

Evolution Stellaire: Naissance, Vie, et Mort des étoiles

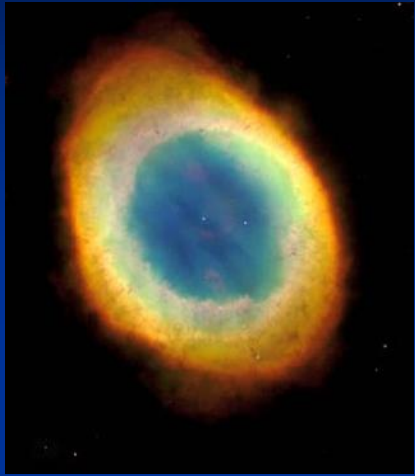
John R. Percy

Union Astronomique Internationale
Université de Toronto, Canada



Evolution des étoiles

- Lorsque nous parlons d'évolution stellaire, nous intéressons aux changements qui se produisent dans les étoiles. Elles consomment du «carburant», depuis leur naissance, durant leur longue vie, et jusqu'à leur mort.
- Comprendre l'évolution des étoiles aide les astronomes à savoir :
 - La nature et le destin futur de notre Soleil.
 - L'origine de notre système solaire.
 - Comparer notre système solaire avec d'autres systèmes planétaires
 - Si la vie existe ailleurs dans l'univers

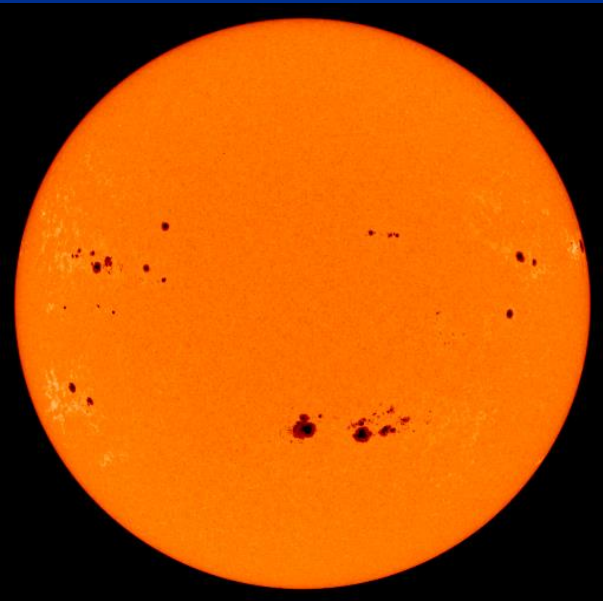


La nébuleuse de l'anneau,
une étoile mourante.

Source: NASA



Propriétés du Soleil : La plus proche étoile et comment les astronomes les mesurent – important!



- Distance: $1,5 \times 10^{11}$ m, réflexion des ondes radar de Mercure et Vénus
- Masse: 2×10^{30} kg, mesure du mouvement des planètes qui tournent autour du Soleil
- Diamètre: $1,4 \times 10^9$ m, diamètre apparent (angle) du Soleil et de sa distance
- Puissance: 4×10^{26} W, la distance et de la puissance mesurée de la Terre
- Composition chimique: 98% d'hydrogène et d'hélium, et

Le Soleil.

Source: NASA SOHO Satellite



Propriétés du Soleil : La plus proche étoile et comment les astronomes les mesures – important!

- **Distance:** de la parallaxe, ou de la luminosité apparente si la puissance est connue.
- **Puissance:** de la distance et de la luminosité apparente
- **Température de surface:** De la couleur ou du spectre
- **Radio:** De la température de puissance et de surface
- **Masse:** Utilisation des observations d'étoiles binaires
- **Composition chimique:** à partir de spectres stellaires

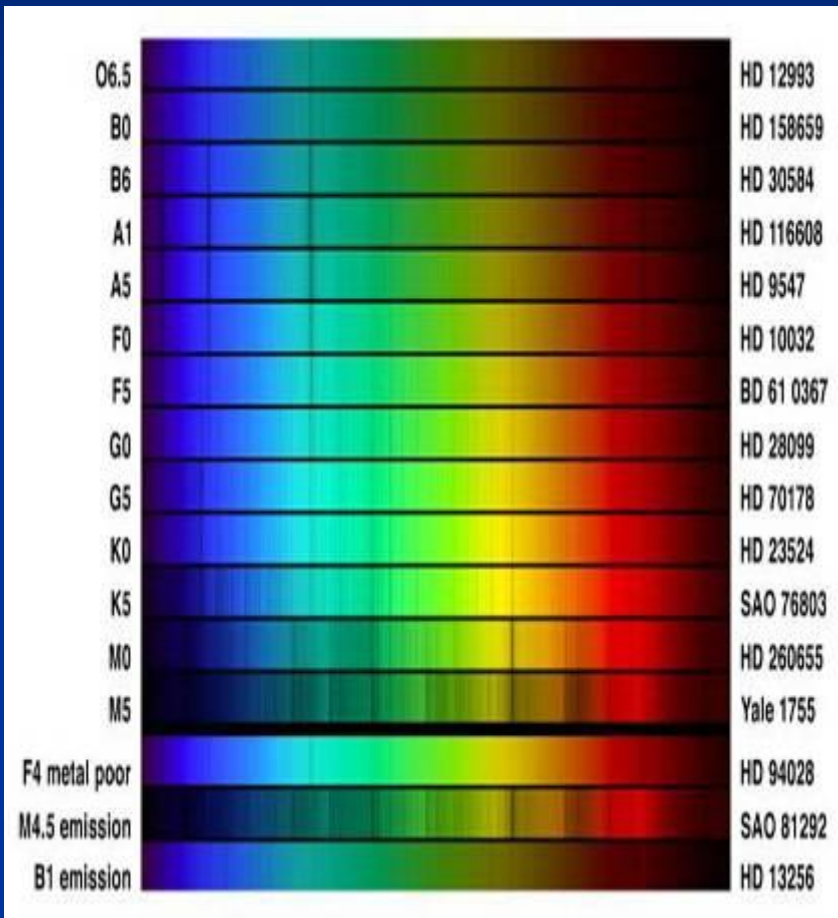


Constellation d'Orion
Source: Hubble, ESA, Akira Fujii



Le Spectre des étoiles :

lumière des étoiles, décomposée en couleurs



- Les astronomes apprennent des sources astronomiques en étudiant la lumière qu'ils émettent
- Le spectre fournit des informations sur la composition, la température et les autres propriétés des étoiles

