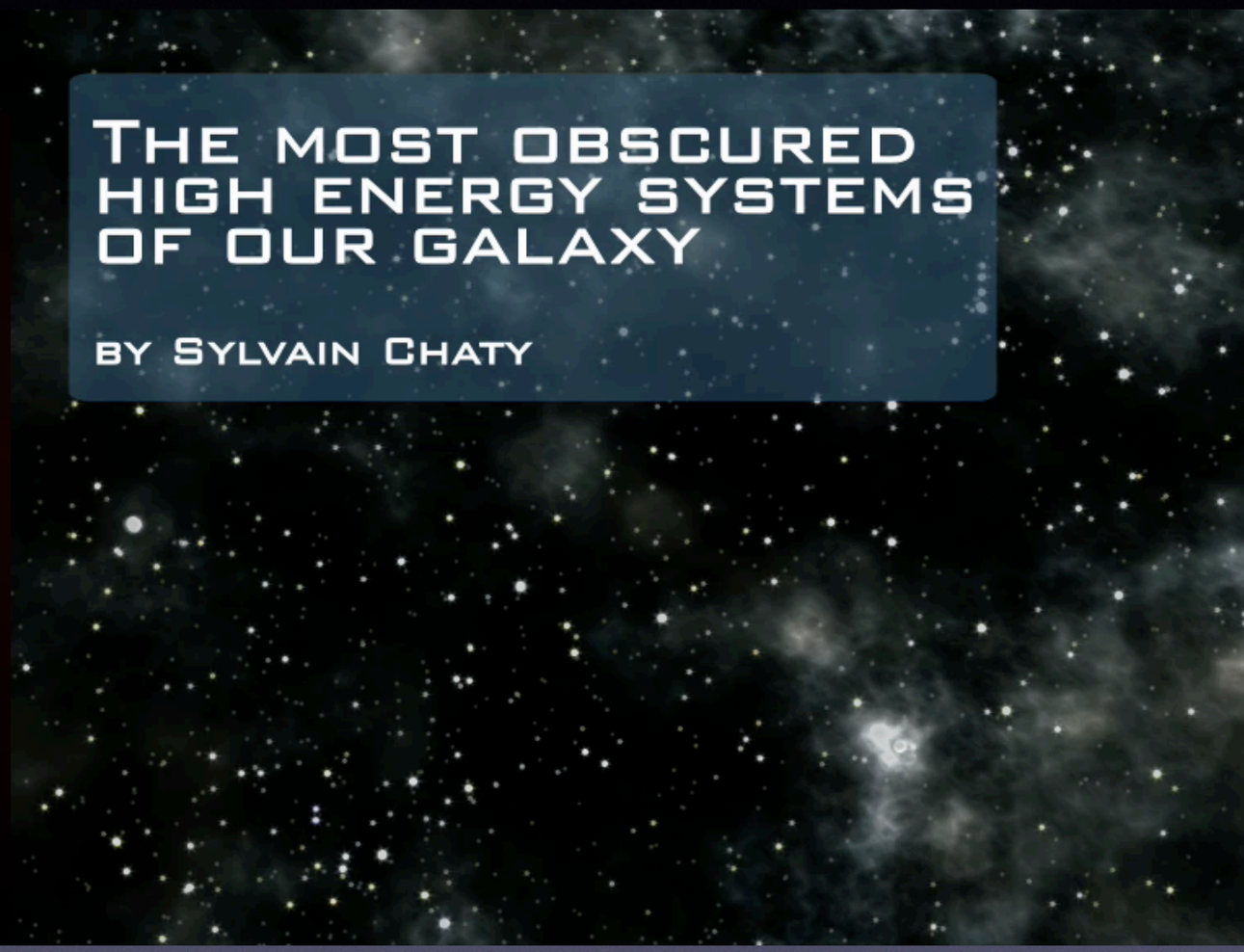
Illustrations de Pierre Carril pour *Ciel & Espace*

S. Chaty

© Ciel et Espace

Couples stellaires

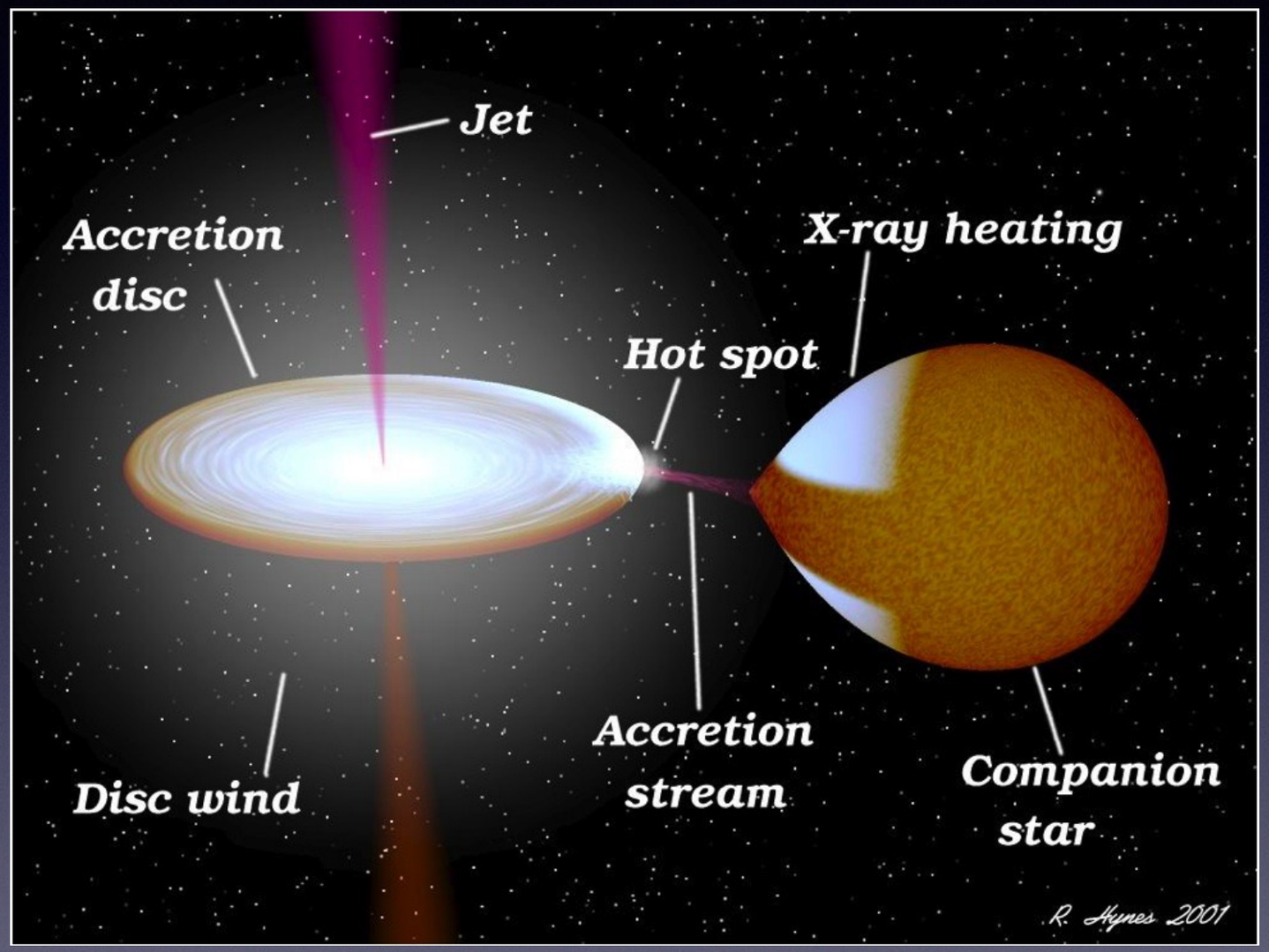


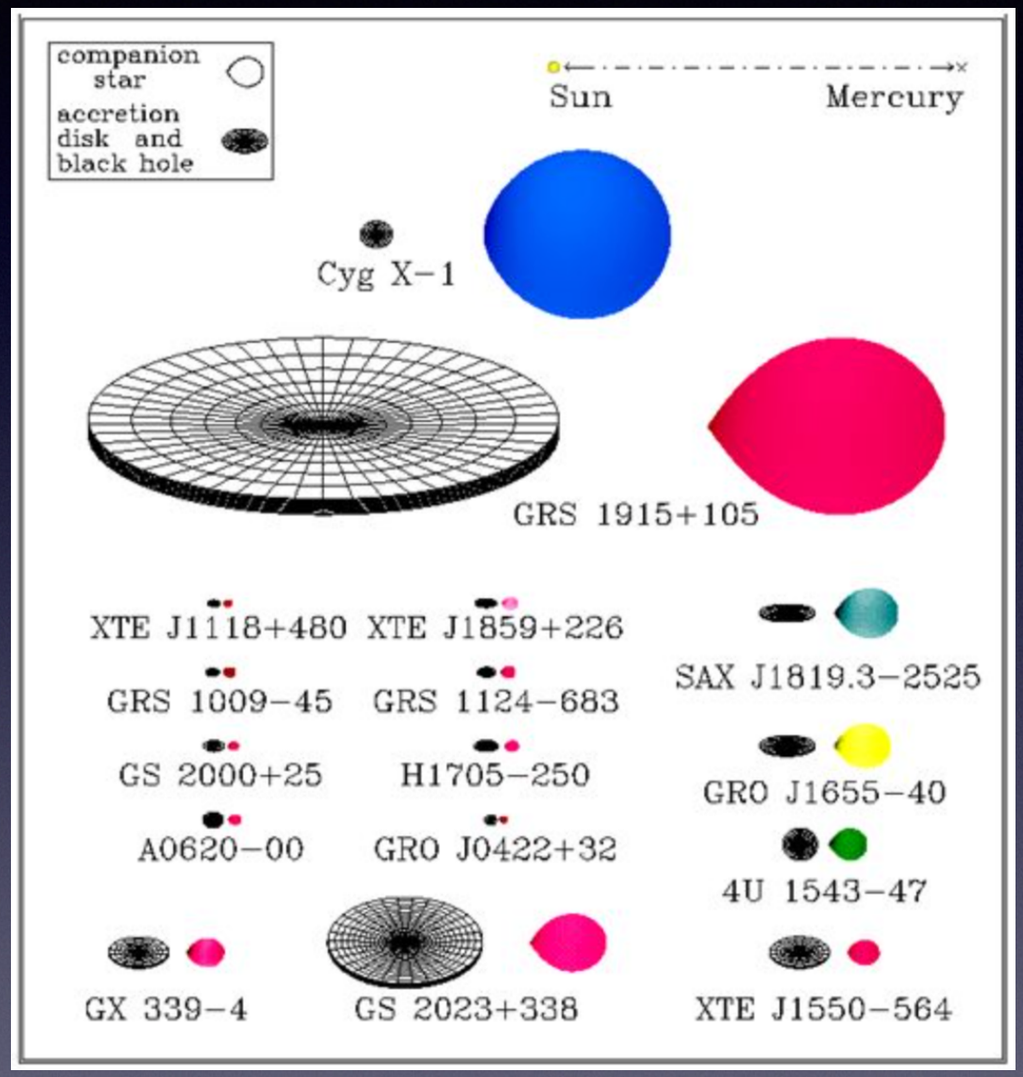


~187 binaires X de faible masse (LMXB): remplissage lobe de Roche

~114 binaires X de grande masse (HMXB): accrétion par vent stellaire

Couples stellaires

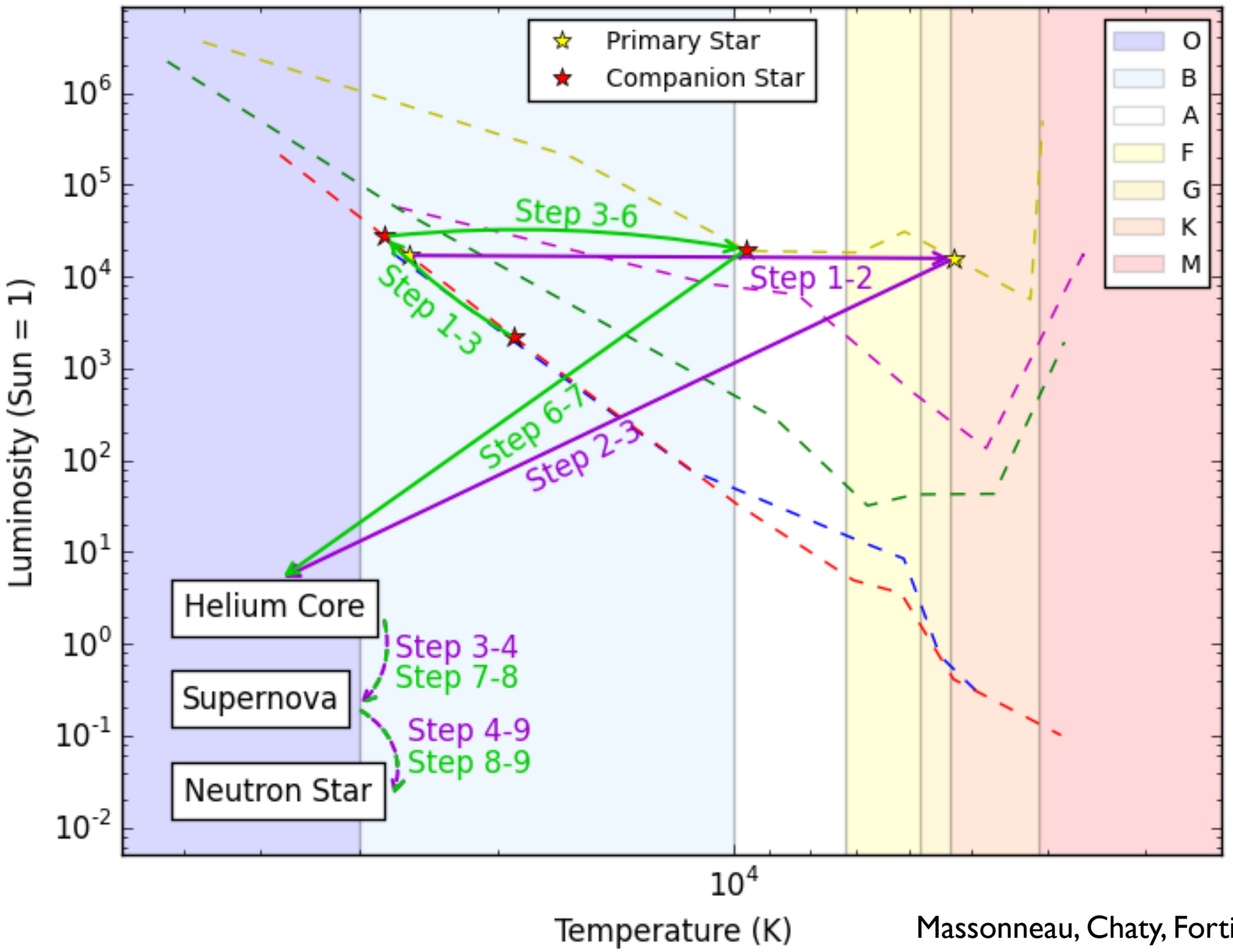




- 20 microquasars dans notre Galaxie: étoile en orbite autour d'étoile à neutron / trou noir

S. Chaty

Evolution stellaire

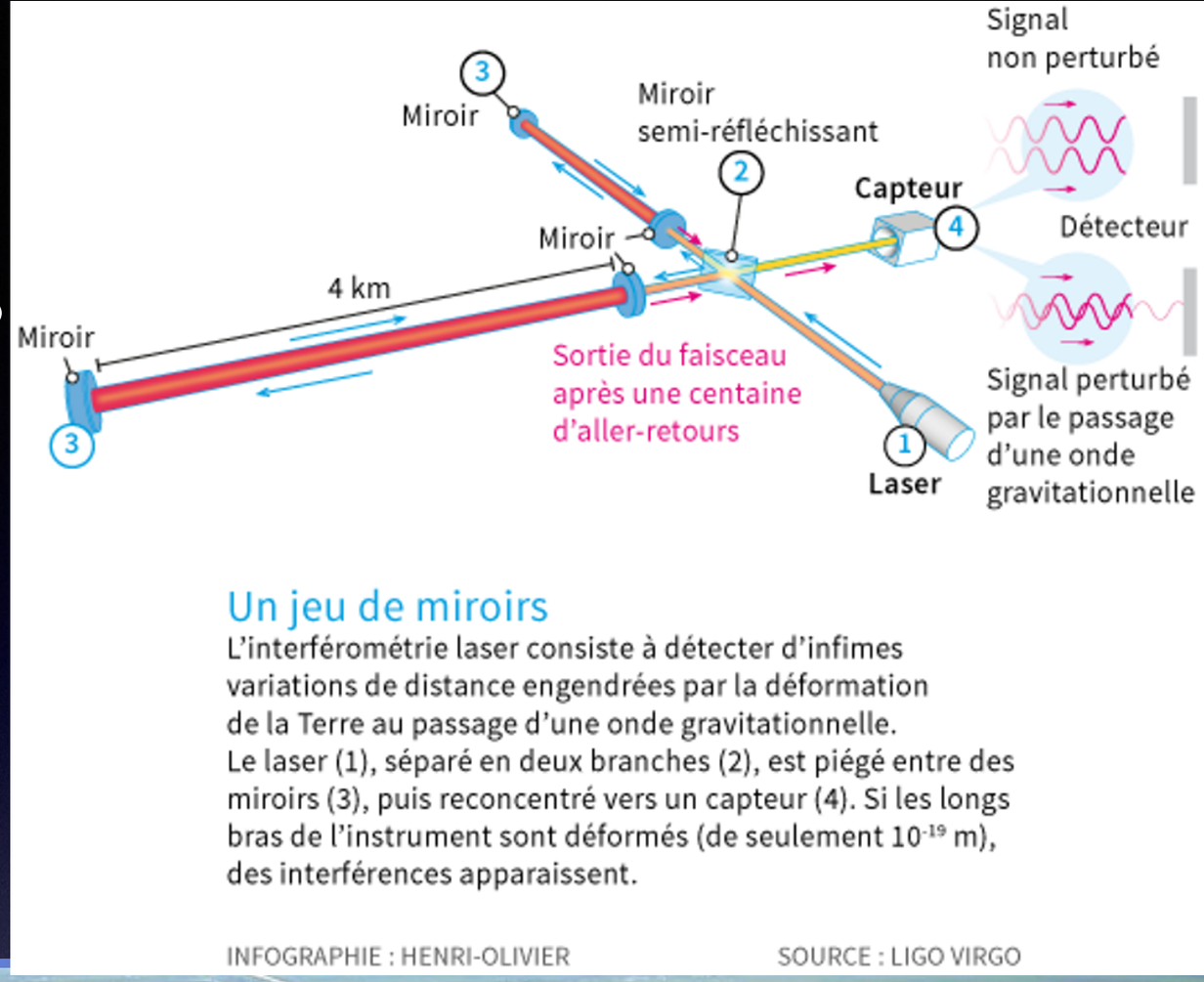


Massonneau, Chaty, Fortin, 2017

S. Chaty

Les ondes gravitationnelles

- LIGO (US): bras de 4 km
- Virgo (EU): 3 km



S. Chaty

Les ondes gravitationnelles (Virgo)

PERSPECTIVES

S. Chaty

An interior view is shown of one of the arms of the Virgo interferometer.

Downloaded from http://science.

IN DEPTH

Les ondes gravitationnelles (LIGO)

This time-exposure photo of one of LIGO's interferometer arms in Livingston, Louisiana, conjures up notions of gravitational waves.

