

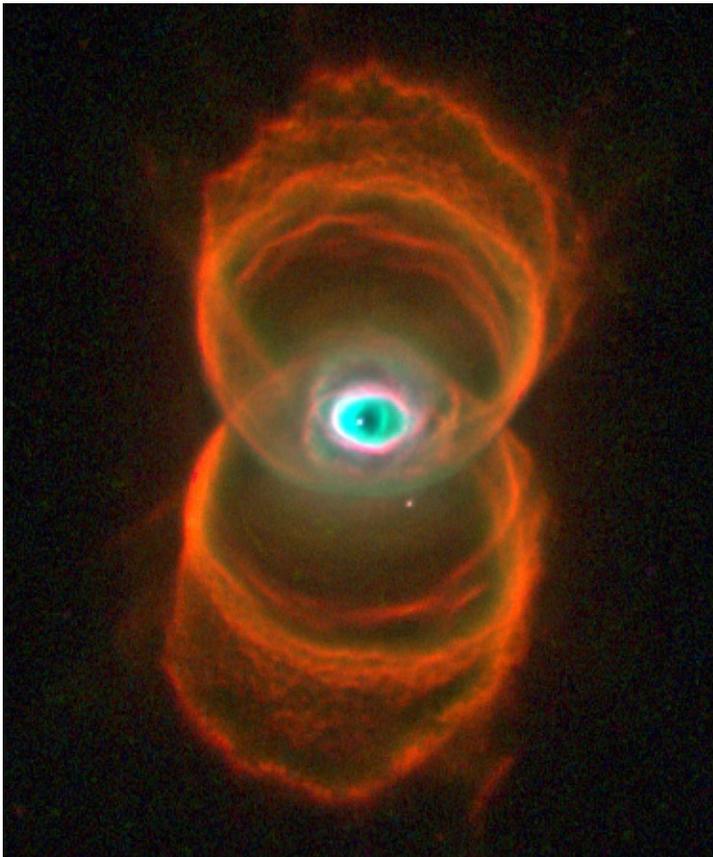


COLLÈGE  
DE FRANCE  
— 1530 —

*Chaire Galaxies et Cosmologie*

## **ETOILES et TROUS NOIRS**

Nébuleuse du sablier- HST



## **Les naines blanches et nébuleuses planétaires**

**Françoise Combes**



Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique

# Grandes lignes

## 1- Naines blanches

Propriétés générales (M, R, T..)

Pression de Pauli, Eq d'état

Diverses classes (atmosphères)

Structure et évolution sdO/B

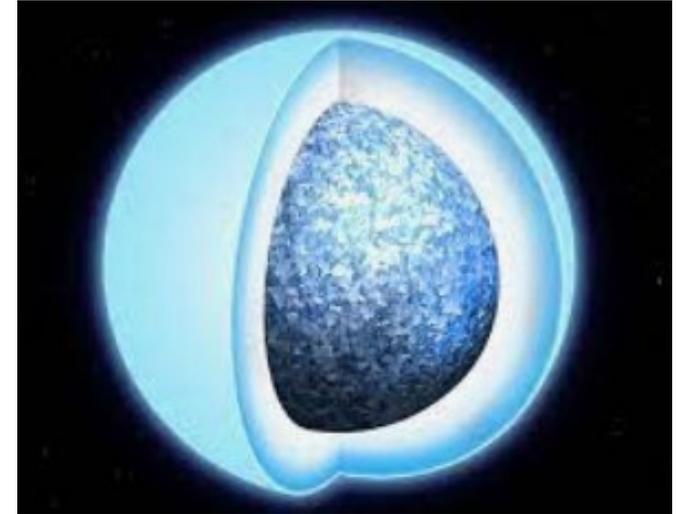
## 2- Nébuleuses planétaires

Morphologies, tailles, couleurs

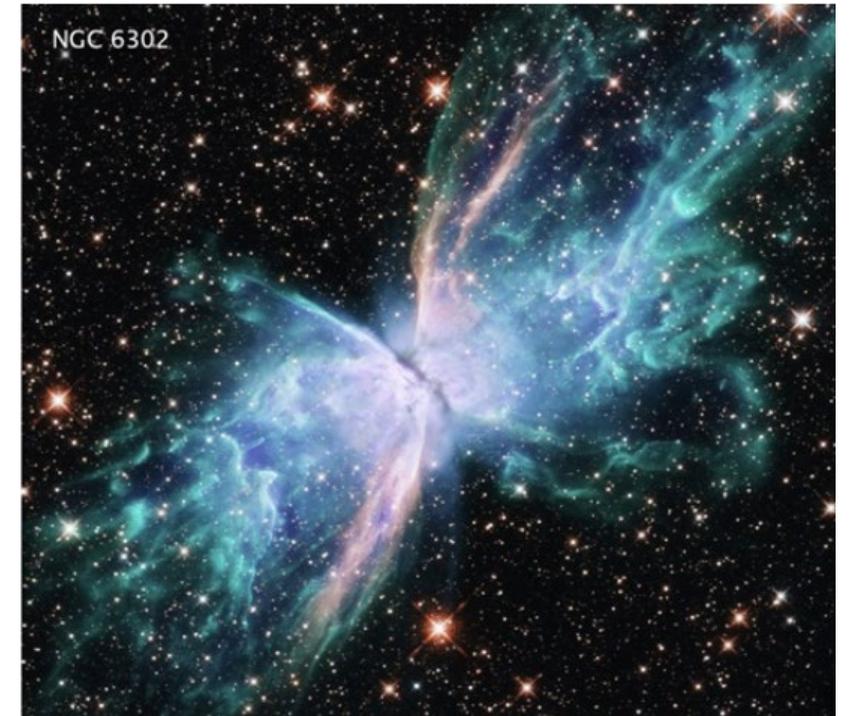
Formation et évolution

Importance extra-galactique

Traceurs de potentiel



*Vue d'artiste par Mark Garlick*



# Propriétés des naines blanches

Les étoiles de faible masse  $< 8 M_{\odot}$  : T insuffisant pour brûler les éléments plus lourds que le carbone  
→ deviennent des naines blanches

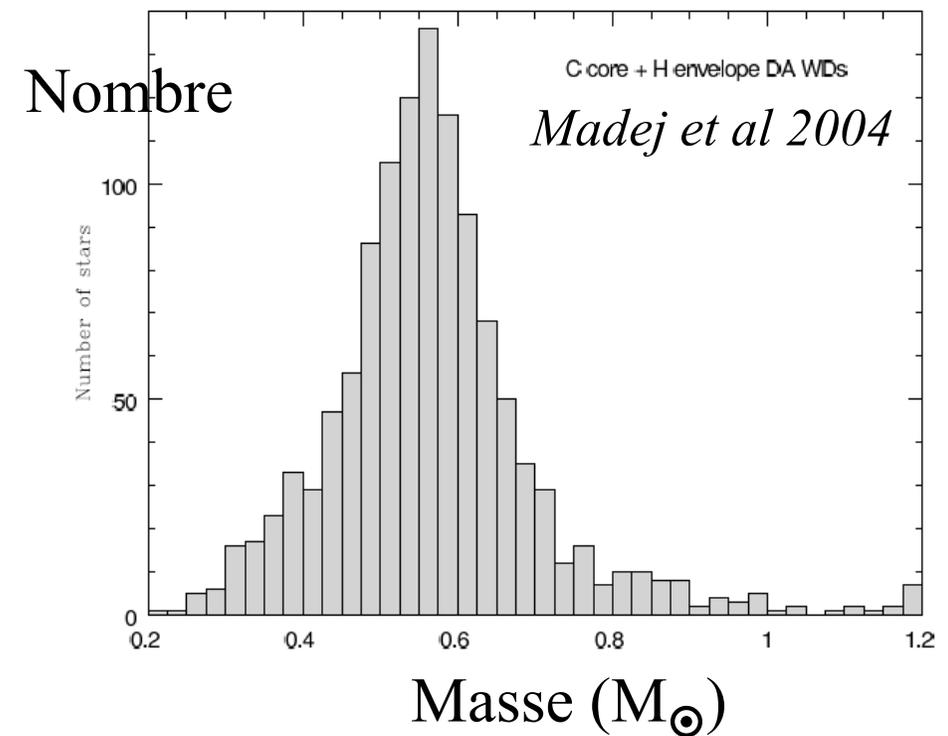
*Découvertes en 1914 (Russell)*

Une naine blanche = le noyau chaud, restant après l'éjection de l'enveloppe

Une naine blanche est soutenue par la pression de dégénérescence électronique. Permet aux atomes de résister à la compression de la gravité  $\rho = 1 \text{ tonne/cm}^3$

A mesure que les naines blanches rayonnent, elles deviennent plus froides et moins lumineuses

→ naines noires, **mais après  $10^{10}$ ans**

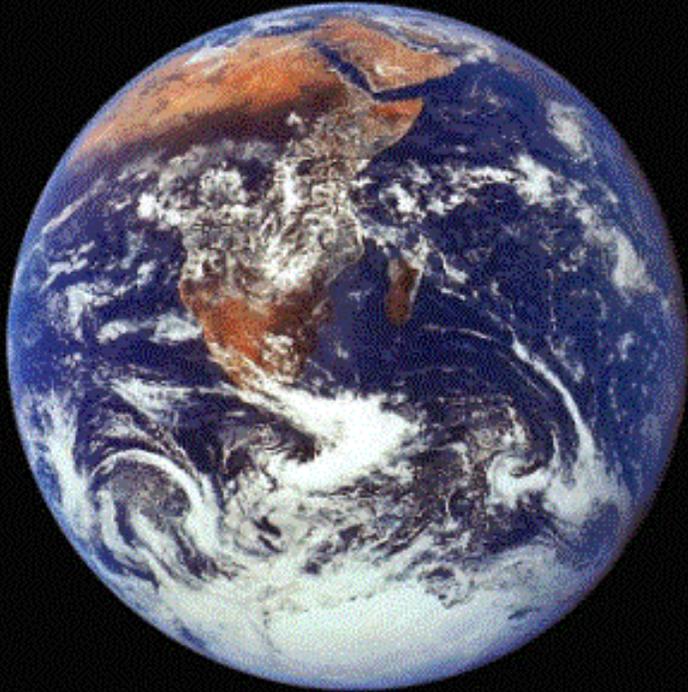


**Maximum mass  $1.4 M_{\odot}$**   
**Chandrasekhar limit**

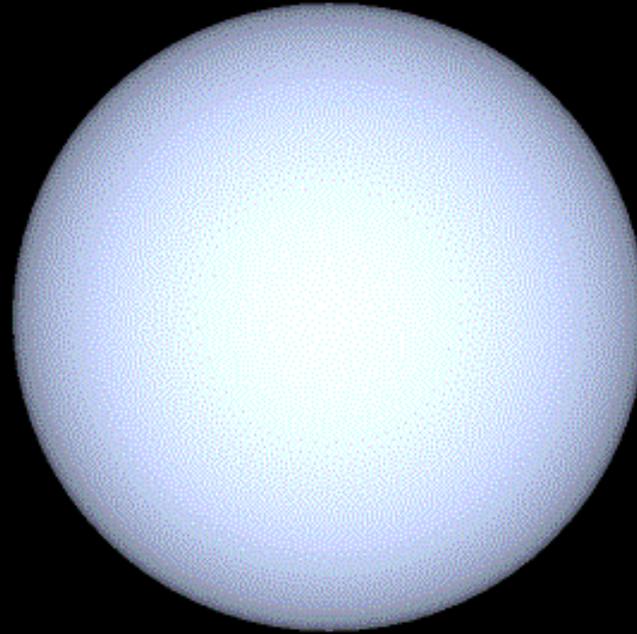
**$10\,000\text{K} < T_e < 150\,000\text{K}$**   
 **$B = 10^3 - 10^9 \text{ Gauss}$**   
**MWD = Magnetic WD  $\sim 2\%$**

# Naines Blanches

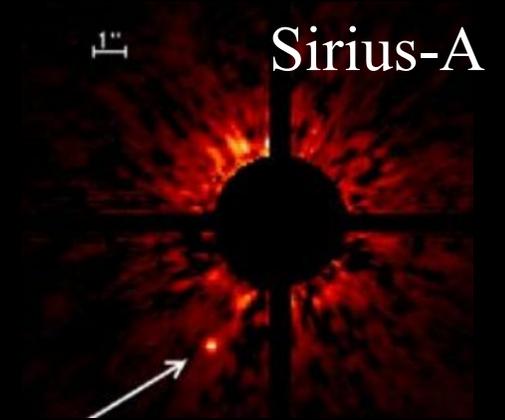
Les naines blanches les plus massives sont les plus petites



En général  $M \sim 0.6 M_{\odot}$ ,  $R \sim 10\,000 \text{ km}$

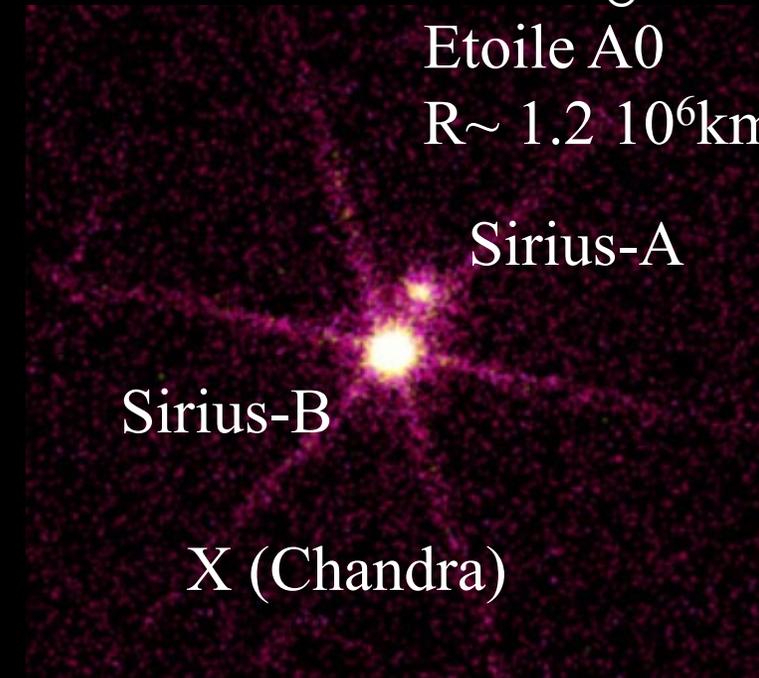


Sirius B  
 $M \approx 1.0 M_{\text{sun}}$   
 $R \approx 5800 \text{ km}$   
 $T \sim 27\,000 \text{ K}$



Sirius-B  
**Infrarouge**

$M \sim 2 M_{\odot}$   
Etoile A0  
 $R \sim 1.2 \cdot 10^6 \text{ km}$

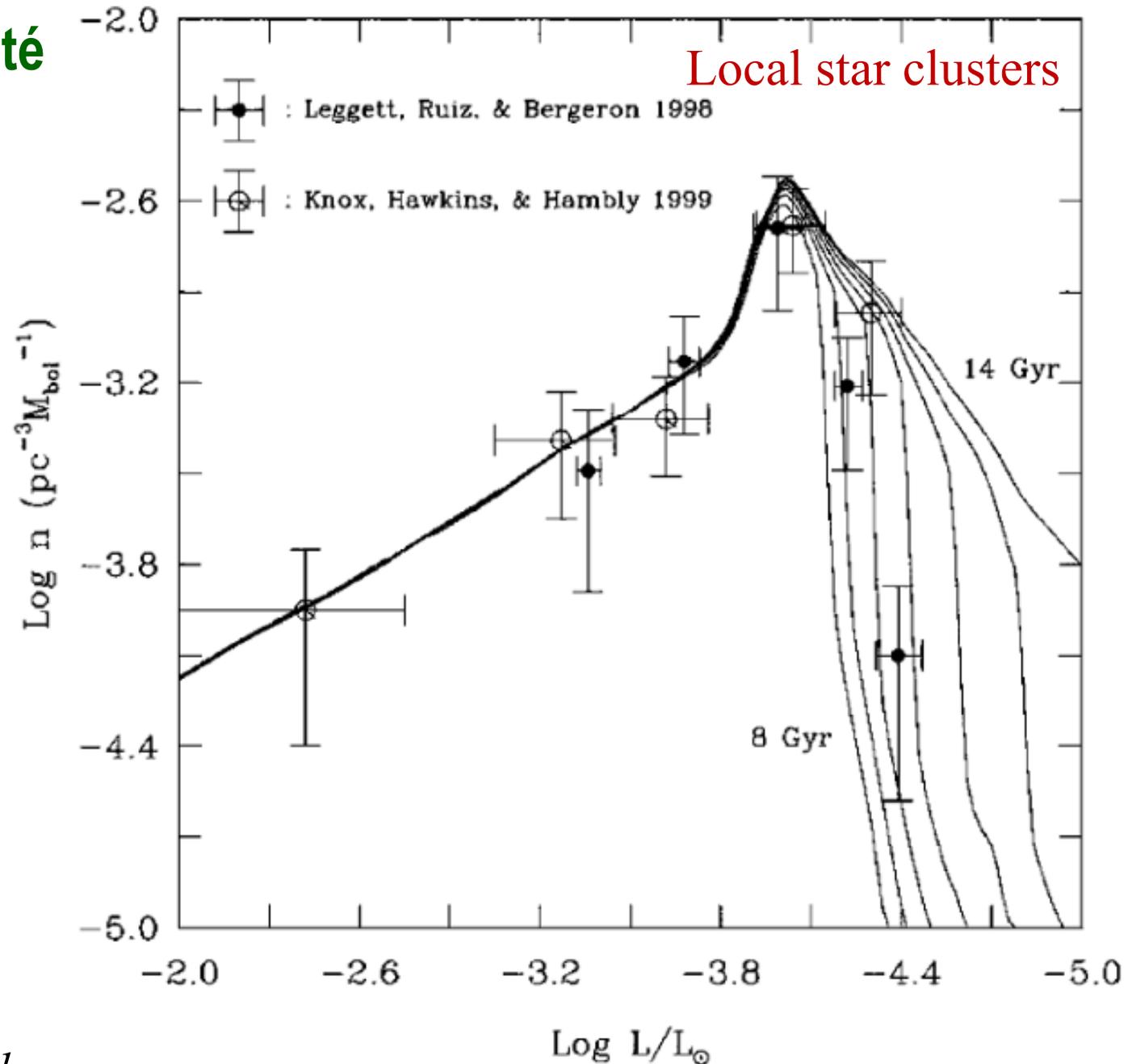


Sirius-A  
Sirius-B  
X (Chandra)

# Fonction de luminosité des naines blanches

Observées localement  
(symboles) +  
Courbes théoriques  
pour plusieurs âges  
du disque ou amas  
d'étoiles (8-14 Gyr)

Constant SFR,  
Salpeter IMF  
Initial  $\rightarrow$  final:  $M \rightarrow m_{\text{WD}}$   
 $m_{\text{WD}} = 0.4 \exp(0.125M)$   
 $t_{\text{MS}} = 10 M^{-2.5} \text{ Gyr}$



# Pression quantique

Relation d'incertitude  $\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$   
Electrons très concentrés en x

→ Vitesses très dispersées

## Principe d'exclusion de Pauli

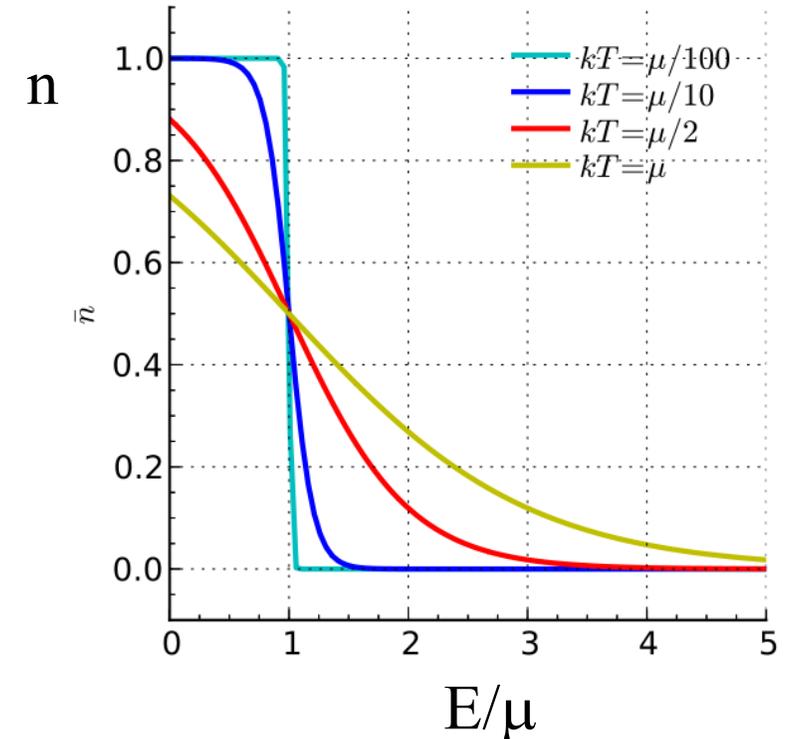
Les fermions (spin  $\frac{1}{2}$ ) ne peuvent pas se trouver  
Plusieurs dans le même état

→ Statistique de Fermi-Dirac (potentiel chimique  $\mu$ )

Il faut considérer le coeur dégénéré comme un amas  
d'ions positifs agglomérés, avec des électrons  
délocalisés, d'autant plus rapides que M est grand

Limite de Chandrasekhar: électrons → c (M=1.4  $M_{\odot}$ )

$$n_i = \frac{g_i}{\exp\left(\frac{E_i - \mu}{k_B T}\right) + 1}$$



# Rayon et masse

Energie gravitationnelle  $E_g = -GM/R$  (par u de masse)

Energie cinétique  $E_k = Np^2/m$  (N e- par u de masse)

$\Delta x \sim n^{-1/3}$   $n = NM/R^3$

$p \sim \Delta p \sim \hbar/\Delta x \rightarrow E_k \sim M^{2/3}N^{5/3} \hbar^2 / (mR^2)$

L'égalité  $E_g \sim E_k$  implique  $R \approx \frac{N^{5/3} \hbar^2}{mGM^{1/3}}$

Soit  $R^3 \propto 1/M$   $\rho \propto M^2$

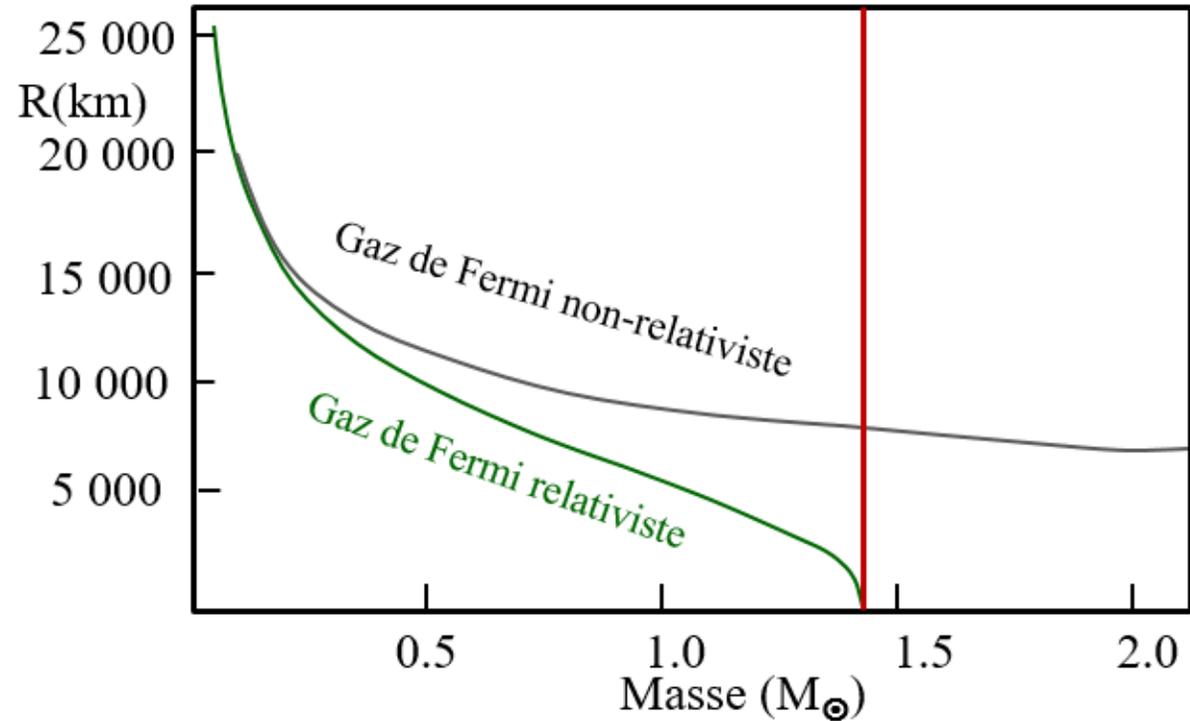
**Limite de Chandrasekhar  $R \rightarrow 0$**

Dépend un peu de la composition, par N

Pression dégénérée, Entropie S nulle

$dE = TdS - PdV$   $P = -dE/dV$   $E \sim GM^2/R \sim V^{-7/3}$

$P \propto 1/R^{10} \sim \rho^{5/3}$  indépendant de T, Si relativiste  $P \sim \rho^{4/3}$



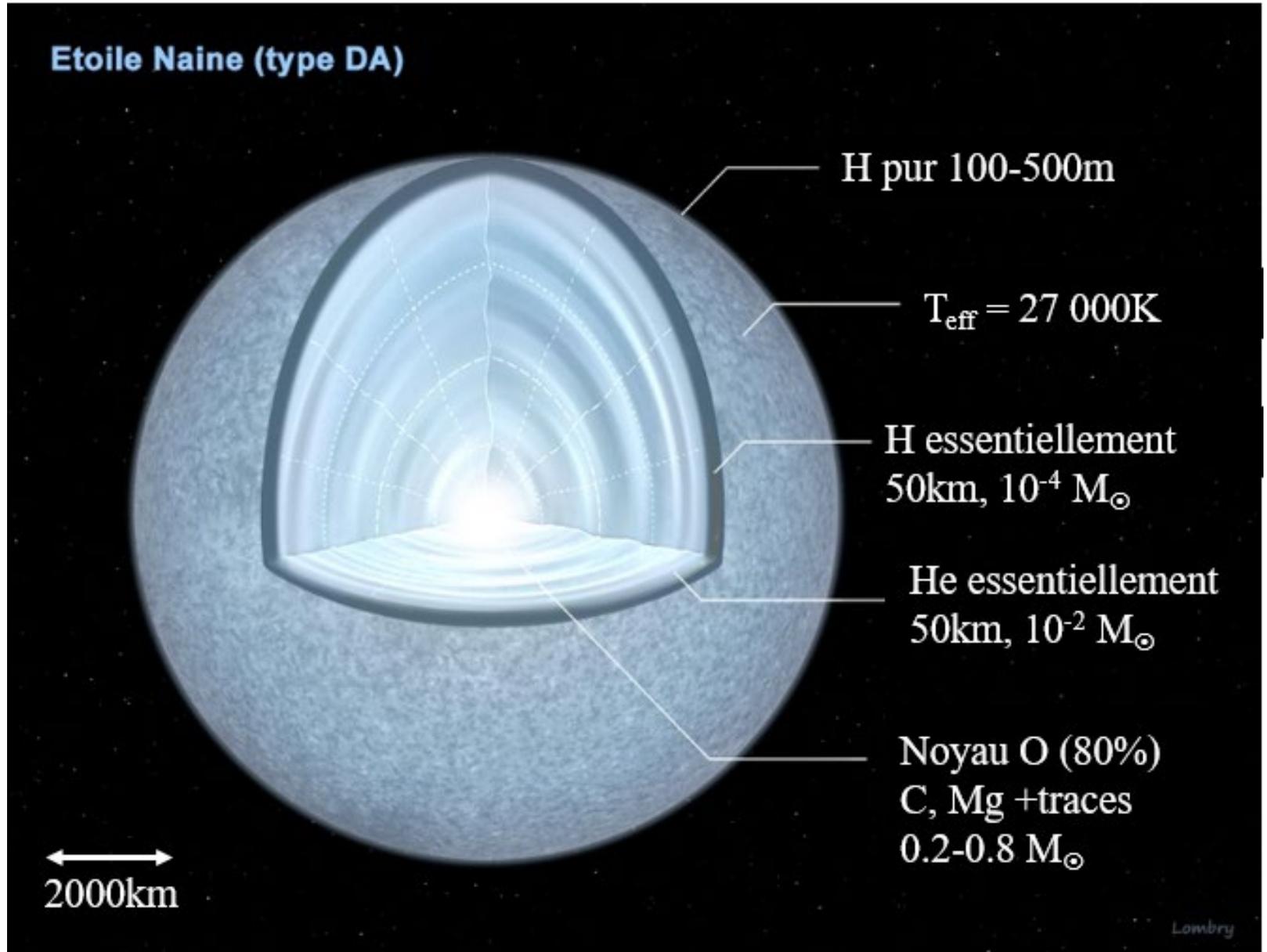
Selon la masse, la composition peut être différente

Pour les plus massives le noyau contient aussi Ne

L'hélium est aussi plus important

DA atmosphère H

Hélium domine dans les non-DA



## Enveloppe H



DA

Avec He-flash tardif  
au stage post-AGB



DB

Les naines blanches ( $10^4$ - $5$ K) sont classées selon leur spectre, Atmosphère essentiellement H, mais avec des variantes