À gauche: les 13 premiers spectres d'étoiles avec des températures de surface différentes (le plus haut en haut). Les trois derniers spectres ont été pris à partir d'étoiles particulières

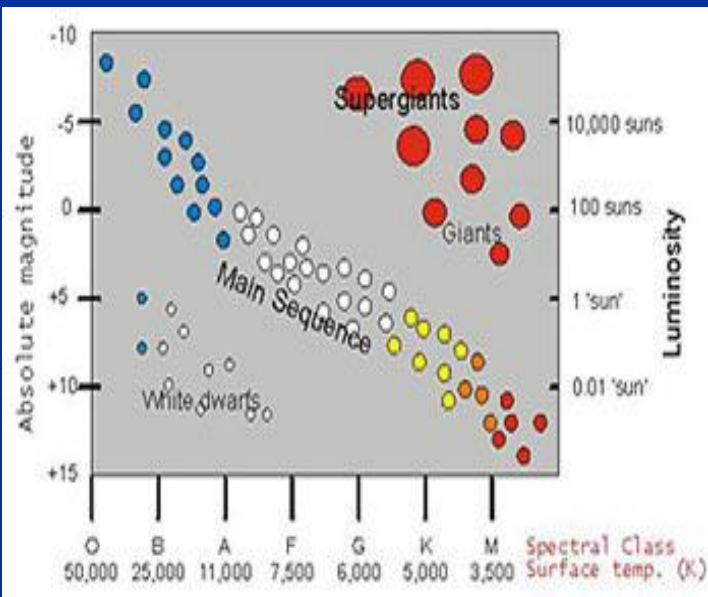


Le diagramme Hertzsprung-Russell

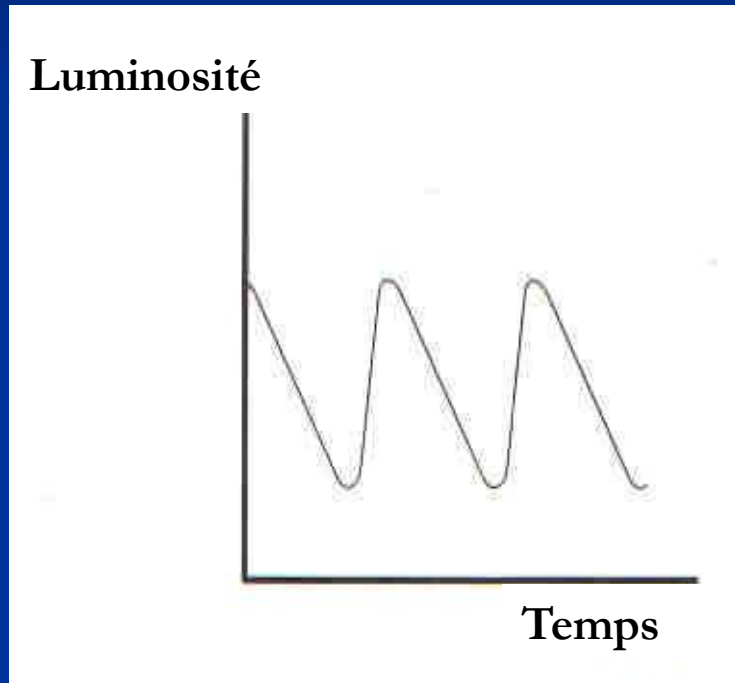
Il y'a un ordre dans les propriétés des étoiles!

- Le diagramme d'Hertzsprung-Russell (HR), Montre la puissance (luminosité) en fonction de la température (classe spectrale); L'ordonnée «grandeur absolue» est une mesure logarithmique de la puissance.

- La plupart des étoiles se trouvent sur la «séquence principale»: les étoiles massives sont chaudes et ont une puissance élevée (en haut à gauche), tandis que les petites étoiles ont des masses inférieures, sont froides et ont une faible puissance (en bas à droite)
- Les étoiles géantes se trouvent sur la partie supérieure droite du diagramme, tandis que les naines blanches se trouvent en bas à gauche



Etoiles Variables

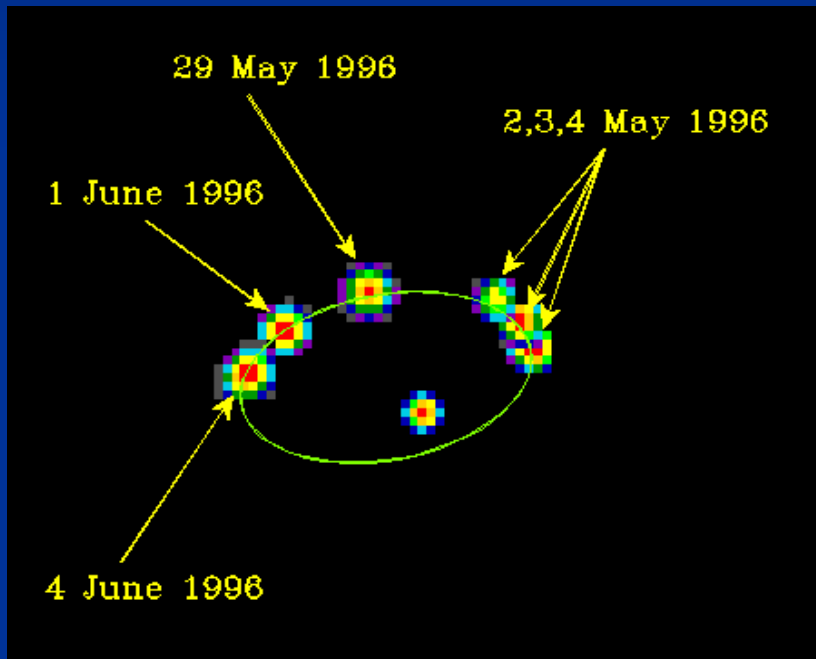


Courbe de lumière:
évolution de la luminosité en fct du temps.