Caltech

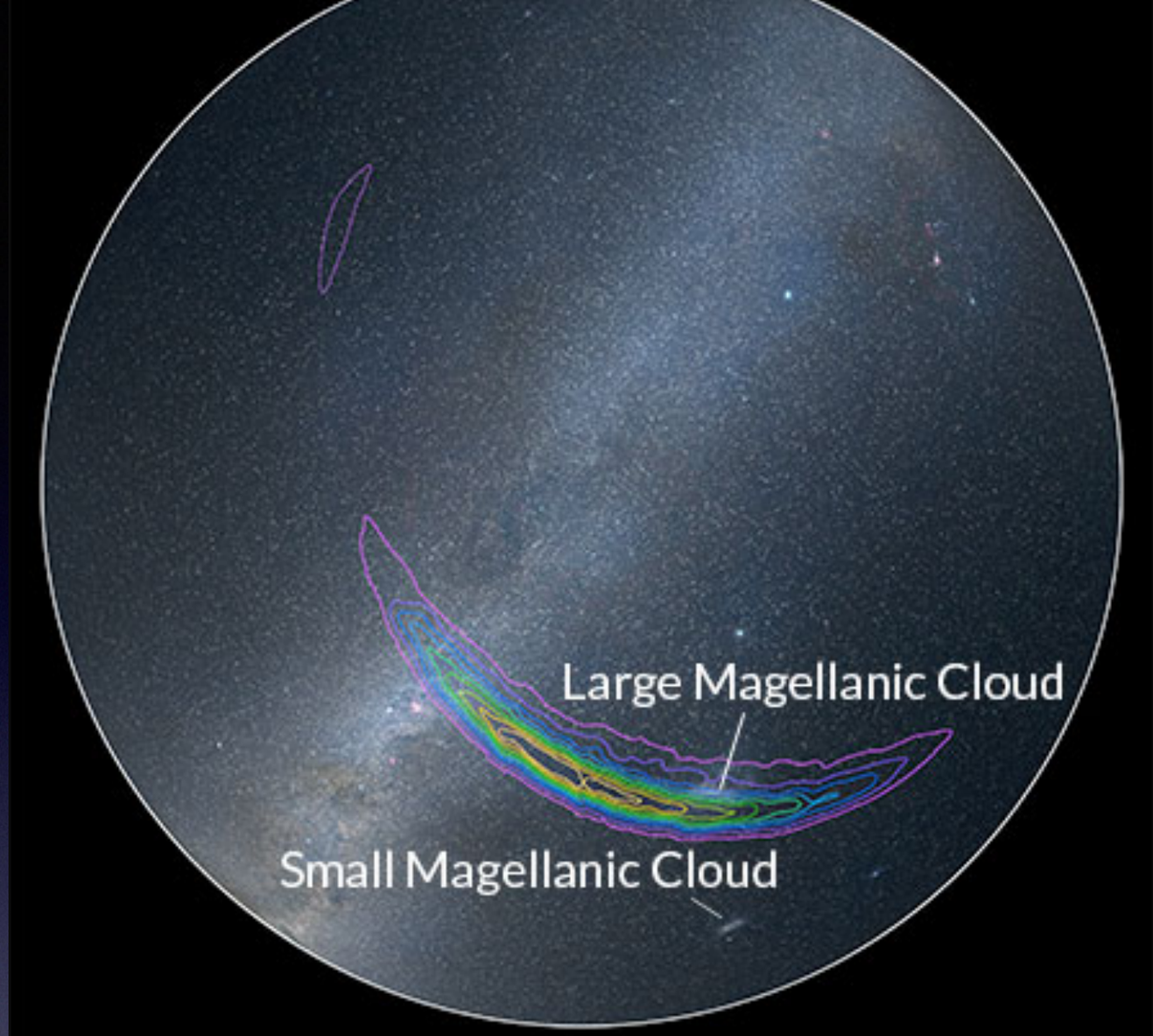
S. Chaty

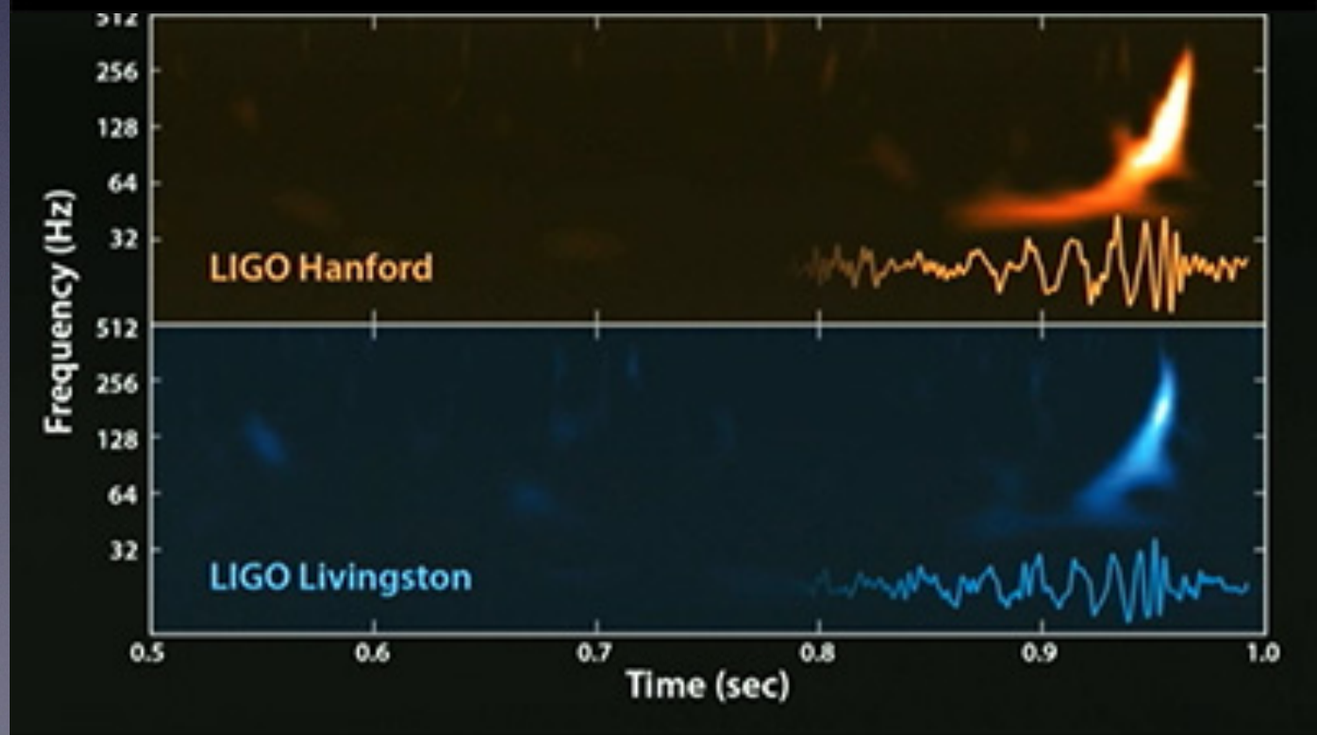
The LIGO equipment and observatories were jointly designed and operated by Caltech and MIT scientists.

Evénement du 14 Sept. 2015

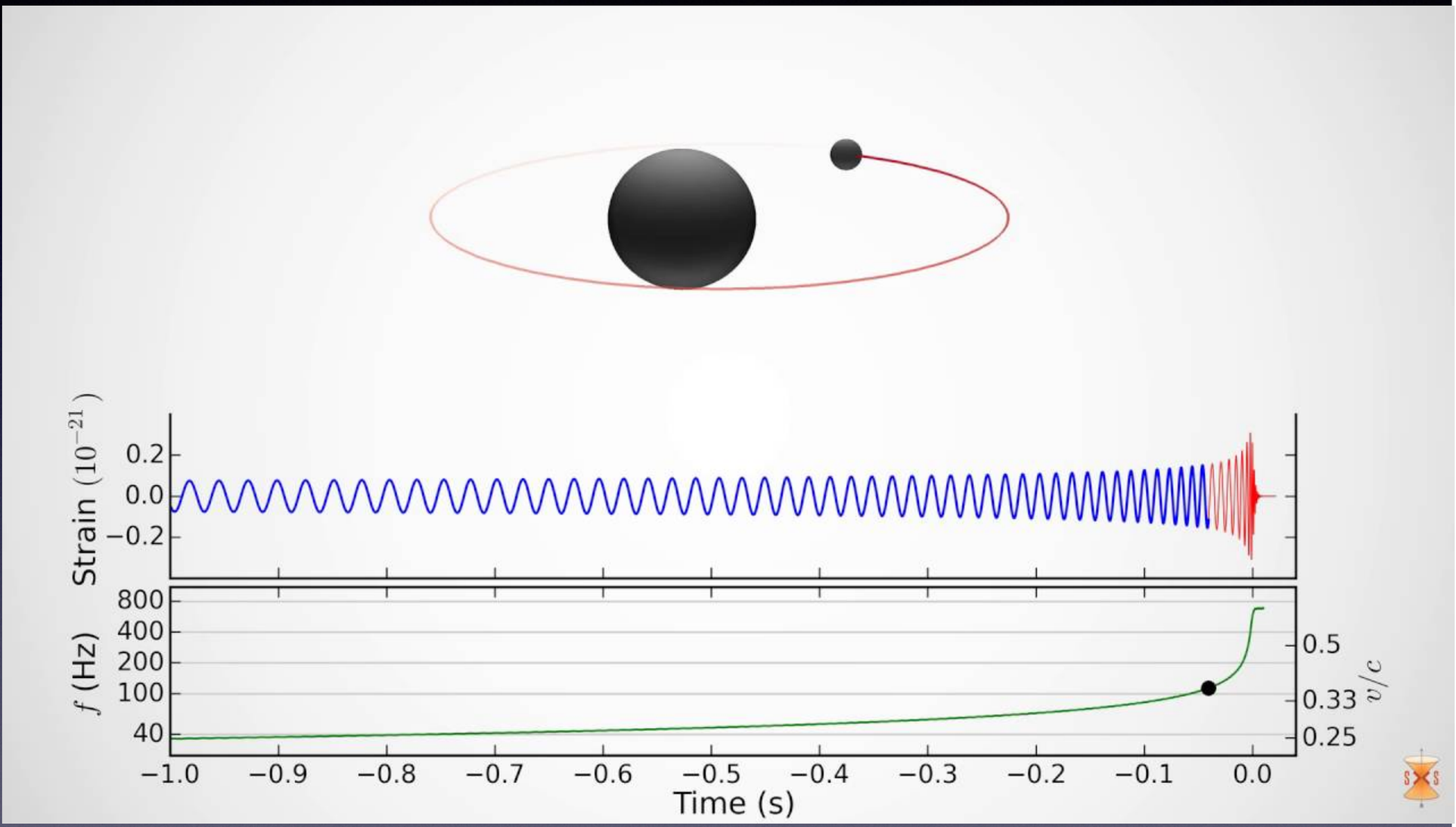
- Detecté le 14 sept. 2015, annoncé le 11 fév. 2016
- 2 BH 36+29 Ms @300Mpc => BH 62 Ms: 3 Ms converties en ondes gravitationnelles ($E=mc^2$)
- Dans la dernière seconde avant la fusion, $L_{GW} > L_*$ de l'univers entier!
- 30 articles publiés par LIGO depuis, le 1er cité +700 x !

S. Chaty



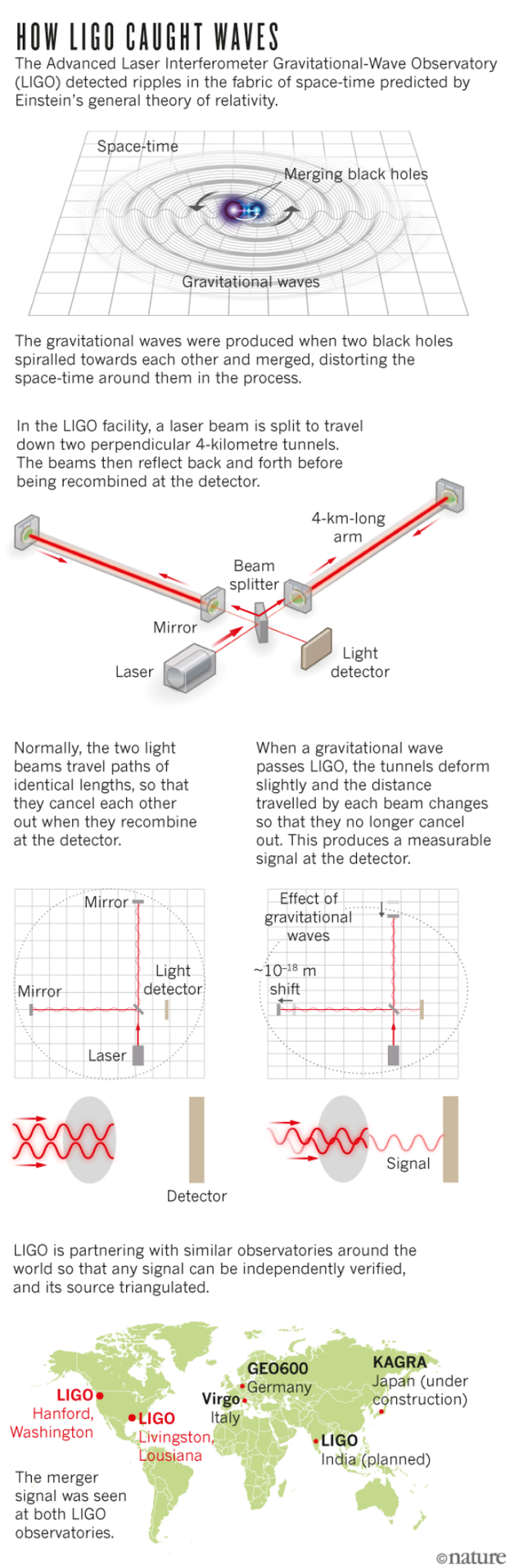


Evénement du 14 Sept. 2015

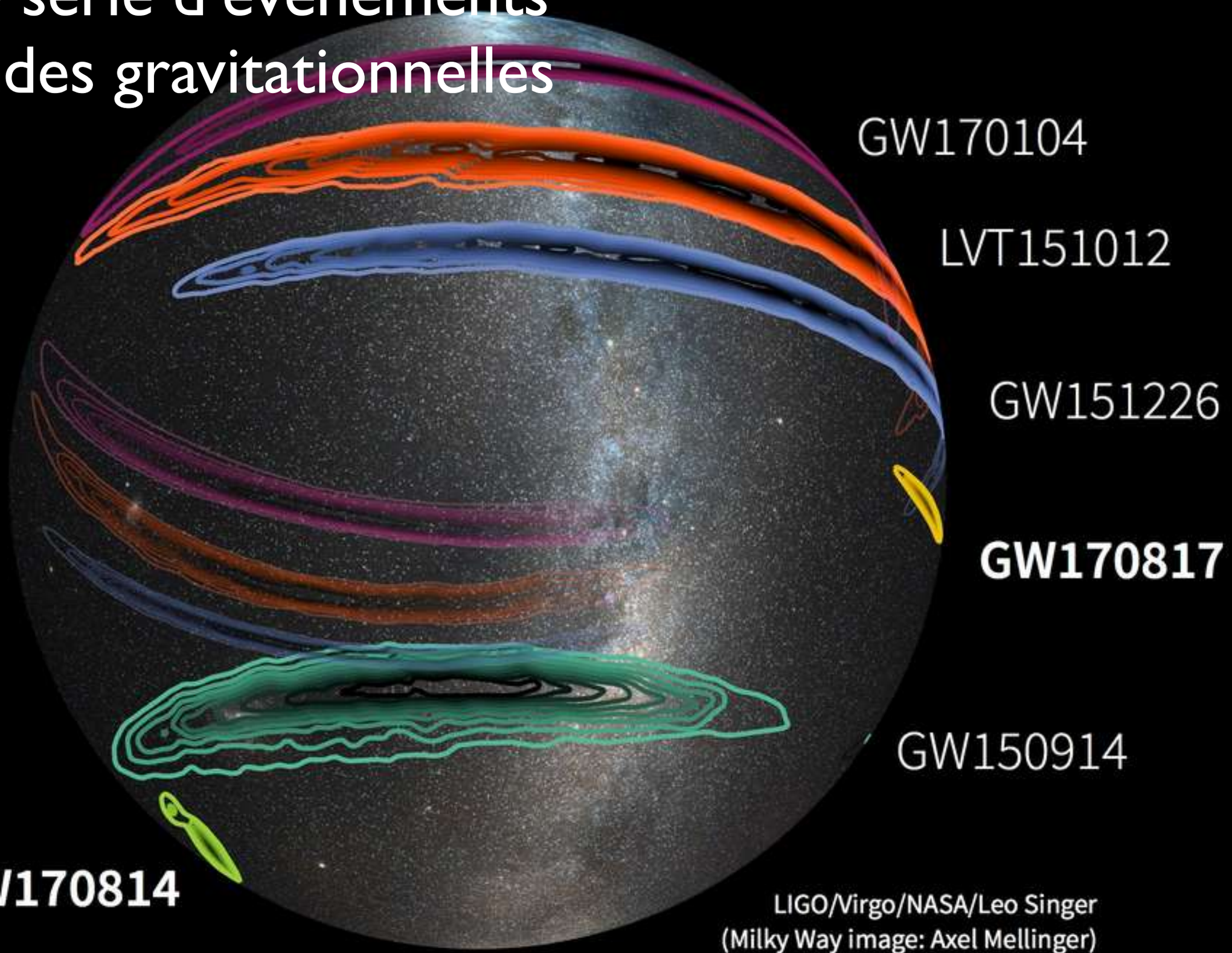


- Déformation spatiale ~10^{-21}: variation de taille d'un atome sur distance Terre-Soleil, d'un noyau atomique sur ø Terre, de 1/1000e taille proton sur 4 km!

S. Chaty



Une série d'événements d'ondes gravitationnelles

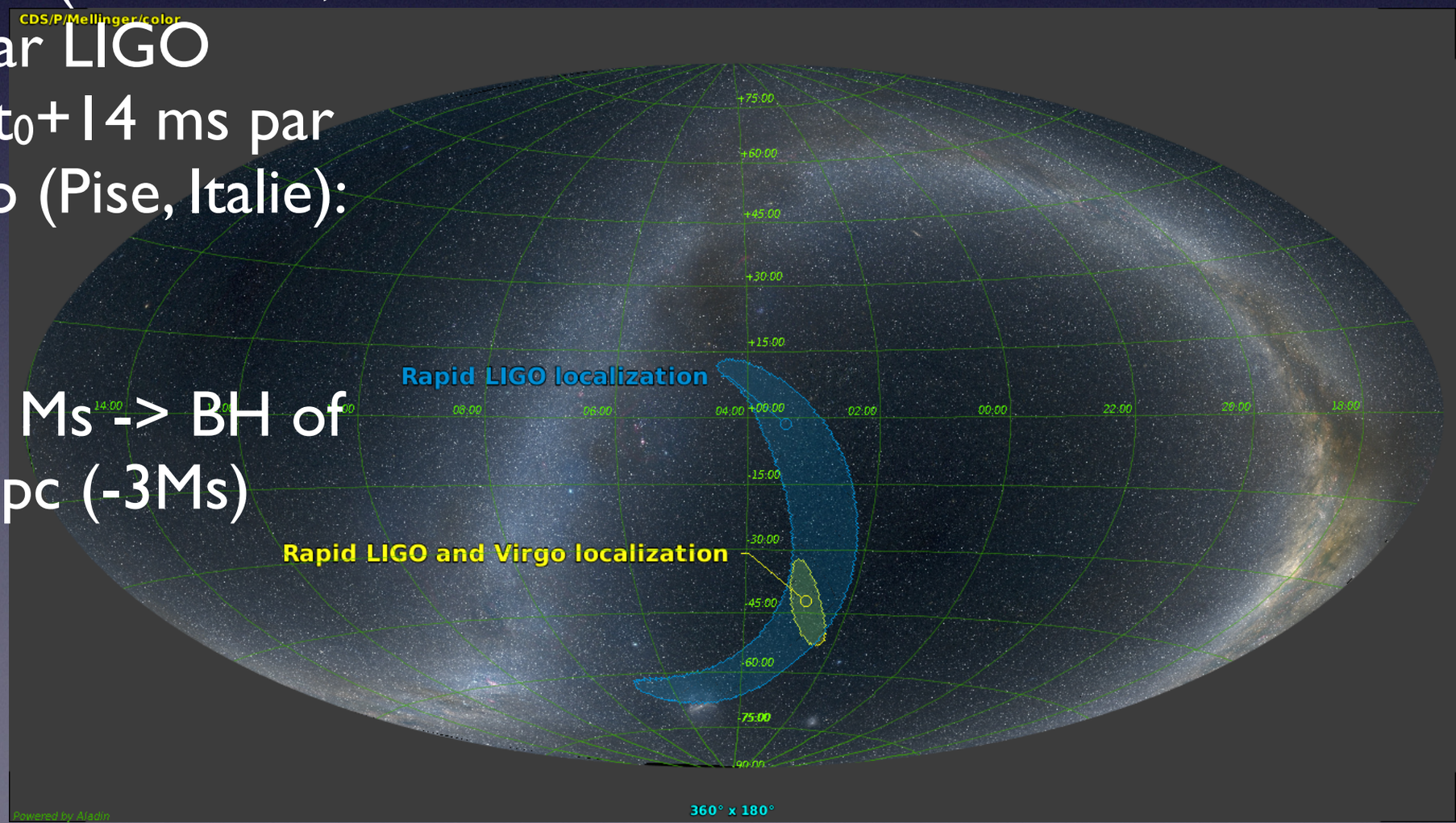


S. Chaty

Evénement du 14 Août 2017

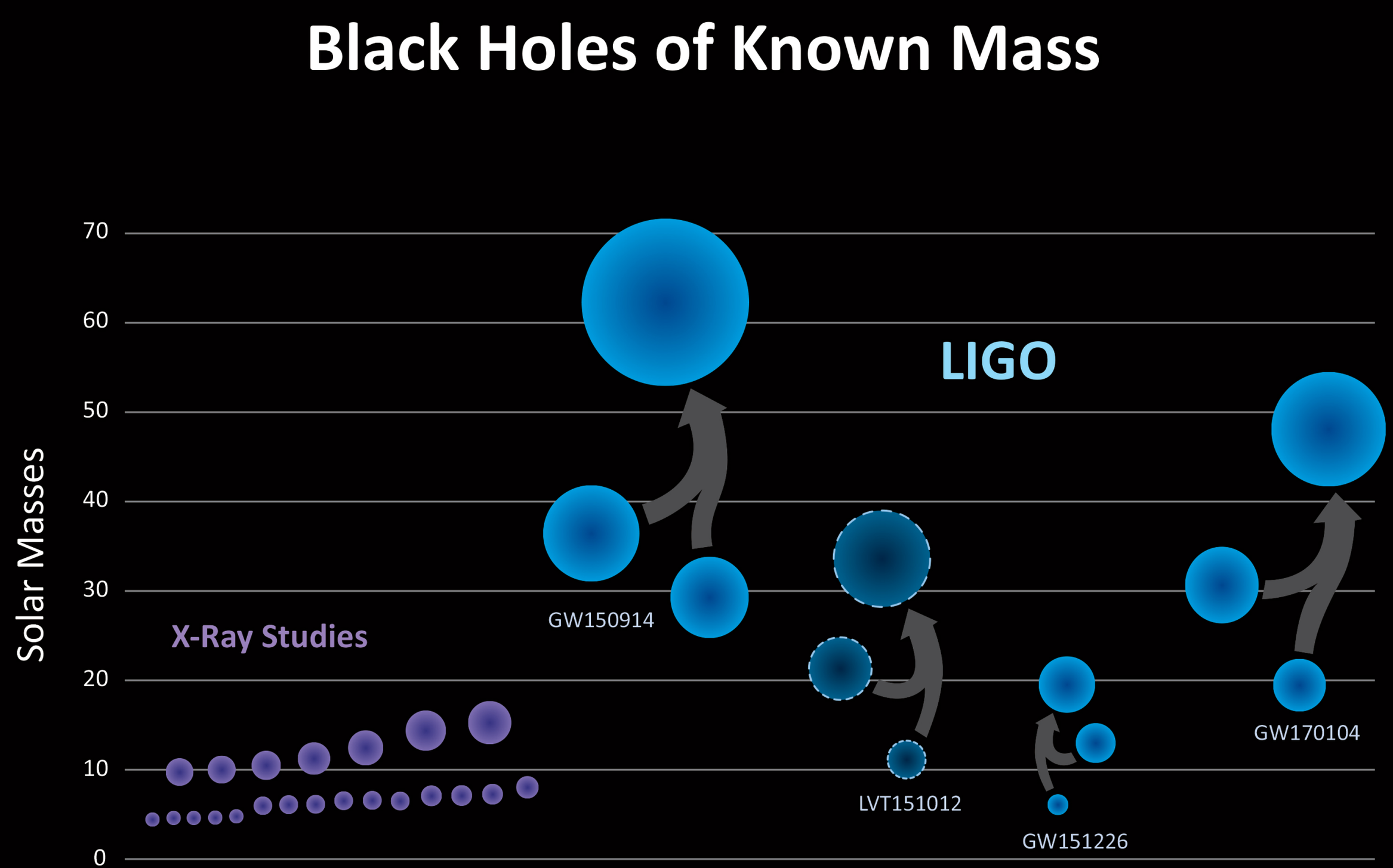
- GW170814: détecté t_0 par Advanced LIGO (Louisiane, US), t_0+8 ms par LIGO (Washington), t_0+14 ms par Advanced Virgo (Pise, Italie): 60°^{2} !