**DA: enveloppe d'Hydrogène**

**DB: enrichies en Hélium HeI (>15%)**

avec quelques autres

**DO: HeII**  $45000 < T < 200\ 000$ K

**DQ: avec des traces de C et métaux**

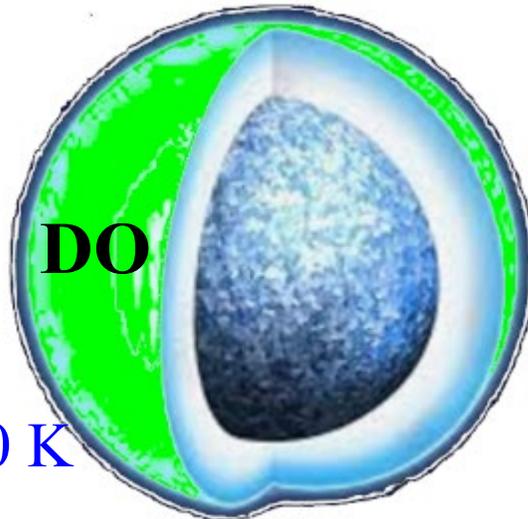
$T < 11\ 000$  K



DQ

$T < 11\ 000$  K

+métaux



DO

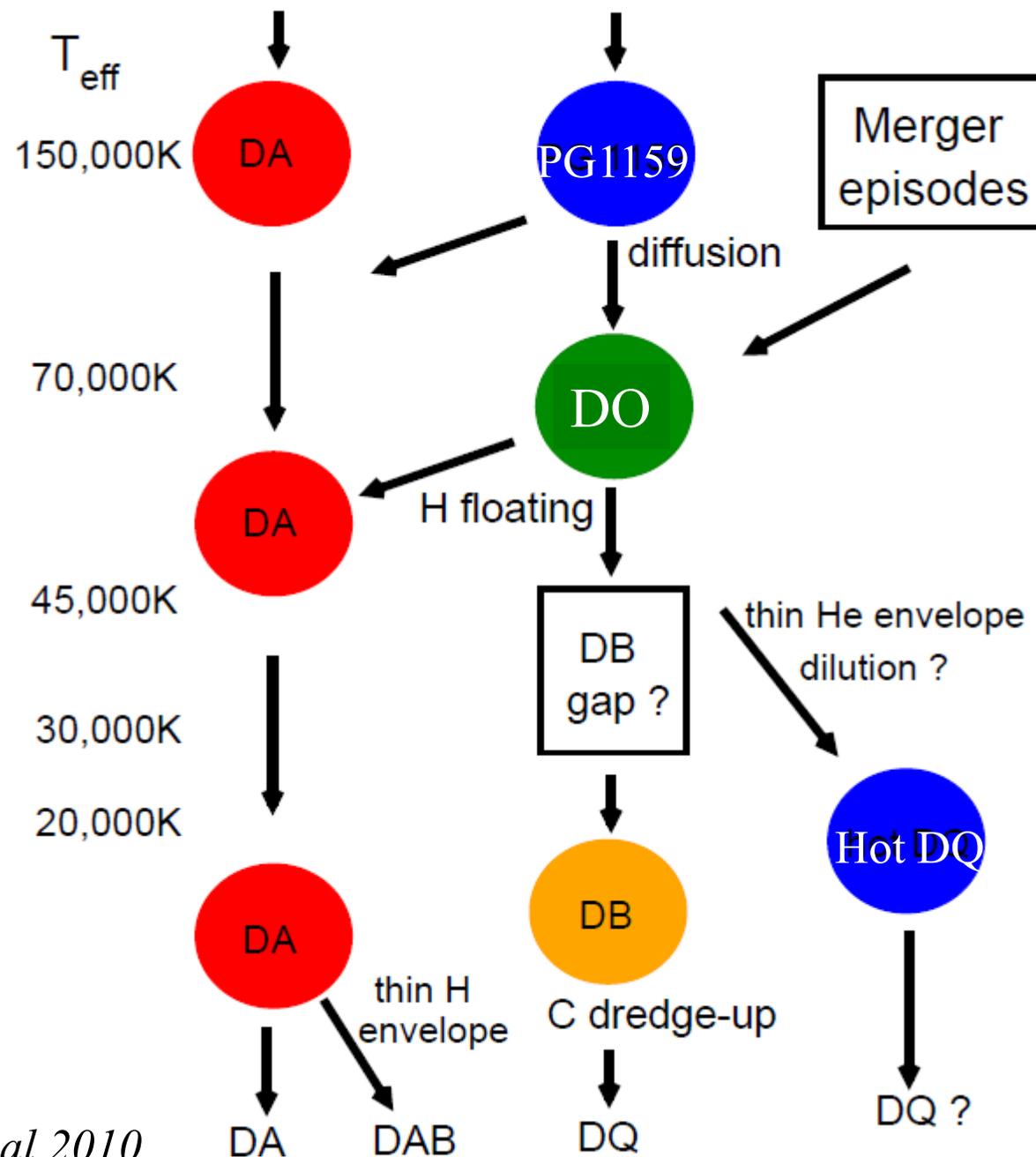
HeII

DO se refroidit  $\rightarrow$  DB (HeI)

Si l'évolution naturelle est le refroidissement, HeII  $\rightarrow$  HeI, DO  $\rightarrow$  DB  
 Il existe toutefois un « gap » entre  
 $30\,000\text{K} < T < 45\,000\text{K}$

Il se pourrait que l'évolution se tourne vers des atmosphères enrichies DQ  
 Surtout après une étape de convection, qui fait remonter à la surface des éléments  
 Comme C et au-delà  $\rightarrow$  **dredge-up**

Les étoiles du **type PG1159** (découverte 1986)  
 $75000\text{K} < T_{\text{eff}} < 250000\text{K}$  sont des étoiles pré-dégénérées, atmosphère déficiente en H  
 Après AGB, elles rallument la fusion de He et terminent en DO

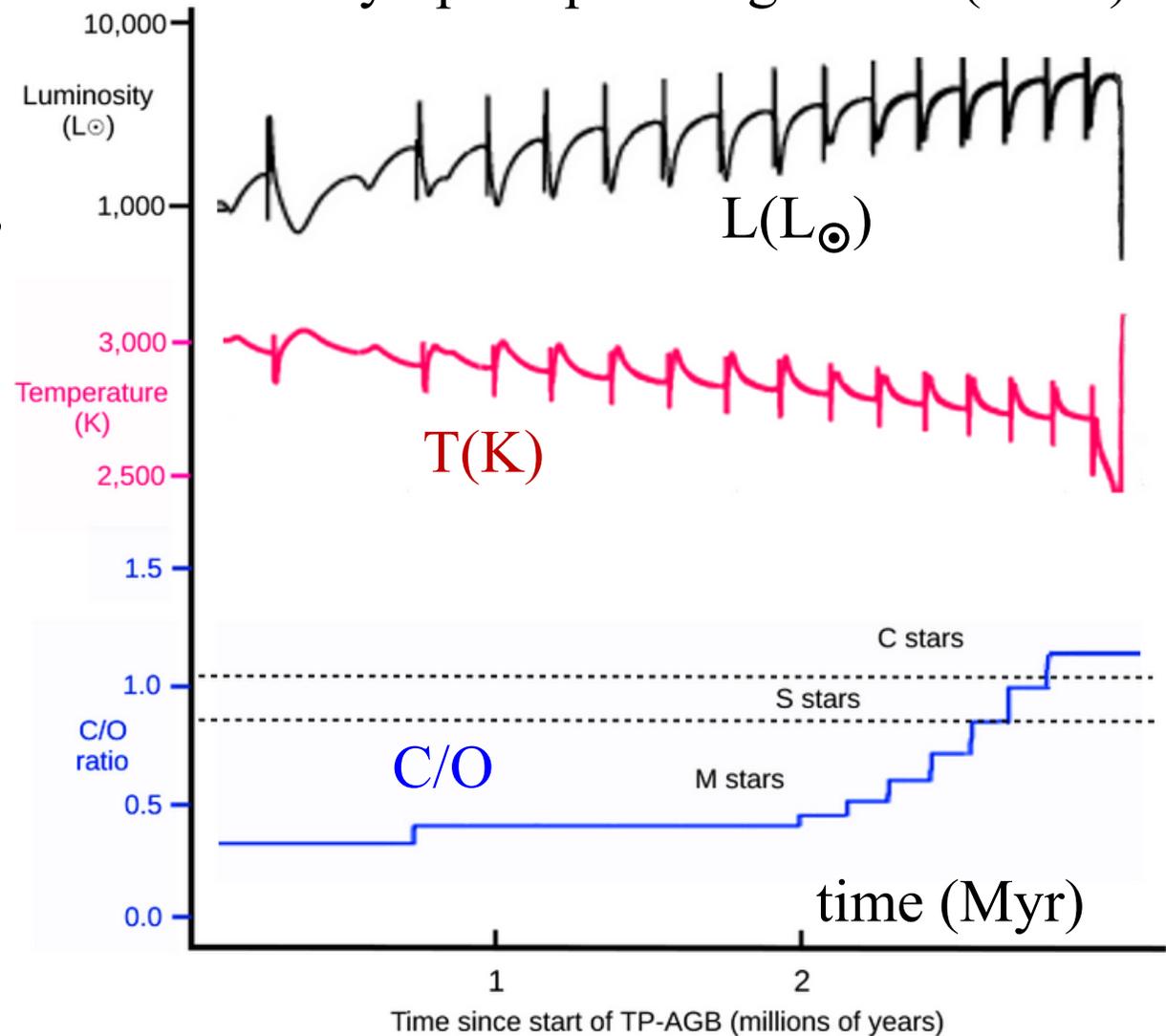


# Episodes Dredge-up TP-AGB

Durant ces épisodes, la matière du cœur peut remonter à la surface,  
L'étoile peut s'enrichir d'éléments plus lourds pendant plusieurs 100ans  
Perte de masse de  $10^{-4}$  à  $10^{-8} M_{\odot}$  /an

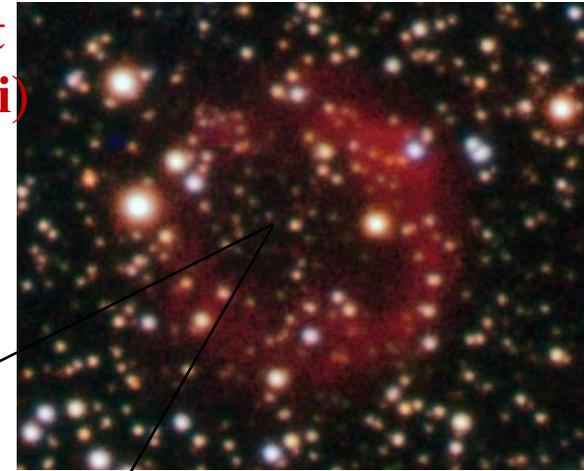
Dans 25% des cas, He se rallume  
→ Renaissance (born-again)  
Très- rapide < 100 ans

Pulses thermiques dans la branche Asymptotique des géantes (AGB)



# Renaissance possible (born again)

Sakurai's Object  
(V4334 Sagittarii)



Après l'étape AGB, ou H et He brûlent en coquilles, l'étoile s'éteint et rejoint la branche des naines blanches

Dans ~20% des cas, He peut se rallumer, et l'étoile renaître

Il y a convection, et mélange de l'hydrogène de surface

→ Explique l'absence de H en surface des non-DA

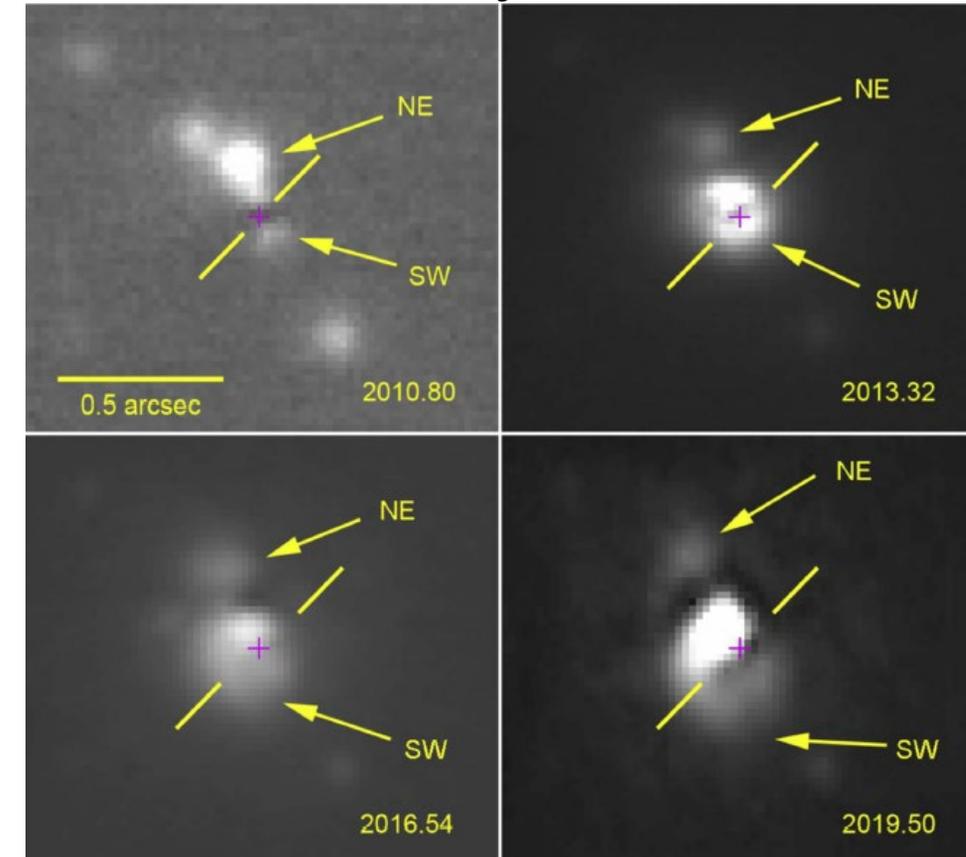
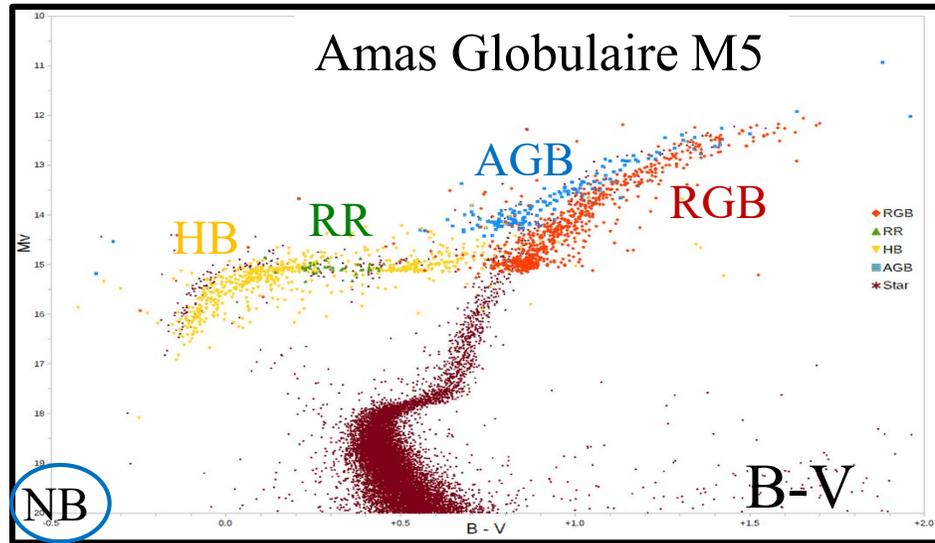
Plusieurs boucles dans le diagramme HR, très rapides

→ Événements rares

Hinkle et al 2020 : jet NE/SW 300km/s

Lum

Variables RR Lyrae

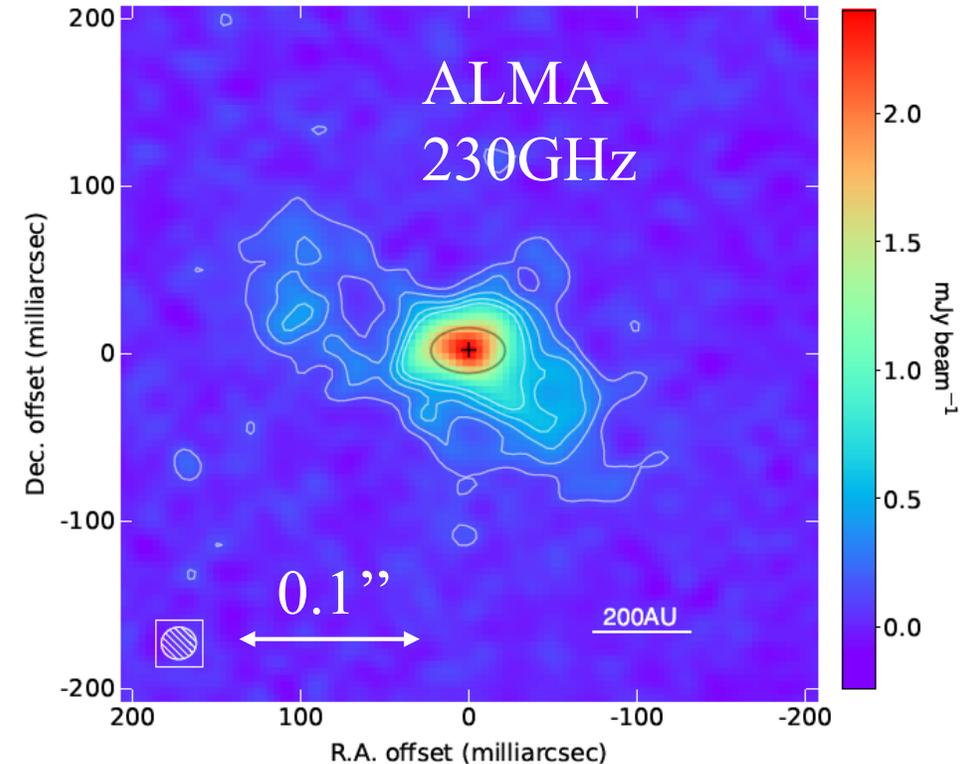


# L'objet de Sakurai

Des étoiles ayant expérimenté une renaissance (born-again) sont rares  
L'épisode est rapide, 2 objets connus seulement  
Dont V4334 Sgr (Sakurai)  
Suivi pendant 30 ans, de WD → RG (géante rouge)  
D=3.5 kpc

Années 1990: pulse tardif  
Ingestion de l'enveloppe H par le cœur qui brûle He  
1997: ejection de matière, et étoile froide carbonée  
1999: obscuration par de la poussière riche en C  
Poussière à 1000K, puis 200K en 2015

Disque de poussière +  
Flot bipolaire (beam 20mas)

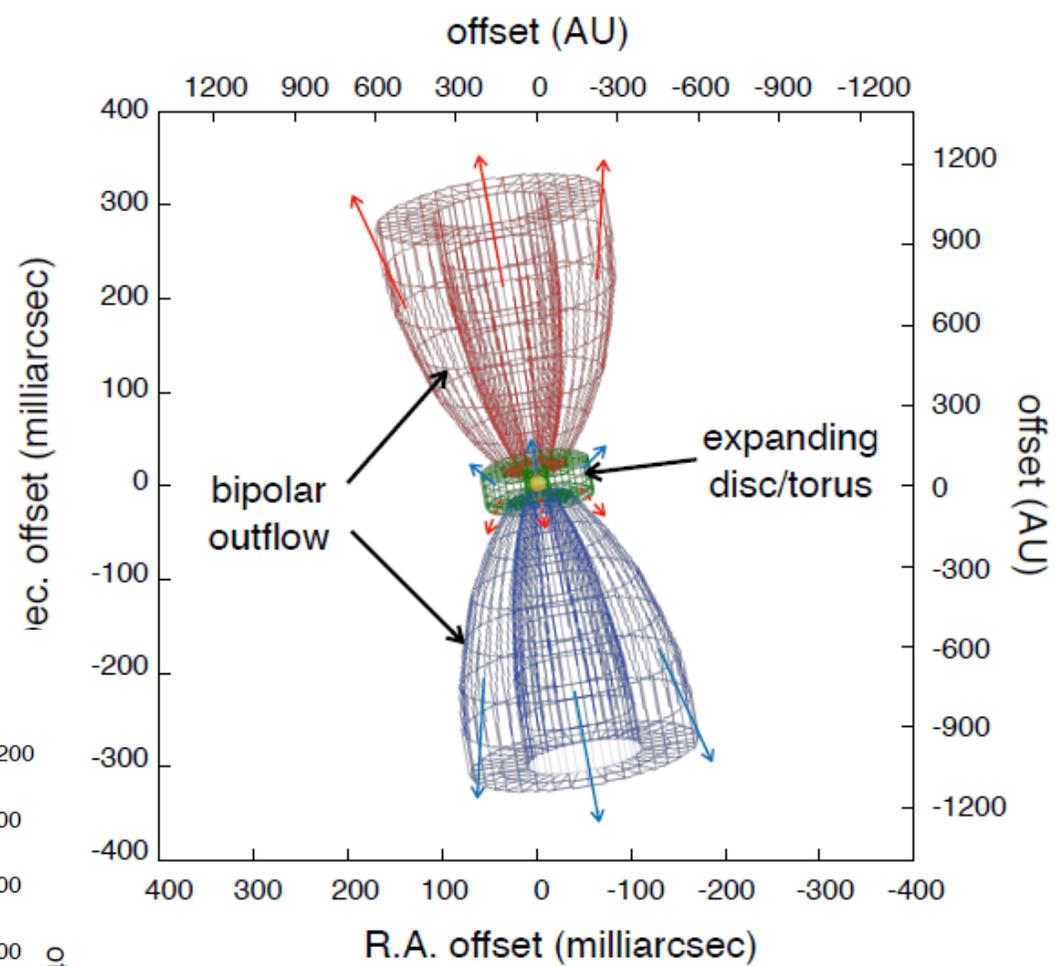
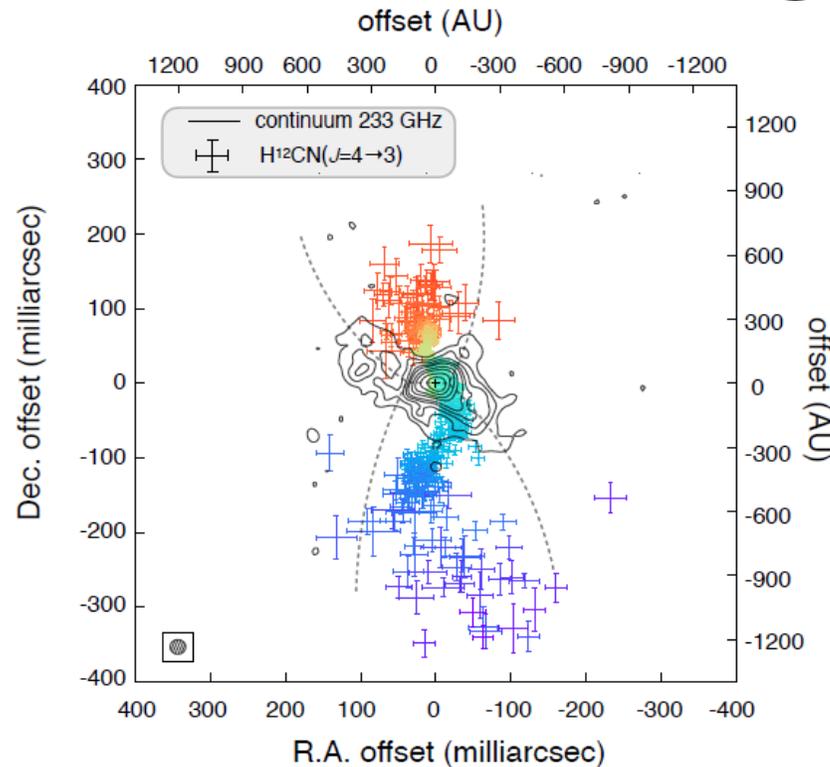
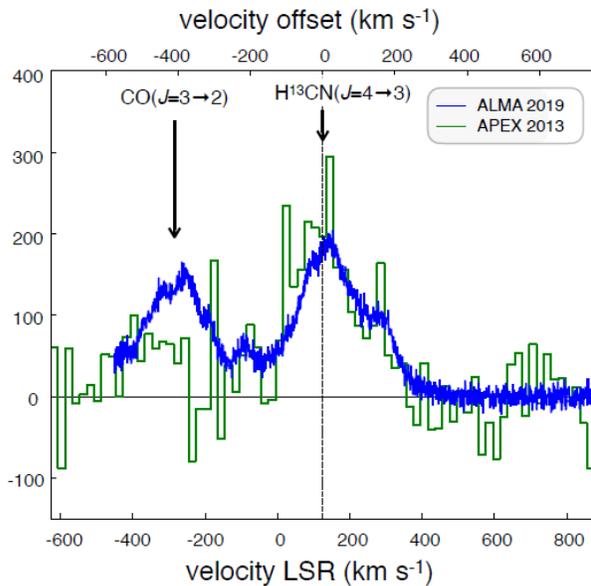


*Tafuya et al 2023*

# Disque et flot bipolaire

Le disque émet en CO(3-2)

HCN(4-3) traceur de gaz dense dans le flot bipolaire ( $\sim 1000\text{km/s}$ )



Influence de la binaire?