- Les étoiles variables sont des étoiles dont la luminosité change avec le temps
- La plupart des étoiles sont variables car elles vibrent, brillent, éclatent ou explosent, ou sont éclipsés par une étoile ou une planète associée
- Les étoiles variables fournissent des informations importantes sur la nature stellaire et l'évolution

Etoile binaire (double) et multiple

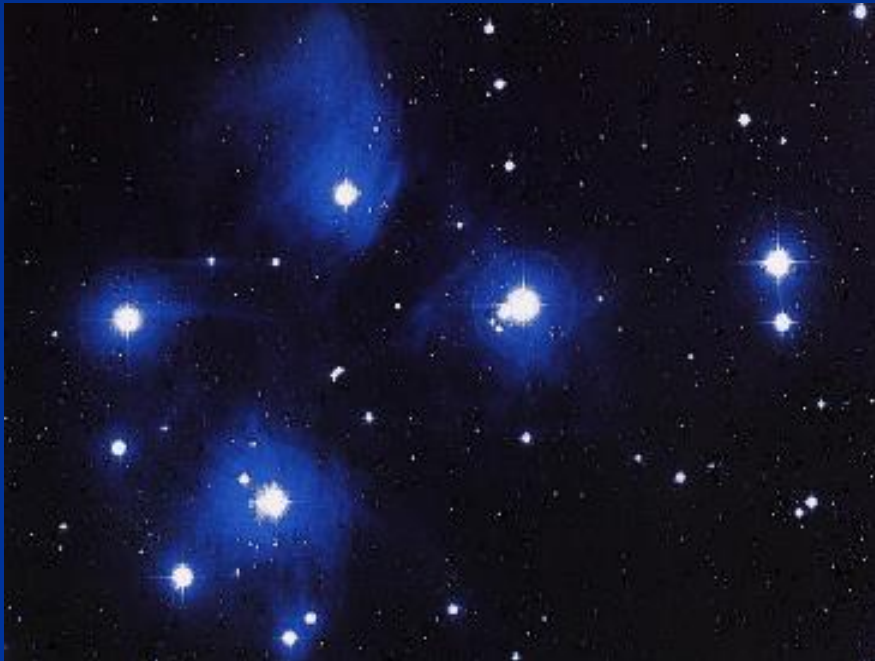
- Les étoiles doubles sont des paires d'étoiles qui sont proches les unes des autres en raison de la gravité et orbitent autour d'elles-mêmes. Elles peuvent être visibles directement (comme sur l'image de gauche), ou détectés par leurs spectres, ou une éclipse entre les étoiles.
- Elles sont l'outil le plus important pour mesurer les masses d'étoiles
- Les étoiles multiples sont trois étoiles ou plus qui sont liées ensemble par la gravité



Mouvement orbital de Mizar, dans le grand Ours.
Source: NPOI Group, USNO, NRL

Amas d'étoiles

"Expériences de la nature"



Les Pleiades : Amas ouvert.
Source: Observatoire du Mount Wilson

- Les amas d'étoiles sont des groupes d'étoiles proches les unes des autres en raison de la gravité. Elles se déplacent ensemble à travers l'espace
- Ils ont été formés au même temps et au même endroit, avec le même matériau, et sont à la même distance, ils ne diffèrent que par la masse
- Les amas sont des échantillons d'étoiles avec des masses différentes mais avec le même âge



De quoi sont-ils composés le Soleil et les étoiles ?



Abondance d'éléments chimiques dans le Cosmos: graines H (90%), riz He (8%), haricots C, N, O et d'autres éléments (2%).

- En utilisant la spectroscopie et d'autres techniques, les astronomes peuvent identifier les «matières premières» qui constituent les étoiles
- L'hydrogène (H) et l'hélium (He) sont les éléments les plus abondants, et ont été formés avec la formation de l'univers
- Les éléments les plus lourds sont des millions ou des milliards de fois moins abondants. Ils ont été formés à l'intérieur des étoiles par des réactions thermonucléaires

1 H																	2 He				
3 Li	4 Be															5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg															13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr				
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe				
55 Cs	56 Ba			72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn			
87 Fr	88 Ra			104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 UUp	116 Lv	117 Uus	118 Uuo			
		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu					
		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr					



Elements created at the Big Bang



Elements produced by nucleosynthesis, in the core of the stars



Elements produced by supernovas



Les lois de la structure des étoiles

- À l'intérieur d'une étoile, en pénétrant, la pression augmente en raison du poids des couches supérieures.
- Selon les lois des gaz, la température et la densité augmentent à mesure que la pression augmente.
- L'énergie va circuler de la partie intérieure plus chaude à la partie extérieure plus froide par rayonnement et convection.
- Si l'énergie sort de l'étoile, l'étoile se refroidira, à moins que de l'énergie soit créée à l'intérieur.
- *Les étoiles sont gouvernées par ces lois simples et universelles de la physique*



Exemple: Pourquoi le Soleil ne s'effondre pas ou se contracte ?



- Gonfler un ballon (illustration à gauche)
- La pression atmosphérique va "pousser" le ballon vers l'intérieur. Il ne se rétrécit pas parce que la pression du gaz «pousse» le ballon vers l'extérieur.
- À l'intérieur du Soleil, la gravité, poussant la matière vers l'intérieur, est équilibrée par la pression du gaz.

La source d'énergie du Soleil et des étoiles

- Combustion chimique de gaz, d'huile ou de carbone? Ce processus est si inefficace que l'énergie apportée au soleil pour seulement quelques milliers d'années
- Contraction gravitationnelle lente? Cela pourrait apporter de l'énergie au Soleil pendant des millions d'années, mais le Soleil a des milliards d'années
- Radioactivité (fission nucléaire)? Les isotopes radioactifs sont presque inexistants à l'intérieur du Soleil et les étoiles
- Fusion nucléaire d'éléments légers en éléments plus lourds?