- 2 BH of 31+25 Ms -> BH of 53 Ms @552Mpc (-3Ms)



S. Chaty

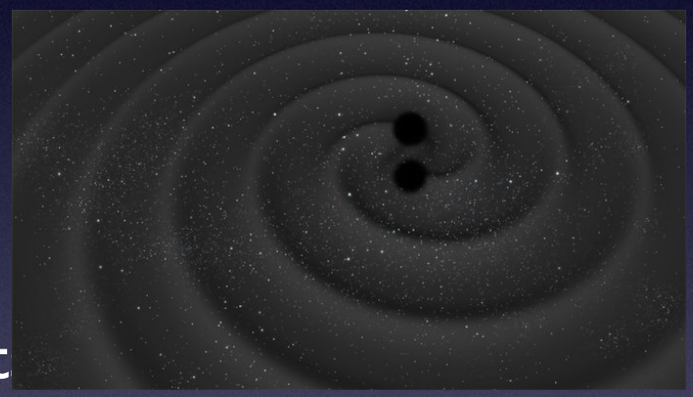
Masse des BBH



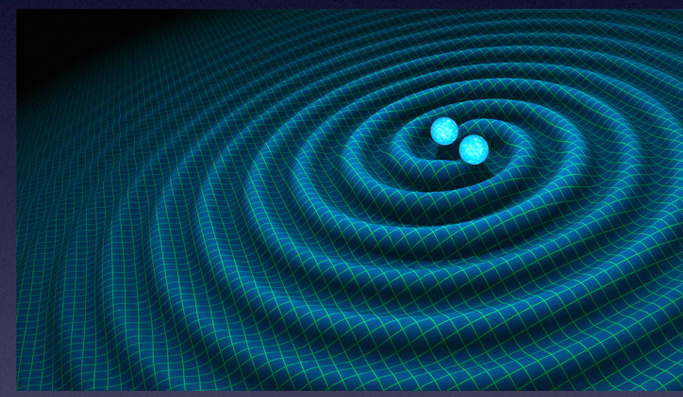
S. Chaty

Evolution binaire

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



- BBH

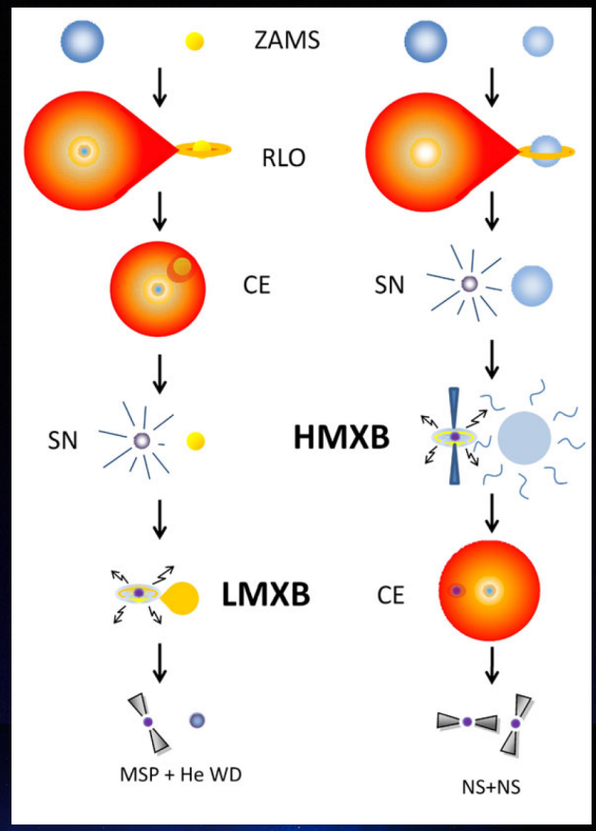


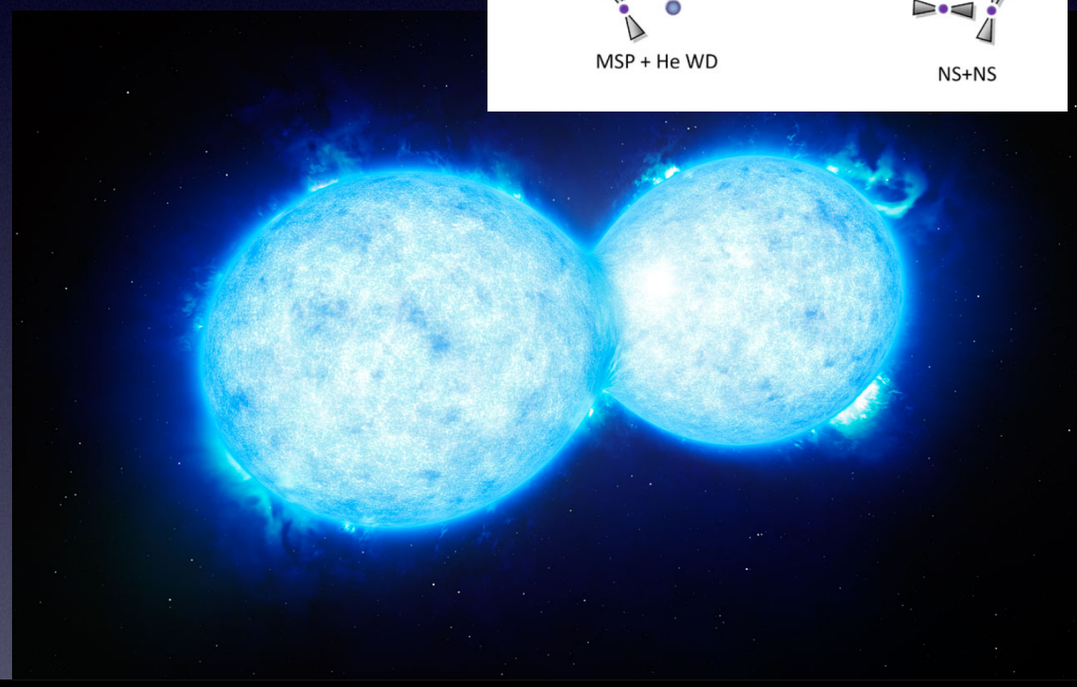
- BNS

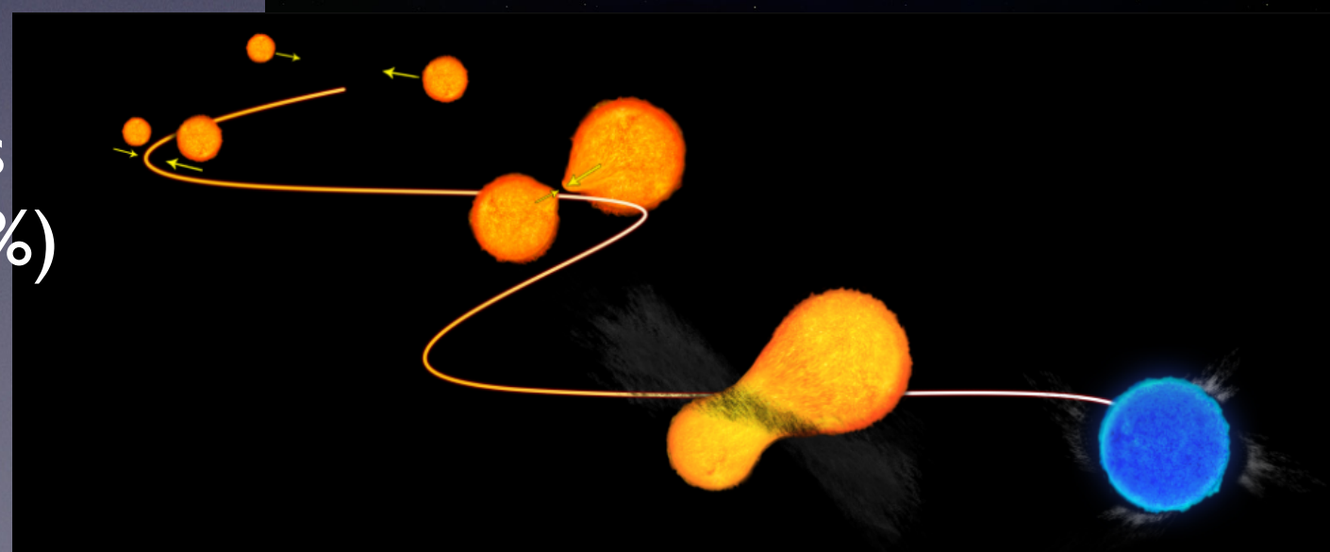
S. Chaty

3 canaux d'évolution binaire

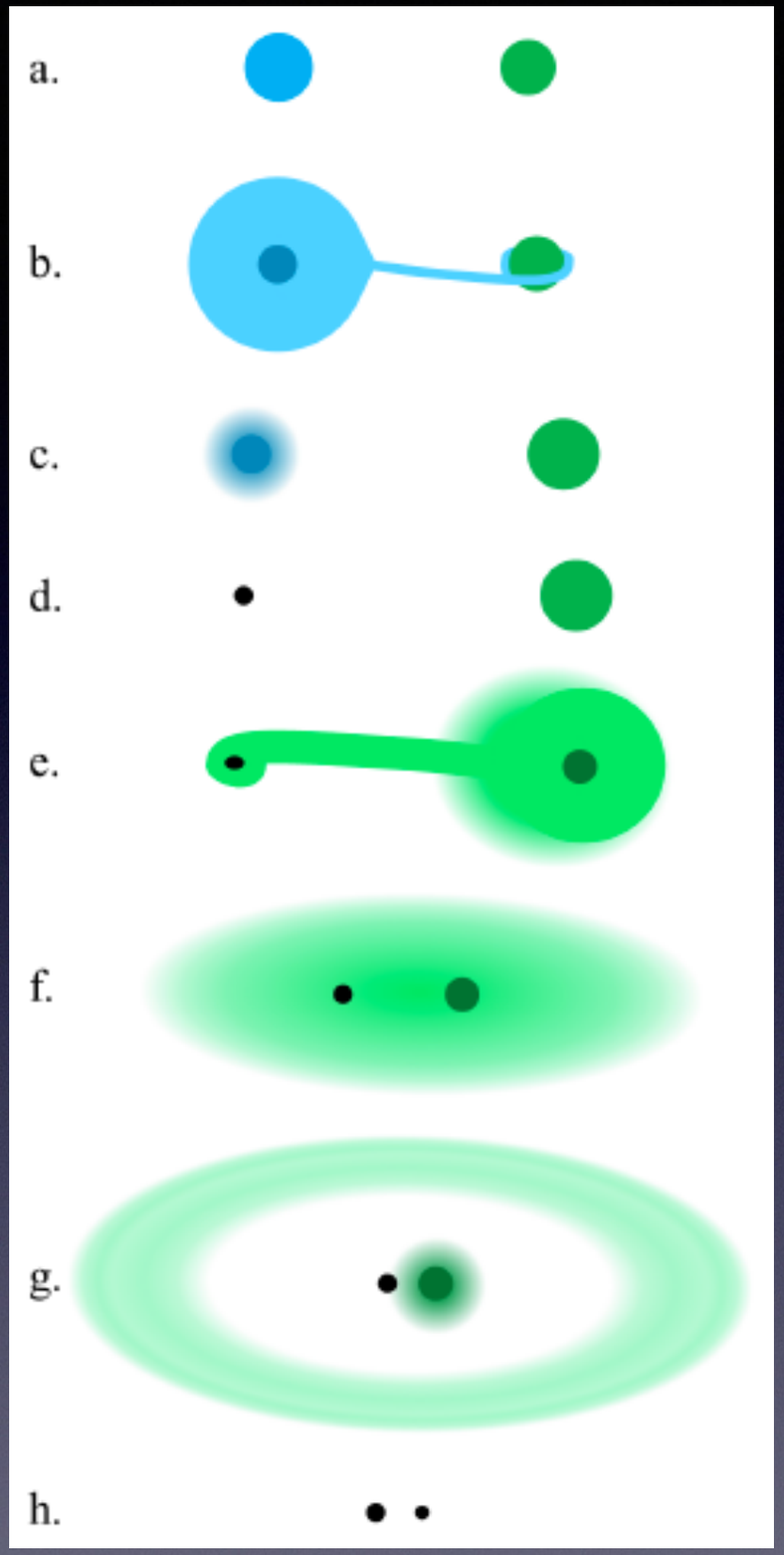
- 1. Classique isolé (90%)
- 2. Evolution chimique homogène & simultanée, convection efficace: convertit tout H en He, se contracte en évoluant (10%)
- 3. Formation dynamique (capture par marée) dans amas stellaire dense (0.1%)

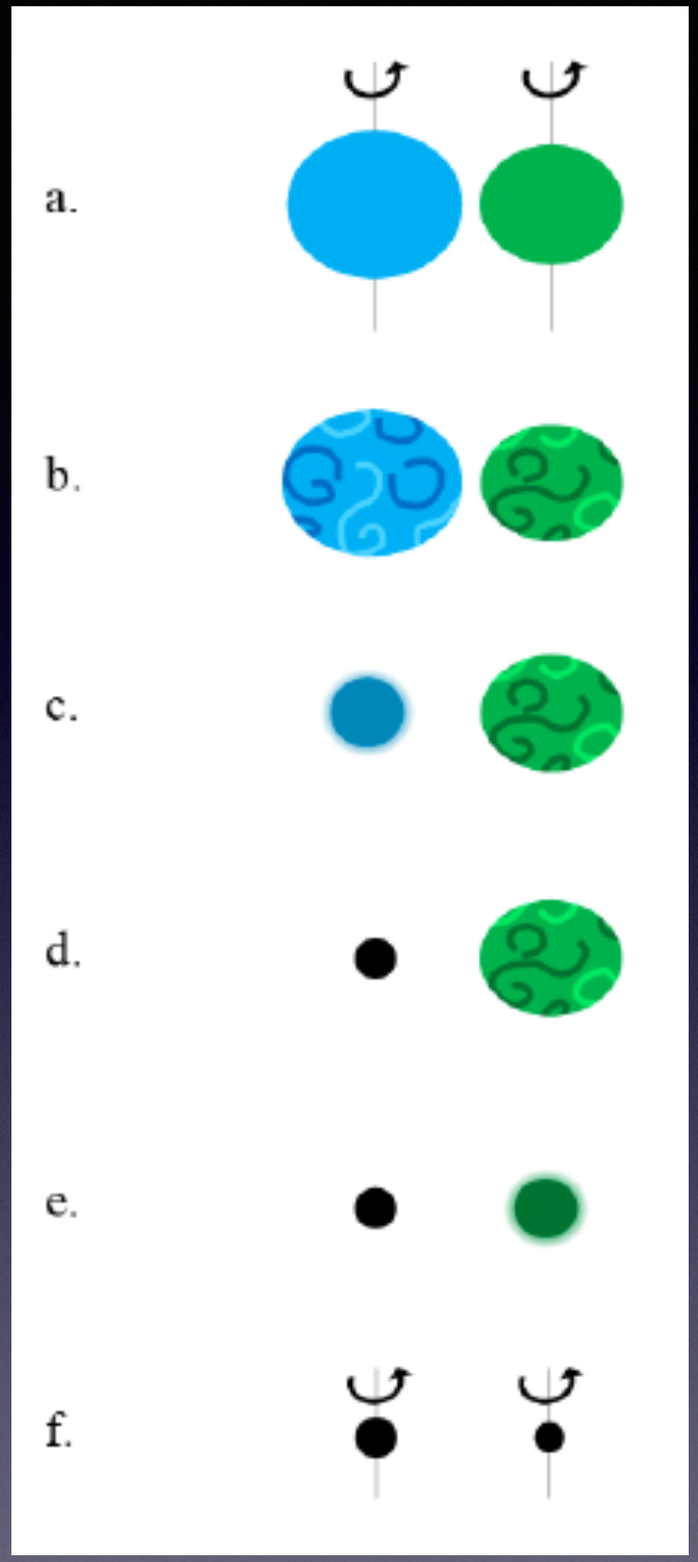


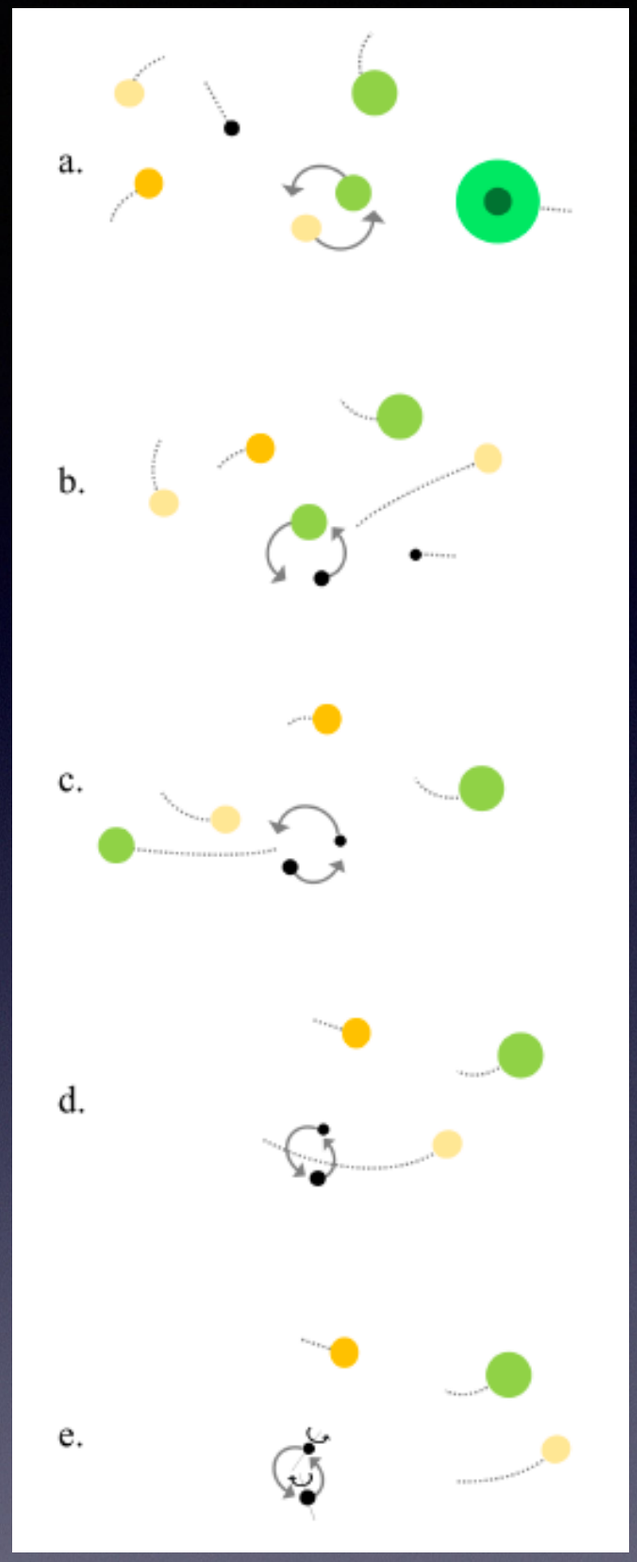




S. Chaty







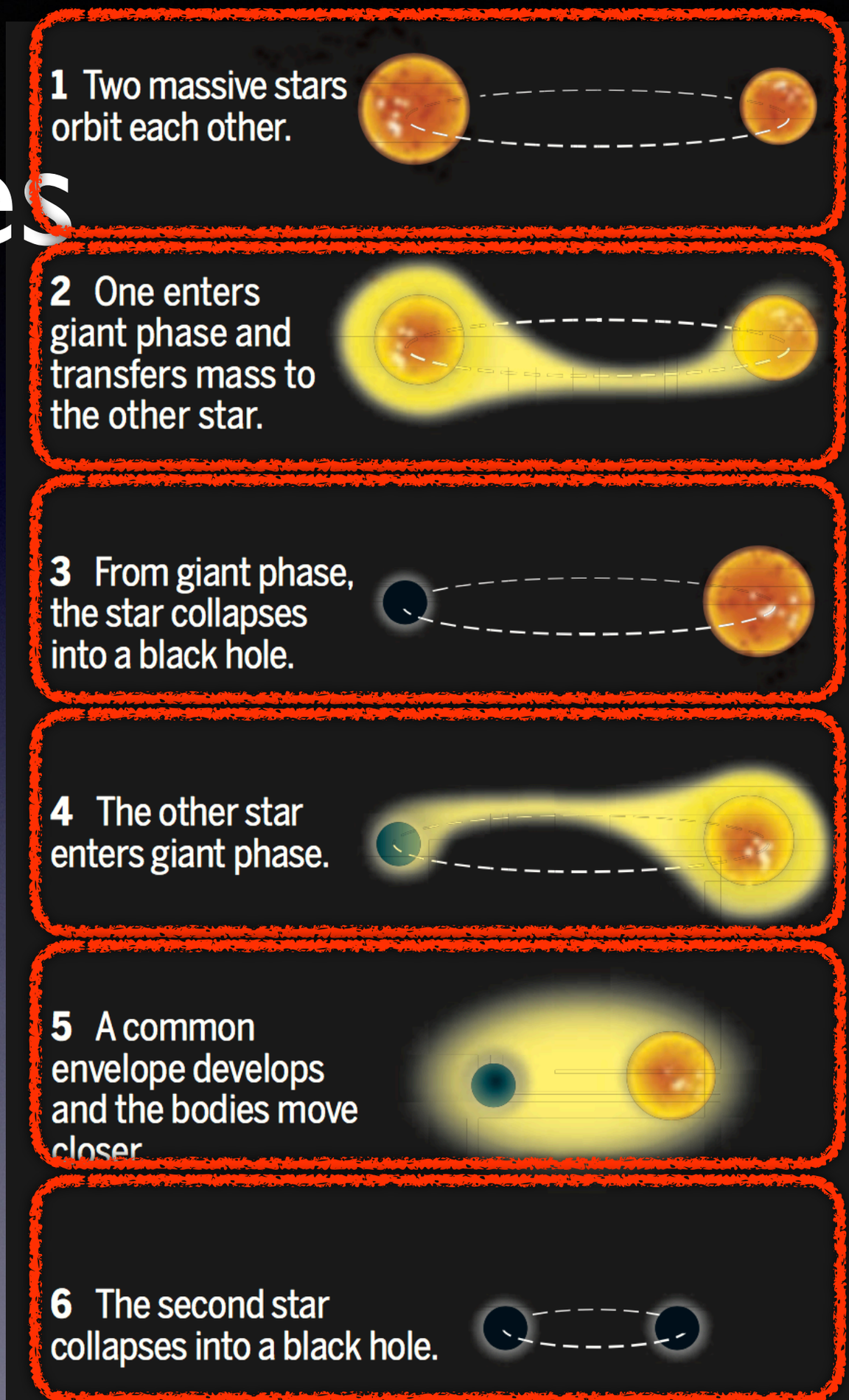
Scénarios de formation: isolé (CE), CHE, dynamique