# Questions encore sans réponse

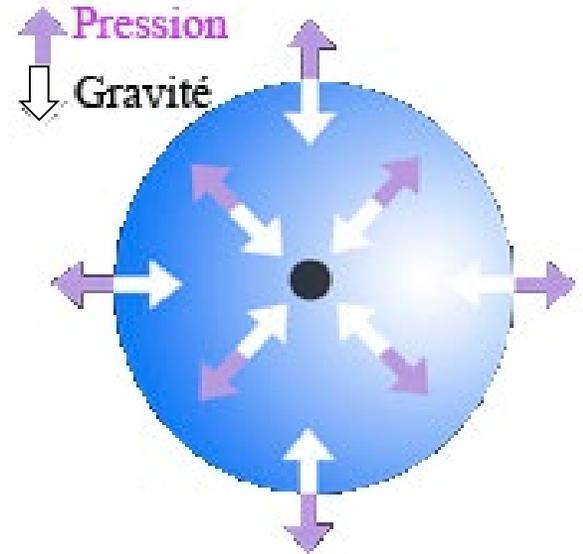
Certaines naines blanches subissent une évolution spectrale, la composition de la surface change, peut-être par:

- convection,
- épisodes de perte de masse,
- accrétion,
- **lévitation radiative**, (qui permet de garder C,N,O, Si dans l'atmosphère)
- **sédimentation gravitationnelle** (éléments plus lourds tombent)

L'interaction entre tous ces processus permet de comprendre leur évolution

**Lévitation:** C,N,O,Si absorbent dans leur raies l'énergie du rayonnement de la naine blanche très chaude ( $> 40\,000\text{ K}$ ), et cela compense la gravité

Pression de radiation dans les raies



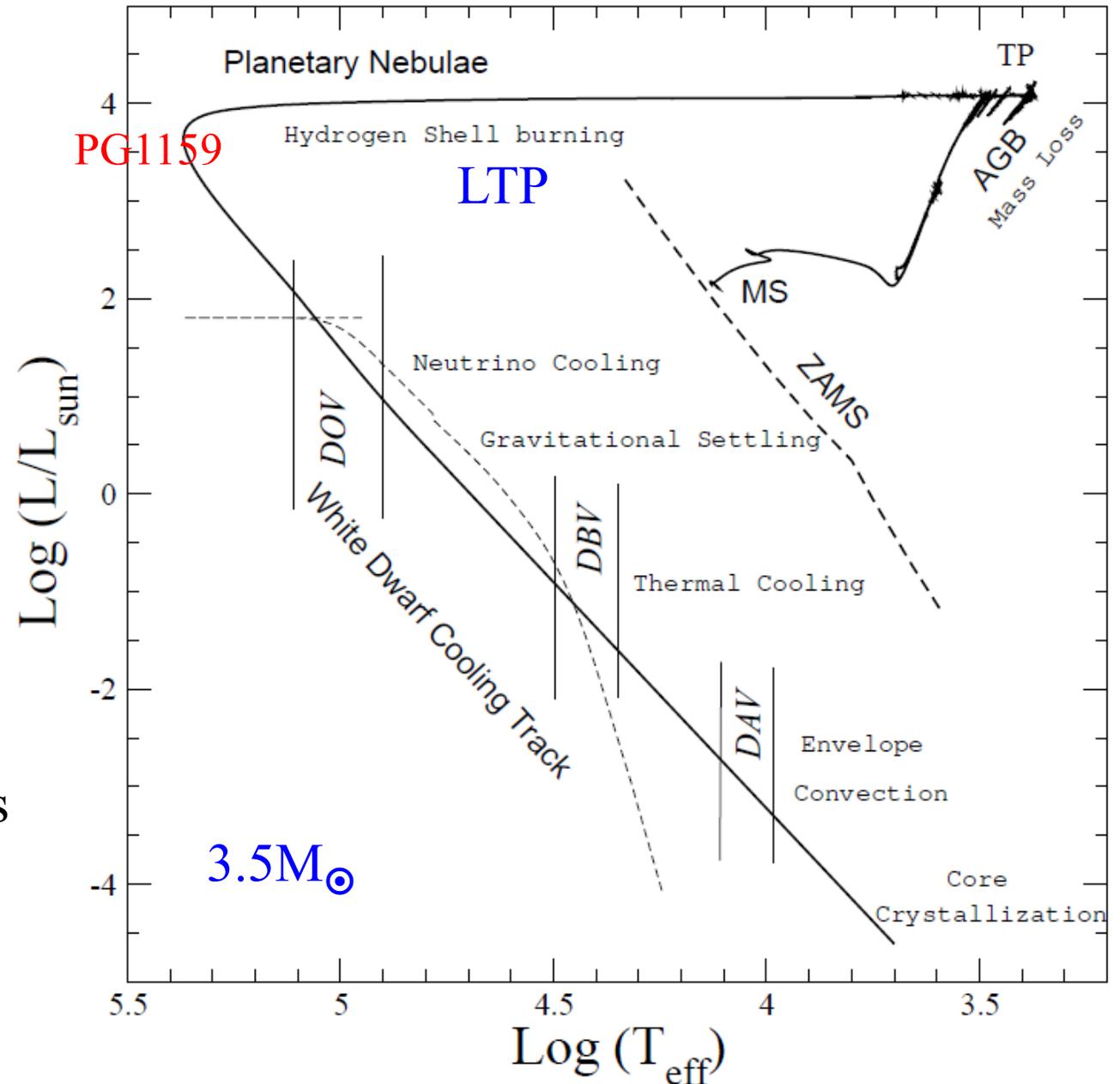
# Zones d'instabilités dans le diagramme HR

LTP (Late Thermal Pulse) possible  
qui brûle H dans l'enveloppe  
L'étoile revient un temps dans les géantes  
puis forme une DB, très déficiente en H

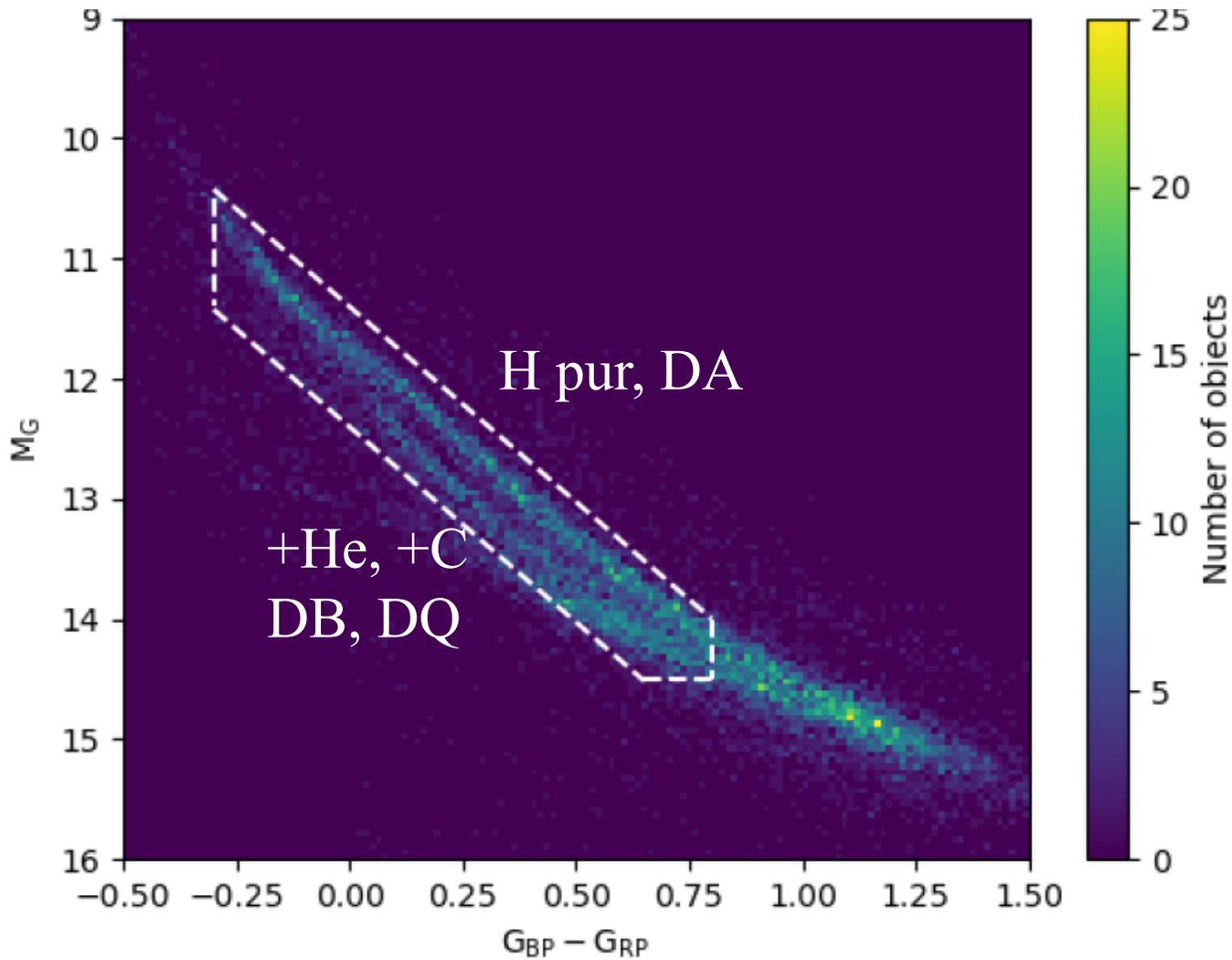
Instabilités dans la zone des AGB

PG1159 précurseur des naines blanches

DOV, DBV, DAV naines blanches pulsantes



# Bifurcation de GAIA

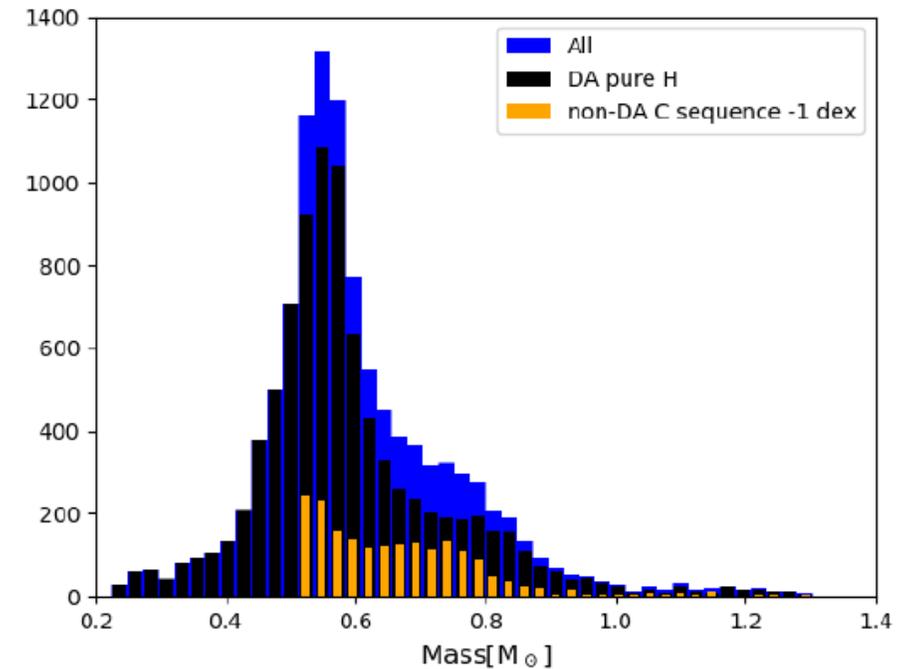


*Camisassa et al 2023*

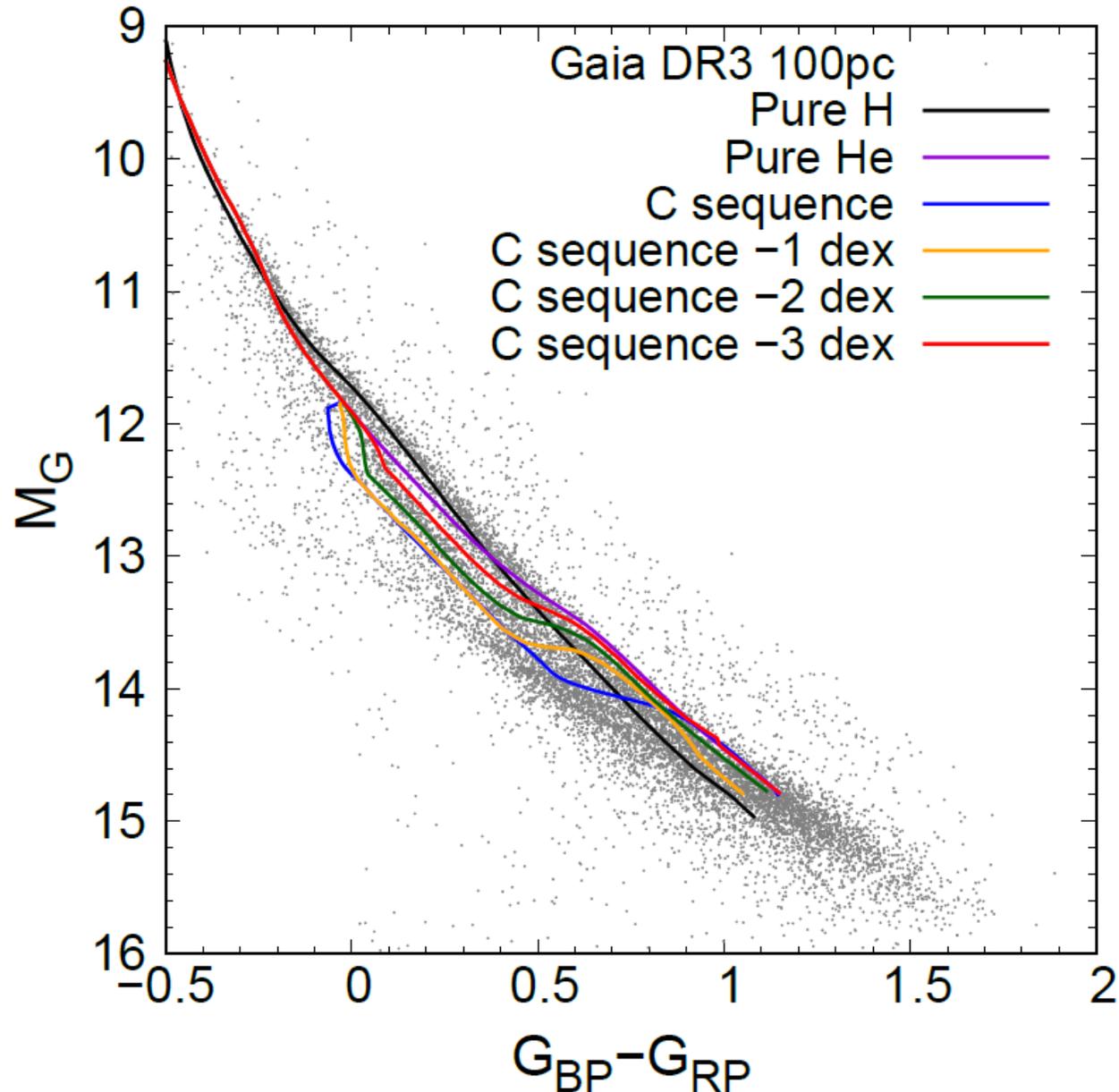
Pour la première fois, la branche des naines blanches montre une bifurcation

Etoiles à 100pc du Soleil, dans le disque mince  
13 000 naines blanches

Evolution possible de  
PG1159-DO-DB-DQ?



# Interprétation de la bifurcation



La branche la plus haute est celle des DA, atmosphère H  
La branche la plus basse n'est pas uniquement celle des DB, dominée par He

Il faut ajouter une composante où l'atmosphère montre des raies de Carbone

Sans doute avec convection des régions internes (dredge-up)

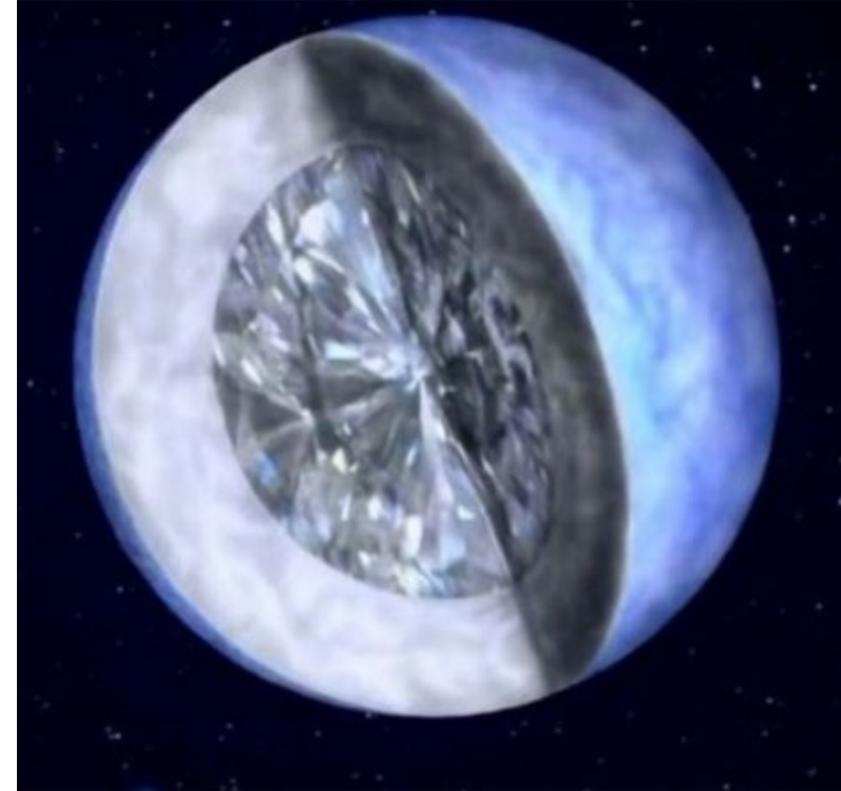
# Cristallisation

Les naines blanches se refroidissent très lentement  
On pense que l'on observe un processus de cristallisation,  
état liquide  $\rightarrow$  état solide  
les atomes de carbone forment une structure ordonnée.  
sous la pression extrême  $\rightarrow$  diamant?

Dans le cœur dégénéré: atomes si tassés  $\rightarrow$  électrons libérés,  
créant un gaz électronique conducteur et des noyaux atomiques  
chargés positivement, sous forme fluide

Les ions non-dégénérés de C et O commencent à se solidifier,  
Cristallisant, en libérant une chaleur latente, qui repousse la fin  
du refroidissement d'un milliard d'années

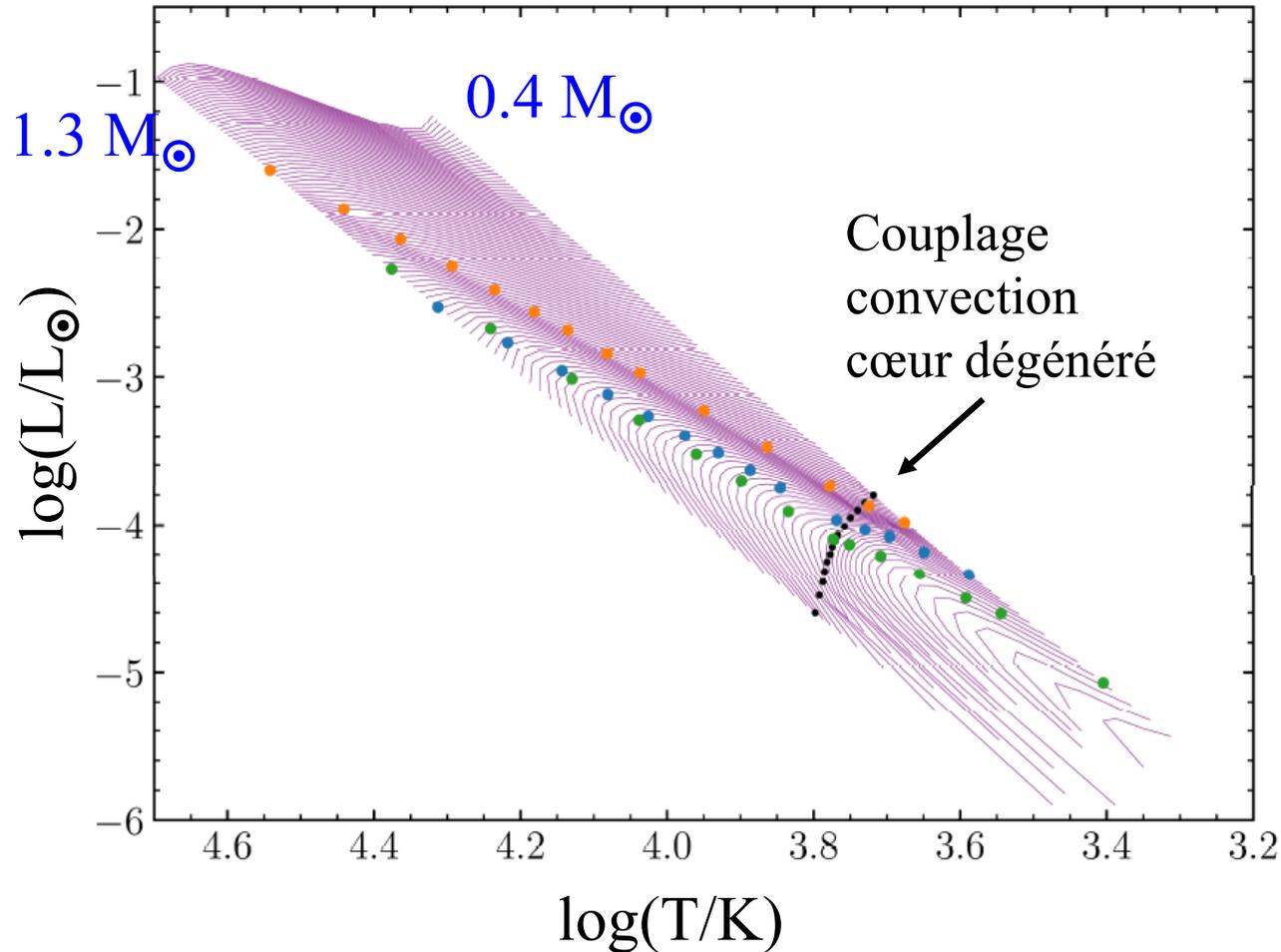
1 tonne/cm<sup>3</sup>



3,5g/cm<sup>3</sup>

# Modèle et prévision dans le diagramme HR

$\text{Log}(t_{\text{cool}}) = 7.5$   incrément 0.02



Branche Q vue par GAIA-DR3

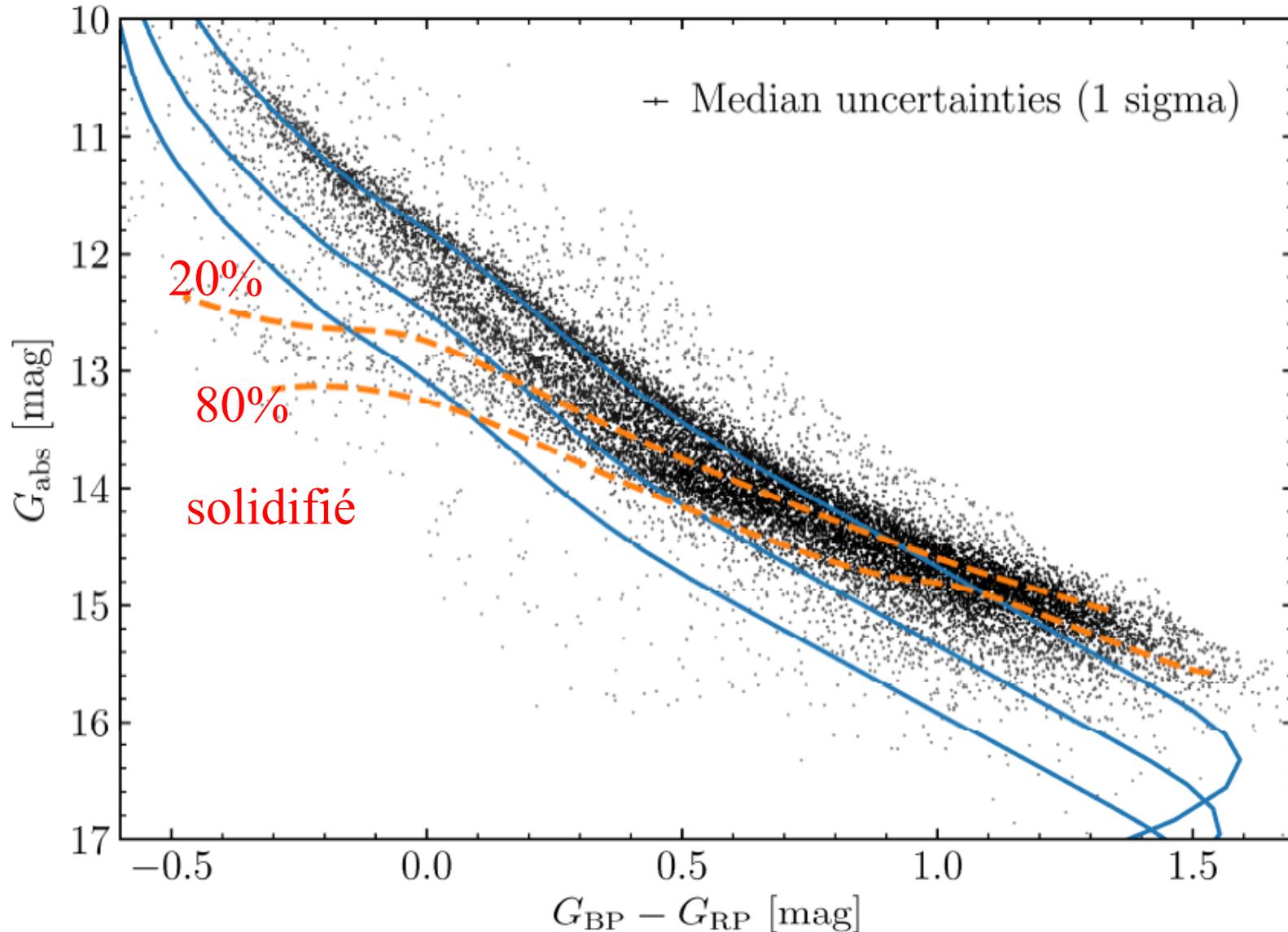
Courbes= isochrones du refroidissement DA, avec C/O =50/50

Points oranges: début de cristallisation  
→ Transition de phase

→ Points bleus 80% de solide

→ Points verts: transition de Debye  
où le solide classique devient quantique

# Une 3ème branche, la branche Q



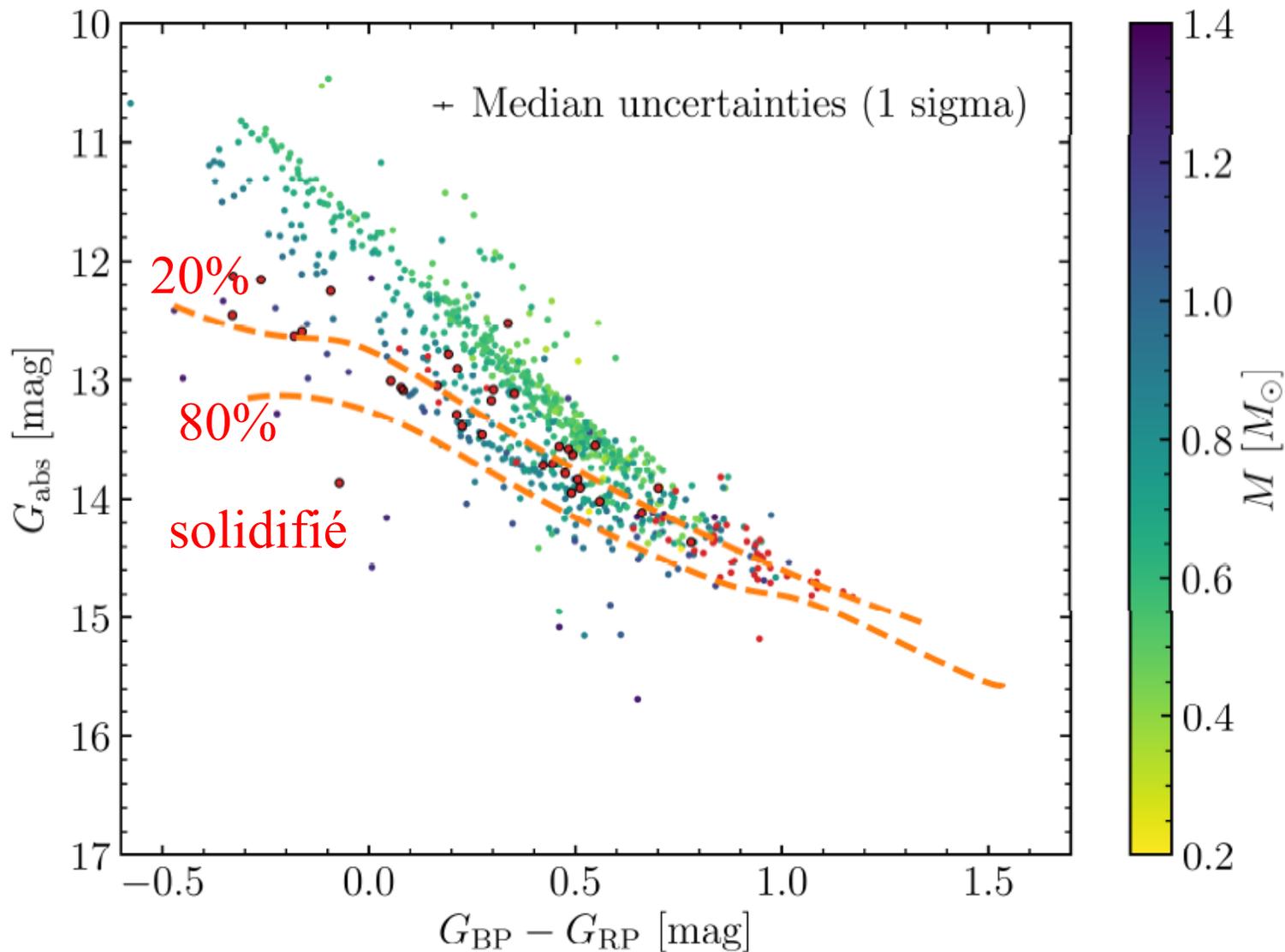
Refroidissement:  
tant qu'il y a des réactions  
nucléaires, les  $\nu$  dominant

Puis les photons,  
Cœur de C-O (O-Ne pour  
les grandes masses)

Après cristallisation,  
la zone dégénérée augmente

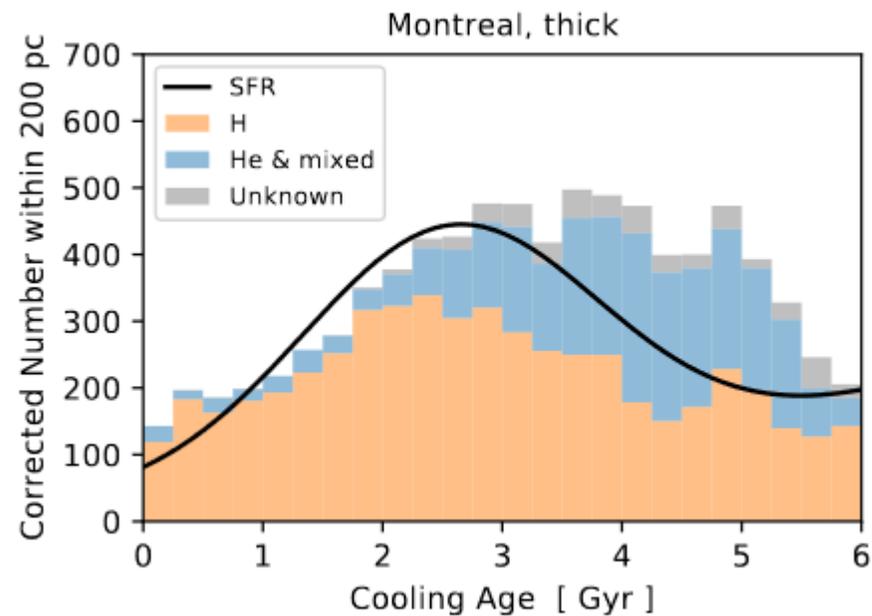
$\text{H}_2$  peut se former  
Puis  $\text{He}_2$

# Age des naines et taux de formation d'étoiles (SFR)



*Tremblay et al 2019*

Il est possible de remonter à la naissance des étoiles, qui donnent des naines aujourd'hui  
si les  $1.1-1.25 M_{\odot}$  sont dues à 50% à des fusions de naines blanches



*Fleury et al 2022*

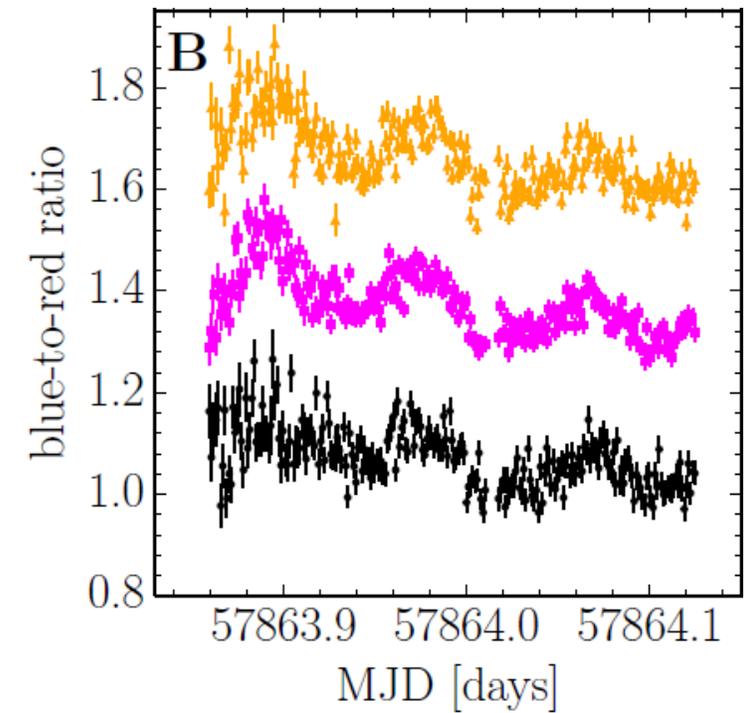
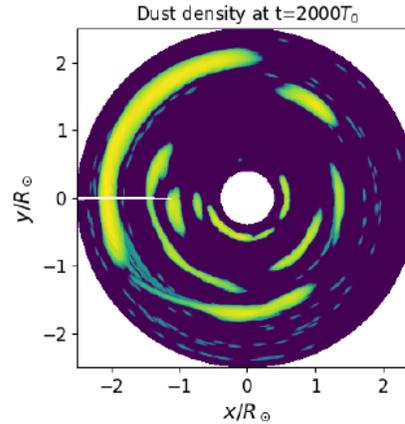
# Naines blanches et débris de planètes

De nombreuses étoiles naines blanches montrent des signes d'accrétion de corps plus petits, ce qui implique qu'elles peuvent héberger des systèmes planétaires

Un petit nombre de ces systèmes contiennent des disques de débris +gaz, visibles à travers les raies d'émission

Ex SDSS J122859.93+104032.9  
variation périodique de 123 min de la forme de la raie de Ca II  
→ disque de débris autour de la naine

*Manser et al 2019*



Fin du système solaire?