Oui! C'est un procédé très efficace, et des éléments légers comme l'hydrogène et l'hélium représentent 98% du Soleil et des étoiles



Chaîne Proton-Proton

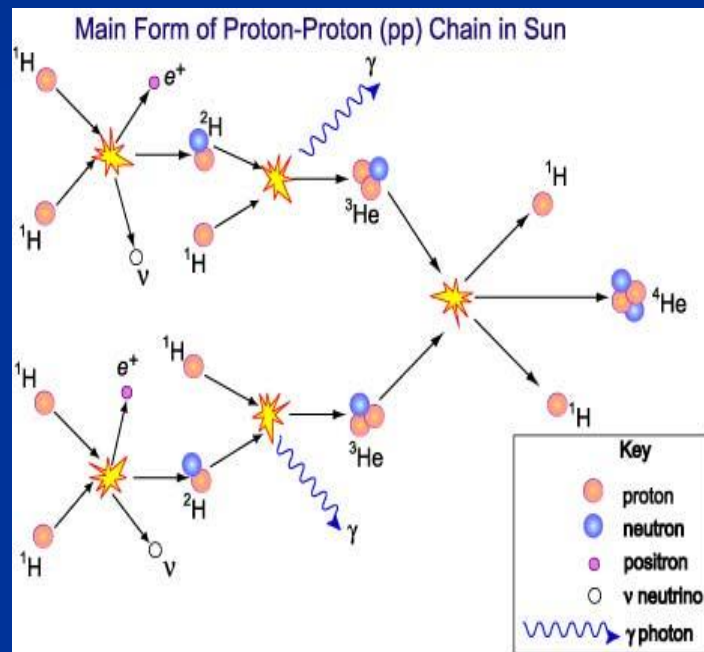
est le principal processus de la fusion dans le Soleil

- À des températures et des densités élevées dans des étoiles, comme notre Soleil, les protons (en rouge) surmontent la répulsion électrostatique entre eux et forment ^2H (deutérium) et neutrino (ν)

Plus tard, un autre proton est couplé avec du deuterium pour former ^3He

Plus tard, les noyaux de ^3He est couplé les uns aux autres pour former un noyau de ^4He , libérant deux protons.

- Résultat: 4 protons ensemble pour former de l'hélium et de l'énergie (rayons gamma et énergie cinétique)



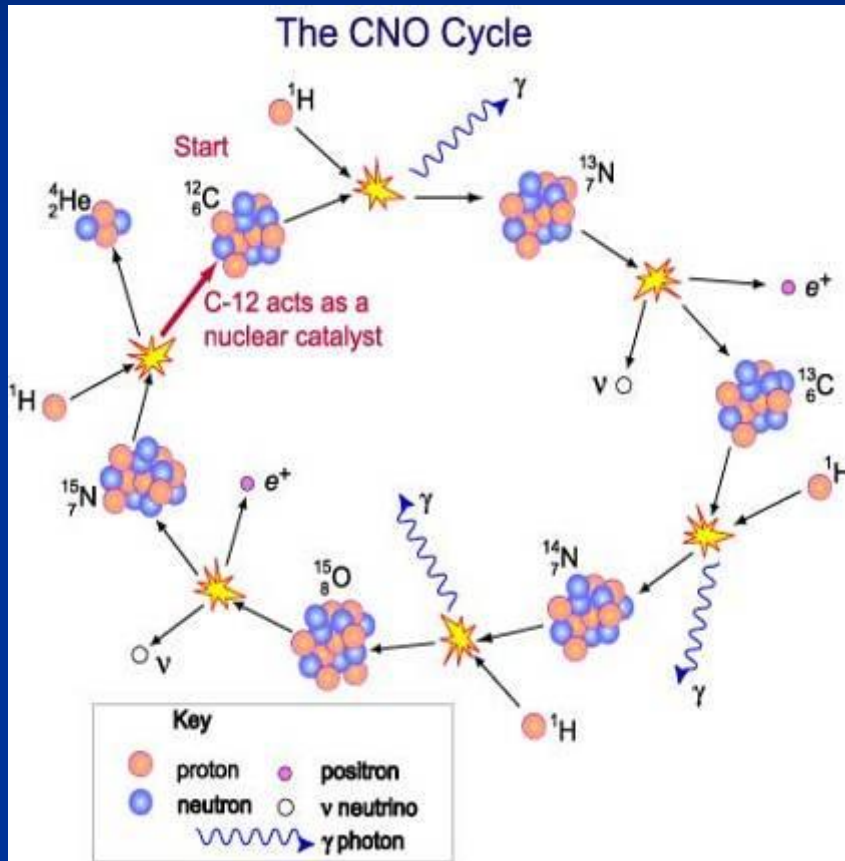
Proton-proton cycle

Source:

Australia National Telescope Facility



Le cycle carbone – azote - oxygène



Cycle CNO

Source: Australia National Telescope Facility

- Dans les étoiles massives, avec un noyau très chaud, les protons (rouge) peuvent entrer en collision avec un noyau ^{12}C (carbone) (en haut à gauche)
- Commence une séquence circulaire de réactions en fin de laquelle quatre protons se fondent pour former un noyau d'hélium (en haut à gauche)
- Un noyau ^{12}C est récupéré à nouveau à la fin du cycle, donc il n'est pas créé ni détruit. Il agit comme un catalyseur nucléaire



Création stellaire “modèles”

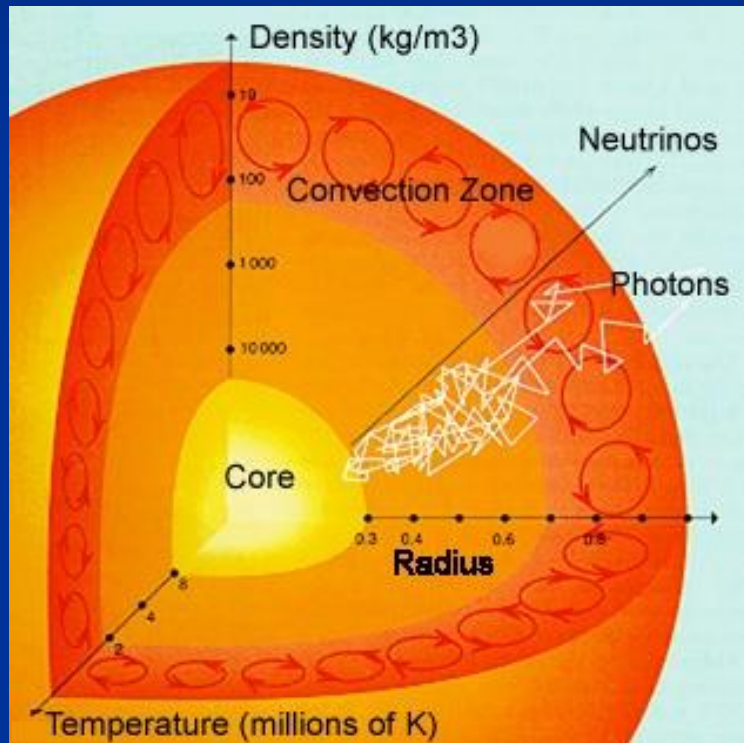
- Les lois qui décrivent la structure stellaire sont exprimées en équations et sont résolues au moyen d'un ordinateur
- L'ordinateur calcule la température, la densité, la pression et la puissance à chaque point du Soleil ou de l'étoile. C'est ce qu'on appelle un modèle
- Au centre du Soleil, la densité est 150 fois plus élevée que la densité de l'eau, et la température est $\sim 15,000,000$ K!