(Mandel & Farmer 2018)

Couples stellaires

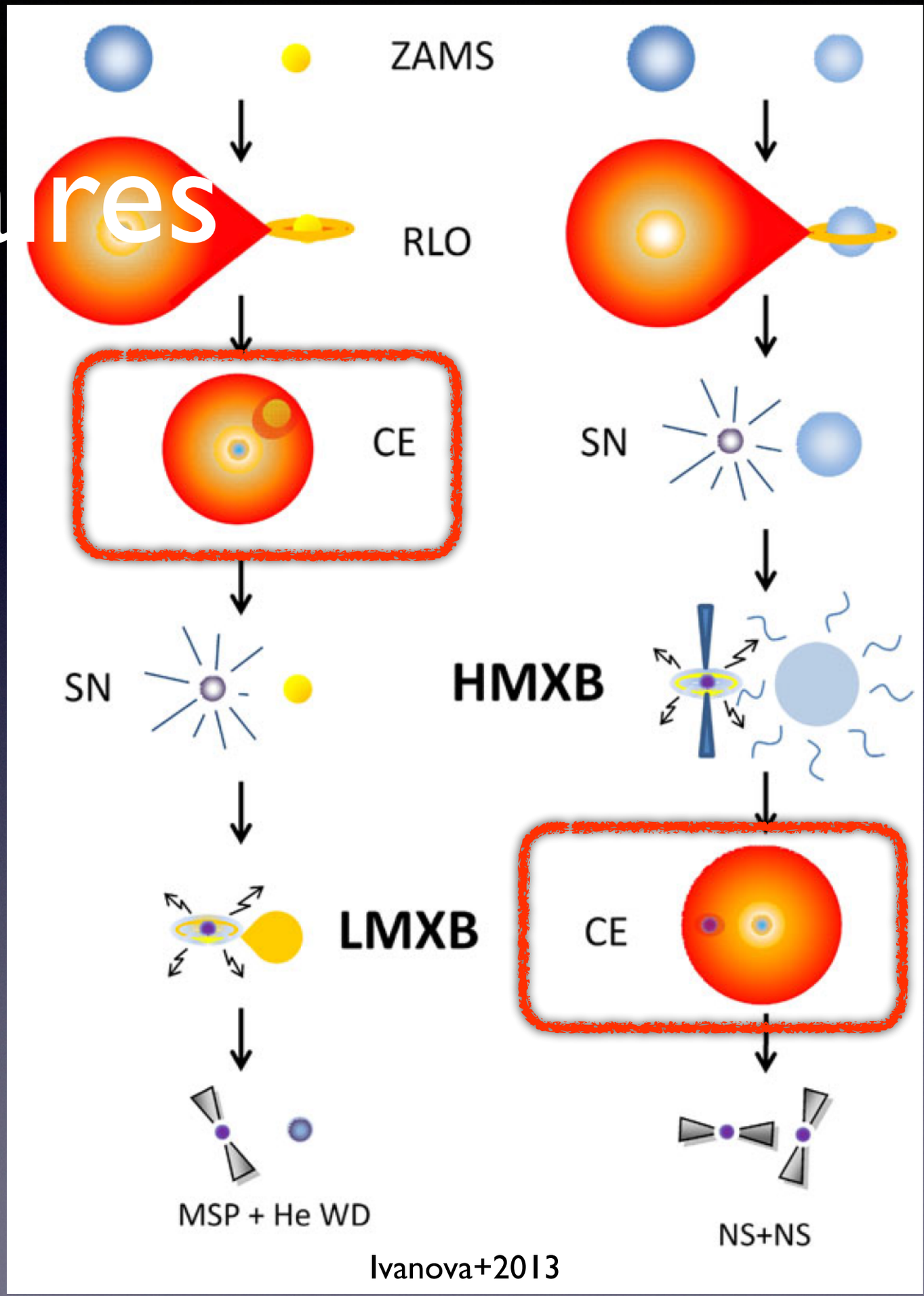
- Evolution d'un couple stellaire qui fusionne dans le temps de Hubble (évolution isolée classique)
- 2 étoiles de masse >10Ms
- Etoile 1 -> Géante rouge -> BH
- Etoile 2 -> Géante rouge
- Phase d'enveloppe commune
- Fin: binaires d'astres compacts: BNS, BBH, ou NS-BH

S. Chaty



Couples stellaires

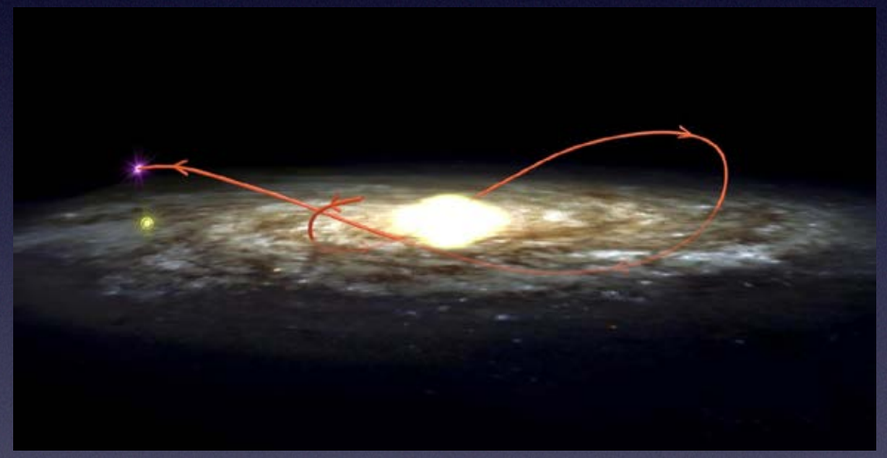
- Début: 2 étoiles de masse <1 ou >10Ms
- Evolution: rapport de masse, distance orbitale, remplissage du lobe de Roche, vent stellaire, enveloppe commune
  -> LMXB vs HMXB
- Fin: binaires d'astres compacts:
  BWD, BNS, BBH, etc



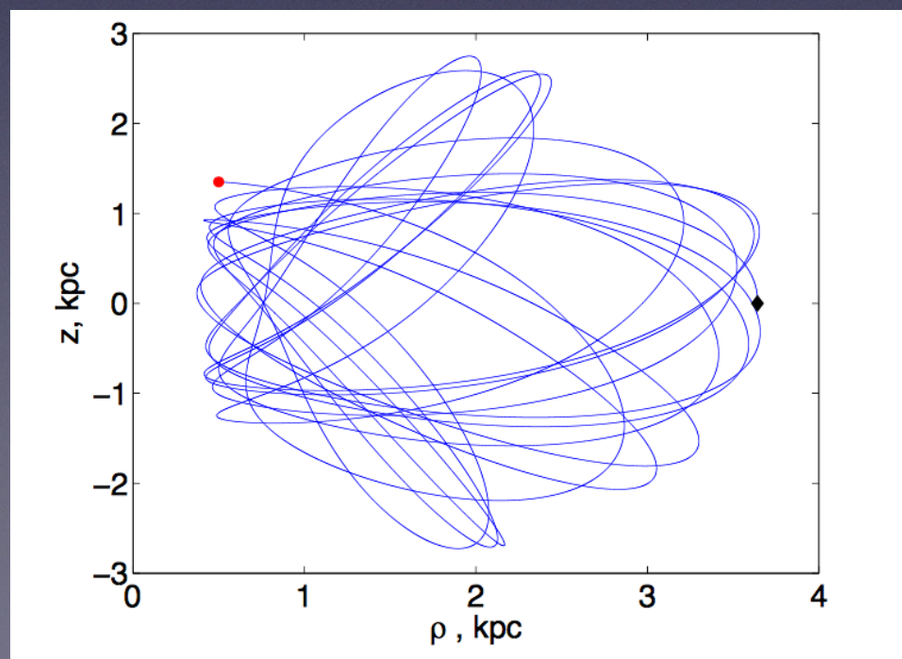
Ivanova+2013

3 incertitudes dans l'évolution binaire

- 1. Kick natal (vitesse systémique lors de la SN) (Mandel+2016)

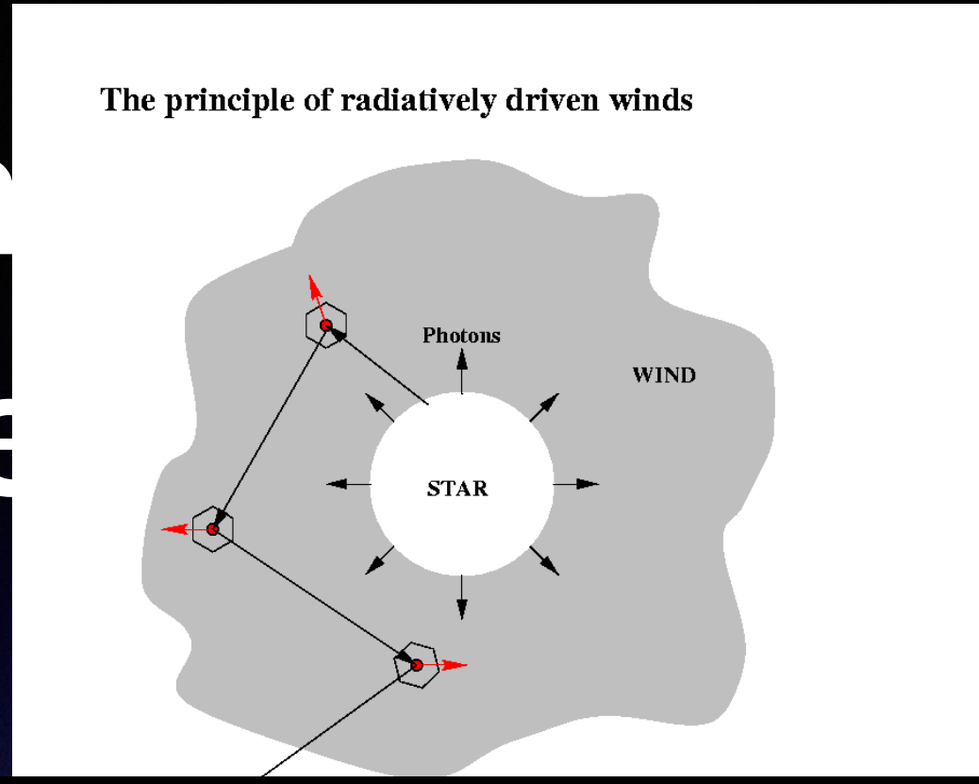


- => destruction du système binaire? (Mirabel+2001)



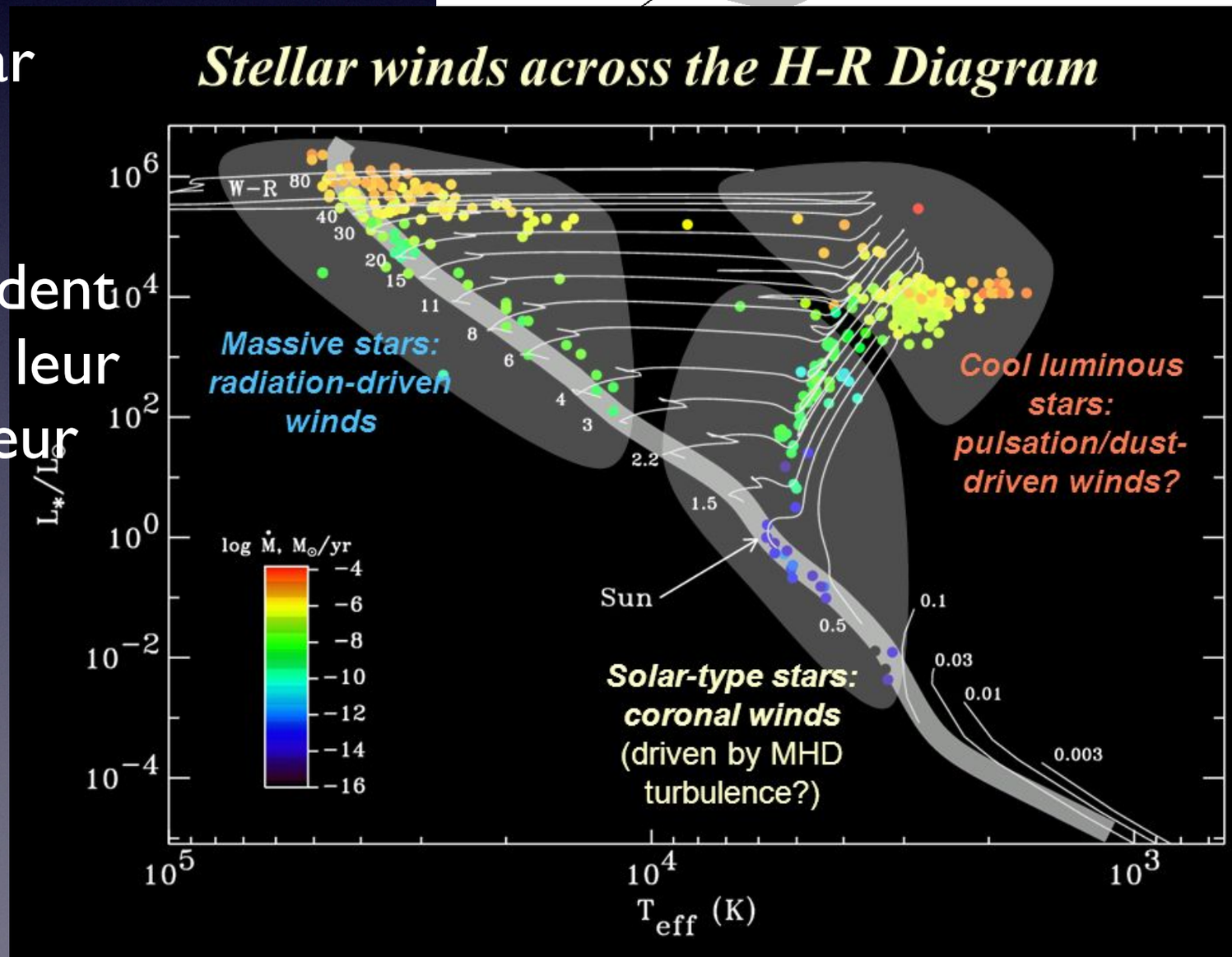
S. Chaty

3 incertitudes dan
l'évolution binaire



- 2. Perte de masse par vent stellaire

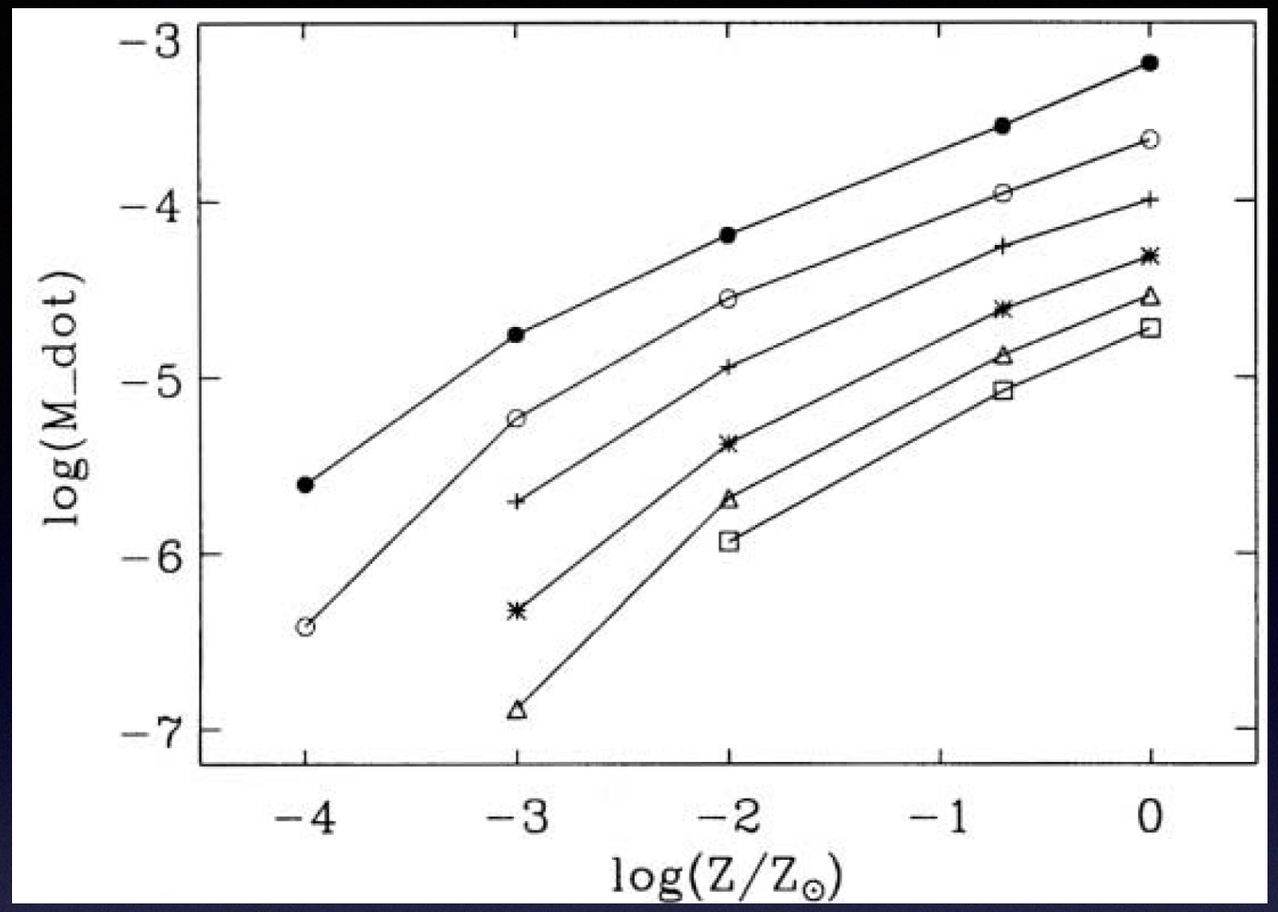
- Etoiles massives perdent la majeure partie de leur masse au cours de leur évolution!