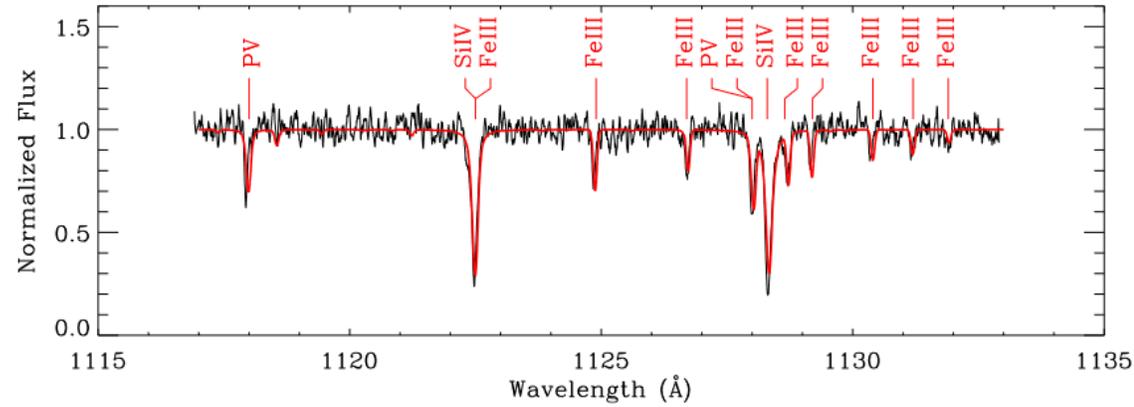
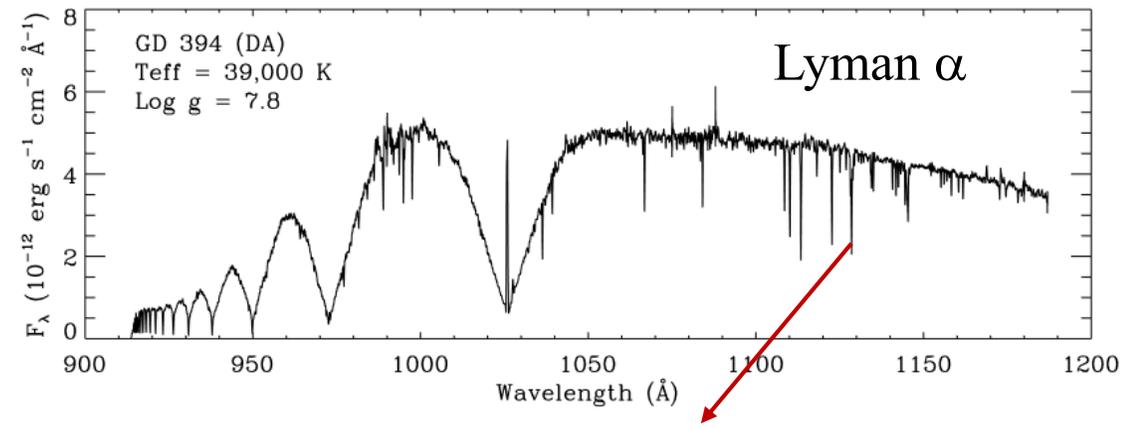
# Contenu en métaux des spectres

Naines blanches plus évoluées  
(convection, dredge-up?)

Naines blanches T élevée: lévitation radiative  
 $20\ 000\ \text{K} < T_{\text{eff}} < 130\ 000\ \text{K}$   
Les éléments lourds sont soulevés par Prad,  
Compensant la gravité  
(+ vents stellaires, + turbulence)

Naines blanches froides: des systèmes planétaires

Peut-être aussi dans les naines blanches plus chaudes?



Fontaine et al 2013



# Fusion de naines blanches

Atmosphère mélangée  
Hydrogène+Carbone

Normalement les naines blanches ne montrent que H+He en surface

Si fusion → Carbone

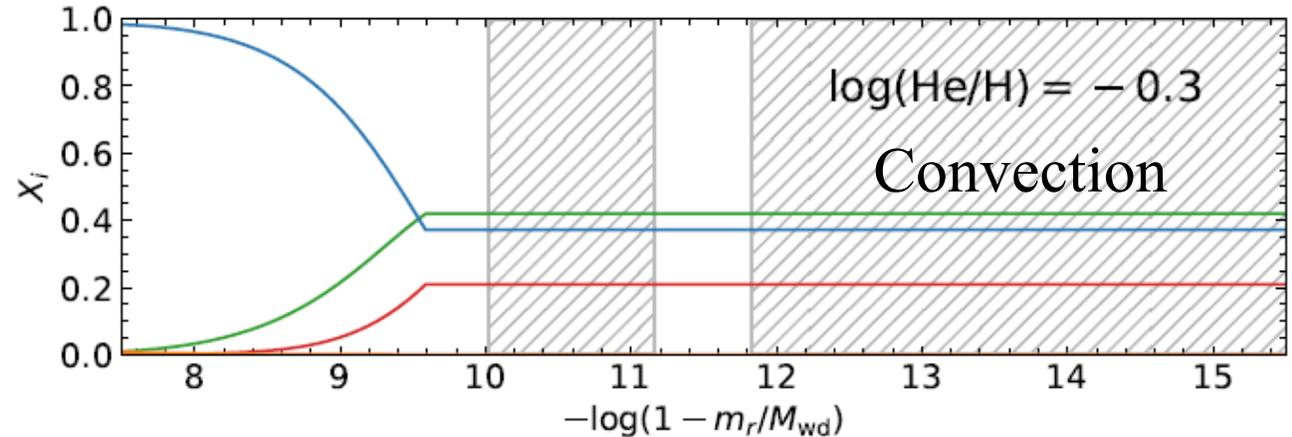
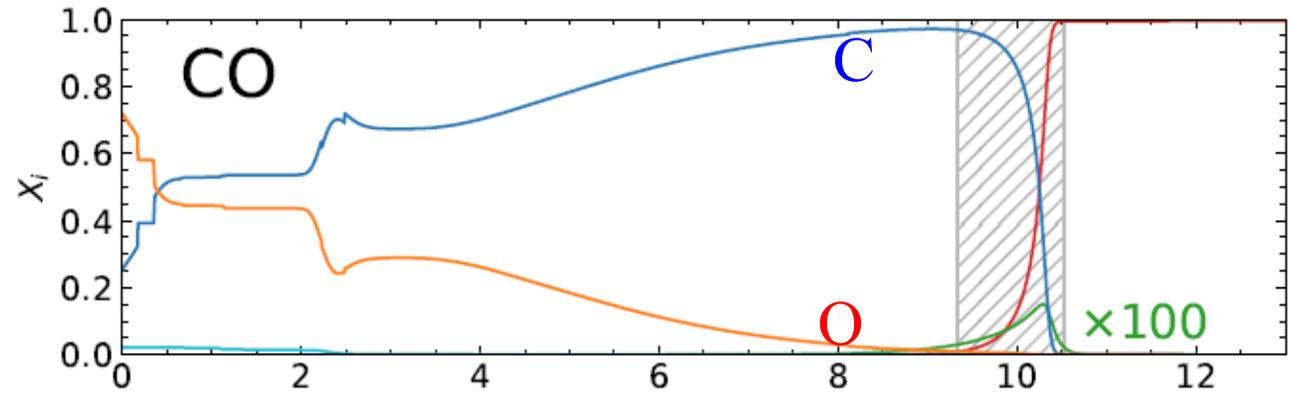
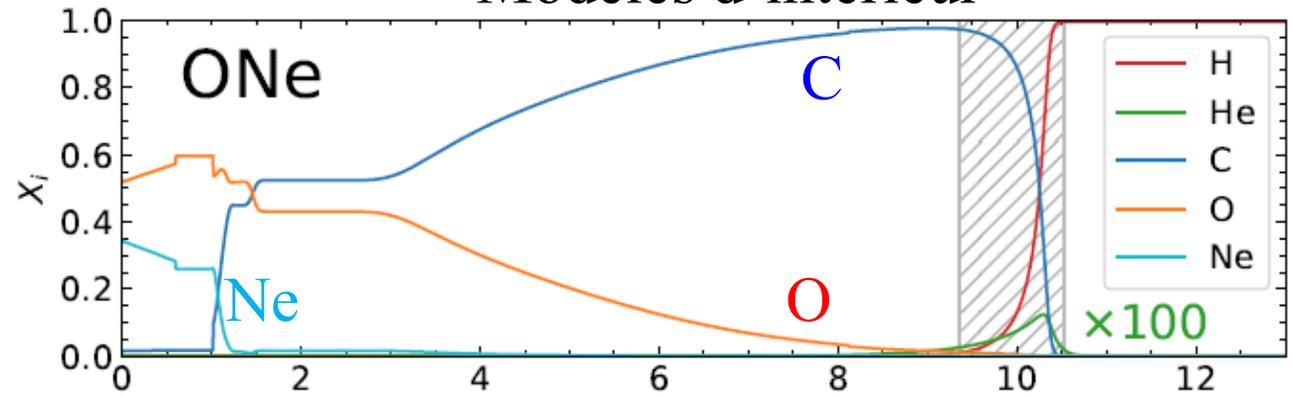
WDJ0551+4135 naine blanche

ultra-massive  $1.14M_{\odot}$

Avec  $C/H = 0.15$  en nombre

$T=13\ 000\ K$

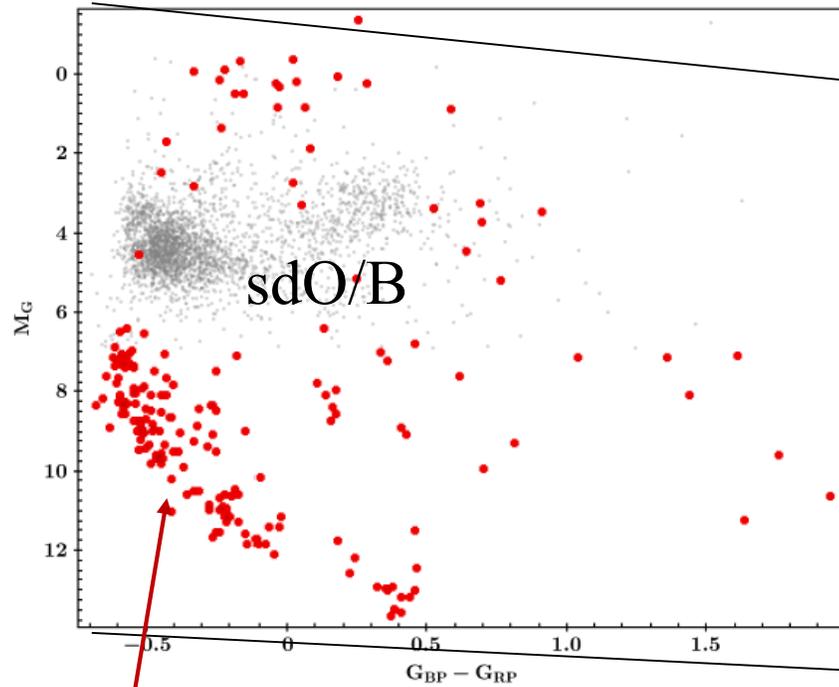
## Modèles d'intérieur



# Sous-naines sdO/B: type O ou B précurseurs de naines blanches

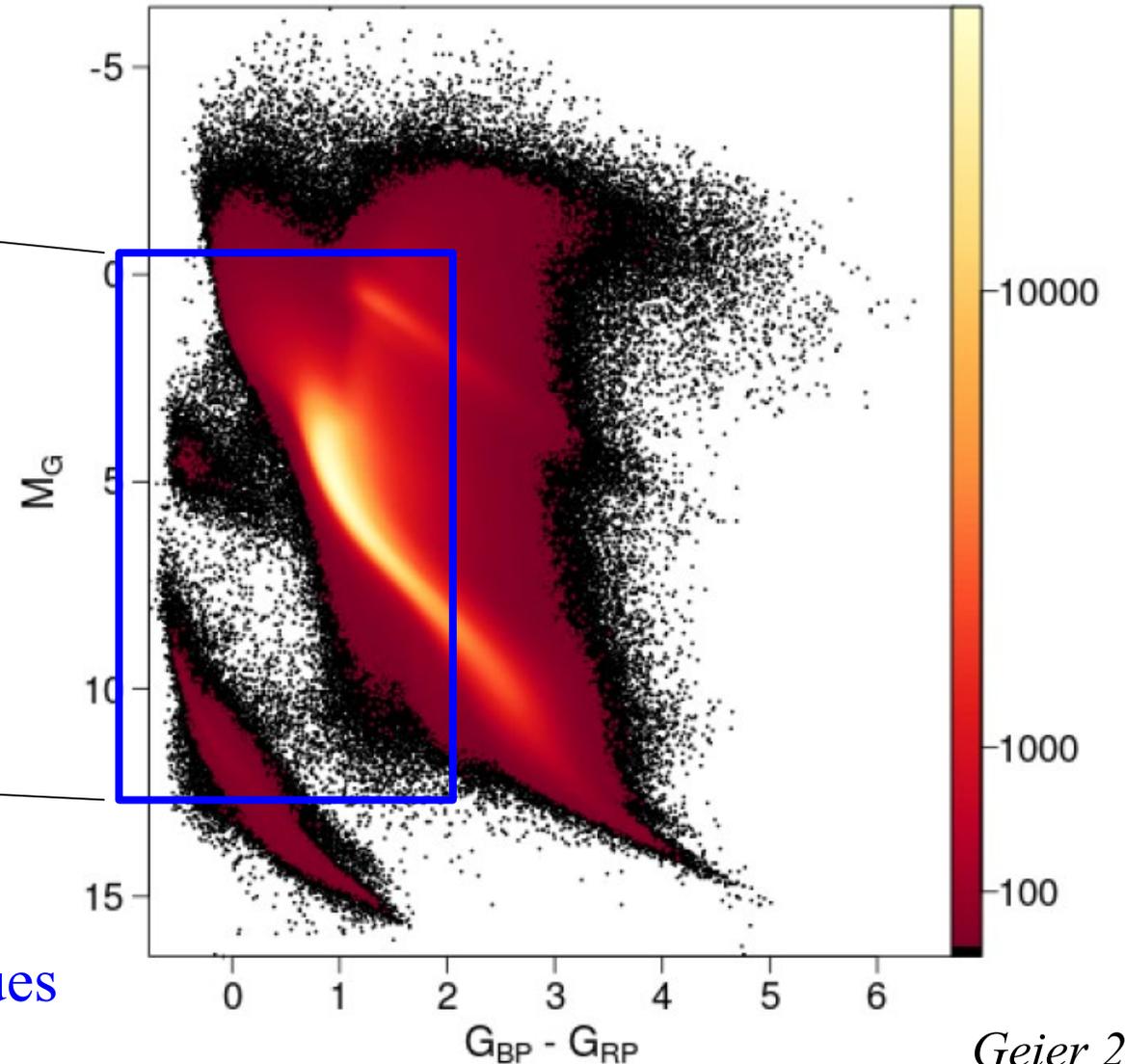
Température 20 000 – 40 000 K, comme les étoiles O et B

Petites tailles, petites masses  $\sim 0.6 M_{\odot}$



Naines blanches  
mal classées

Grâce à GAIA,  
Distances mieux connues



# Atmosphères des sdO/B

Il existe plusieurs types de spectres:

-- sdO 50-100% d'hélium dans l'atmosphère,  
peu de H, spectre de H, HeII

Les sdO ont un cœur de C+O, et une couche fusionnant He

-- sdB cœur où He brûle encore, pas de coquille,  
spectre de H et HeI faible

Les modes de vibration astérosismologiques sont  $\sim 10$ min

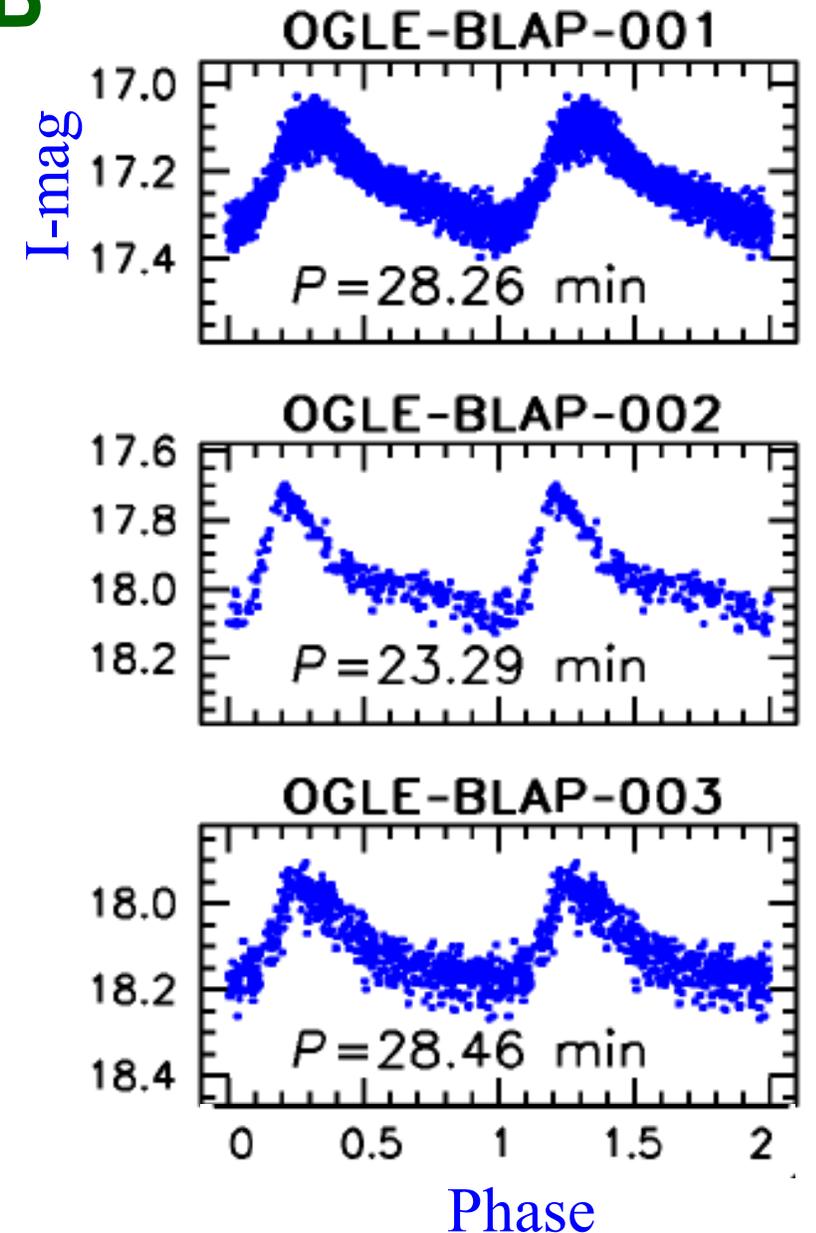
Certaines sdO révèlent du C et O dans leur atmosphère,  
Peut-être formés sur place, ou provenant d'une binaire

Restent un grand nombre de mystères

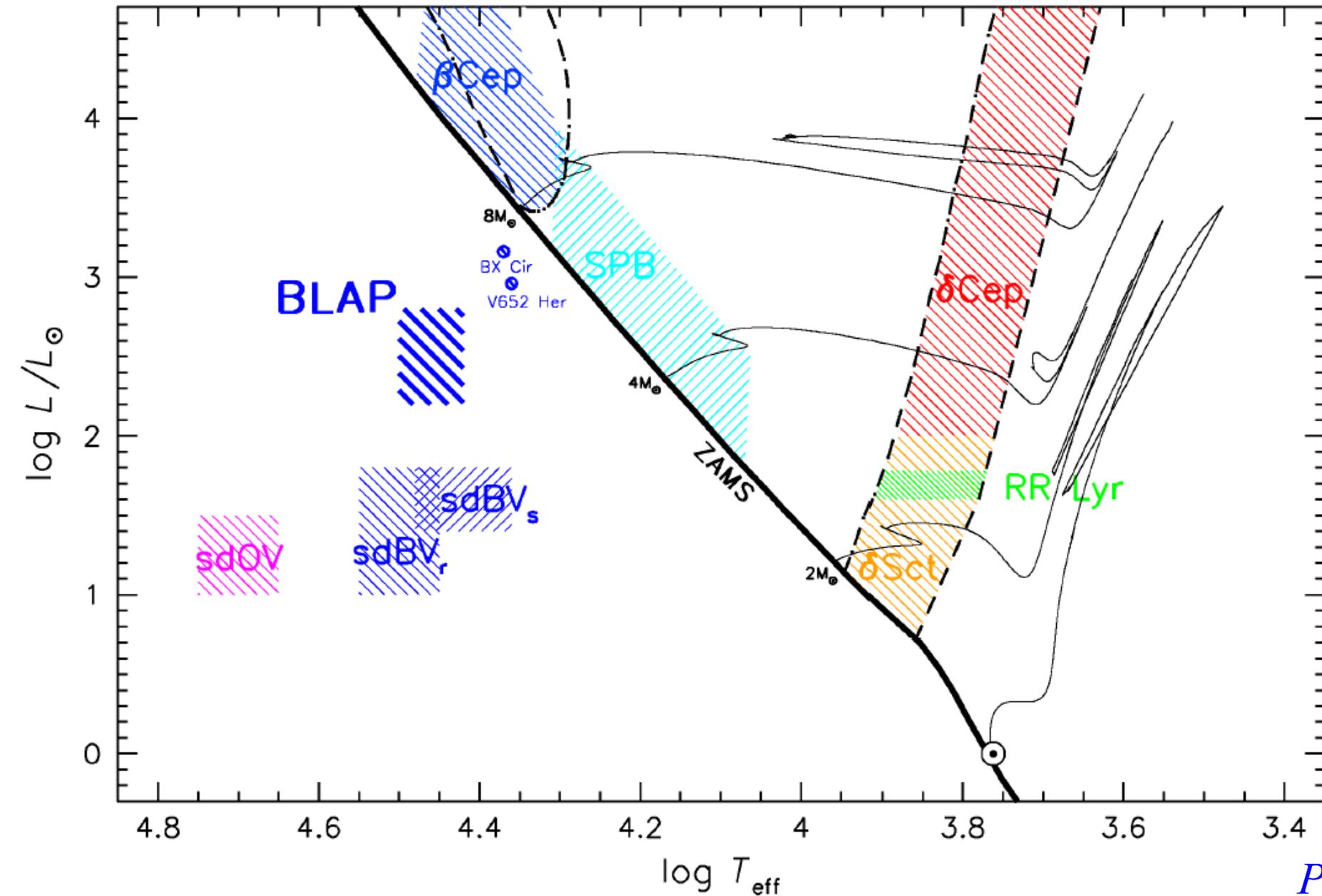
→ **Découverte de pulsations de grande amplitude**

*Pietrukowicz et al 2017*

BLAP (Blue Large Amplitude Pulsators)



OGLE expérience de micro-lentilles



présence de He II bump  
 δCep, δSct, RR Lyrae

Z bump d'opacité (Fe?)  
 βCep, SPB, sdO,  
 slow (s) ou rapid (r)

\\ mode **pression**  
 // mode **gravité**

Périodes 20-40min

BLAP moins nombreux  
 → rencontres?

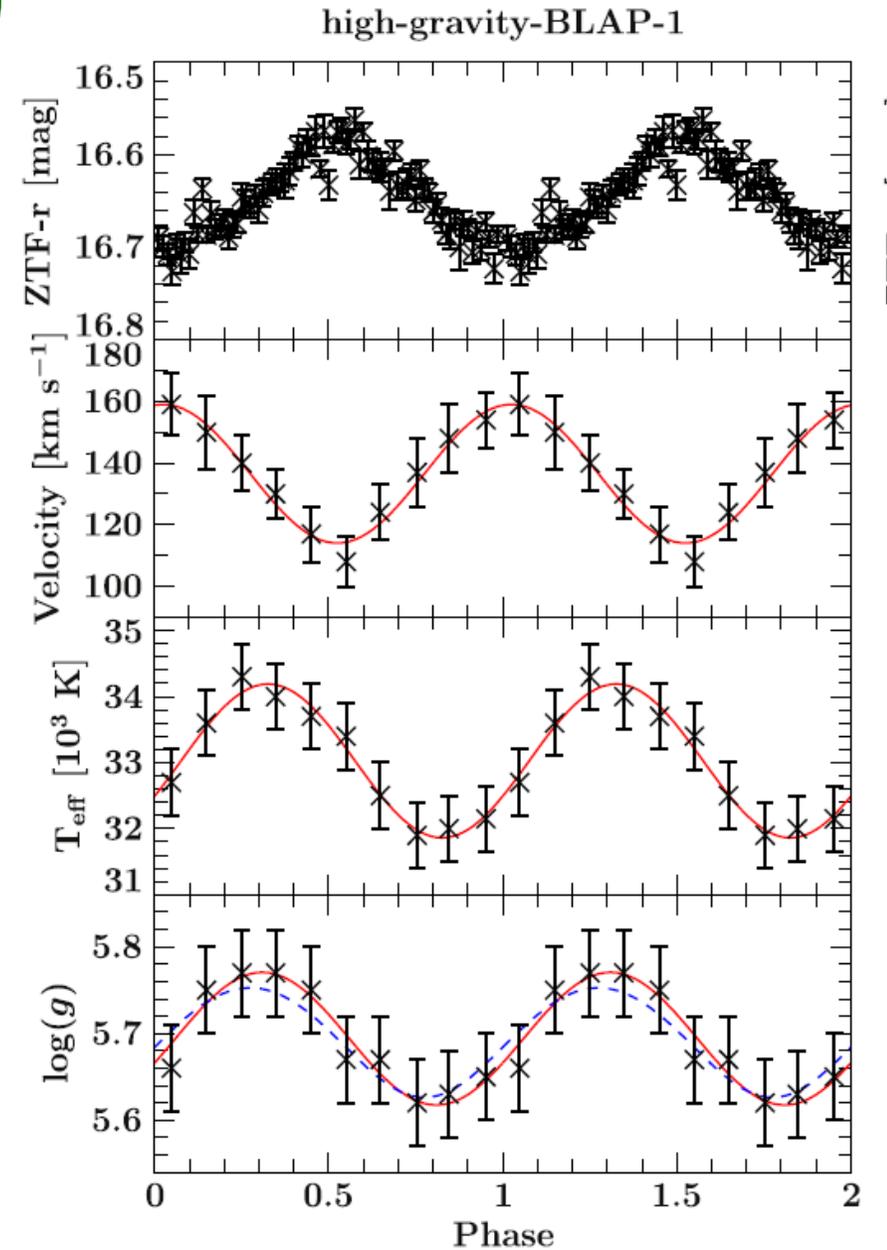
# BLAP (Blue Large Amplitude Pulsators)

Un grand nombre d'outils pour étudier les phénomènes variables: ZTF (Zwicky Transient Facility), Vera Rubin...