A l'intérieur du Soleil

Basé sur un "modèle" du Soleil fait sur ordinateur

- À l'intérieur du noyau chaud, les réactions nucléaires produisent de l'énergie en fusionnant l'hydrogène en hélium
- Dans la zone radiative, au-dessus du noyau, l'énergie s'écoule vers l'extérieur à travers le mécanisme de rayonnement
- Dans la zone convective, entre la zone radiative et la surface, l'énergie s'écoule vers l'extérieur par convection
- La photosphère, à la surface, est la couche où l'étoile devient transparente



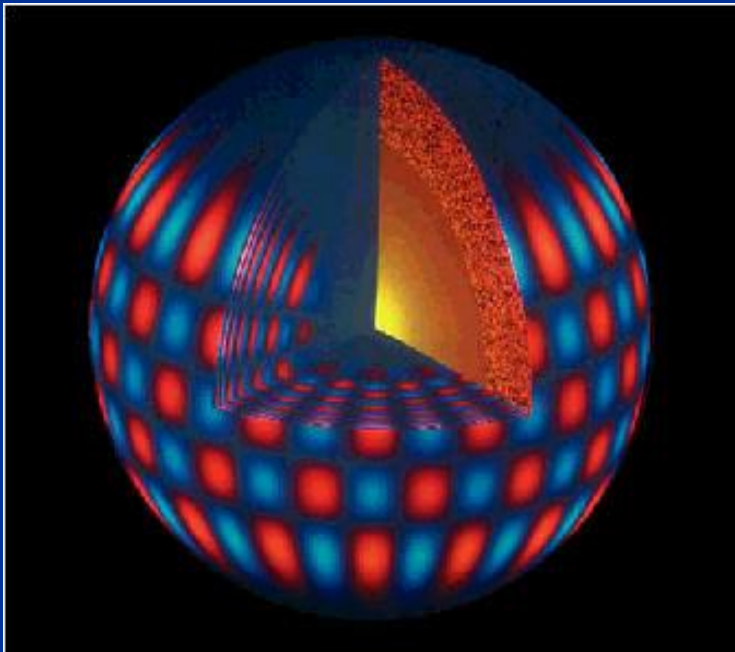
Modèle Solaire

Source: Institut de Physiques Théoriques,
Université d'Oslo



Tester le modèle héliosismologique

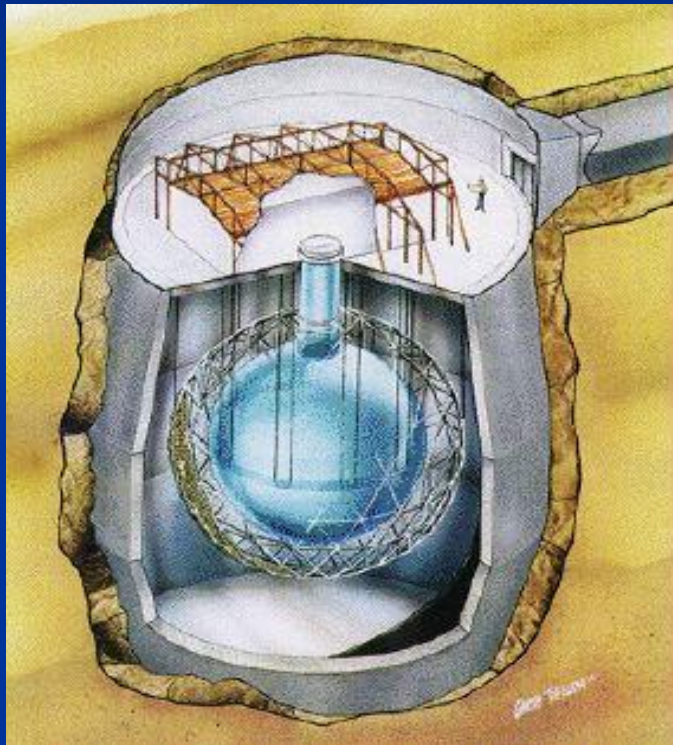
- Le Soleil vibre doucement en milliers manières (motifs). L'une d'elle est montrée dans l'image à gauche
- Ces vibrations peuvent-être observées et nous pouvons les utiliser pour déduire la structure interne du Soleil, testant ainsi les modèles existants de la structure du Soleil. Ce processus est connu sous le nom d'héliosismologie
- Des vibrations similaires peuvent être observées dans d'autres étoiles: astrosismologie



Conception artistique de la vibration solaire.
Source: US National Optical Astronomy
Observatory



Tester le modèle neutrinosolaire



- Les réactions de fusion nucléaire produisent des particules élémentaires appelées neutrinos.
- Ils ont une masse très faible, et interagissent rarement avec la matière.
- Leur masse a été détectée et mesurée grâce à des observatoires spéciales, comme l'Observatoire Neutrino de Sudbury (à gauche). Les résultats sont cohérents avec les prédictions obtenues dans les modèles