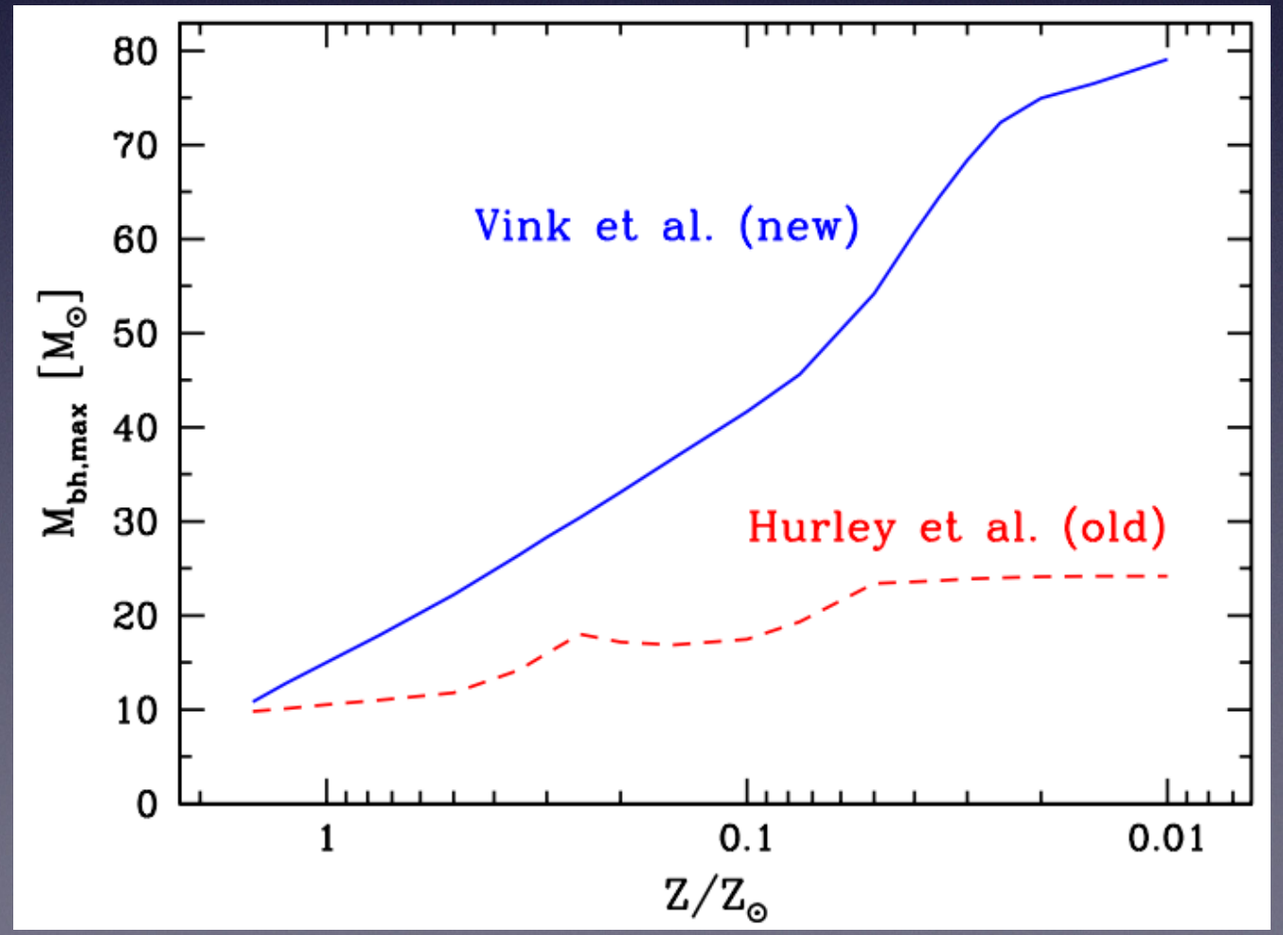


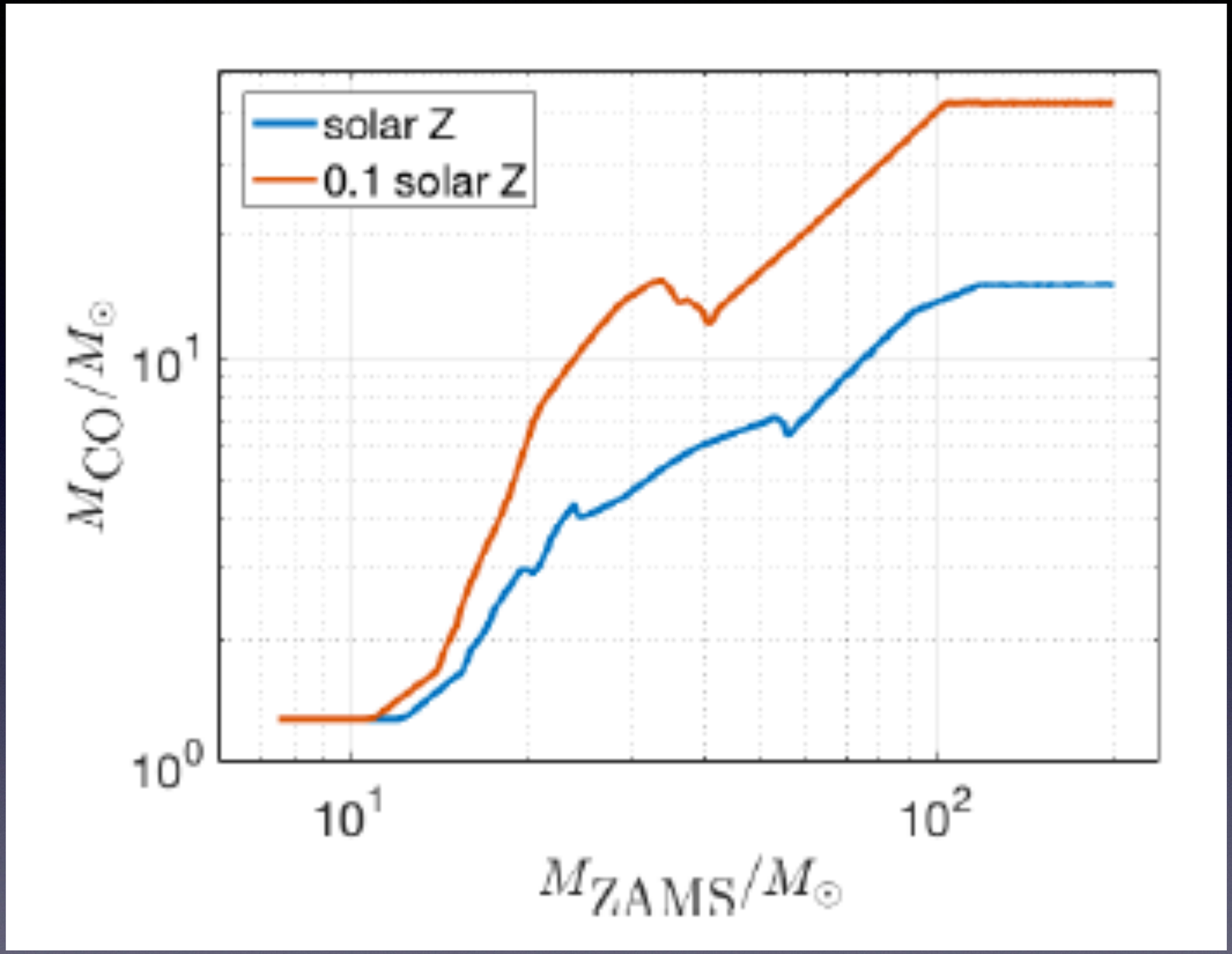
S. Chaty

Comment former des BH massifs?

- Comment expliquer la fusion de 2 BH massifs?
- Intensité du vent stellaire corrélée à la métallicité: moins de métaux => vent moins intense! (Kudritzki+2000)
- => influence sur la masse maximale du rémanent stellaire: moins de métaux => rémanent plus massif!





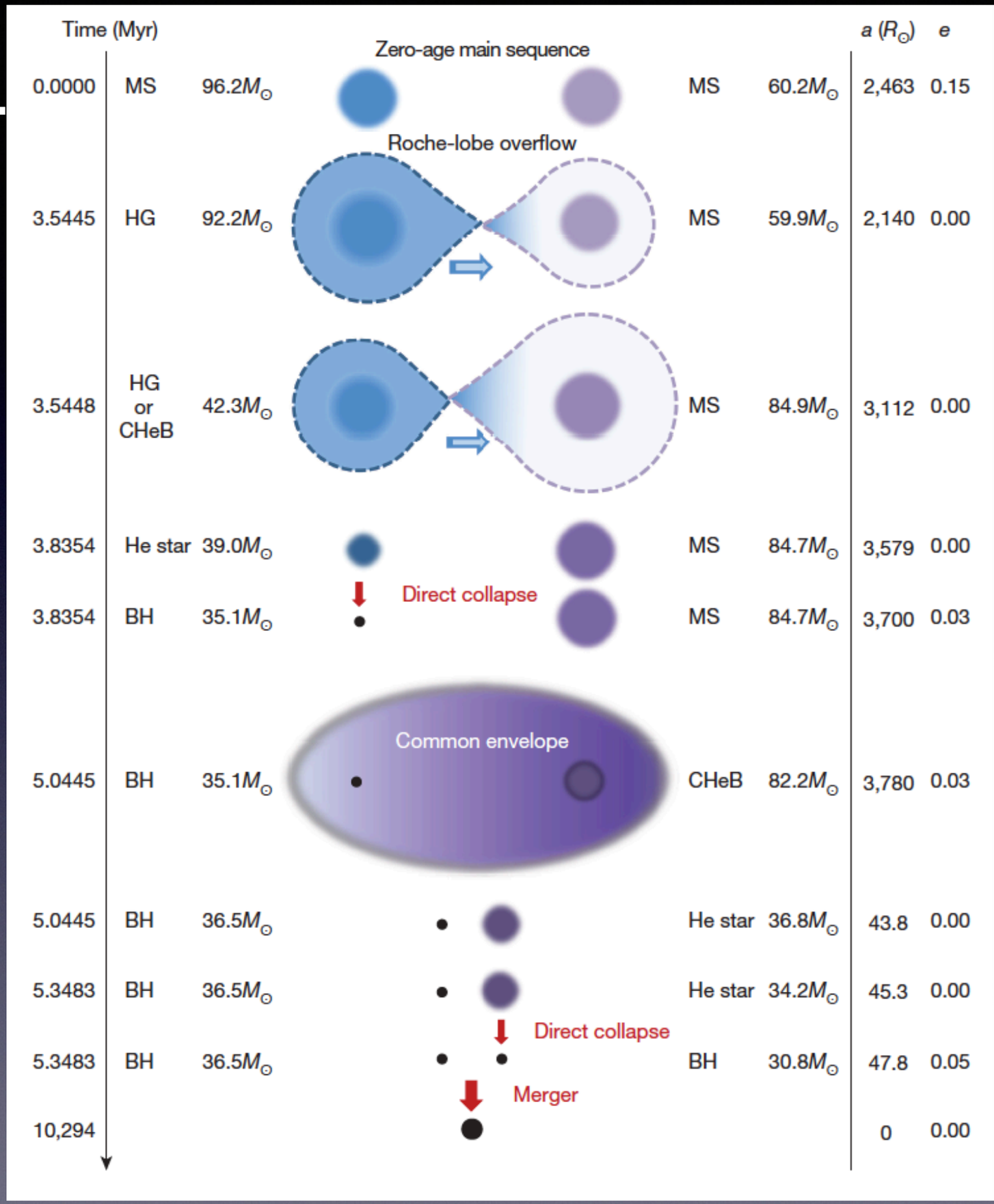


Masse de l'objet compact rémanent

(Stevenson et al 2017)

Evénement du 14 Sept. 2015

- Extrapolation aux environnements de faible metallicité galactique
- Pour fusionner dans le temps de Hubble, BH doivent avoir été séparés de moins de 1/5 au!



- Belczynski+2016

3 incertitudes d
l'évolution bi

- 3. Phase d'enveloppe commune (CE)

- Etoile 1 évolue en géante rouge, son rayon augmente, remplit son lobe de Roche, son enveloppe englobe étoile 2, l'orbite se rétrécit par dissipation visqueuse du moment cinétique

- Puis: éjection de l'enveloppe ou fusion des 2 composantes? (Paczynski+1976; Webbink 2008, Ivanova+2002)

- Combien de systèmes survivent?

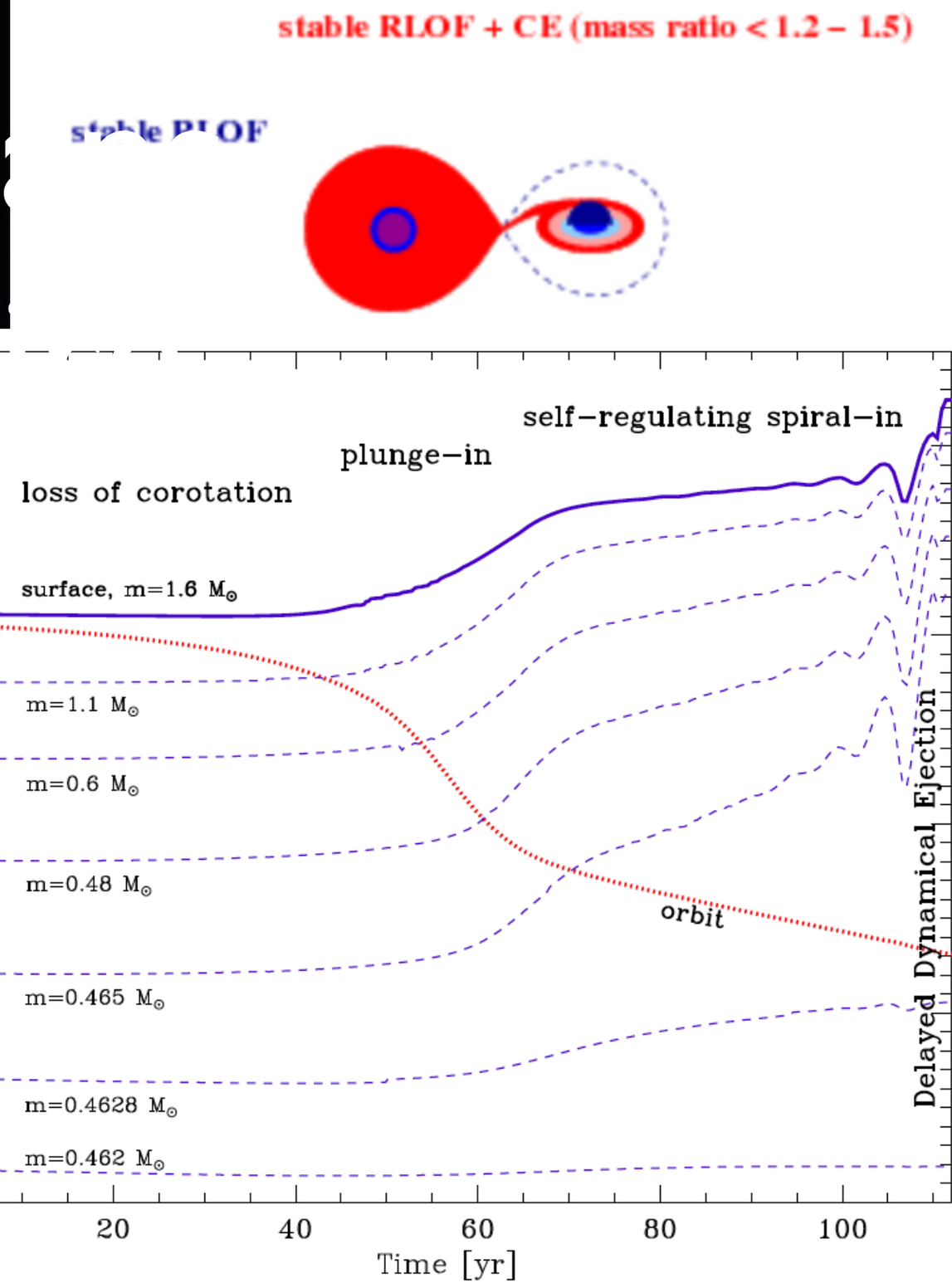


Fig. 2 The main potential phases of a CE event prior to the envelope ejection or the merger. This example is for a $1.6M_{\odot}$ red giant and a $0.3M_{\odot}$ WD, using data from one-dimensional hydrodynamical simulations in Ivanova (2002). Not all phases are expected to happen during all CE events. The dashed lines represent locations at fixed mass coordinates, and the dotted line shows the location of the in-spiralling secondary

S. Chaty

Spin

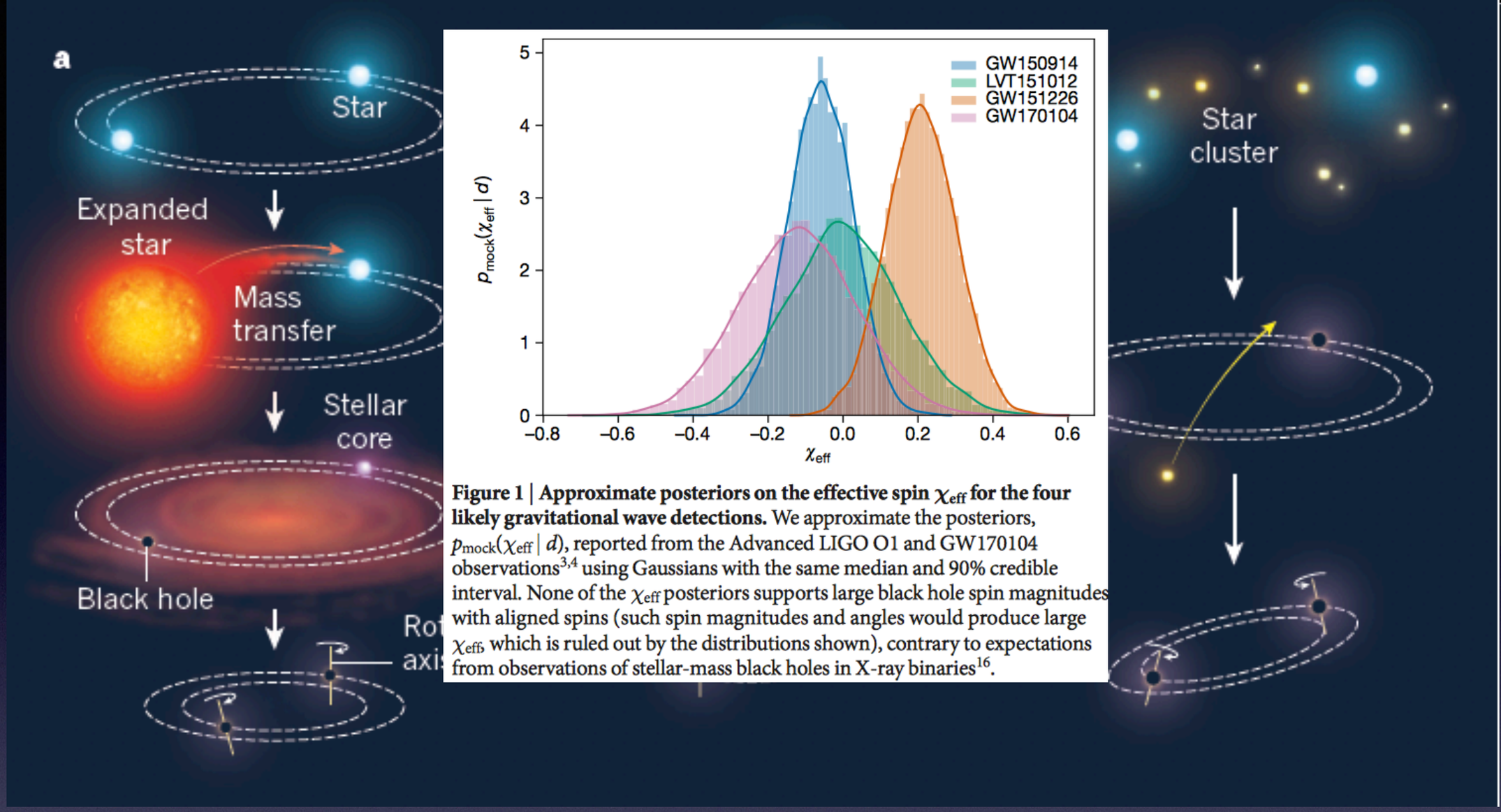
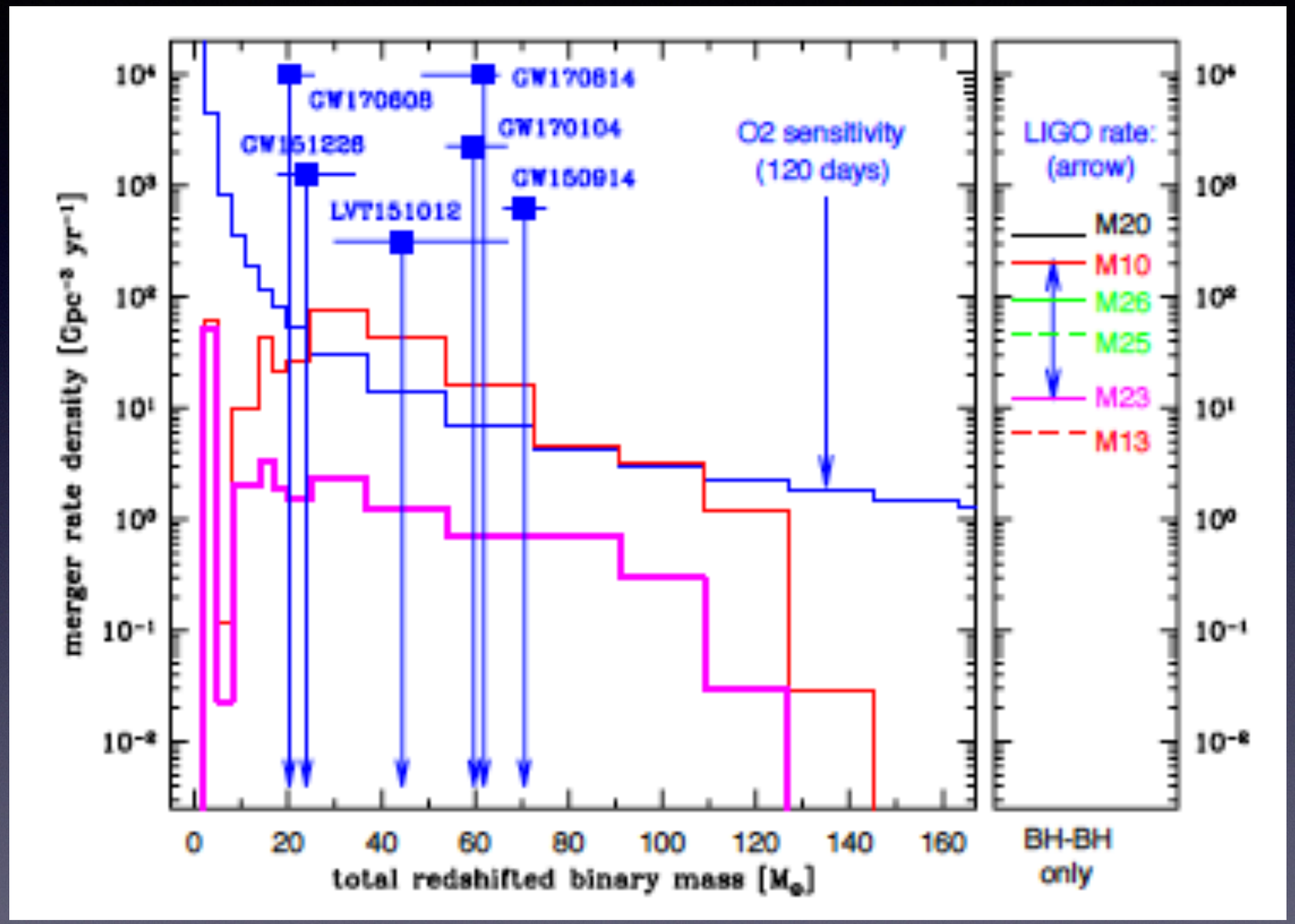


Figure 1 | Approximate posteriors on the effective spin χ_{eff} for the four likely gravitational wave detections. We approximate the posteriors, $p_{\mathrm{mock}}(\chi_{\mathrm{eff}} \mid d)$, reported from the Advanced LIGO O1 and GW170104 observations[3,4] using Gaussians with the same median and 90% credible interval. None of the χ_{eff} posteriors supports large black hole spin magnitudes with aligned spins (such spin magnitudes and angles would produce large χ_{eff}, which is ruled out by the distributions shown), contrary to expectations from observations of stellar-mass black holes in X-ray binaries[16].