Les BLAP sont des sdOB, dont l'amplitude photométrique peu varier de 10% en moins de 10min, les variations correspondent à des oscillations radiales

Ces variables se trouvent dans la suite logique des RR Lyrae ou Céphéides mais pas prédites  
→ Découverte en 2017 (*Pietrukowicz, Kupfer et al 2019*)

Les pulsations seraient dûes à des variations d'opacité du fer  
Contrairement à  $\delta$ Cep ou RR-Lyr ( $\text{He}^+$ )

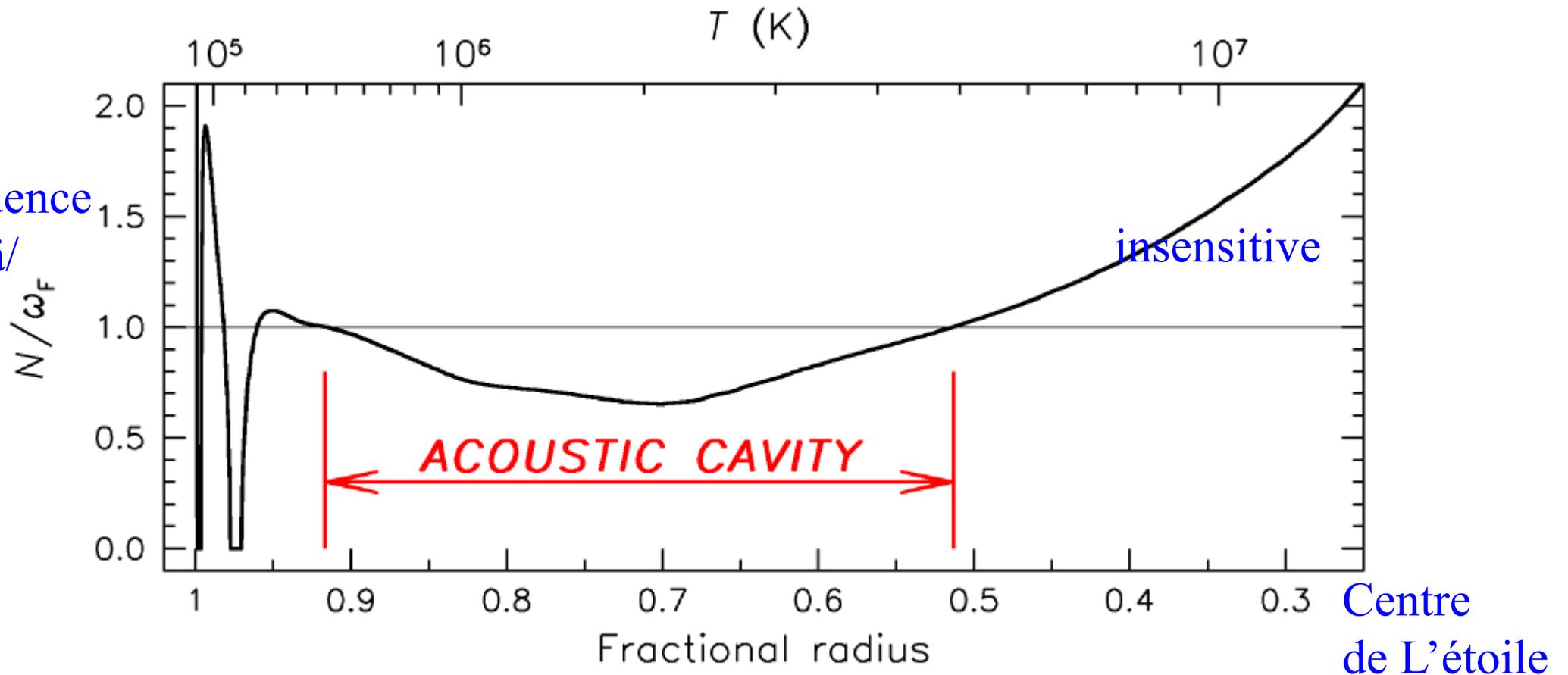


3.3minutes

# Mode de pulsations, des sdO/B

Les pulsations concernent une **cavité acoustique** dans l'enveloppe de l'étoile (au moins 25% du rayon) avec  $T < 10^7 \text{K}$  L'amplificateur est près de la surface, une zone de maximum d'opacité du Fe, à  $2 \cdot 10^5 \text{K}$

Rapport fréquence  
Brunt-Väisälä/  
Mode  
fondamental



# Les NOVAE récurrentes

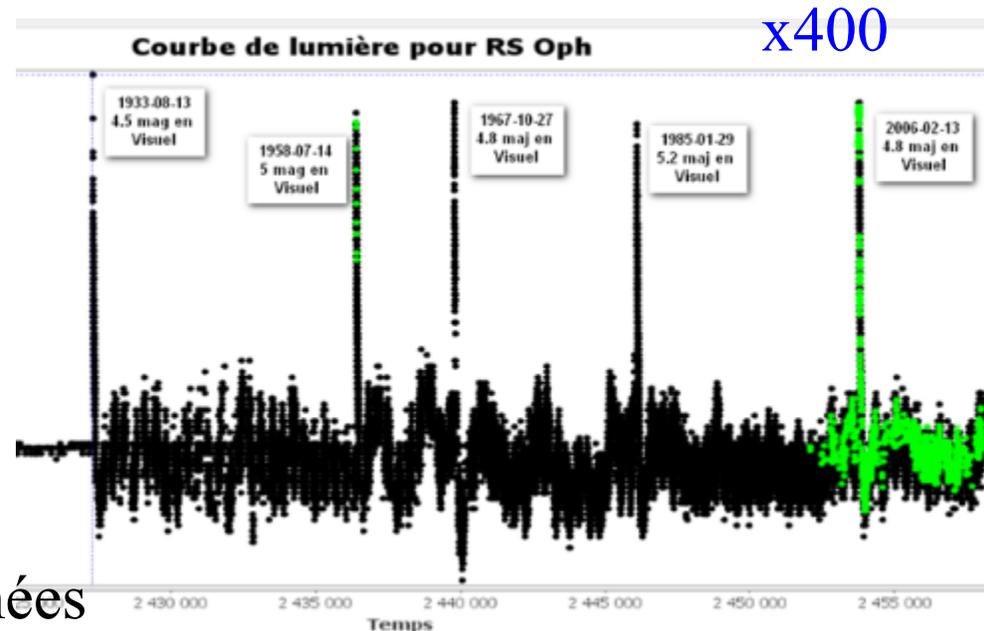
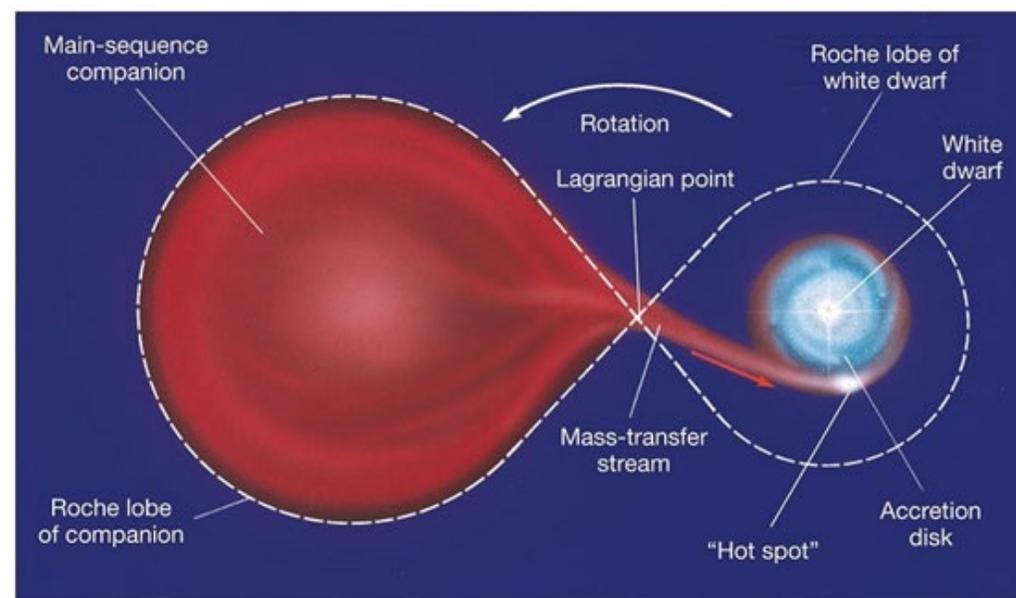
Environ la moitié des étoiles sont binaires, mais cette fréquence peut varier au cours de la vie des étoiles (explosions, accrétion..)

Une étoile sur la SP/RGB perd de la masse au profit d'une naine blanche

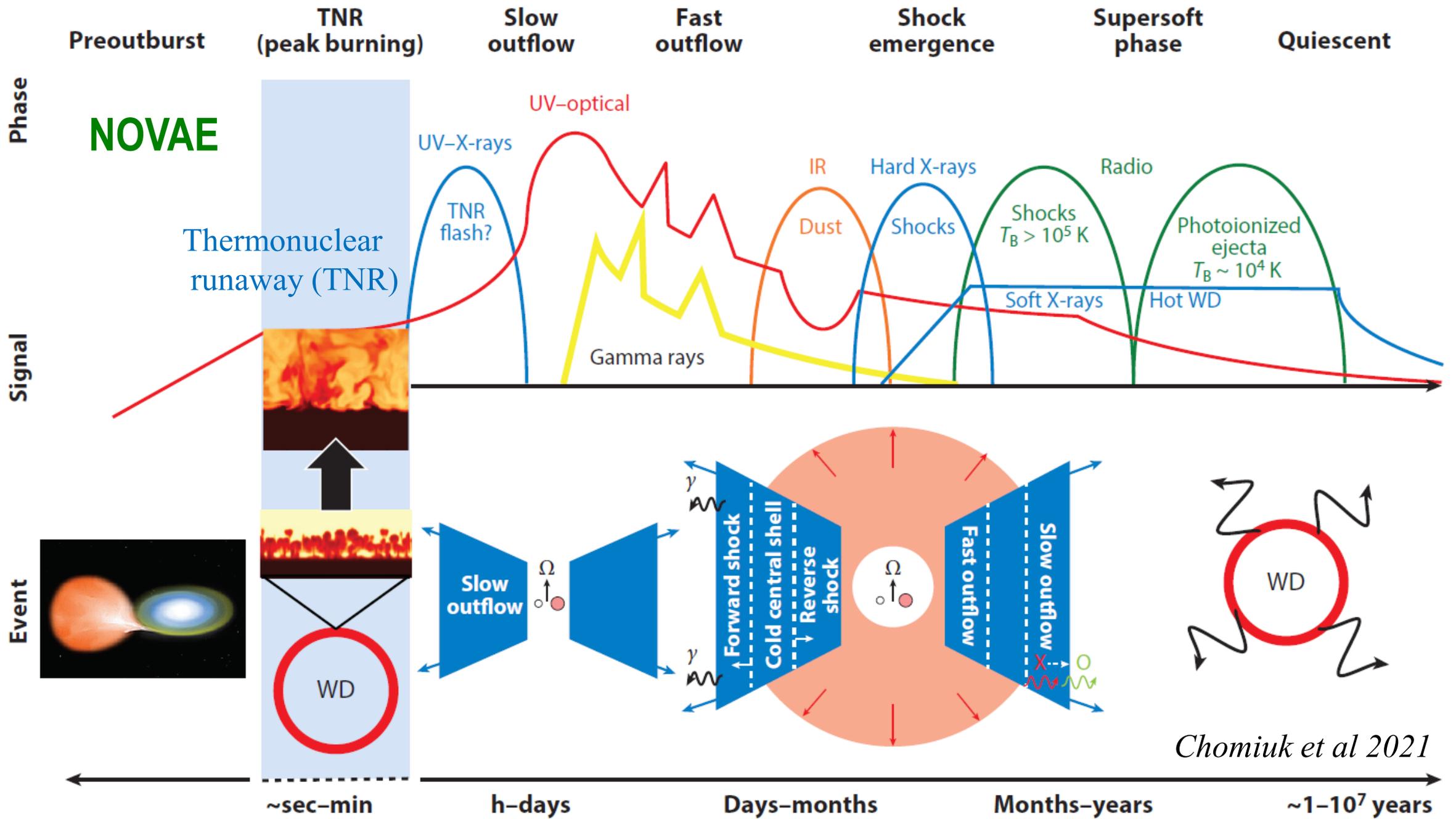
Entraîne des réactions nucléaires → explosion  
20-70 novae par an dans notre Galaxie

En 2010-14, détection de novae en rayons-gamma  
Explosion en optique durant qqs jours à qqes mois  
Puis devient optiquement mince → UV, rayons-X

Ejecta photo-ionisés → émission radio pendant des années  
Poussière → émission infrarouge



1933, 1958, 1967, 1985, 2006, 2021



**NOVAE**

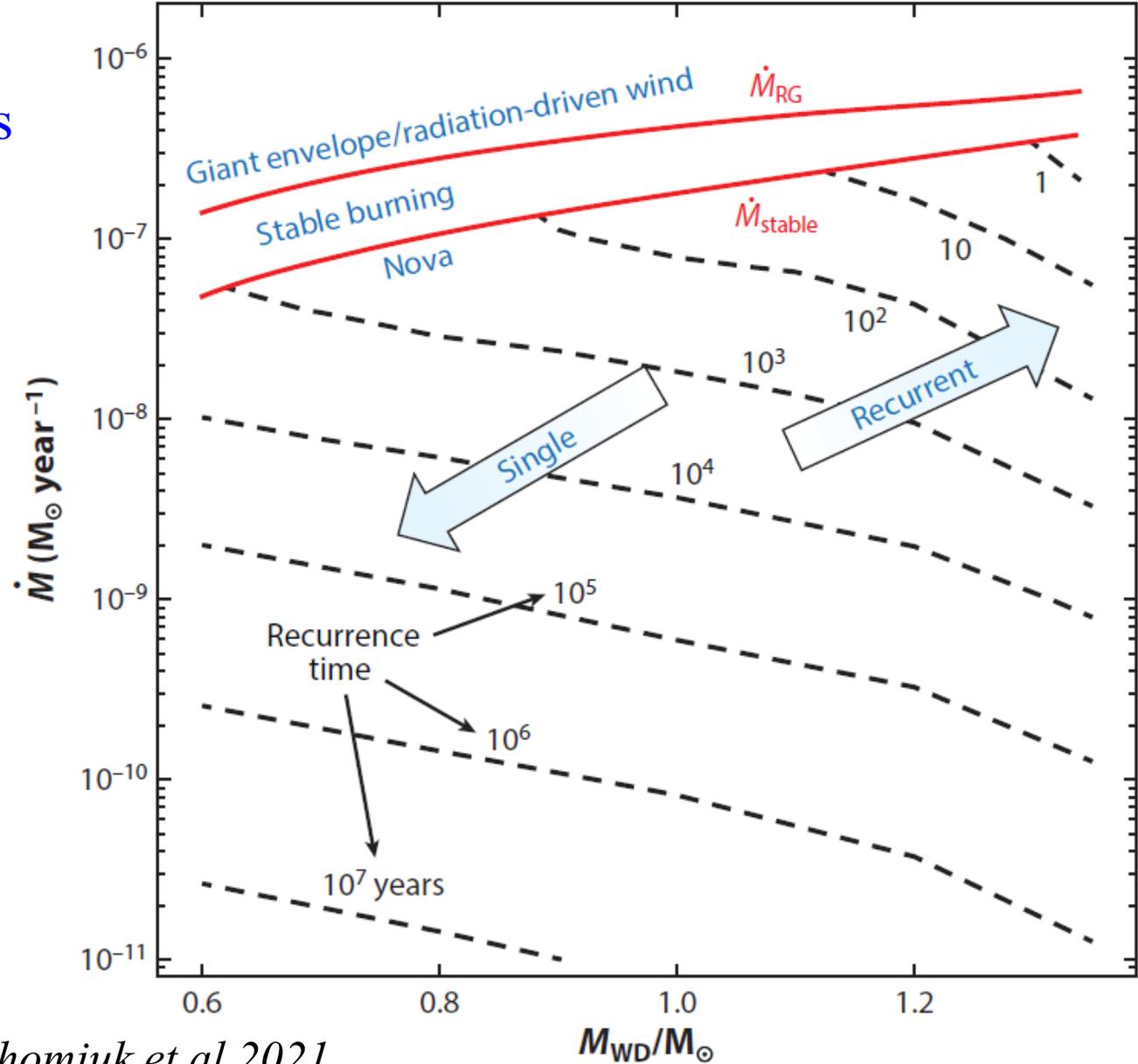
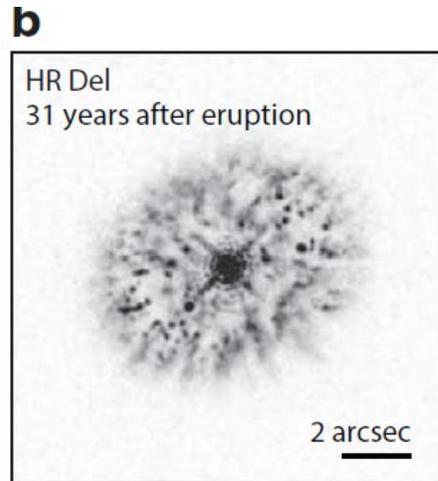
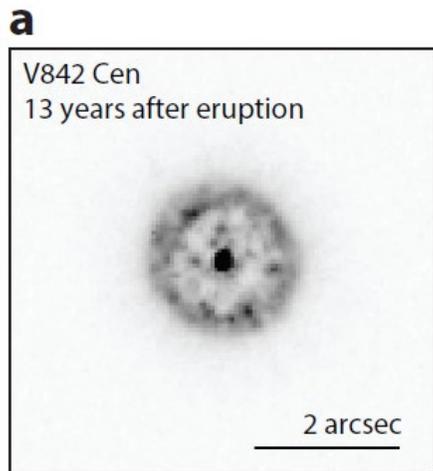
Thermonuclear runaway (TNR)

*Chomiuk et al 2021*

# Chocs après interaction entre éjecta, ou chocs internes

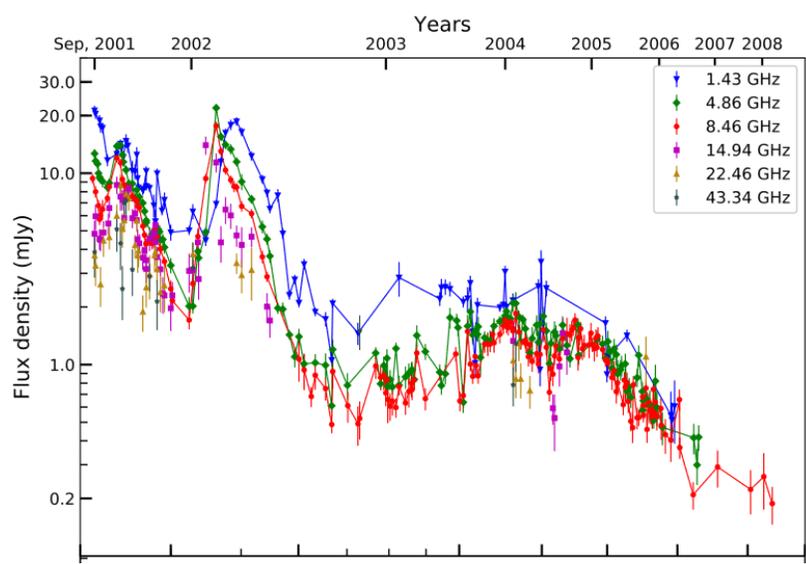
Emission en continu de Gamma  $> 100$  MeV  
Électrons relativistes accélérés dans les chocs  
→ Émission radio synchrotron  
Chocs créent la variabilité + inhomogénéités  
→ Formation de **molécules et de poussières**

L'occurrence de nova dépend à la fois de  $M(\text{naine})$  et du taux d'accrétion  $\dot{M}$



# V445 Puppis

*Nyamai et al 2021*

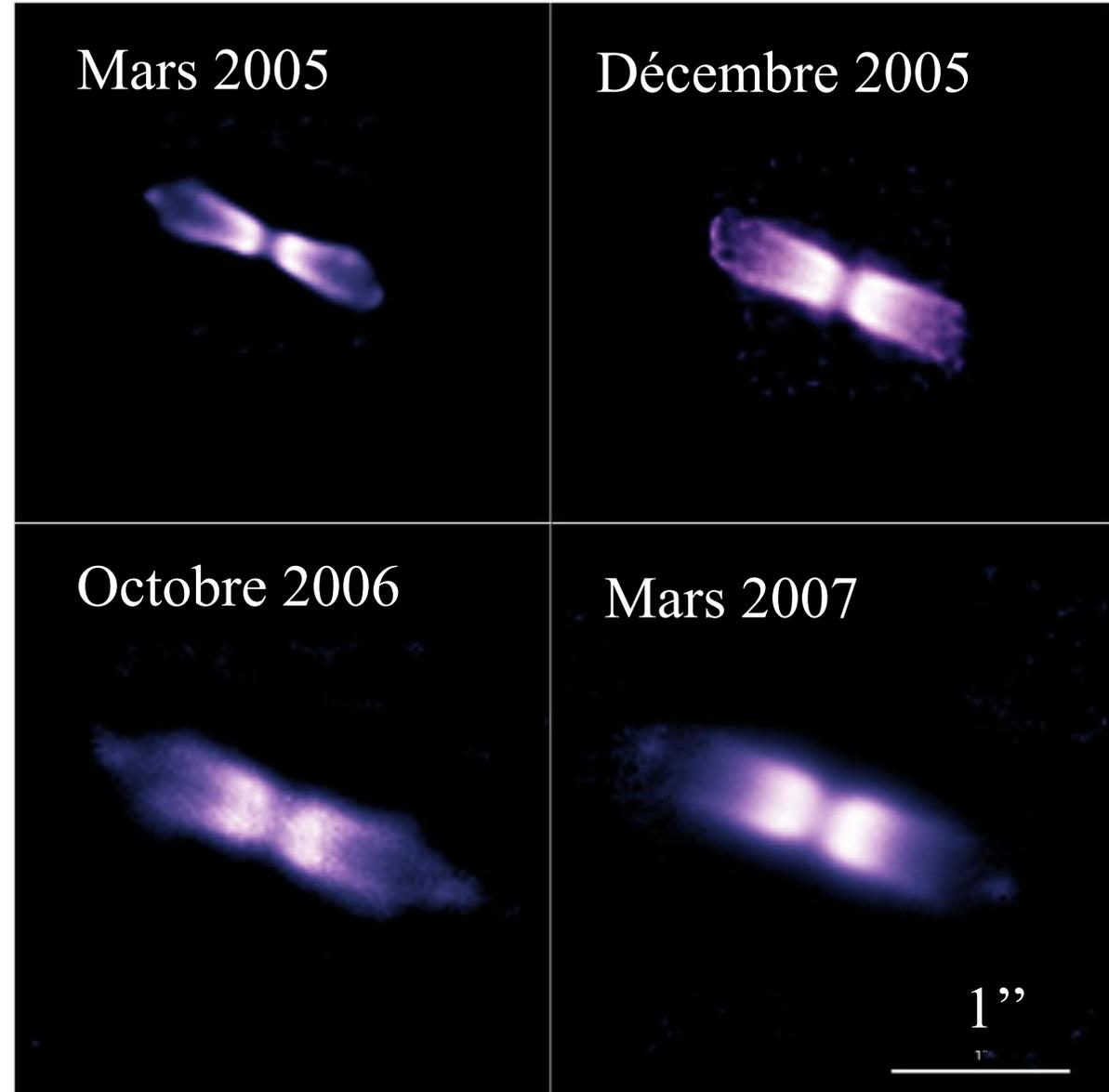


Flux  
Radio

La seule nova, brûlant l'hélium  
Progéniteur d'une future SNIa  
Vitesse des éjecta 10 000 km/s

La poussière obscurcit le  
disque où se trouve la binaire

Explosion en 2000  
 $\gamma$  jusqu'à 10 GeV (Compton,  $\pi$ )  
Onde de choc observée en radio  
pendant plus de 10 ans



# Des variables cataclysmiques aux SNIa

Les binaires incluant une naine blanche

-- variables cataclysmiques (CV), plus faibles qu'une nova, luminosité facteur  $< 10$

-- CV binaire la plus serrée

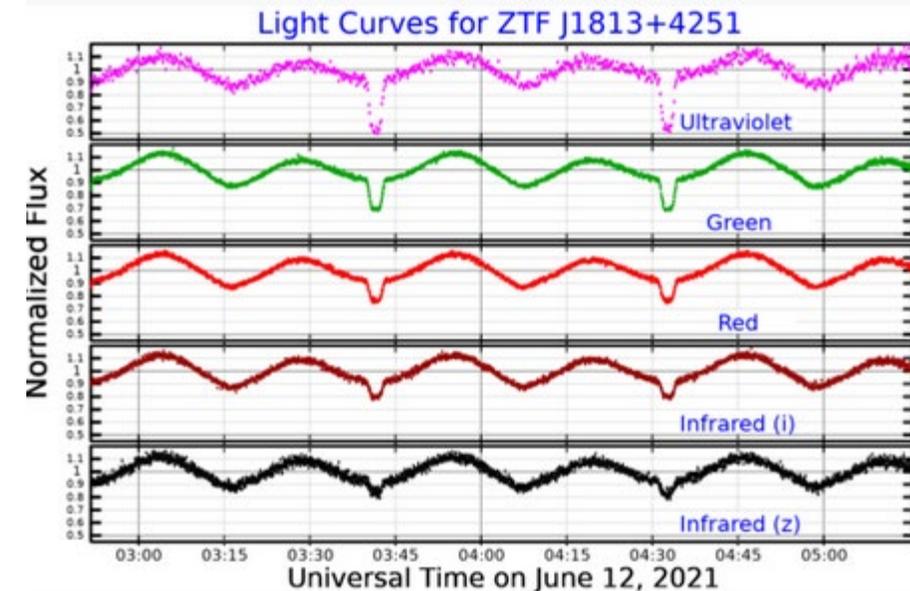
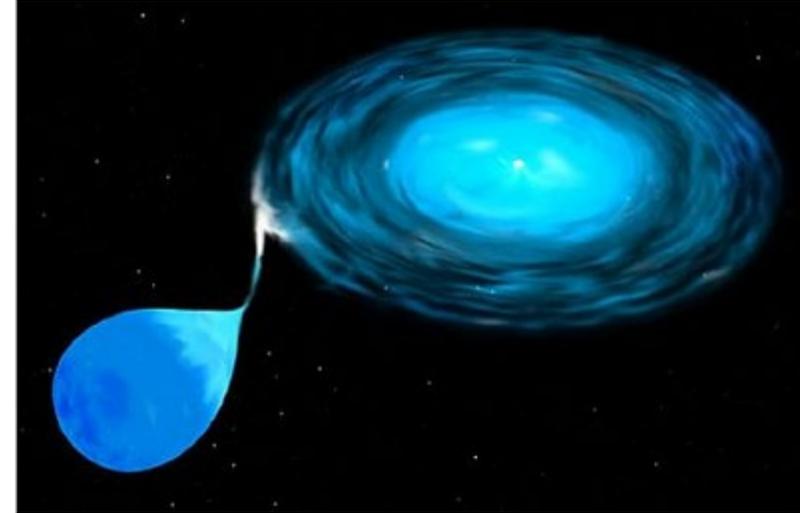
ZTF J1813+4251, période 51 minutes  $\rightarrow$  18min

-- si l'accrétion continue suffisamment, la naine blanche dépasse la limite de Chandrasekhar ( $1.4 M_{\odot}$ )

Contraction  $\rightarrow$  Fusion nucléaire du carbone

Jusqu'à explosion **en SNIa**

$\rightarrow$  destruction complète de la naine blanche



*Burdge et al 2022*

# Naines blanches pulsantes

Astérosismologie en plein essor

→ Structure interne

DAV (ZZ Ceti) les plus fréquentes

DBV, CV (GW Lib), PG1159 pulsantes

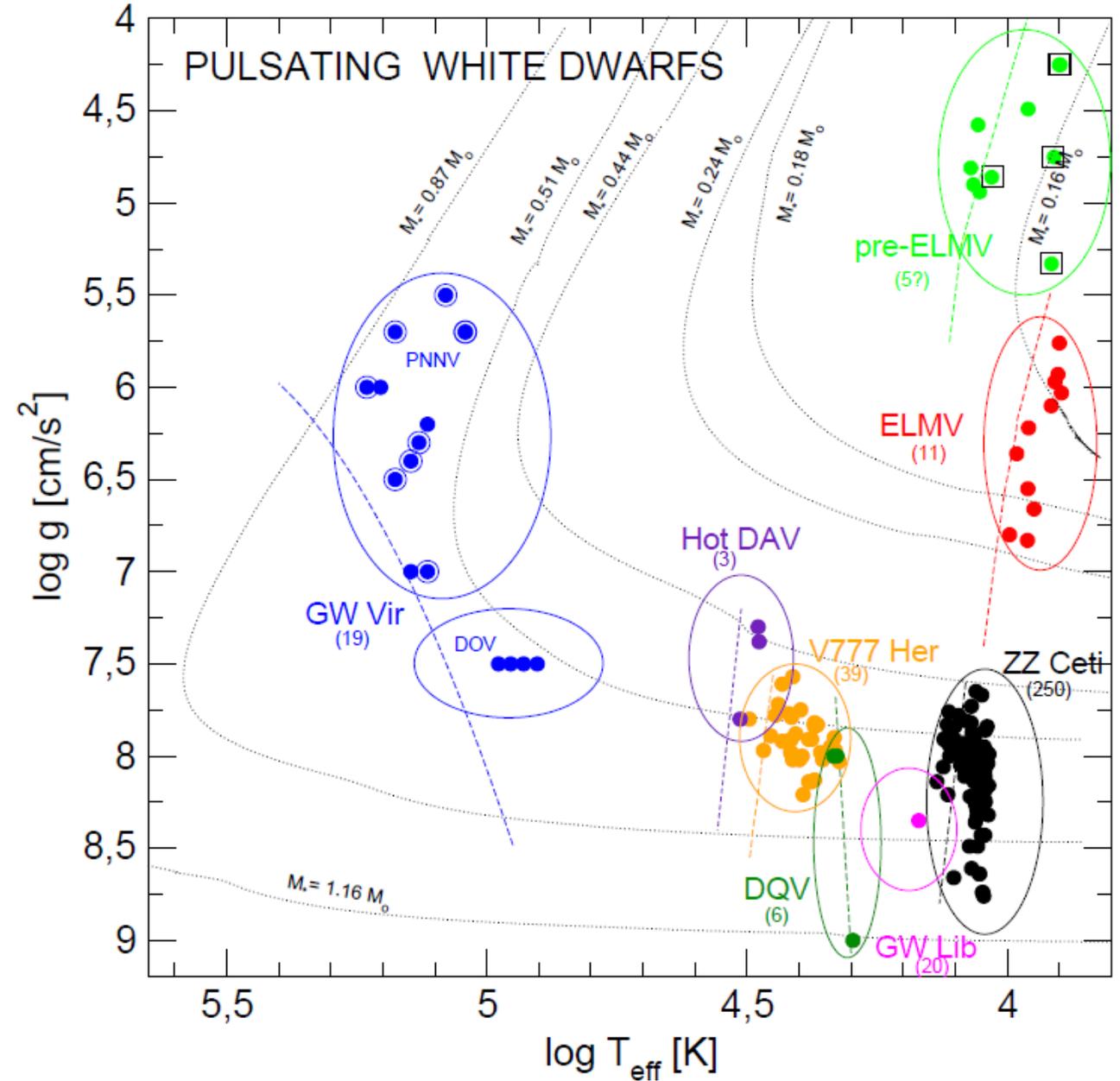
ELMV « extremely low-mass »

et pre-ELMV

Champ magnétique très fort dans

10-20% des naines blanches

→  $10^6 - 10^9$  Gauss



# Champ magnétique

Le champ B des naines isolées  $10^3 - 10^9$  G

$B < 10^3$  G difficile à étudier

Les naines hautement magnétiques ont B complexe et non dipolaire → multipôles

Pas de décroissance avec le temps  $\sim 10^{11}$  ans

Périodes de rotation lentes ( $\sim 100$  ans)