Neutrino Observatoire, Sudbury
Source: Neutrino Observatoire, Sudbury



Durée de vie stellaire

- La durée de vie d'une étoile dépend de la quantité de combustible nucléaire (hydrogène) qu'elle possède et de la rapidité avec laquelle elle le consomme (puissance)
- Les étoiles moins massives que notre Soleil sont les plus courantes. Elles ont moins de carburant, mais des puissances beaucoup plus petites, donc elles ont des vies plus longues
- Les étoiles plus massives que le Soleil sont moins fréquentes. Elles ont plus de carburant, mais des puissances beaucoup plus élevées, donc ont une vie plus courte



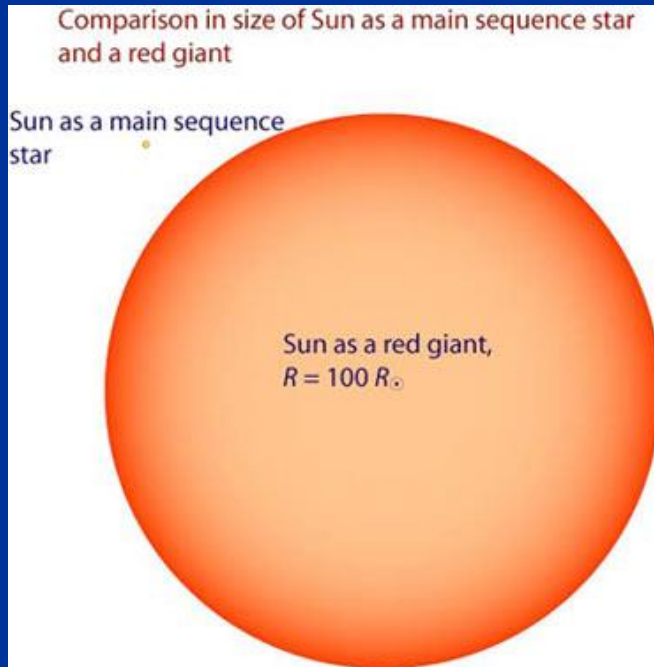
Comment les astronautes étudient-ils l'évolution stellaire?

- En observant les étoiles à différents stades de leur vie, et en les mettant dans une séquence d'évolution logique.
- Réaliser des modèles sur ordinateur, en utilisant les lois de la physique, puis prévoir les changements dans la composition des étoiles à cause de la fusion nucléaire.
- Étudier des amas stellaires et/ou des groupes d'étoiles avec des masses différentes, mais avec le même âge.
- Étudier les phases rapides et étranges dans les vies stellaires (par exemple, les supernovas et les novas).
- A travers l'étude des étoiles pulsantes variables, en mesurant les changements lents de la période de pulsation causés par leur évolution.



Evolution d'étoiles semblables au Soleil

- L'étoile semblable au Soleil ne change pas beaucoup pendant les premiers $\sim 90\%$ de sa vie, tant qu'elle a assez de carburant (hydrogène) pour continuer ses réactions thermonucléaires. Nous l'appelons une étoile de séquence principale.



- Quand son hydrogène se épuise, elle se dilate en une étoile géante rouge.
- À l'intérieur du noyau, les températures peuvent augmenter suffisamment pour commencer à produire l'énergie par la fusion de l'hélium en carbone.
- Quand l'hélium est épuisé, l'étoile se gonfle de nouveau en géante rouge encore plus grande, cent fois plus grande que le Soleil

Comparaison de taille: Soleil – Géante rouge
Source: Téléscope National d'Australie



La mort d'étoiles semblable au Soleil



Nébuleuse planétaire hélicoïdale.
Source: NASA

- Quand l'étoile devient géante rouge, elle commence à vibrer (vibrer). Nous l'appelons : Mira star.
- Sa pulsation provoque la séparation des couches externes de l'étoile, produisant une belle nébuleuse planétaire (photo à gauche)
- Le noyau de l'étoile est un nain, dense, blanc, petit, et sans carburant



Naine blanche

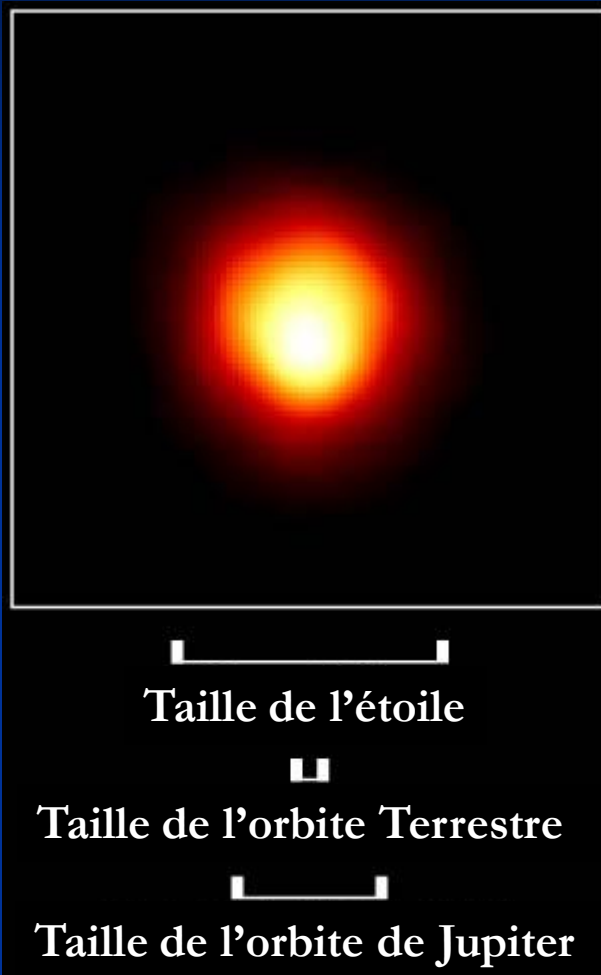


The white dwarf companion (below) of Sirius (above). Source NASA

- Une naine blanche est le noyau d'étoiles mortes.
- Une naine blanche a une masse semblable au Soleil, un volume semblable à la Terre, et une densité million de fois supérieure à celle de l'eau.
- A son intérieur, la force gravitationnelle centripète est équilibrée par la pression quantique externe des électrons dans son intérieur.
- Beaucoup d'étoiles proches, y compris Sirius (à gauche) et Procyon, ont des compagnons naines blanches.