- a. BH formés après évolution d'un couple d'étoiles massives => spins non alignés (SN)
- b. BH produits dans couple d'étoiles proches en rotation rapide => spins alignés (transfert de masse)
- c. BH formés séparément dans amas stellaire dense, rapprochés par interaction gravitationnelle dynamique => spins non alignés!
- Spins des BH non alignés (prob. 80% à 180°) => probable formation par canal dynamique!

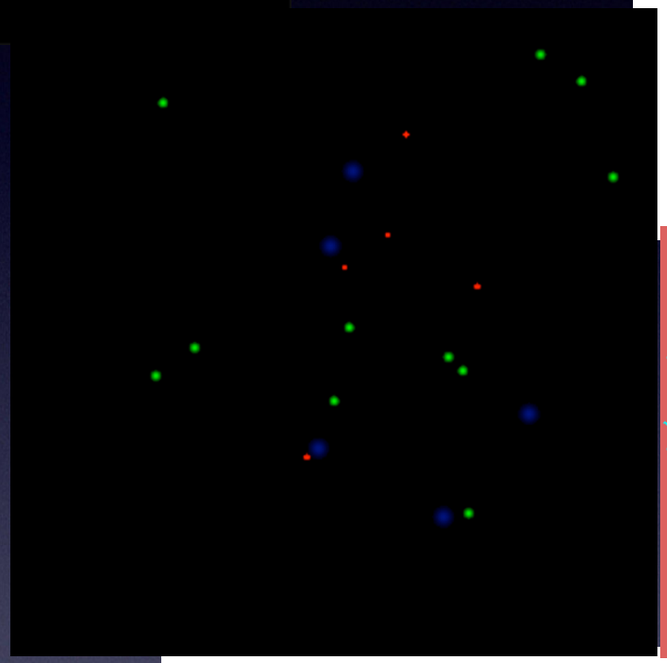
Taux de fusions

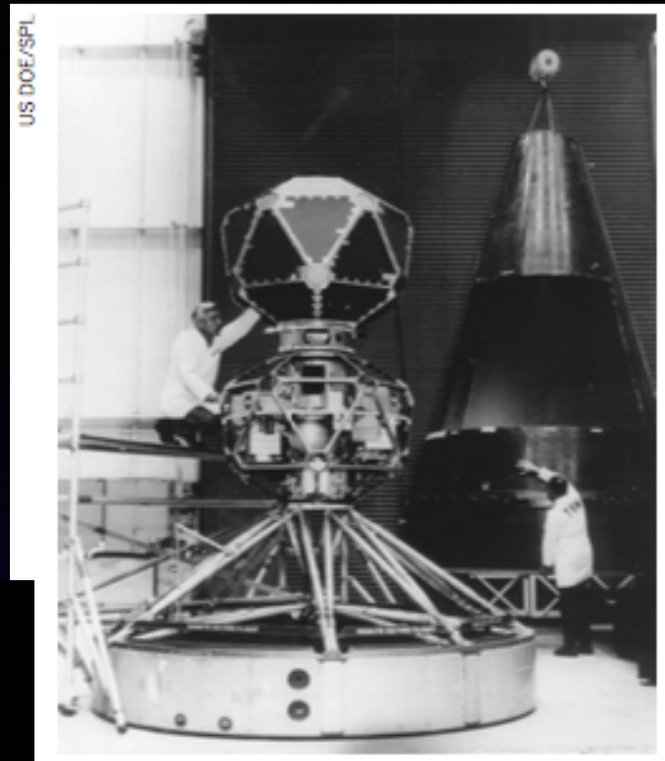


- Courbe de sensibilité de LIGO/Virgo: taux de fusion des objets compacts (BBH, BNS, BH-NS): pour une galaxie du type MW ~1-20 fusions/Myr!

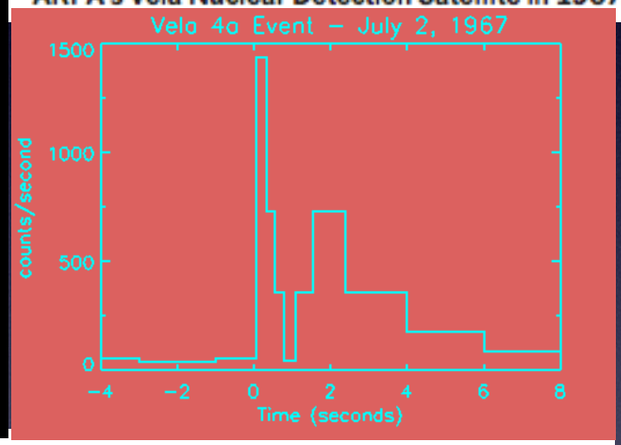
S. Chaty

Sursauts de rayons γ

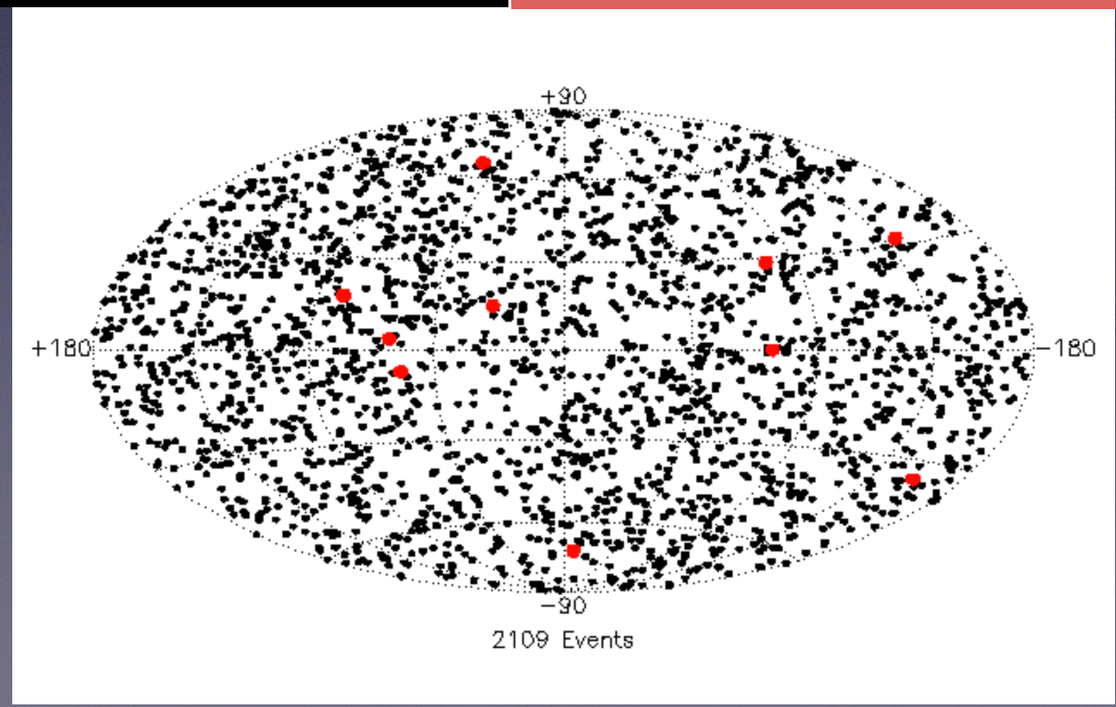




ARPA's Vela Nuclear Detection Satellite in 1967.



- Détectés en 1967 par satellites Vela (tests nucléaires), annoncés en 1973, isotropes dans le ciel



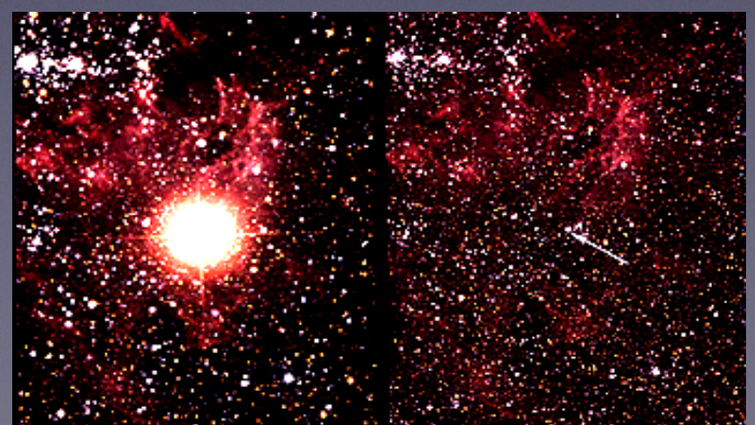
S. Chaty

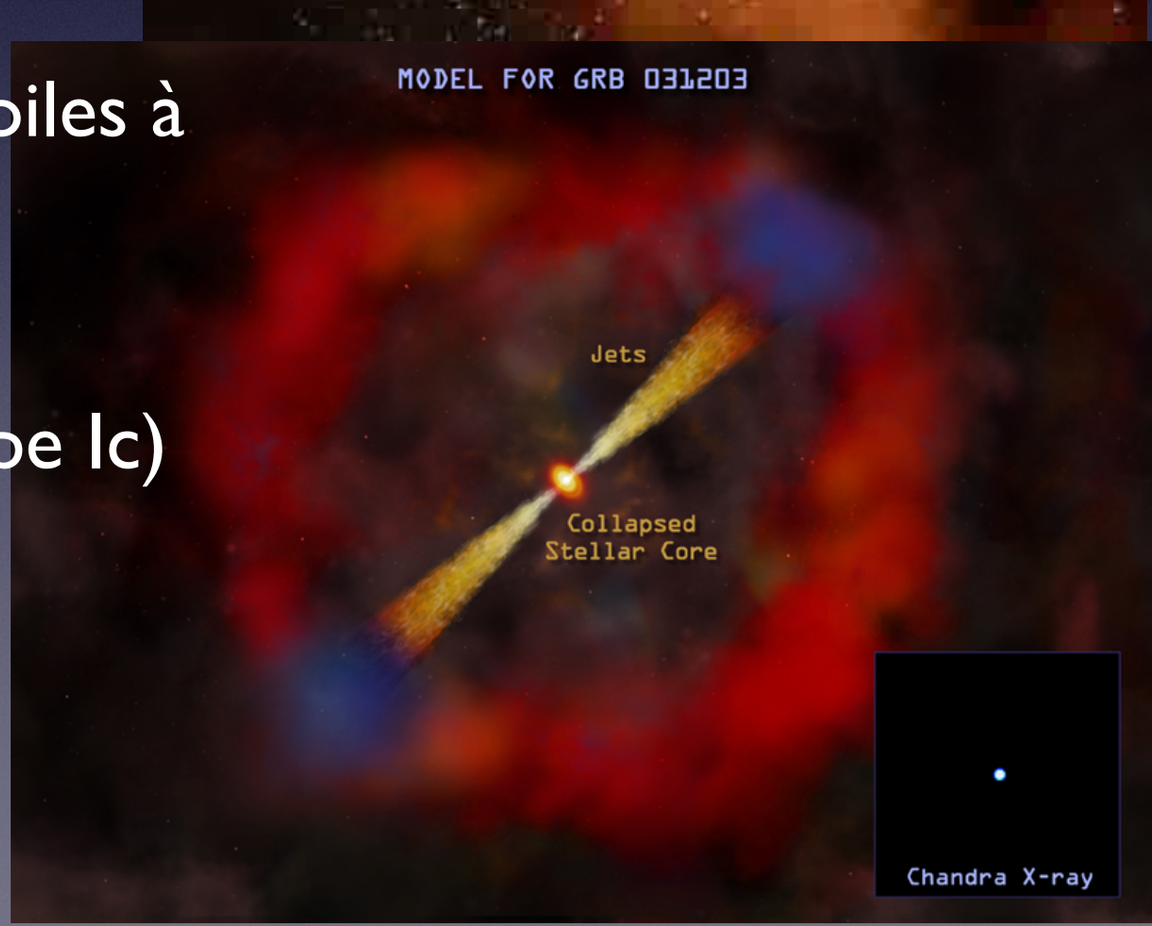
Sursauts de rayons γ

- Explosions les + énergétiques de l'Univers (jets très collimatés), observables jusqu'aux confins de l'Univers, durée: s -> mn

- Sursauts courts: coalescence de 2 étoiles à neutron / trous noirs?

- Sursauts longs: effondrement d'étoile massive (hypernova, SN associées: Type Ic)

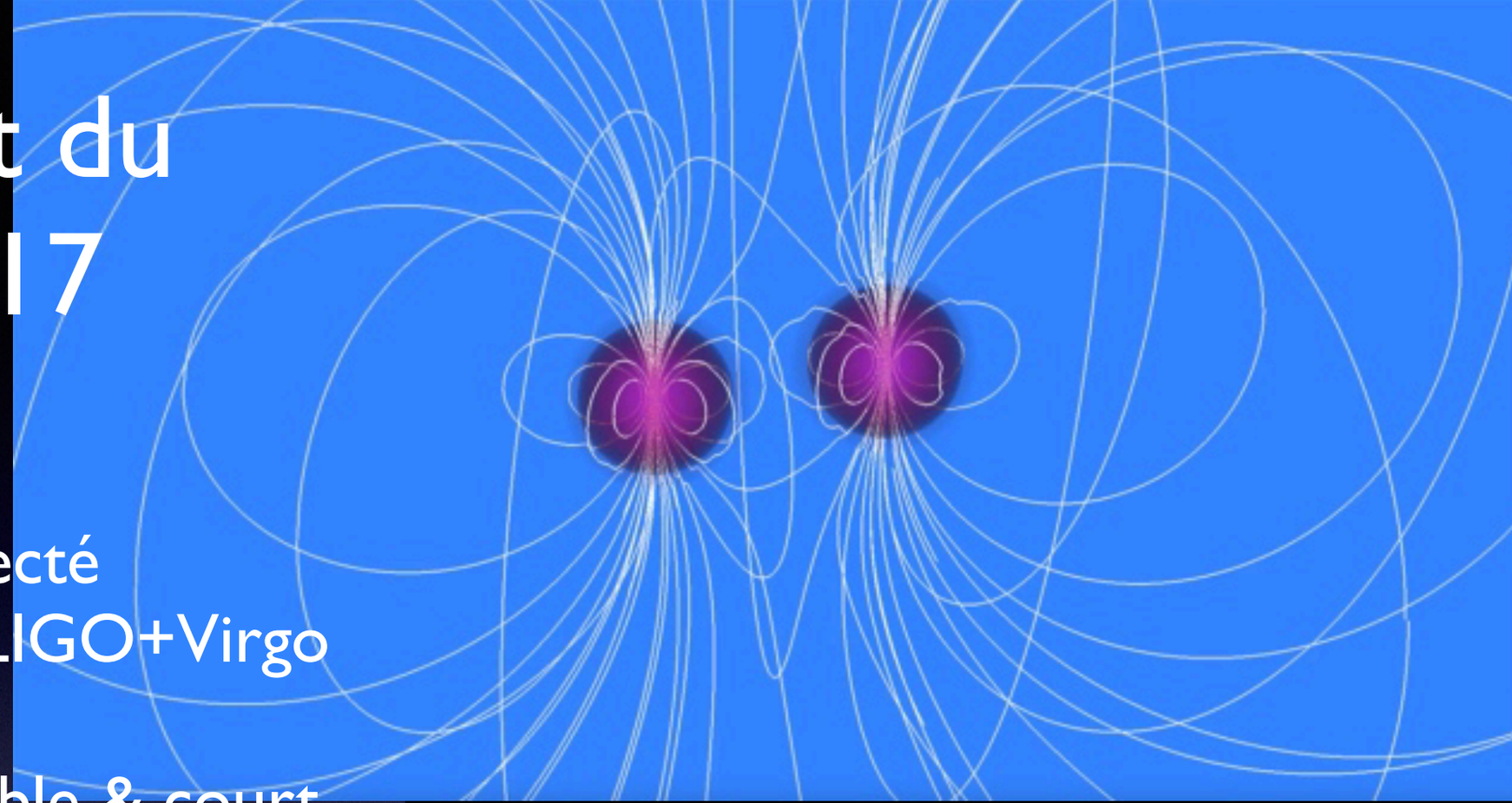




S. Chaty

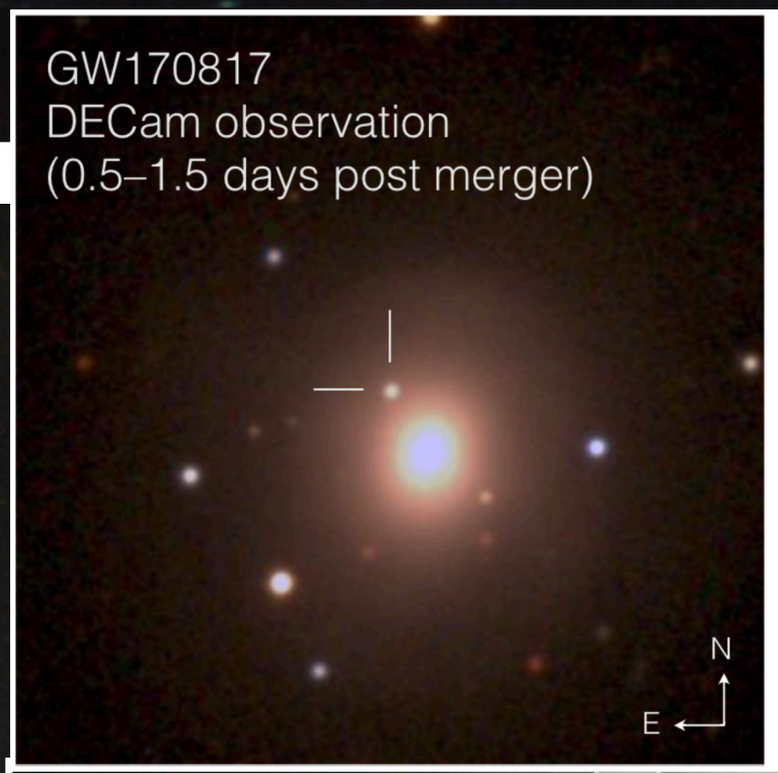
Evénement du 17/08/2017

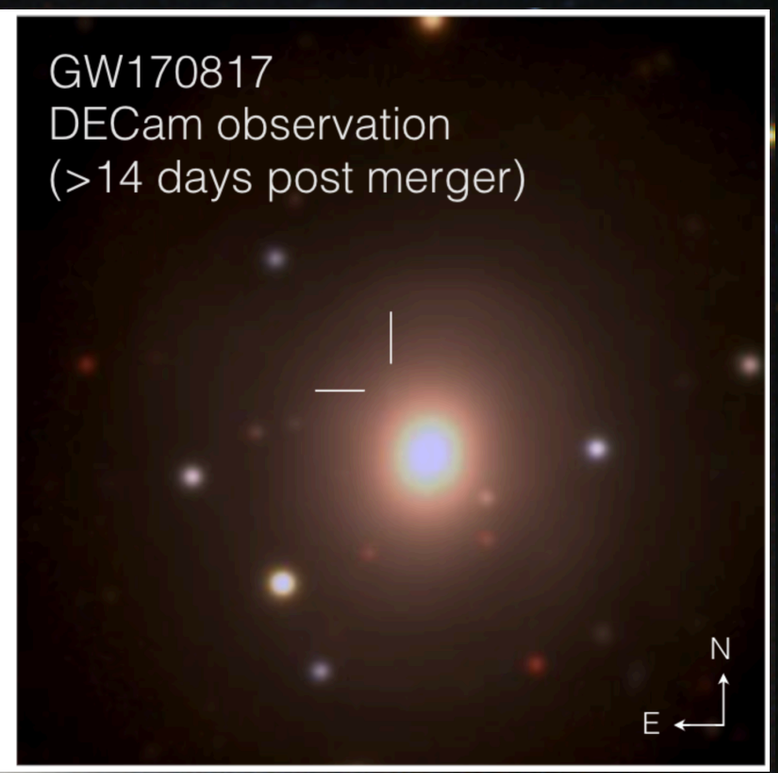
- GW170817: détecté 17/08/2017 par LIGO+Virgo
- GRB170817A faible & court détecté par Fermi/GBM & INTEGRAL (retard 1.7s)
- $28^{\circ 2}$
- 2 NS 1.36-2.26 + 0.86-1.36 Ms => Produit final 2.82Ms NS/ BH? @~40Mpc