WD non magnétiques (qqs jours)

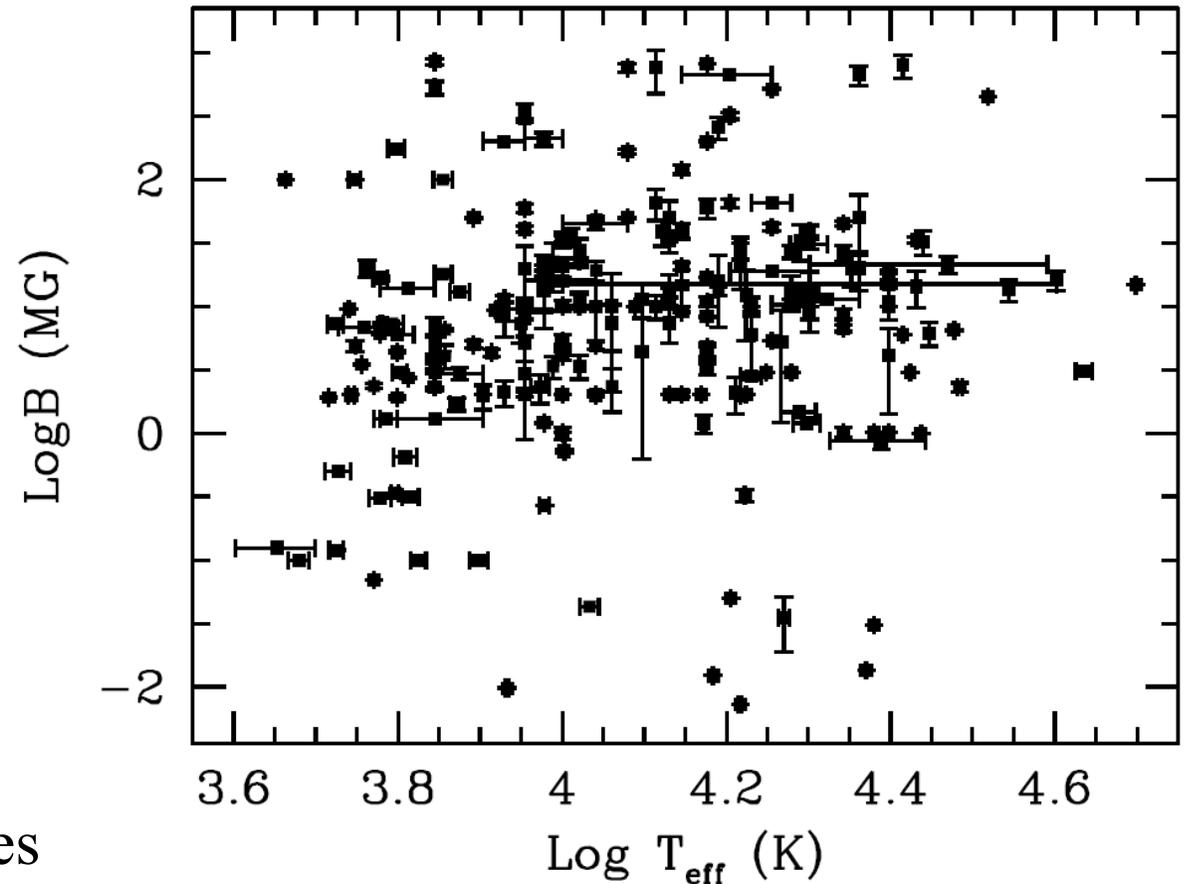
→ Champ B freine les noyaux

WD magnétiques: plus massives  $0,784 M_{\odot}$

non magnétiques  $0,663 M_{\odot}$

MWD se trouvent également dans les systèmes binaires CV et représentent environ 20 à 25 % de tous les CV connus

MWD: naines blanches très magnétiques



# Champ magnétique

Spectroscopie Zeeman des CV  $B \sim 7-230 \text{ MG}$   
Géométrie dipolaire en champ fort

IP (polaires intermédiaires)

plus difficiles à mesurer

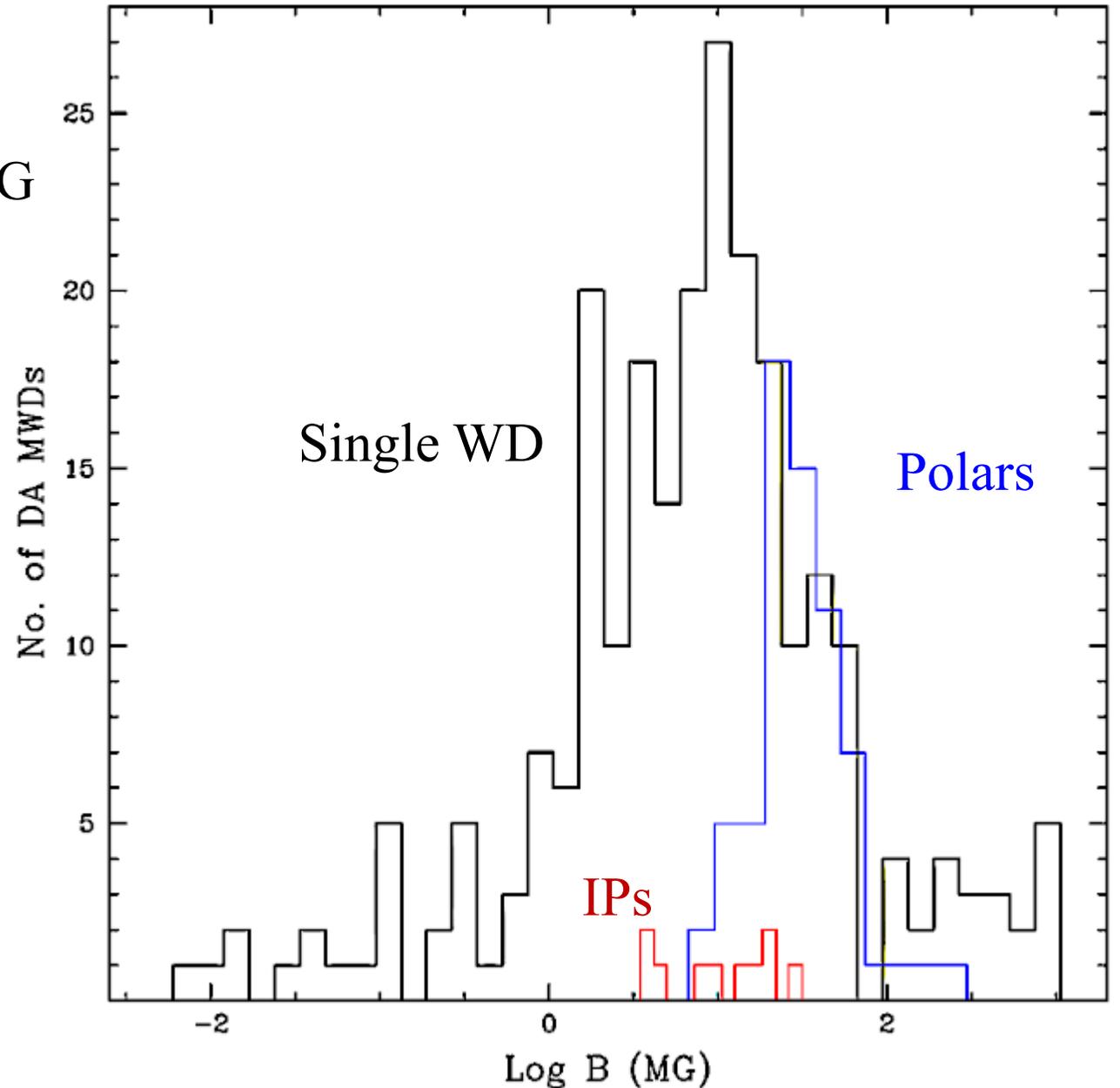
MCV mêmes périodes orbitales que CV

Binaires, Polars 0,4 h

IP périodes plus longues Gap de 2-3h

Les IP de période  $> 4 \text{ h}$

évoluent en Polars



# Origine du champ magnétique

L'origine des champs dans les MWD est toujours débattue.

(1) Hypothèse des **champs fossiles** reste une possibilité intéressante, (concentration de B dans l'effondrement)

(2) la génération de champs au sein de l'enveloppe commune d'un **système binaire**

→ explique l'absence de MWD associés à des compagnons éloignés, type K, M

Doivent avoir une enveloppe commune

→ Durant la fusion de la binaire, effet dynamo

Observation de polarisation circulaire, puis linéaire (plus faible)

Dans les WD isolées, relation entre spin et champ B, incliné, oblique



Spin et champ B oblique

# Effet du compagnon stellaire

L'étoile perd de la masse, qui tombe sur la naine blanche

→ Accélère la rotation de la naine blanche

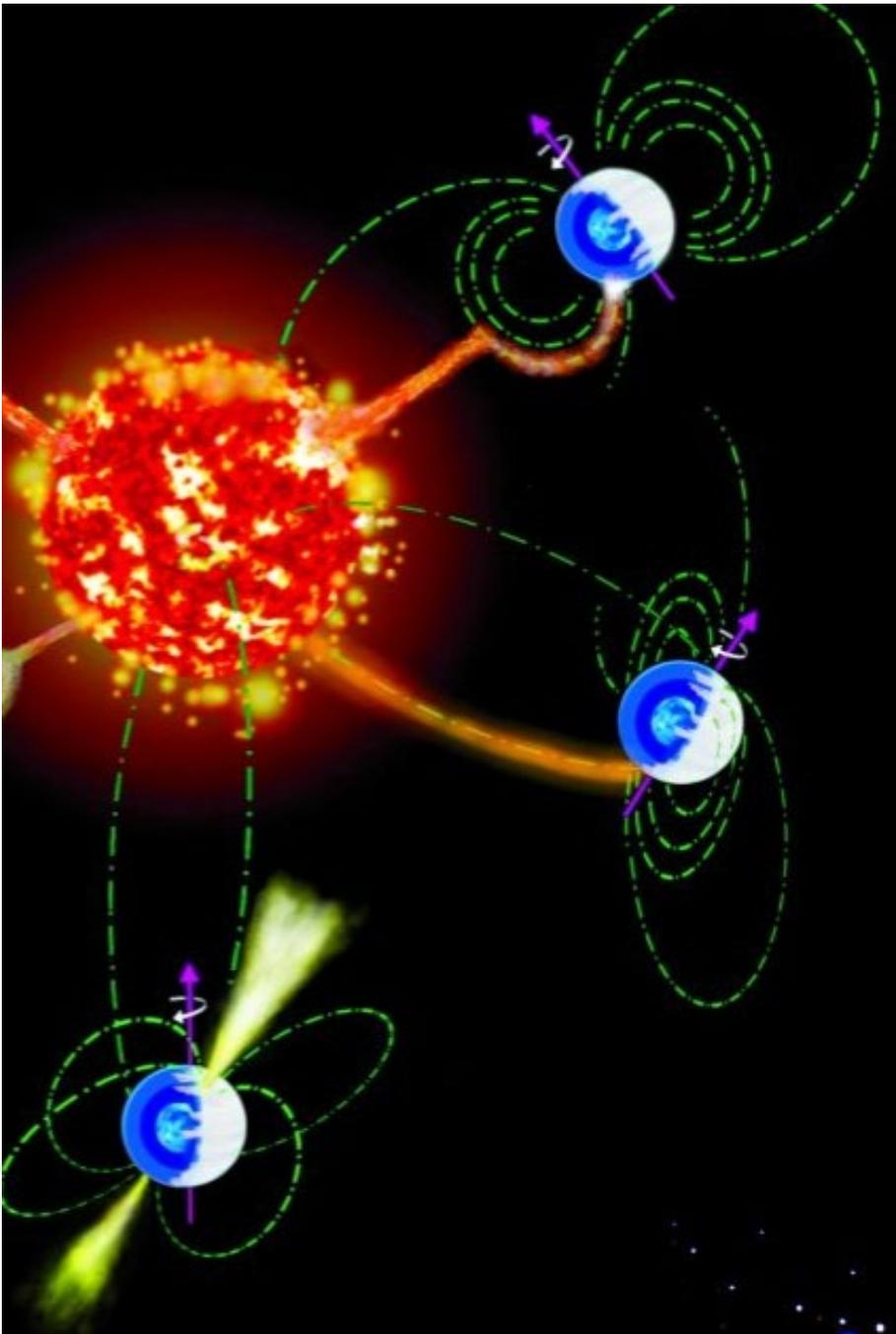
Spin et champ B non alignés

Lorsque le champ B de la naine rejoint l'étoile, il y a détachement, arrêt de l'accrétion

Propulsion du plasma dans le milieu

Dynamo inverse: champ E en mouvement, courants

→ Champ B



# Propulseur magnétique

J0240+1952 est une binaire CV  
où la rotation de la naine blanche  
est de **24 sec, la plus rapide connue**  
 $M = 0.7 M_{\odot}$  Distance = 600pc  
 $T_e = 25\,000\text{ K}$

Point chaud à la surface,  
→ Permet de mesurer la rotation

Point chaud 30 000 K dû au propulseur magnétique: le plasma arrivant à l'équateur, accélère la rotation, et le champ B, qui propulse le plasma dans le milieu interstellaire

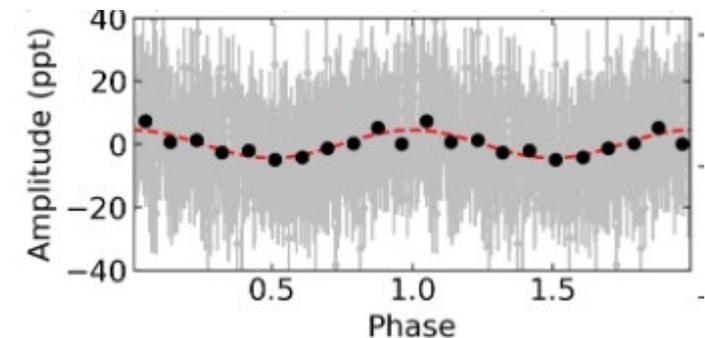
Variation de luminosité = 0.2%

Masse minimum pour résister  $M > 117 R^3 / GP^2 = 0.7 M_{\odot}$

*Pelisoli et al 2021*



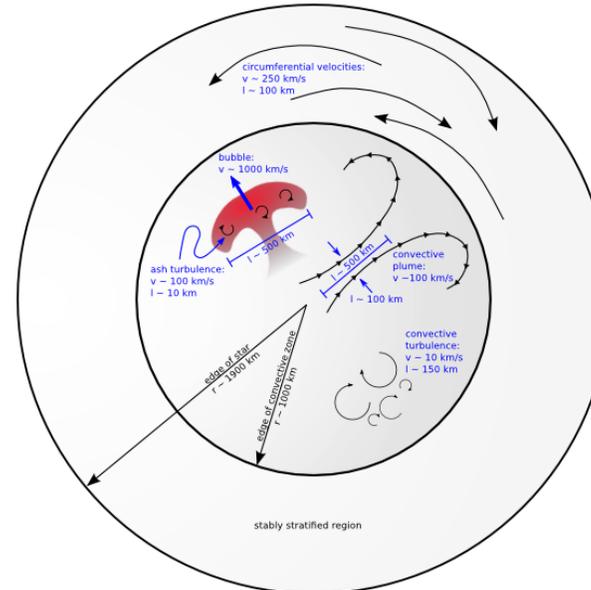
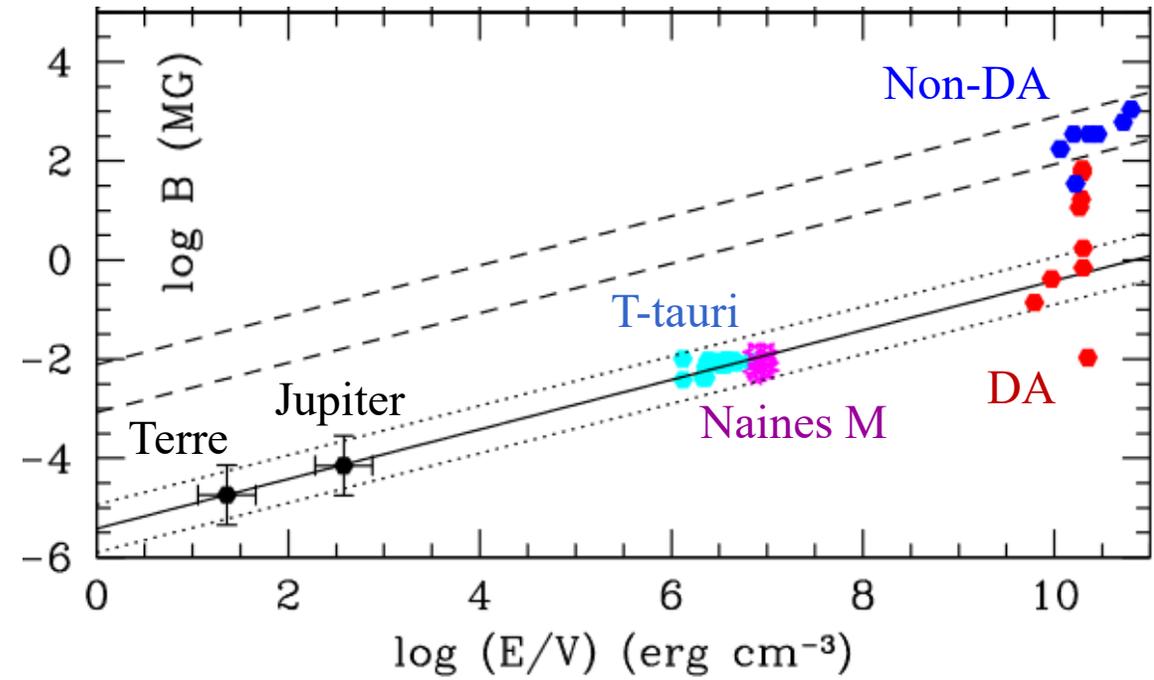
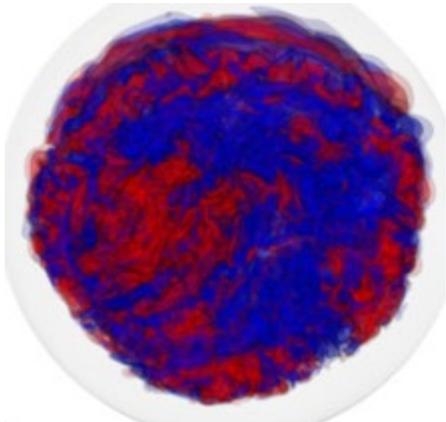
Vue d'artiste de J0240+1952



# Champ magnétique

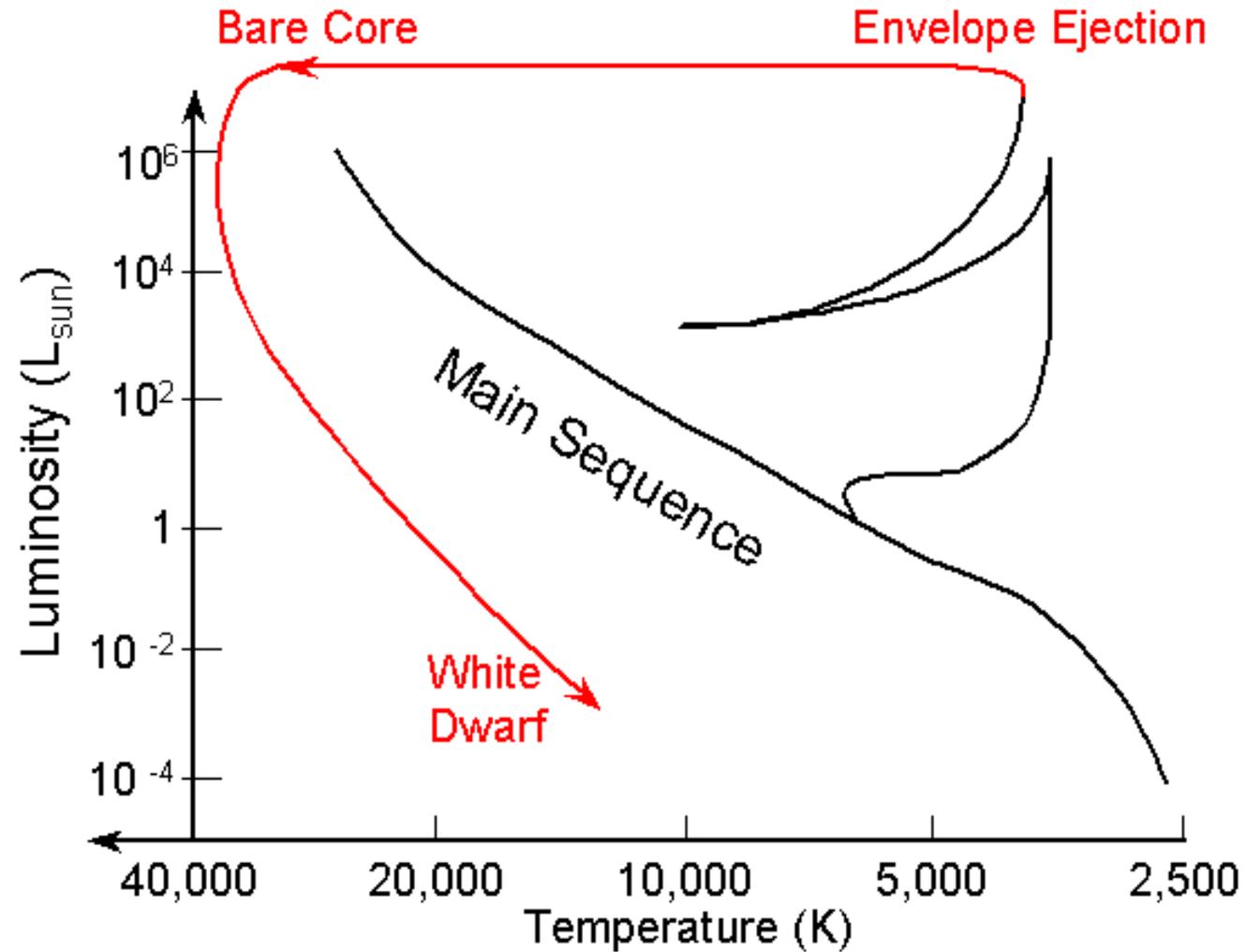
Ou bien, champ B dû à la **crystallisation**  
 Refroidissement: fluide de plasma O, C, + Ni, Fe  
 Rotation → effet dynamo → champ B

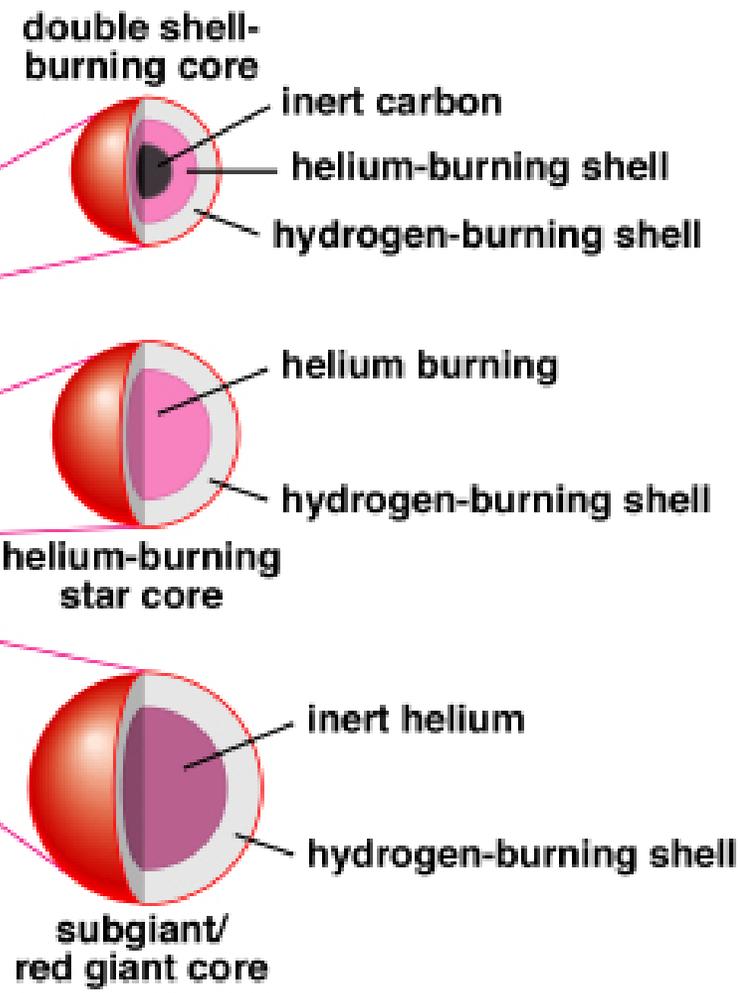
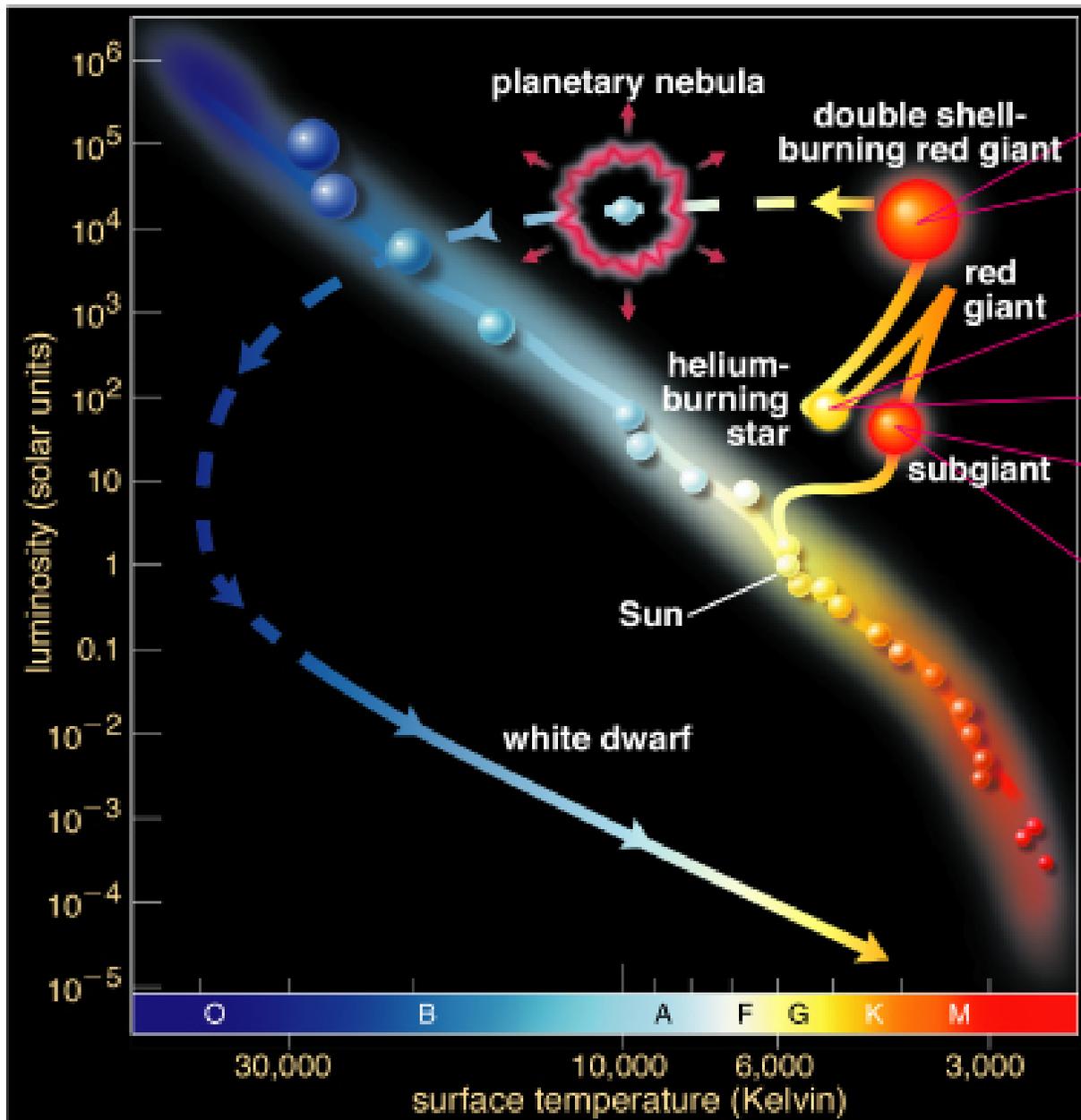
Plus de refroidissement → un solide précipite,  
 Instabilités de Rayleigh-Taylor dans ce manteau  
 convectif qui cristallise (séparation C, O)  
 produisent une dynamo forte