L'évolution d'étoile géante



- Les étoiles géantes sont rares, puissantes et consomment leur carburant très rapidement - en quelques millions d'années.
- Quand elles ont dépensé leur carburant, elles gonflent et deviennent des étoiles « géantes rouges »
- Leur noyau est très chaud, assez pour produire des éléments lourds comme le fer.
- Bételgeuse (à gauche), dans la constellation d'Orion, est une géante rouge vif. Elle est beaucoup plus grande que l'orbite de la Terre

Bételgeuse.

Source: NASA/ESA/HST



La mort d'une étoile géante

- Quand le noyau d'une étoile massive devient principalement en fer, il n'a plus de combustible nucléaire pour continuer avec la fusion et ne peut plus rester chaud.
- La gravité écrase le noyau dans une étoile à neutrons, libérant d'énormes quantités d'énergie gravitationnelle, et conduisant l'étoile à une explosion d'une supernova (à gauche).
- Les supernovas produisent des éléments plus lourds que le fer et expulsent ces éléments et d'autres dans l'espace, qui deviendra en partie de nouvelles étoiles des planètes et de la vie



La nébuleuse du Crabe, le reste d'une explosion de supernova passée en 1054.
Source: NASA



Les Etoiles Neutrons



- Les noyaux stellaires avec des masses entre 1,5 et 3 fois la masse du Soleil s'effondrent et deviennent des étoiles à neutrons à la fin de la vie de l'étoile.
- Elles ont des diamètres d'environ 10 km et des densités trillions de fois plus grandes que l'eau.
- Elles sont faites de neutrons et de particules plus exotiques.
- Les jeunes étoiles neutroniques tournent rapidement et émettent des impulsions régulières sous forme de rayonnement en ondes radio, et sont connues sous le nom de pulsars.

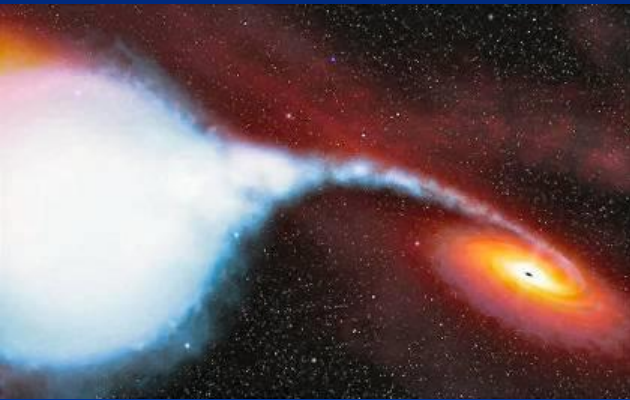
Pulsar, étoile à neutrons au cœur de la Nébuleuse du crabe.

L'énergie rotationnelle émise par une nébuleuse énergétique.

Source: NASA/ESA/HST



Trous noirs



Conception artistique de Cygnus X-1,
Une étoile visible (à gauche) avec un
trou noir (À droite) dans un centre de
disque d'accrétion.

Source: NASA.

- Un trou noir est un objet astronomique dont la gravité est si forte que rien ne peut y échapper, pas même la lumière.
- Les noyaux des étoiles massives peu communes (plus de 30 fois la masse du Soleil) deviennent des trous noirs quand leur carburant s'épuise.
- Une méthode de détection des trous noirs: lorsqu'une étoile visible est en orbite autour d'eux (à gauche).



Cas spéciaux des étoiles variables

- Beaucoup de restes stellaires - naines blanches, trous noirs ou étoiles à neutrons - ont une étoile visible normale en.
- Si le gaz de l'étoile normale se trouve dans une reste stellaire, le disque d'accrétion peut-être formé autour de celui-ci (image à gauche).
- Quand le gaz se trouve dans un reste stellaire, il peut éclater ou exploser, ce que nous appelons une étoile variable cataclysmique.



Une étoile avec une variable cataclysmique Normale (à gauche) et une étoile naine blanche Sur un disque d'accrétion (à droite).

Source: NASA



La naissance des étoiles

- Les étoiles sont formées à l'intérieur des nuages moléculaires (nébuleuses), faites de gaz froid et de poussière.
- La poussière et le gaz interstellaires représentent environ 10% de la matière dans notre galaxie.
- Les jeunes étoiles peuvent généralement être trouvées à l'intérieur ou à proximité de la nébuleuse d'où elles proviennent.
- L'exemple le plus proche et le plus clair d'une région de formation d'étoiles est la nébuleuse d'Orion (à gauche), à environ 1500 années-lumière de nous.



Nébuleuse d'Orion
Source: NASA



Gaz Interstellaire

Le gaz entre les étoiles

- Le gaz interstellaire (atomes ou molécules) peut-être activé par la lumière ultraviolette provenant d'une étoile voisine, produisant une nébuleuse d'émission (à gauche).
- Le gaz froid entre les étoiles produit des ondes radio qui peuvent être détectées par les radiotélescopes.
- 98% du gaz interstellaire est constitué d'hydrogène et d'hélium



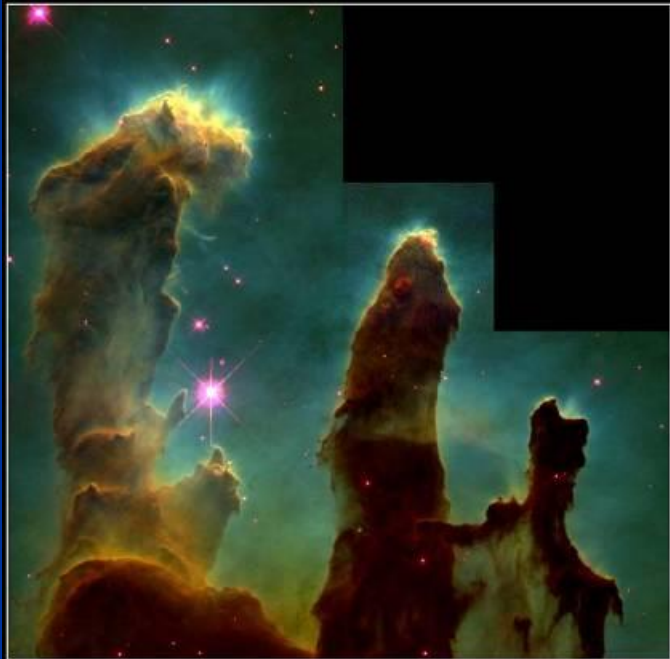
The Orion nebula. The gas is energized by ultraviolet light from the stars in the nebula.