S. Chaty

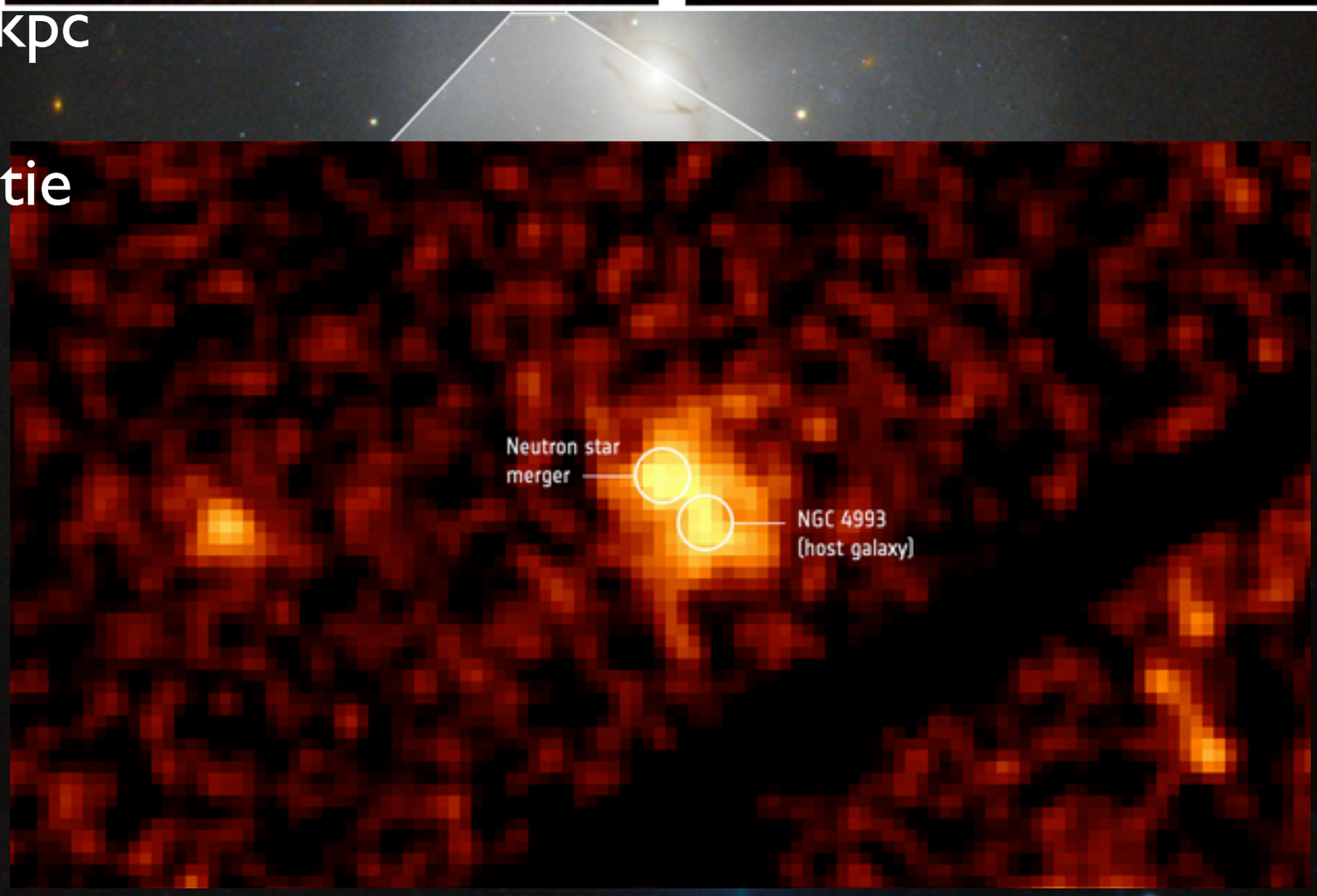
Evénement du 17/08/2017





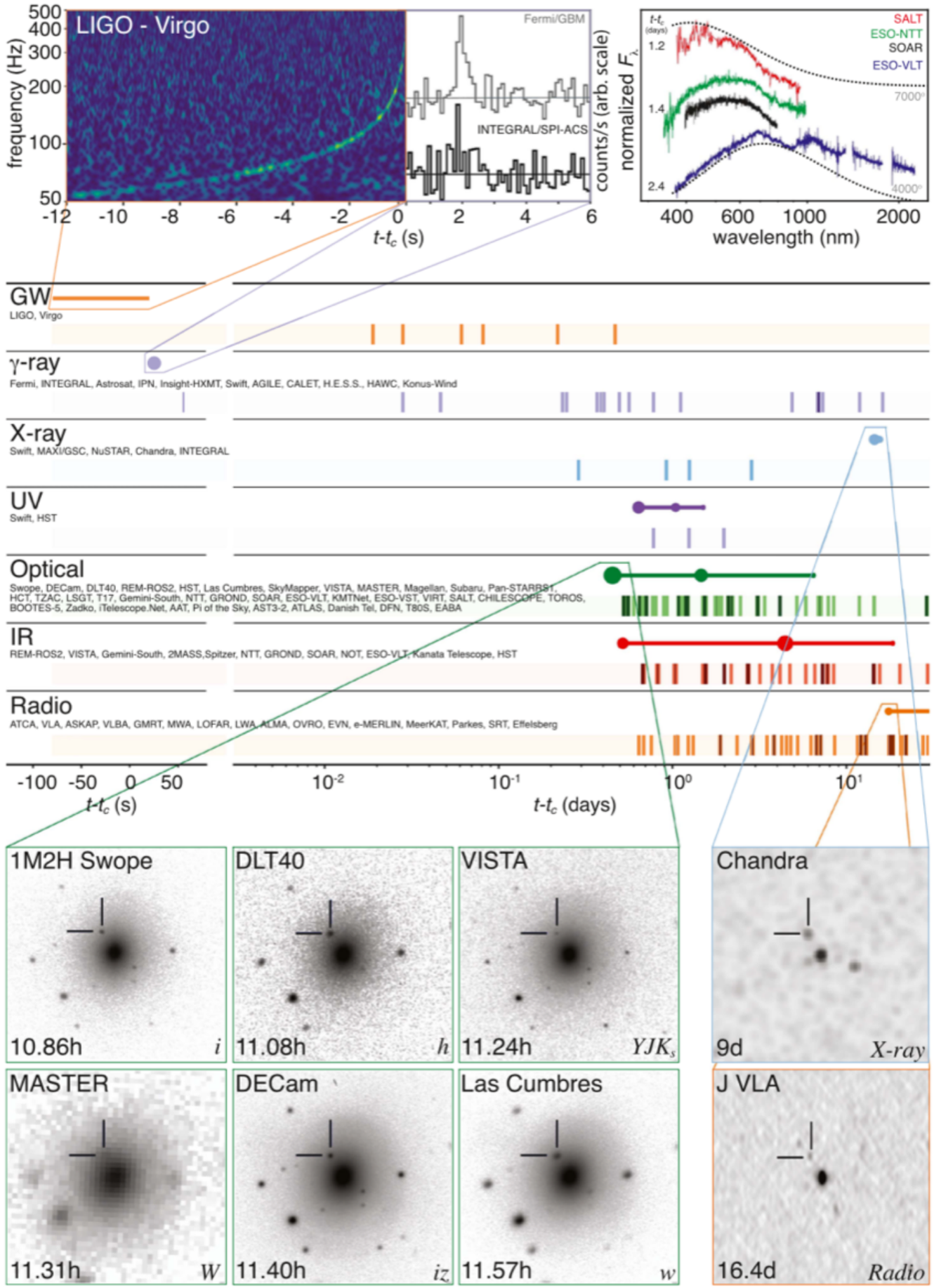
- Variable SSS17a @2.2 kpc du centre de la galaxie NGC 4993. Contrepartie électromagnétique:

- UV 1j post-fusion, OIR qq j + tard, X-ray 9 j + tard, radio GHz 16 j + tard!



S. Chaty

GW170817

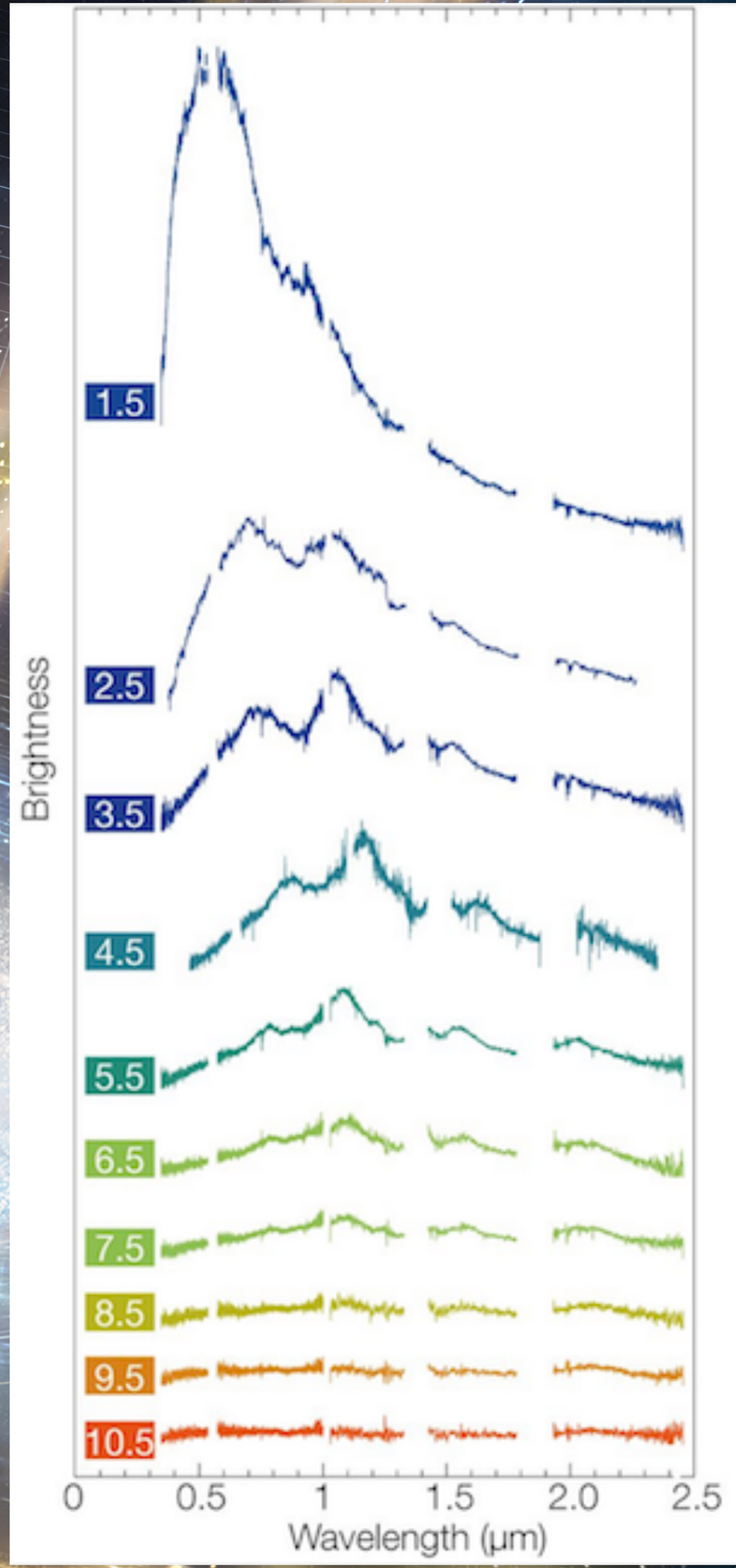


S. Chaty

Evénement du 17/08/2017

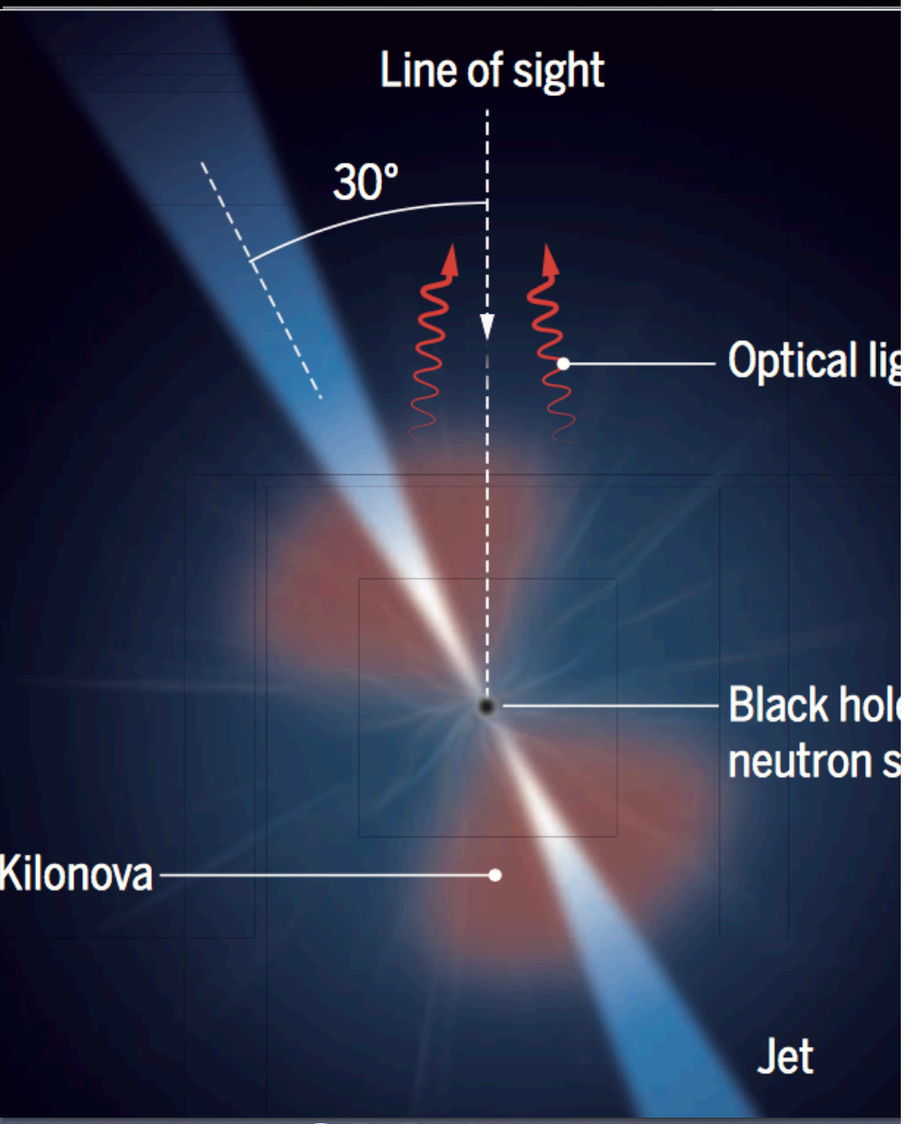
- *kilonova:* formation de jets relativistes, dont l'énergie provient de la décroissance radioactive des noyaux lourds et isotopes, synthétisés via *r-process* dans la matière éjectée

- Masse éjectée totale: qq centièmes de Ms



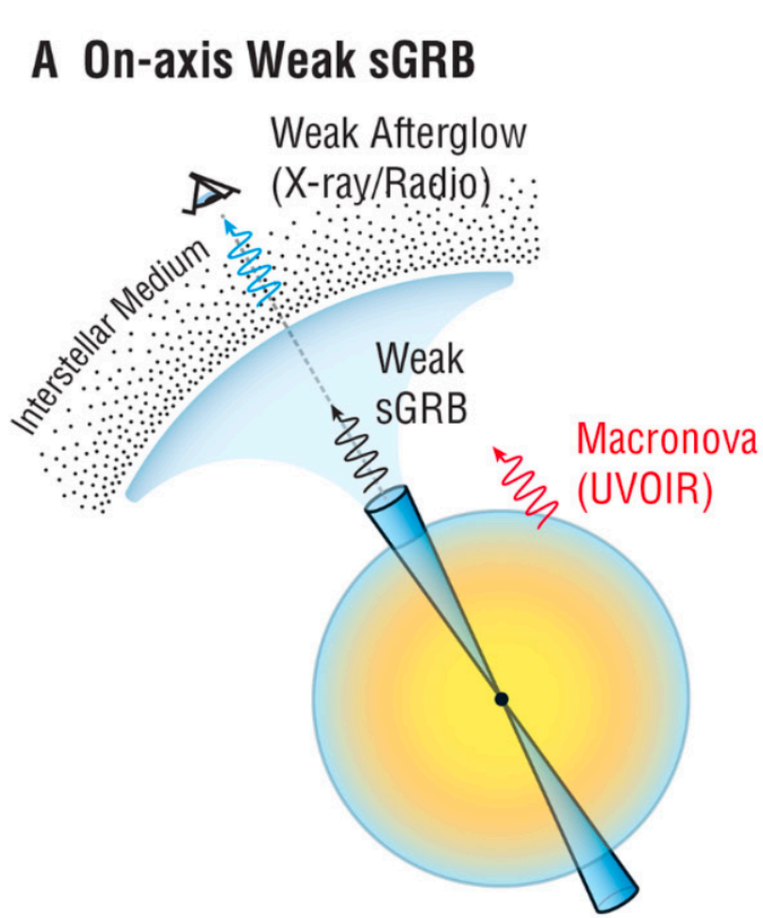
S. Chaty

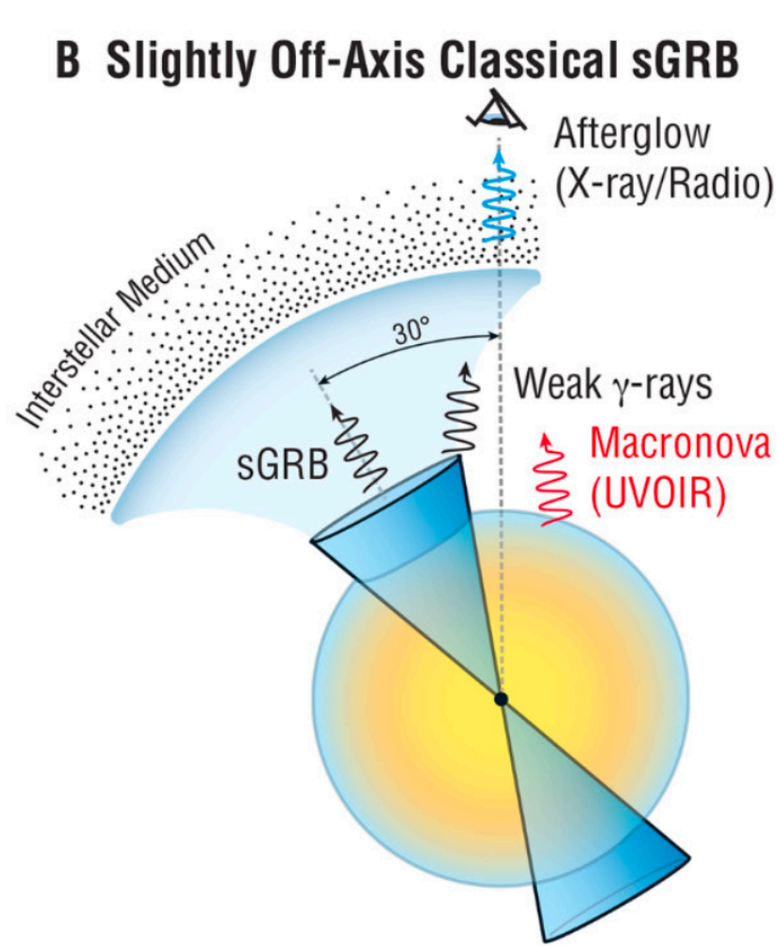
Fusions de BNS

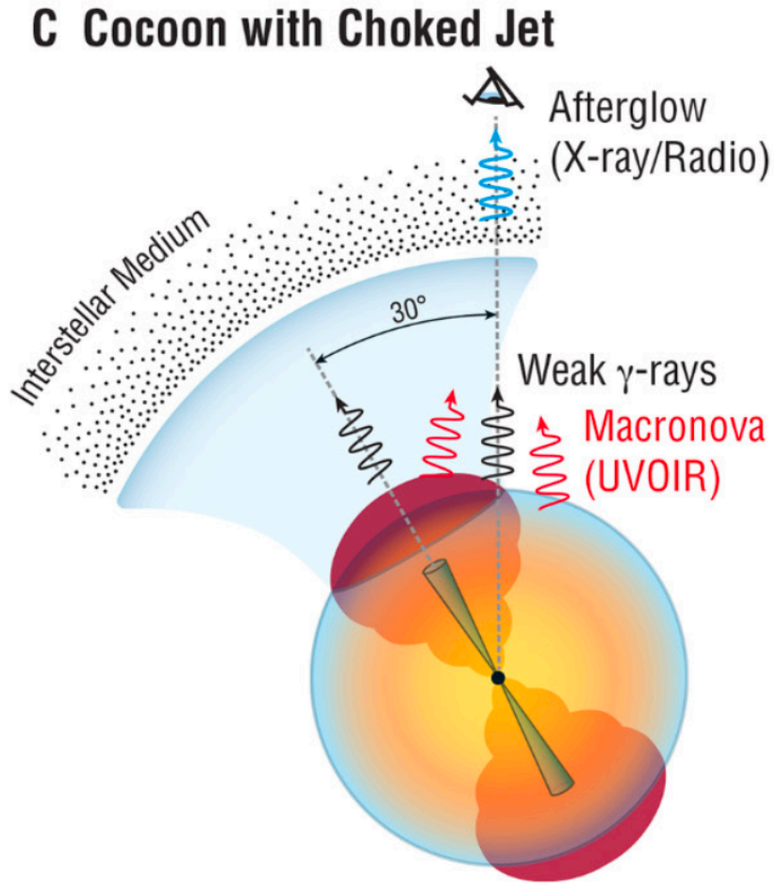


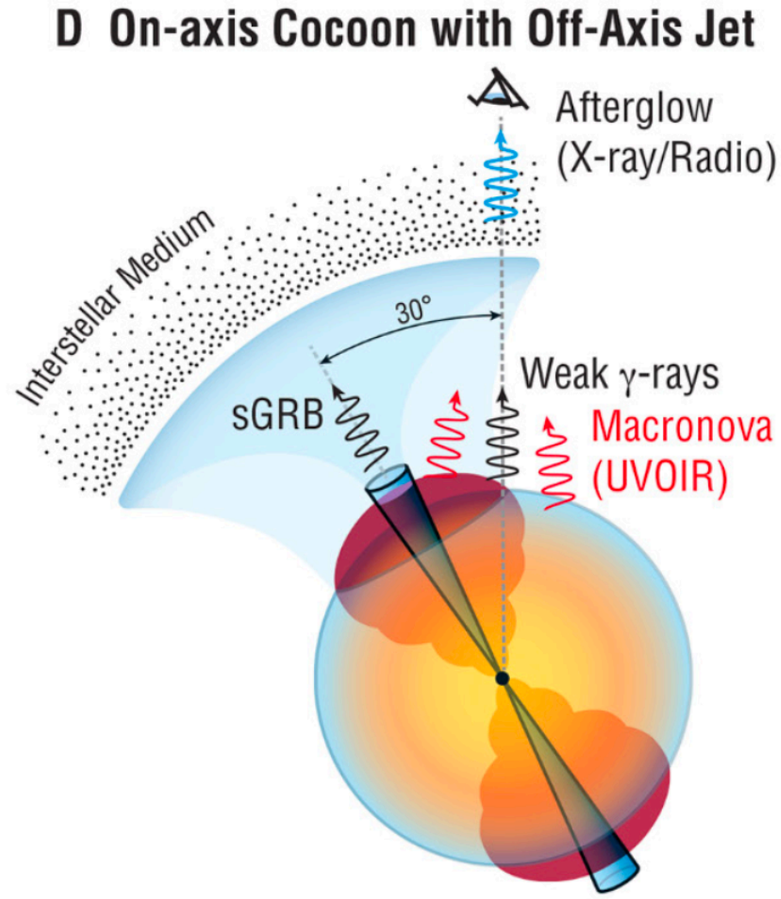
- GRB hors axe & faible densité du MIS autour de l'objet