**Mécanisme universel!**

# Phase des nébuleuses planétaires

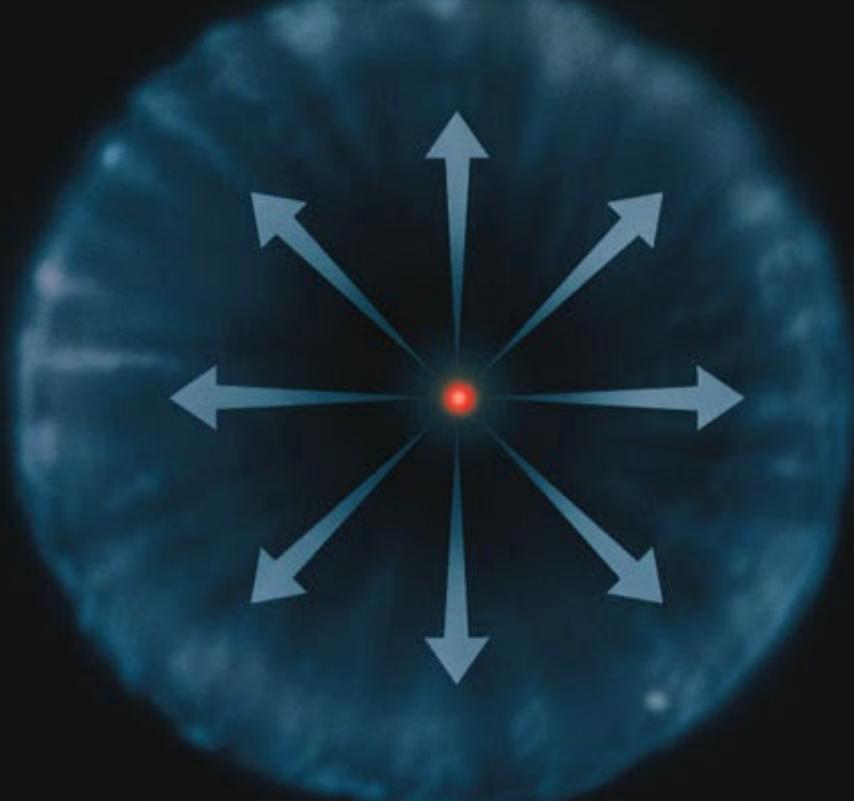




# Nébuleuse Planétaire

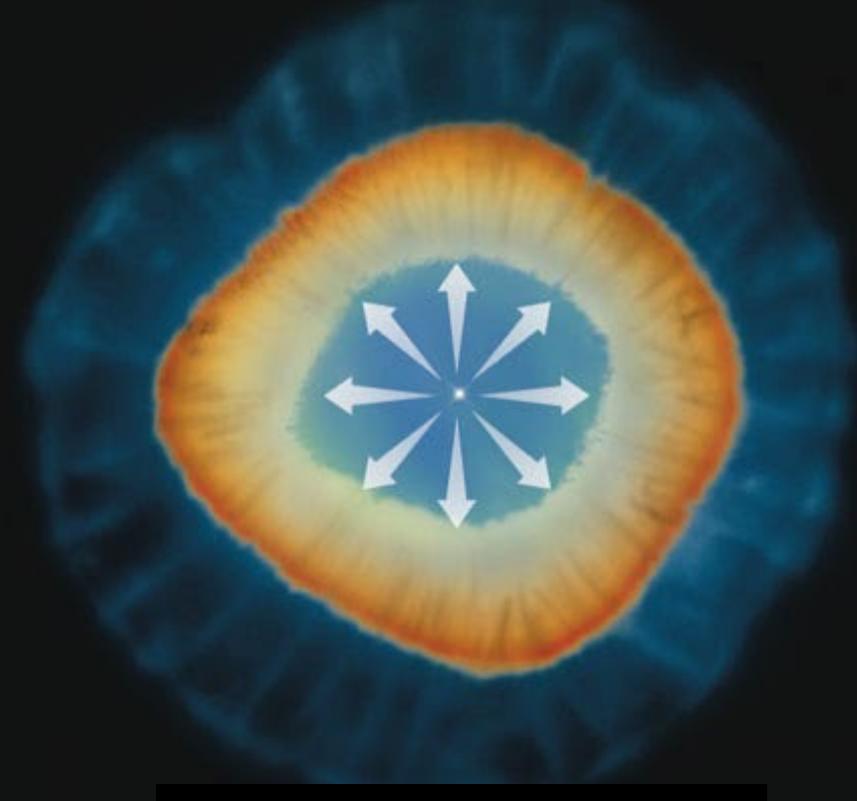
Lorsque l'explosion rattrape le vent stellaire

Vent stellaire lent d'une géante rouge



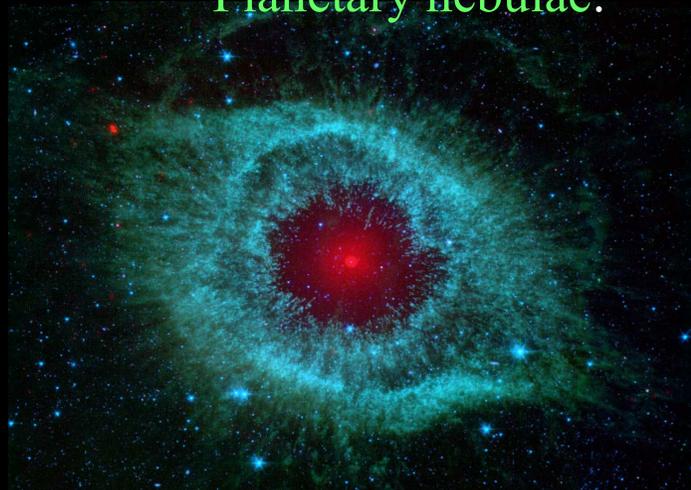
Le gaz correspondant n'est pas détectable facilement

Vent rapide de l'objet compact central



Nébuleuse planétaire quand le vent rapide comprime le vent lent

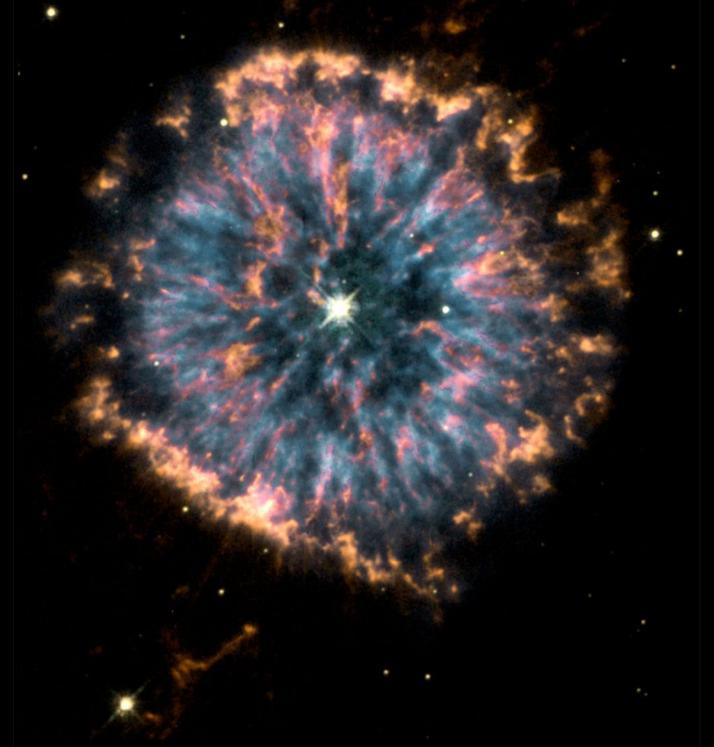
Planetary nebulae:



Eskimo Nebula NGC 2392



NGC 6751 Glowing Eye



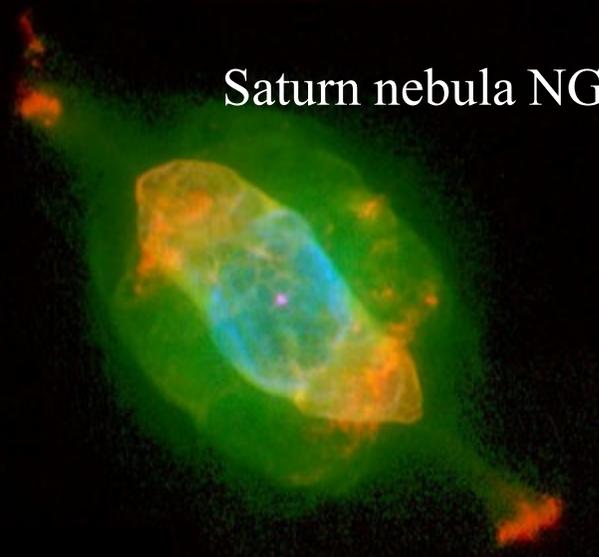
Blinking nebula NGC 6826



Helix Nebula



Saturn nebula NGC 7009



Cat's Eye Nebula NGC6543



Hourglass Nebula



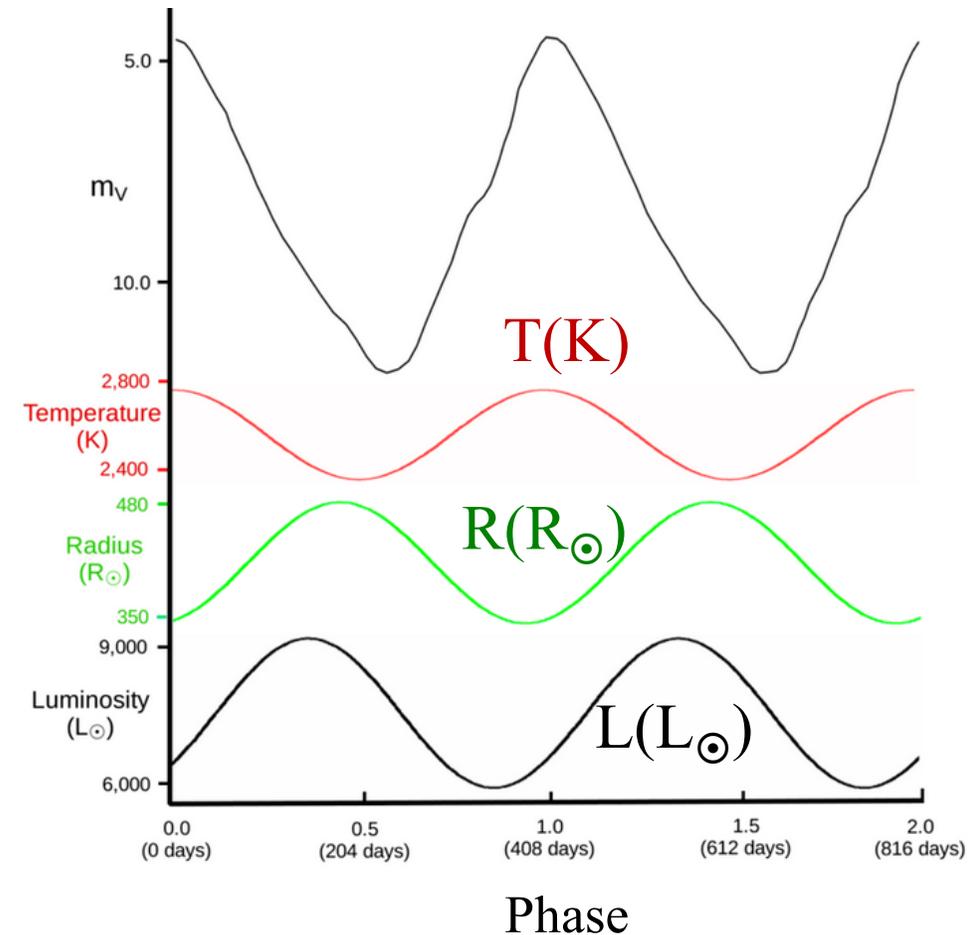
# Pourquoi si instable?

Etoile Mira connue depuis  
Fabricius en 1596  
Période de 332 jours



Au sortir de la séquence principale, étoile en expansion  
brûle  $H \rightarrow He$  en coquille, cœur se contracte,  
dégénéré pour  $M < 2M_{\odot}$ , chauffe surtout les ions  
 $T$  croît, sort de la dégénérescence, He flash, les étoiles  
commencent à fusionner le cœur d'hélium en C, O

Les réactions de fusion de He dépendent de  
la température comme  $T^{40}$   
Un petit  $\delta T$  suffit à l'expansion de l'étoile  
Qui refroidit  $\rightarrow$  et se contracte  
Rapides oscillations, grande instabilité  
qui explose l'enveloppe, peu liée



# Spectre des nébuleuses planétaires (NP)

**Raies d'émission du gaz ionisé**

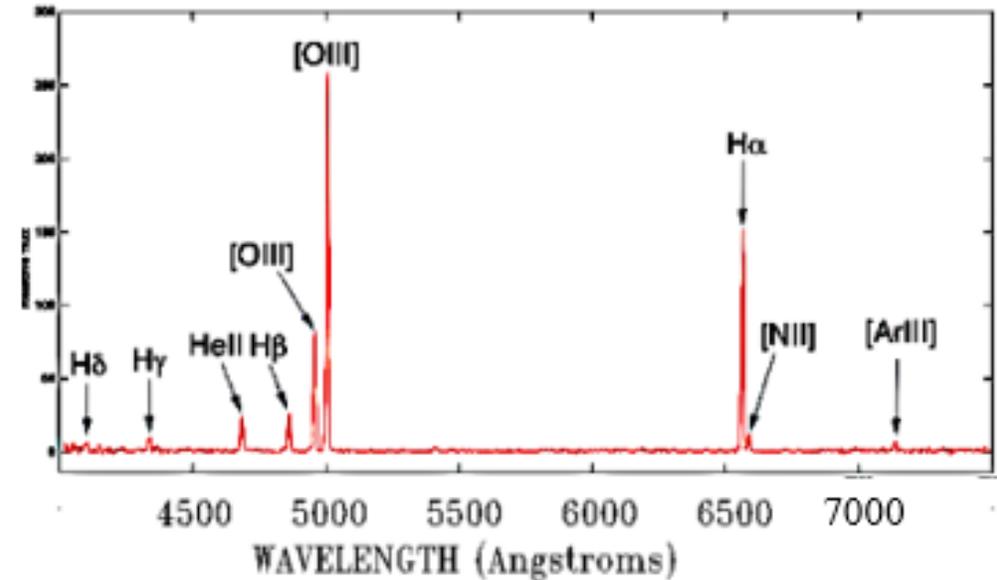
**La plus intense est [OIII] de l' $O^{2+}$  à 5007 Å**

C'est une raie « interdite »: non observée sur Terre  
Caractéristique des gaz raréfiés

La probabilité d'émission spontanée est faible, et les ions se désexcitent sur Terre par collisions

Cette raie permet d'observer les NP dans les galaxies

[OIII] et absence de continuum → détection automatique

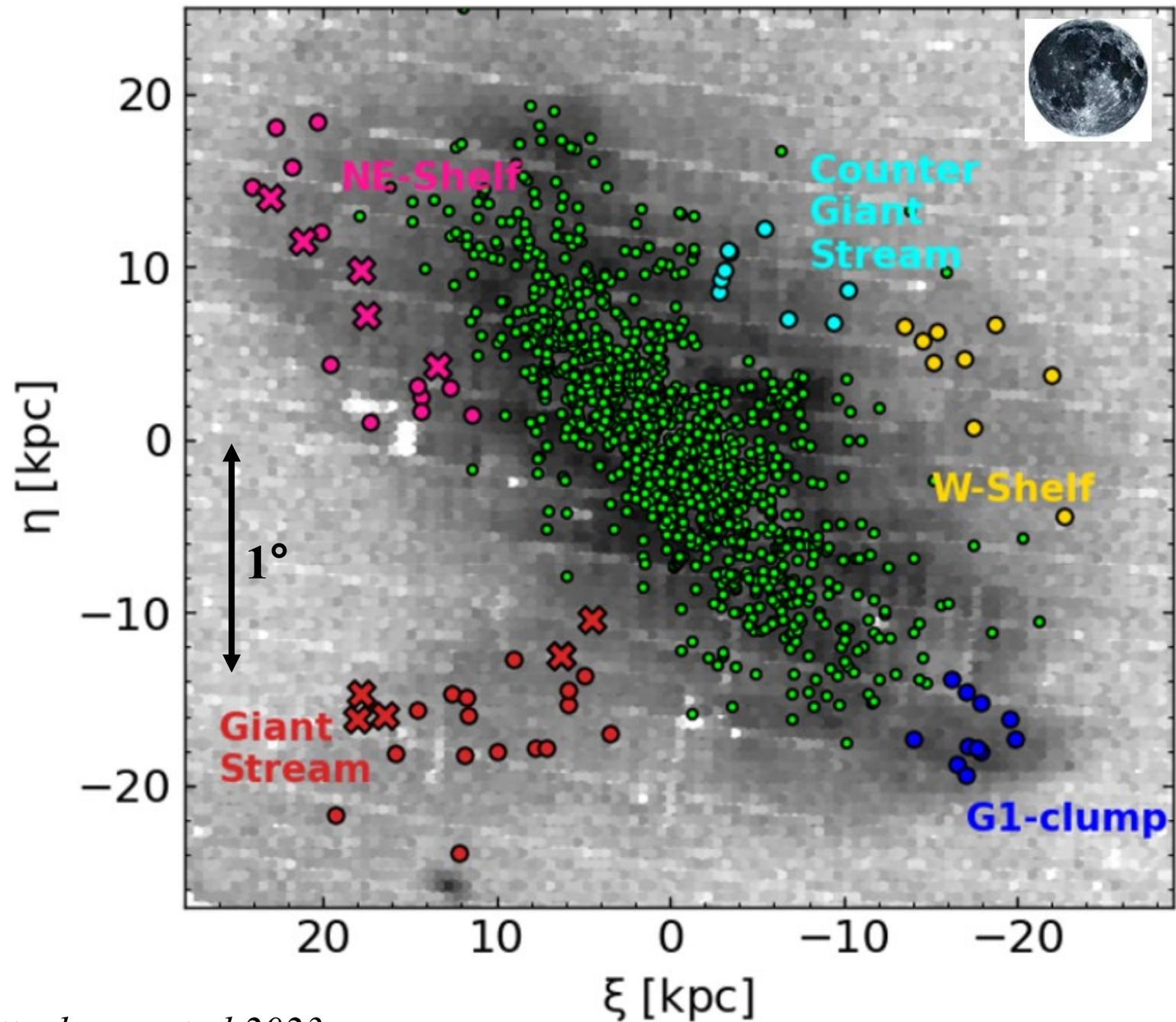
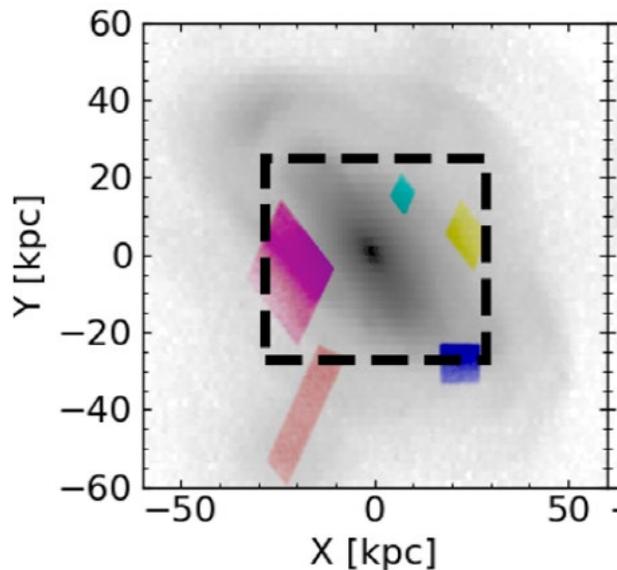


# NP dans M31

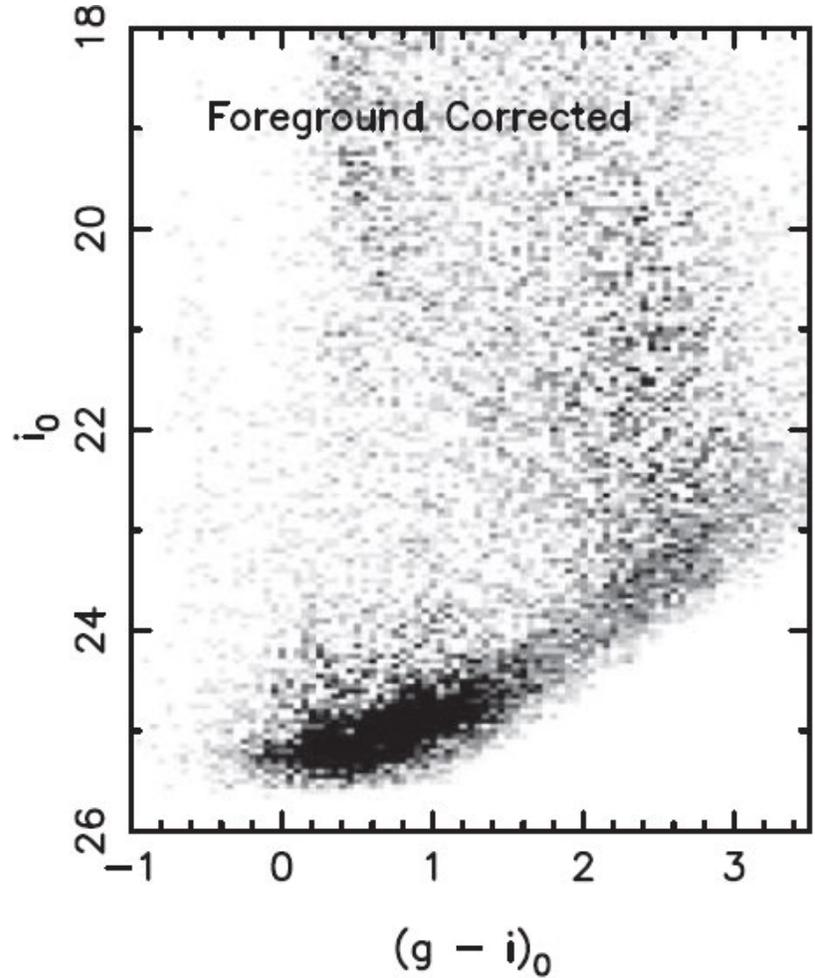
NP du centre de M31 en vert

Les NP des courants de marée sont en différentes couleurs

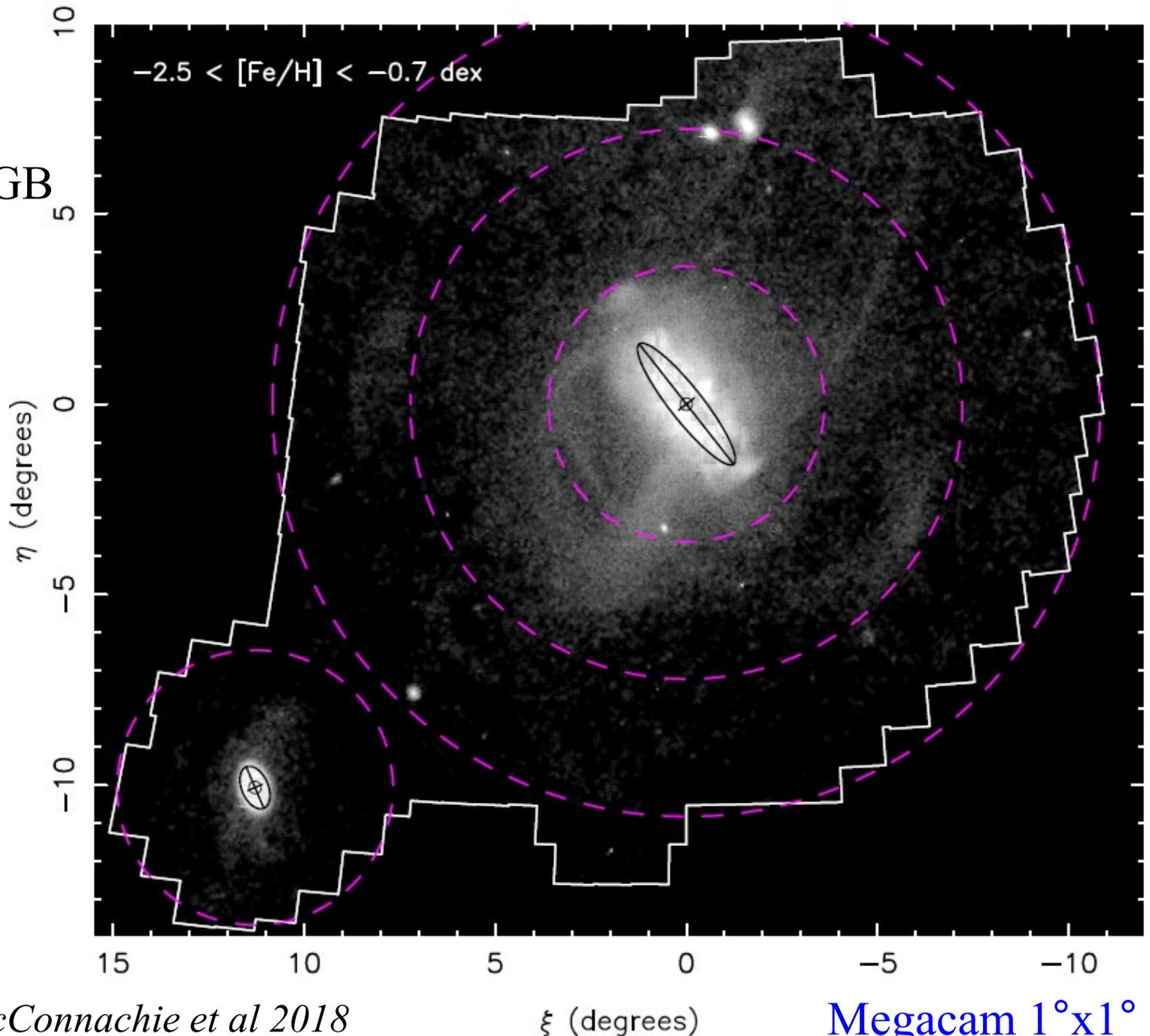
Vitesses correspondent à une fusion il y a 3 Gyr (1:4)



Identification des étoiles individuelles  
→ suppression de la contamination  
Etoiles: branche des géantes rouges RGB



McConnachie et al 2018



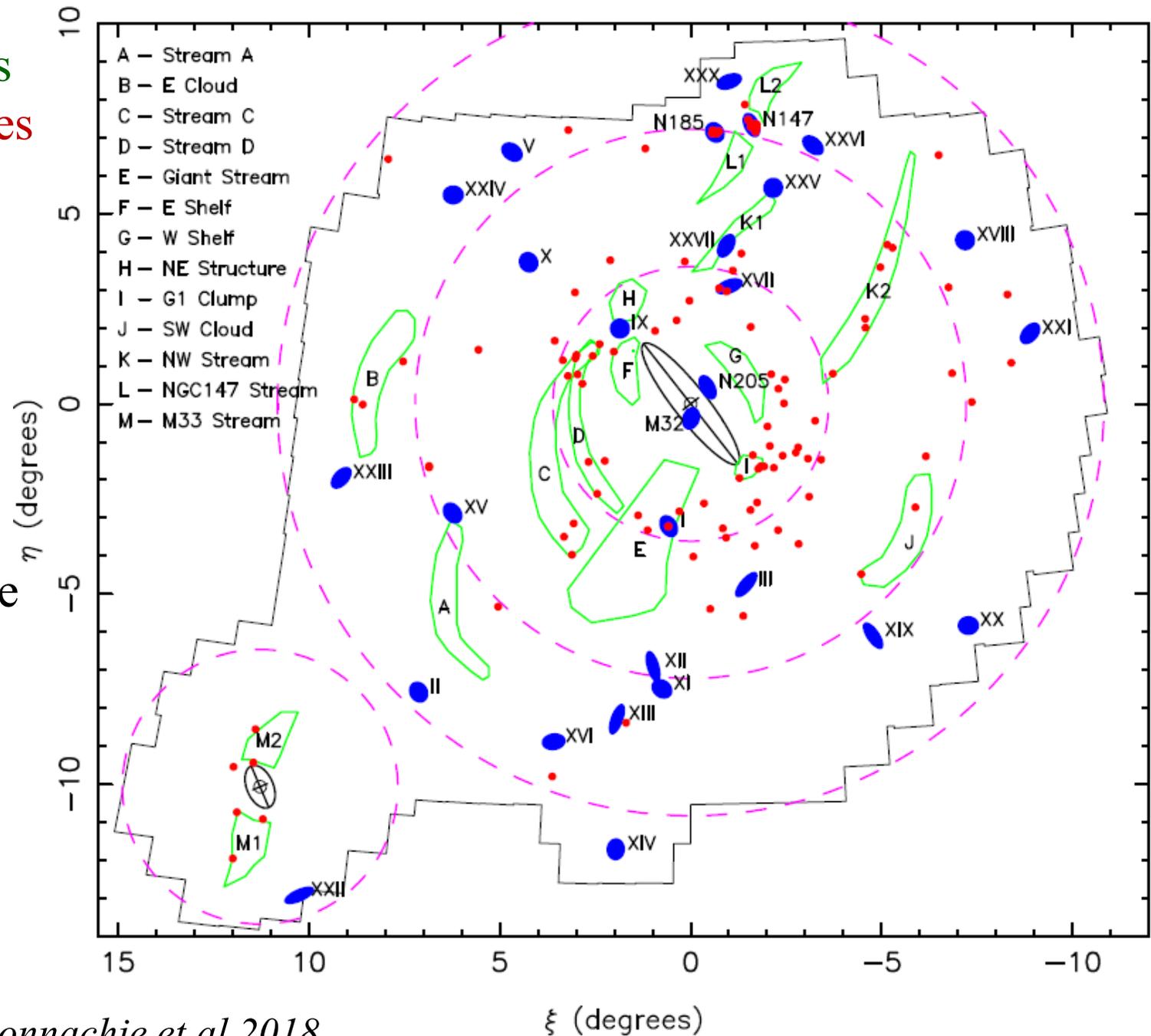
Megacam 1°x1°

Identification de 13 courants stellaires  
Et 32 galaxies naines, amas globulaires

Ces structures sont dues à au moins  
5 événements de fusion  
Le principal avec M33, le GS, et  
peut-être les coquilles lointaines

Certains de ces événements à l'origine  
de l'anneau de formation d'étoiles  
R= 10kpc de M31

Plan assez fin de satellites?