Source: NASA



Gaz Interstellaire : Le gaz entre les étoiles

- La poussière interstellaire près des étoiles lumineuses peut-être détectée dans la partie visible des spectres
- La poussière peut bloquer la lumière des étoiles et le gaz derrière (à gauche). Les étoiles se forment dans ces nuages.
- Seulement 1% du matériau entre les étoiles est de la poussière. Les particules de poussière ont une taille de quelques centaines de nm et sont principalement des silicates ou du graphite



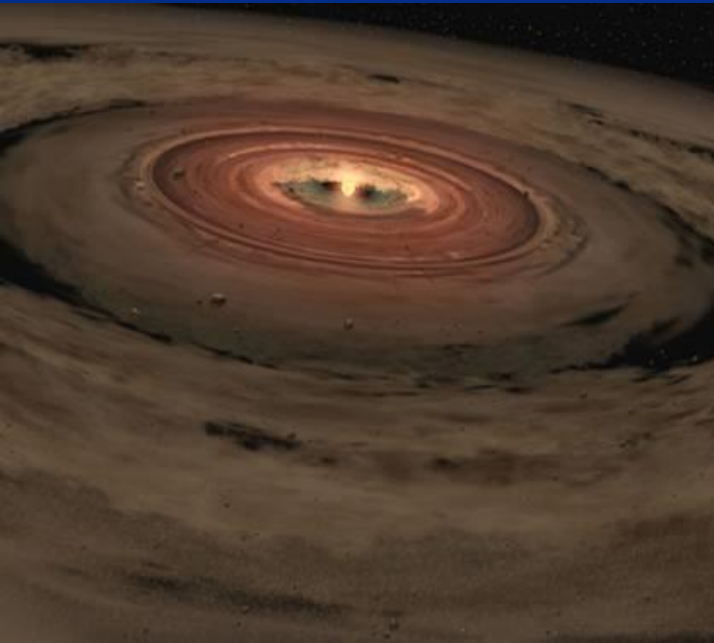
Gaseous Pillars · M16 HST · WFPC2
PRC95-44a · ST ScI OPO · November 2, 1995
J. Hester and P. Scowen (AZ State Univ.), NASA

M16

Source: NASA/ESA/HST



Formation d'étoile



- Les étoiles sont formées à l'intérieur des parties d'une nébuleuse appelée noyaux, denses ou comprimés.
- La gravité est responsable de l'attraction des noyaux.
- La conservation du moment angulaire augmente la rotation des noyaux, qui s'aplatissent et finalement se convertissent en disques.
- Les étoiles sont formées au centre des disques. Les planètes sont formées dans les parties extérieures plus froides des disques.

Conception artistique d'un système
Planétaire en formation.
Source: NASA



Les disques protoplanétaires: Proplyds

Les systèmes planétaires en cours de formation



- Des disques protoplanétaires ont été observés dans la nébuleuse d'Orion (à gauche)
- L'étoile peut difficilement être visible au centre du disque.
- Le disque de poussière a bloqué la lumière qui est derrière.
- Ces observations et d'autres fournissent une preuve directe de la formation de systèmes planétaires.

Proplyds

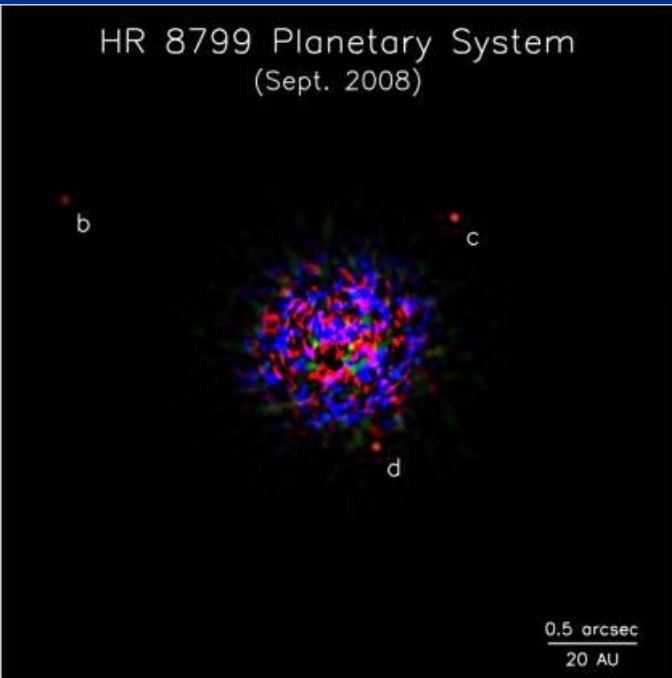
Source: NASA/ESA/HST



Exoplanètes = planets extrasolaire

Planètes autour d'autres étoiles

- Les exoplanètes sont généralement détectées et étudiées par l'effet gravitationnel qu'ils ont sur l'étoile, ou par la lumière de gradation de son étoile si le transit se produit.
- Très peu ont été capturés directement (à gauche).
- Contrairement aux planètes de notre système solaire, de nombreuses exoplanètes sont immenses et très proches de son étoile. Cela permet aux astronomes de modifier/corriger leurs théories sur la façon dont les systèmes planétaires se forment.



Exoplanète Système HR 8799
Source: C. Marois et al., NRC Canada



Considerations Finales

- “La gravité entraîne la formation, la vie et la mort des étoiles” [Professor R.L. Bishop]
- La naissance d'une étoile explique l'origine de notre système solaire et d'autres systèmes planétaires.
- La vie de l'étoile explique la source d'énergie qui rend la vie sur Terre possible.
- La vie et la mort des étoiles produisent des éléments chimiques plus lourds que l'hydrogène. C'est ainsi que les étoiles, les planètes et la vie sont faits.
- Au cours de la mort d'une étoile, la gravité produit les objets les plus étranges de l'univers: les naines blanches, les étoiles à neutrons et les trous noirs.



Merci
pour votre attention !