S. Chaty



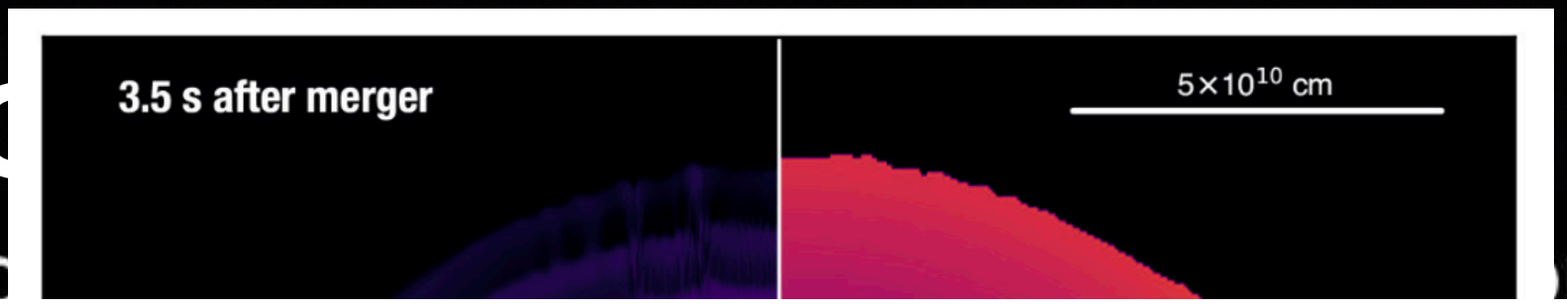




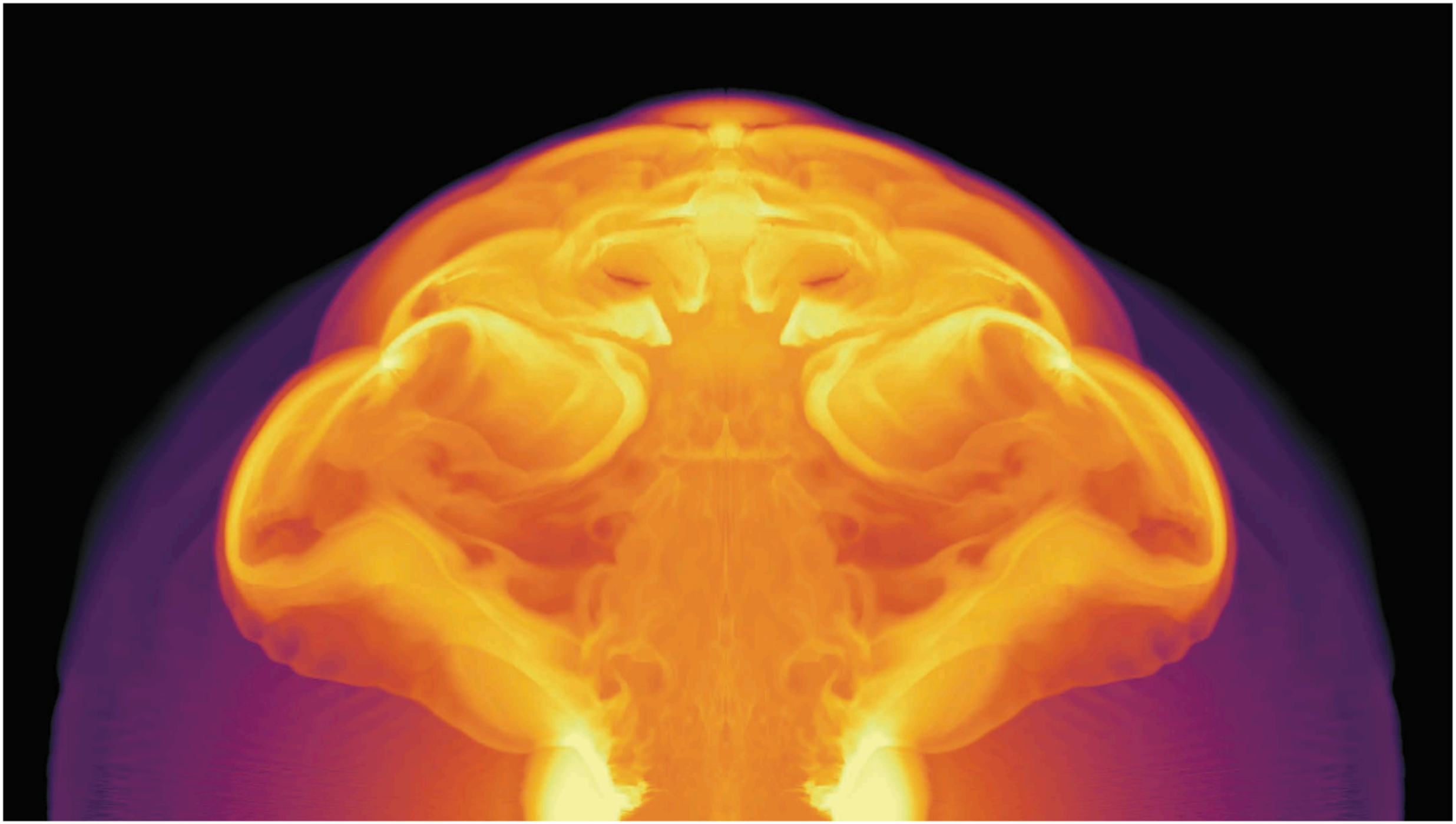


Kilo

Crashing



urst jets

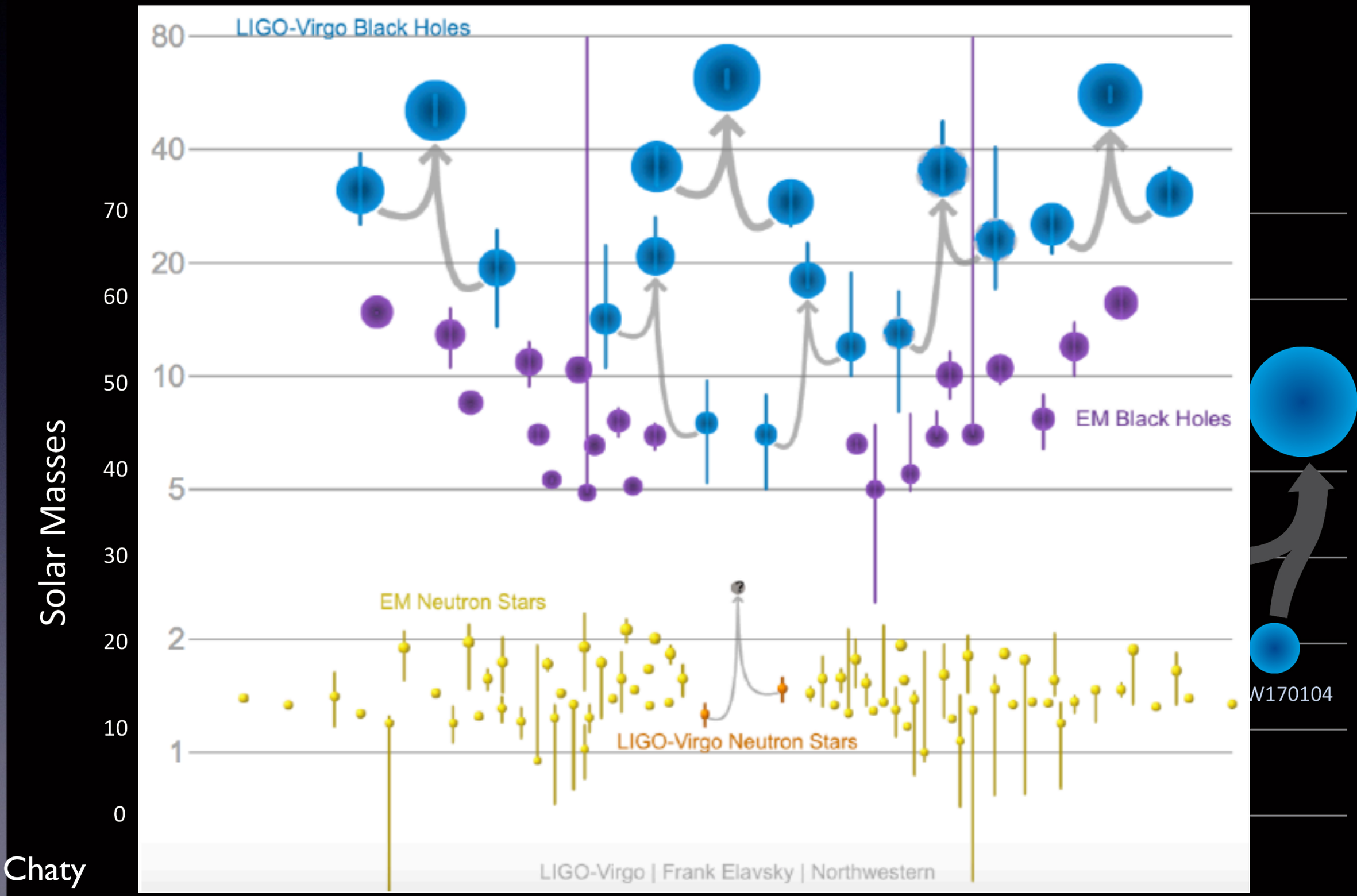


E. NAKAR & O. GOTTLIEB (TEL AVIV), L. SINGER (NASA), M. KASLIWAL (CALTECH) & THE GROWTH COLLAB., *SCIENCE* HTTP://DOI.ORG/CD8R (2017)

Signatures of gold and platinum were seen after the collision of two small but very dense stars.

S. Chaty

Masse des BBH+BNS



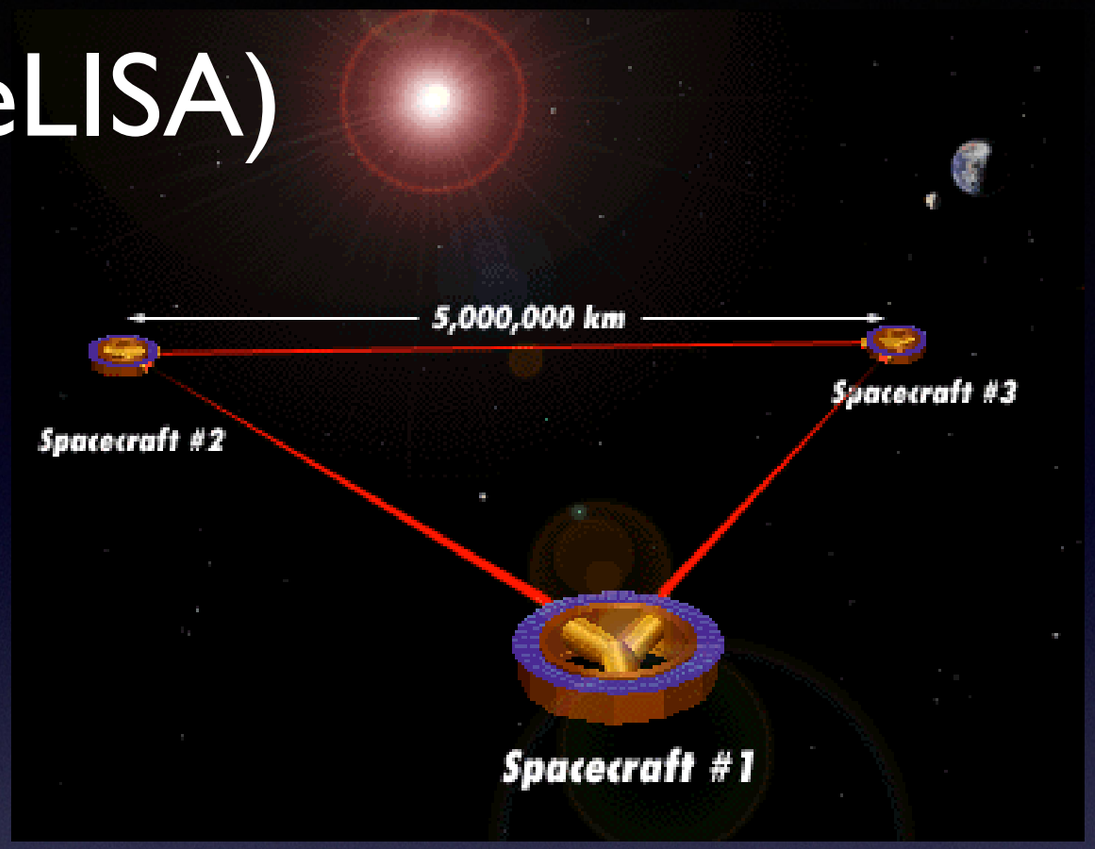
S. Chaty

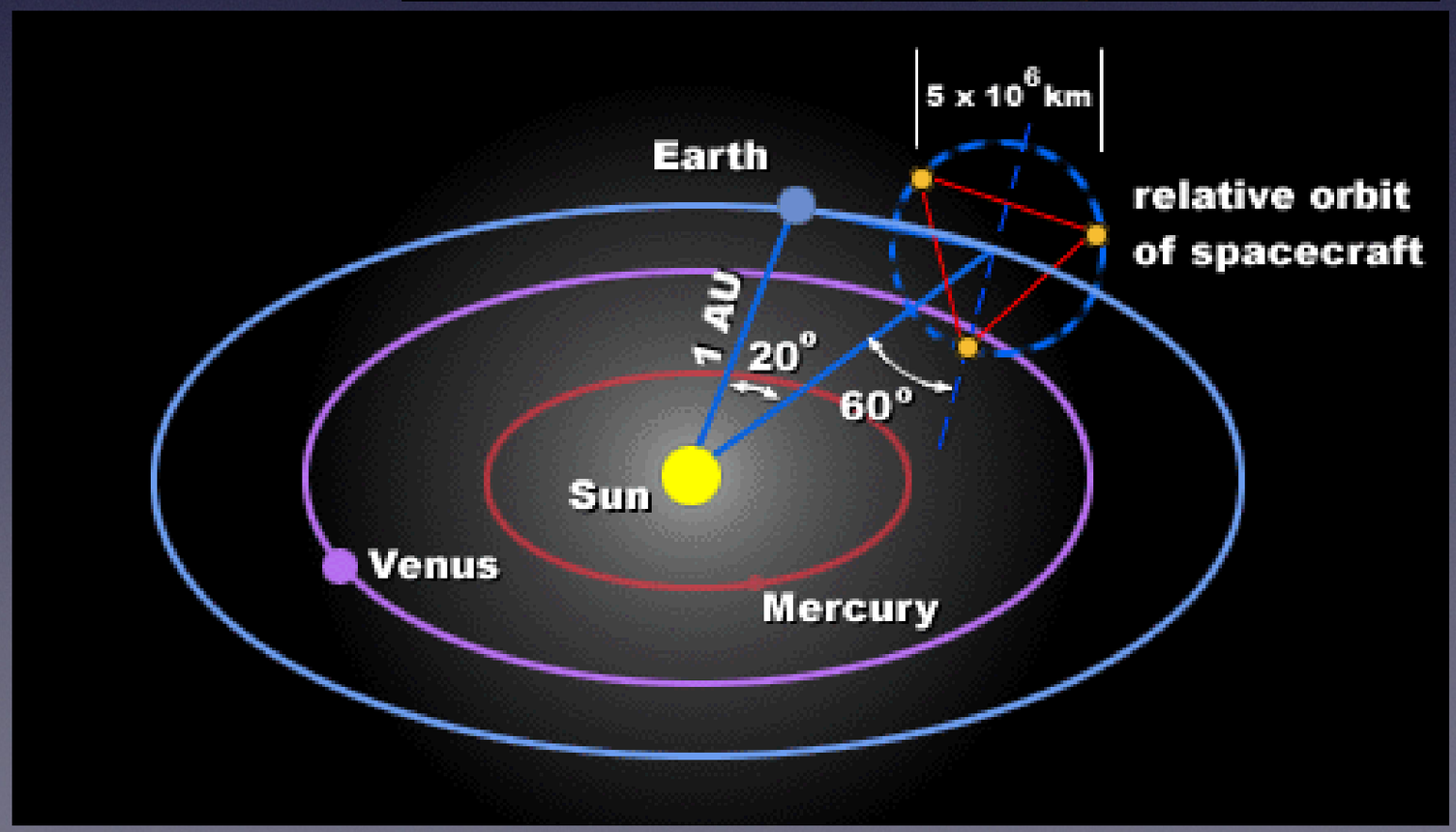
Open questions

- Comment évoluent les binaires, de formation à fusion?
- Comment identifier les progéniteurs des fusions (rapport de masse, masse totale, séparation, spin)?
- Comment estimer le taux de fusion des BBH, BNS: produit final NS ou BH?
- Interaction avec milieu interstellaire: kilonova (OG+EM)?

Les ondes gravitationnelles (eLISA)

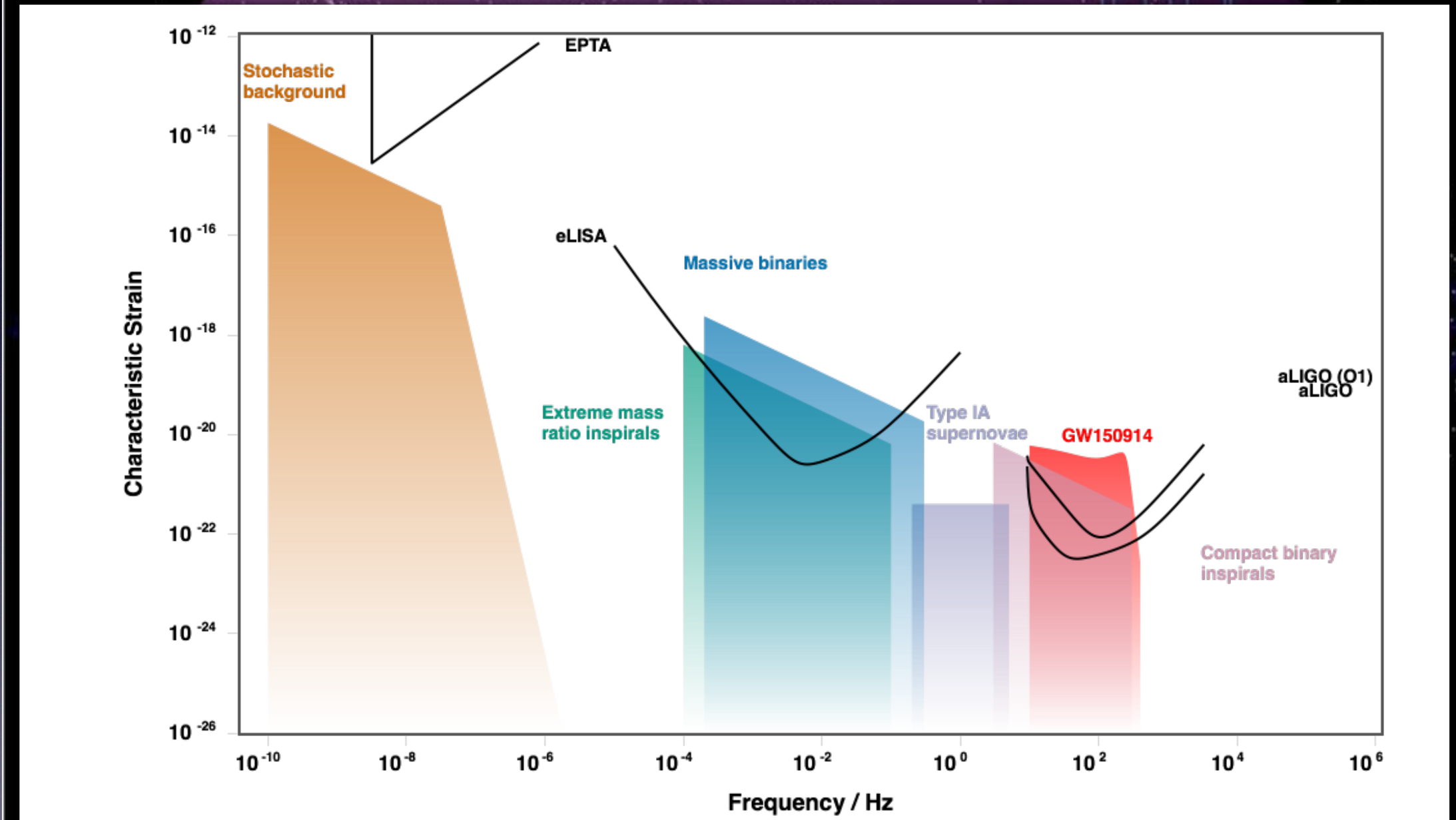
- Futur observatoire spatial d'ondes gravitationnelles (ESA)





S. Chaty

Les ondes gravitationnelles (LIGO/eLISA)



- Advanced LIGO/Virgo: observations (run 3) début 2019

S. Chaty

S. Chaty

SVOM White Paper, ©S. Schanne

Pendant ce temps, dans l'univers, des couples d'étoiles se rapprochent jusqu'à la fusion...

S. Chaty