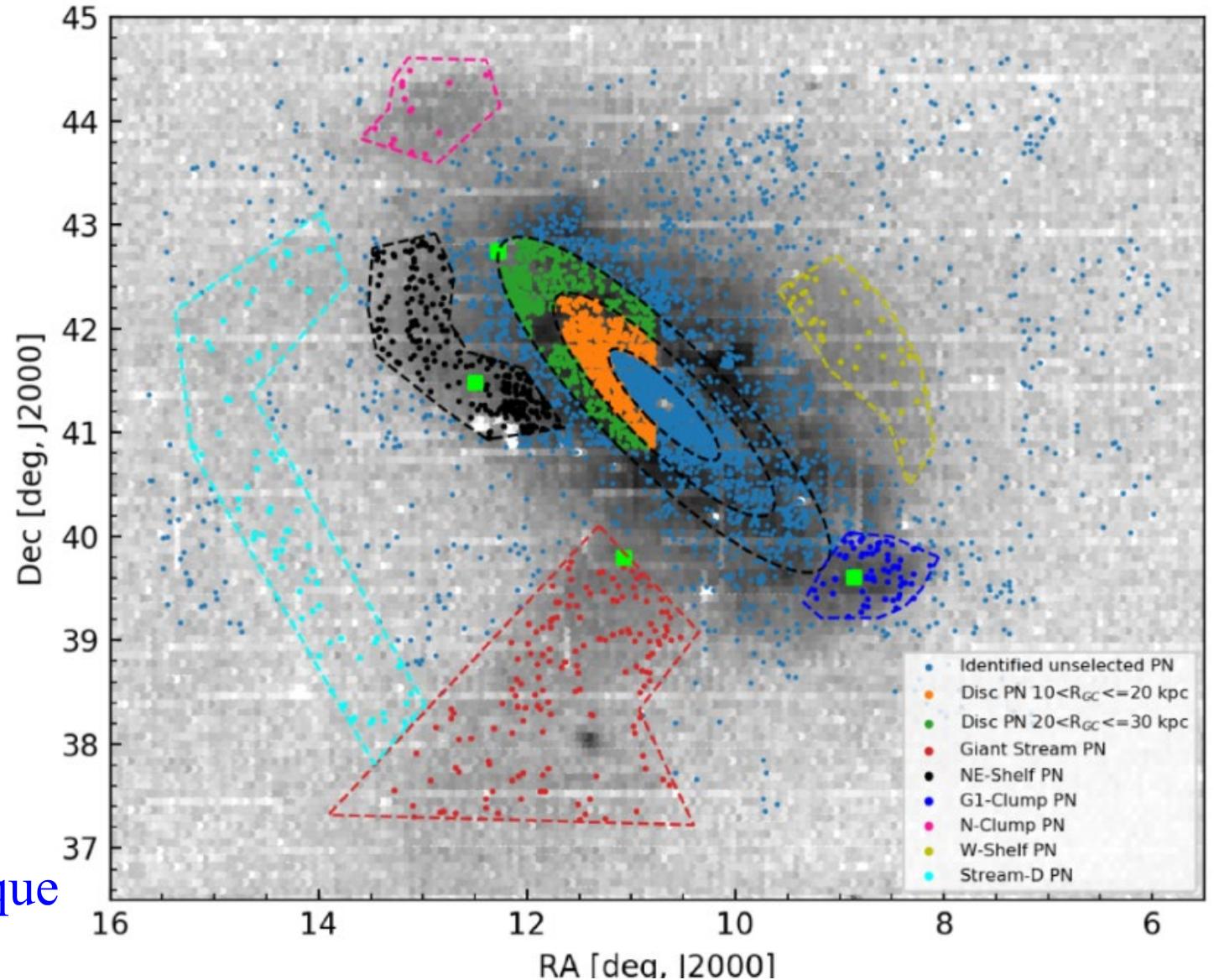
# NP dans M31

Les NP donnent aussi l'âge et la métallicité des populations stellaires

Selon les masses de coupure du spectre de masse

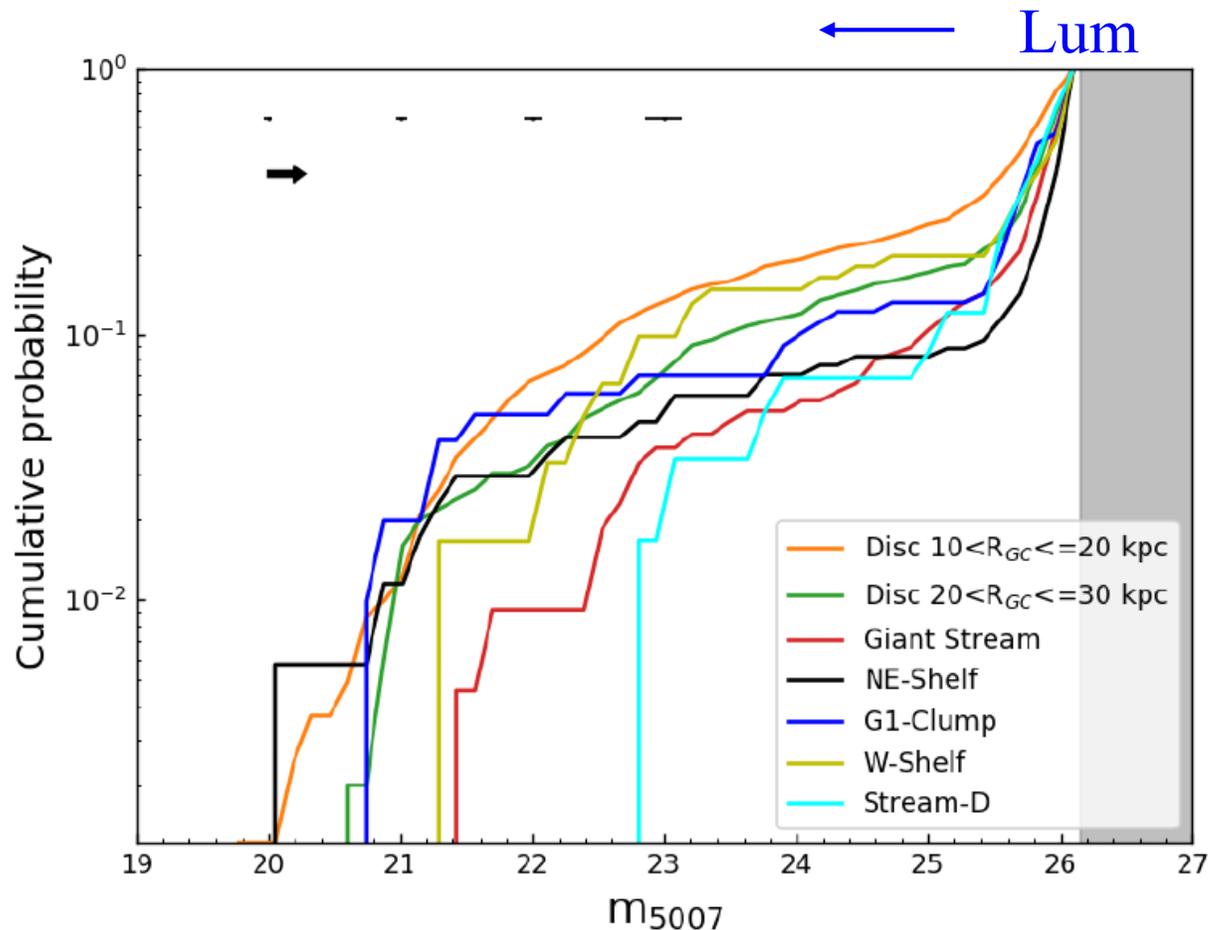
Mise en évidence dans le disque en fonction du rayon  
Dans les divers courants de marée

Les NP les plus jeunes sont dans le disque puis dans le halo

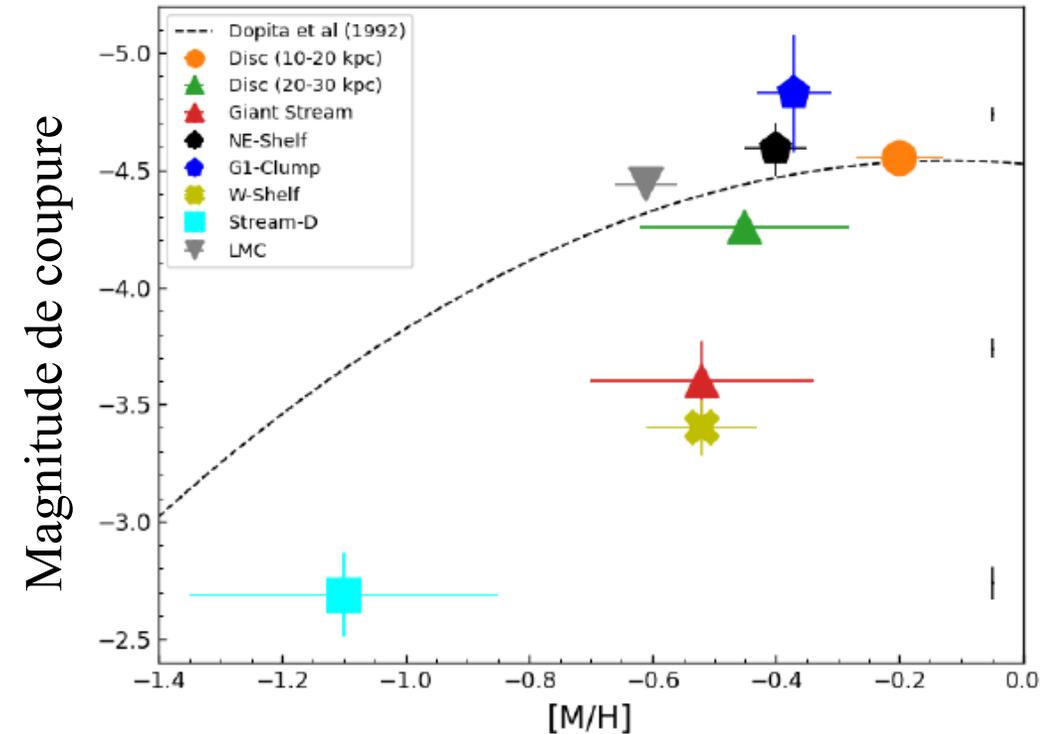


# Populations stellaires et fusions

Les populations plus jeunes ont une coupure permettant de plus fortes luminosités



→ Compatible avec une fusion majeure, il y a 2-3 Gyr

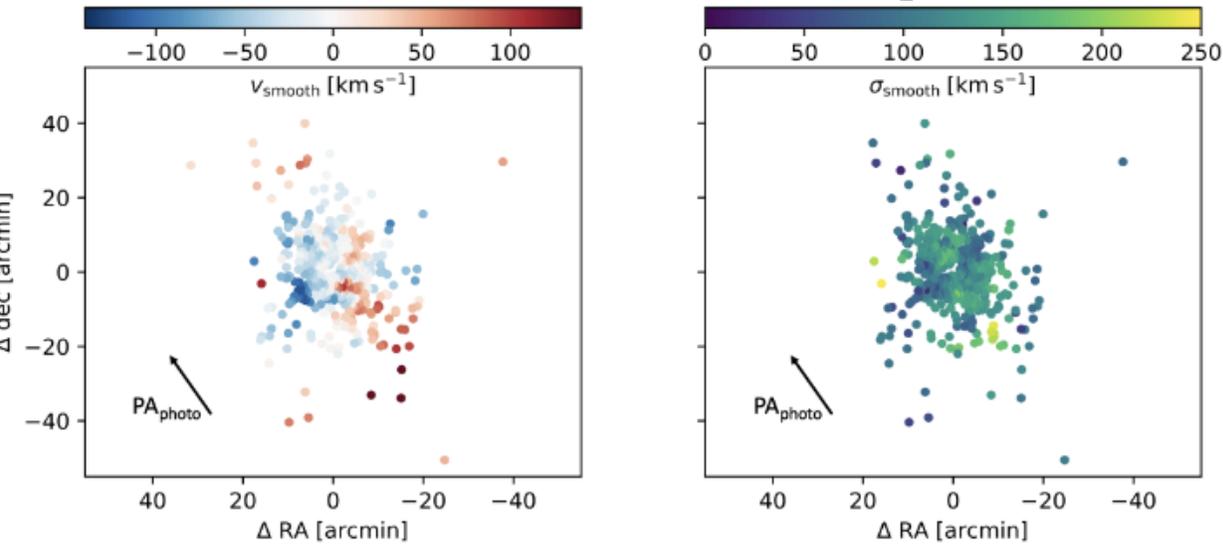


Le courant D est peu métallique, et d'ancienne population stellaire  
→ Provient d'une autre fusion de galaxies

# NP et Amas globulaires dans CenA (NGC 5128)

Amas globulaires

Dispersion

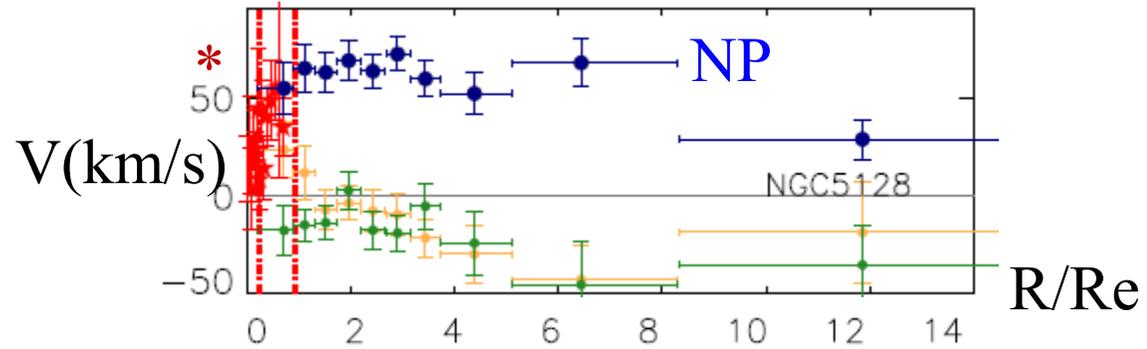


NGC 5128



Aplatissement du halo  $q=1.3$

Prolate (citron)



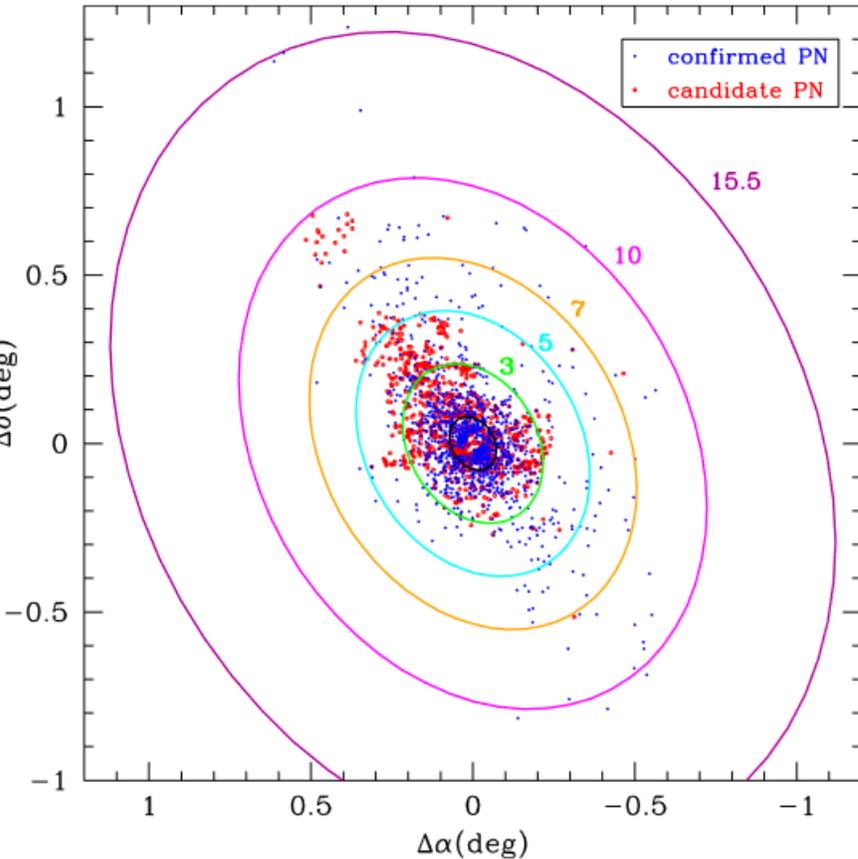
c3 s3

*Pulsoni et al 2018, Versic et al 2023*

# Nébuleuses planétaires dans CenA (NGC 5128)

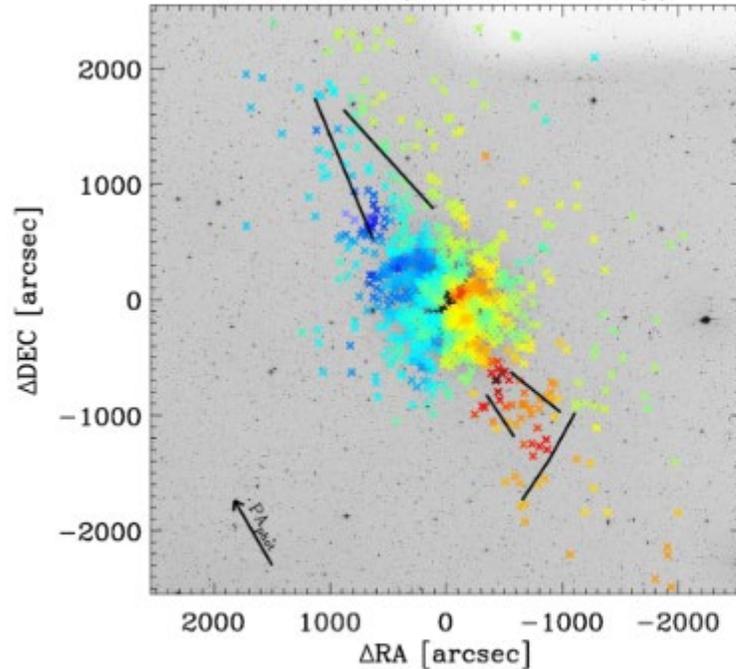


NGC 5128

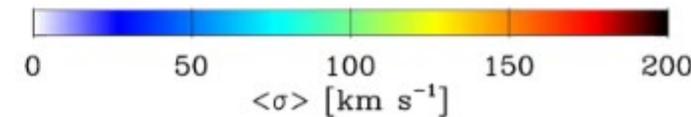
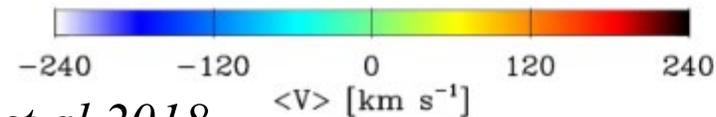
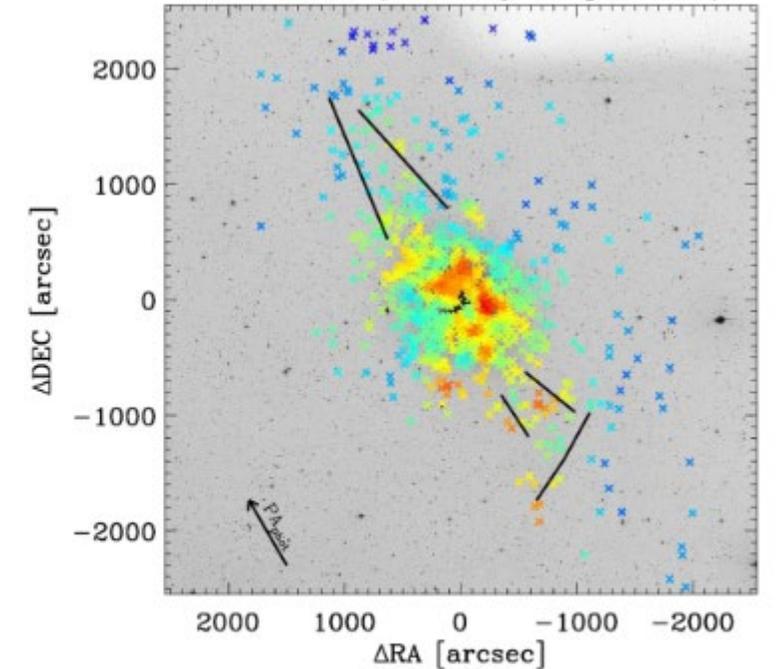


1267 confirmées par spectro  
+ 1118 candidates

NGC 5128 (radial velocity)



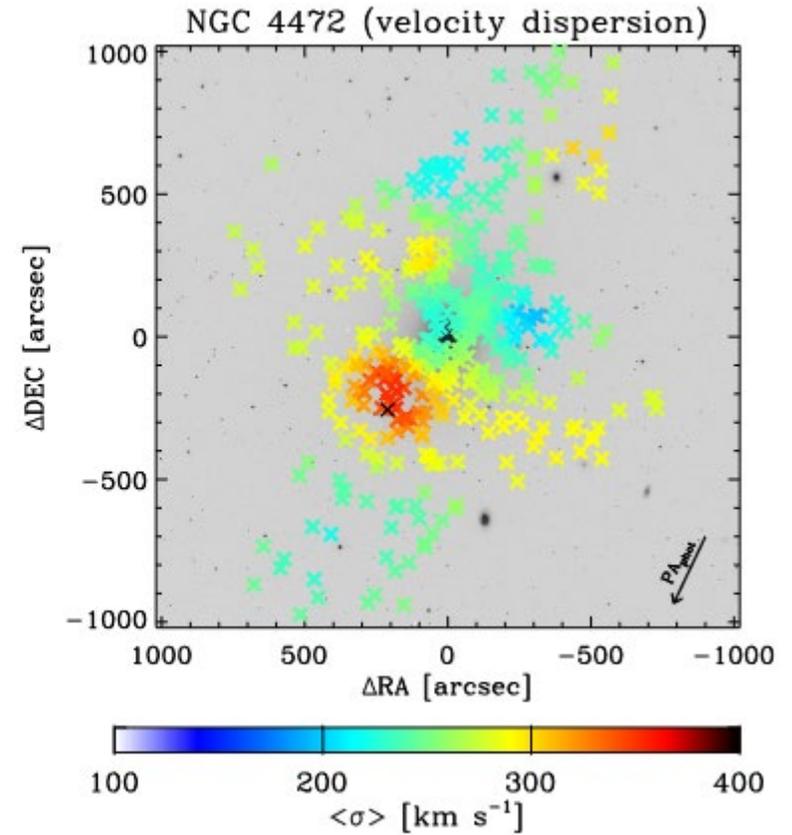
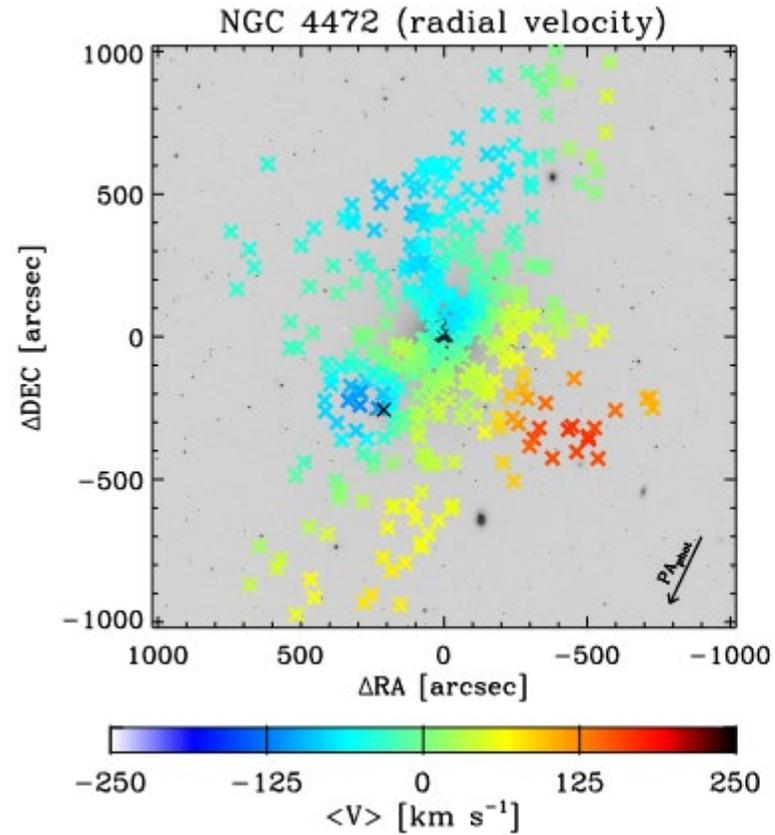
NGC 5128 (velocity dispersion)



*Walsh et al 2015, Pulsoni et al 2018*

# Nébuleuses planétaires dans les galaxies elliptiques

NGC 4472



Traceurs de la masse totale  
Distribution de matière noire

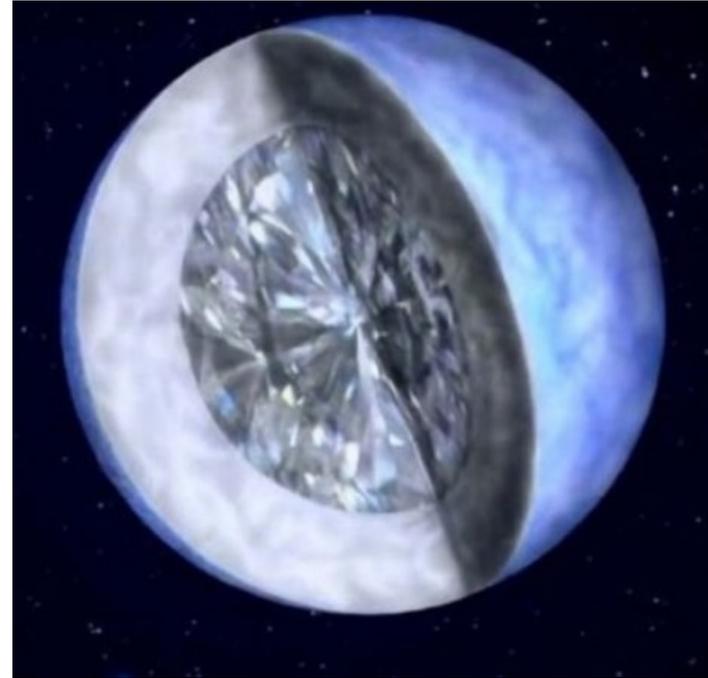
# Résumé

## 1- Naines blanches

Plusieurs sortes: DA ou non-DA selon la masse et présence H (DA), réduction drastique de H He en surface → non-DA

Evolution ultérieure, selon accrétion et épisode convectif, ramène des éléments à la surface → rallumage

Cristallisation, champ magnétique



## 2- Nébuleuses planétaires

Morphologies multiples, tailles, couleurs, selon binarité, et variabilité durant l'étape géante rouge  
NP comme traceur extra-galactique

Témoins des fusions, interactions, matière noire

