

I) Le ciel et l'univers

(Hervé Cottin) – 1h30

A- L'atmosphère de la Terre

B- Le « bestiaire » de l'univers :

Etoiles, planètes, constellations, galaxies / Les échelles (UA/al/pc)

II) L'exploration du Système Solaire

(Hervé Cottin) – 4h30

A- La formation du Système Solaire

B- Les planètes telluriques

C- Les planètes géantes (gazeuses et glacées)

D- Les satellites des planètes géantes

E- Les petits corps / Les impacts

III) Lumière et observations

(Antoine Jolly) – 4h30

A- Le ciel à différentes longueur d'onde - télescope spatiaux et terrestres

B- Corps noir et spectres de raies – classification des étoiles

C- Flux, magnitude et luminosité des étoiles- diagramme de Hertzsprung-Russel

IV) Vie et mort des étoiles

(Antoine Jolly) - 4h30

A- La naissance et l'évolution des étoiles

B- L'énergie des étoiles et la nucléosynthèse

C- La mort des étoiles

V) Origine de la vie sur la Terre /

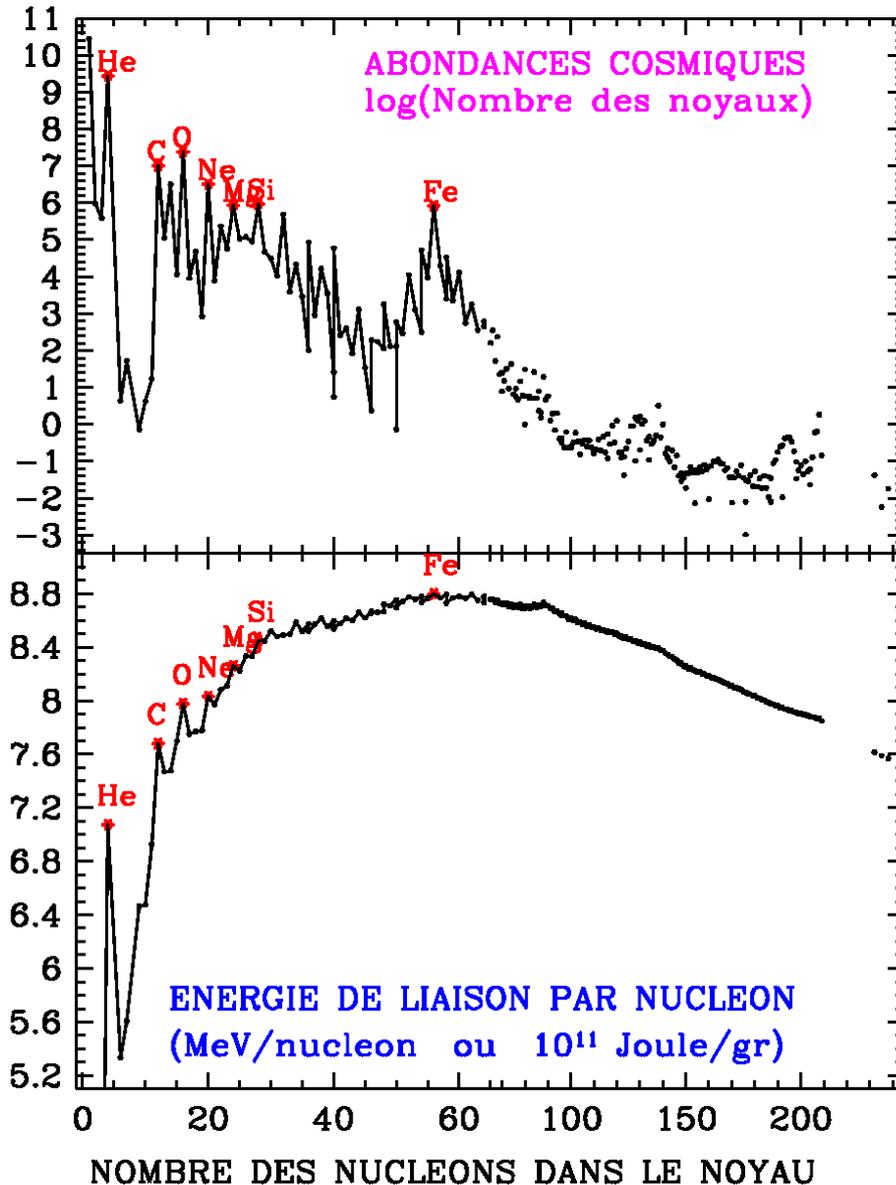
(Hervé Cottin) – 3h

La vie ailleurs que sur la Terre ?

A³
PLAN

Cours : 18 h / TD : 9 h / TP : 1h30

La nucléosynthèse et l'abondance cosmique



Les atomes les plus abondants sont aussi ceux qui ont la plus grande énergie de liaison nucléaire

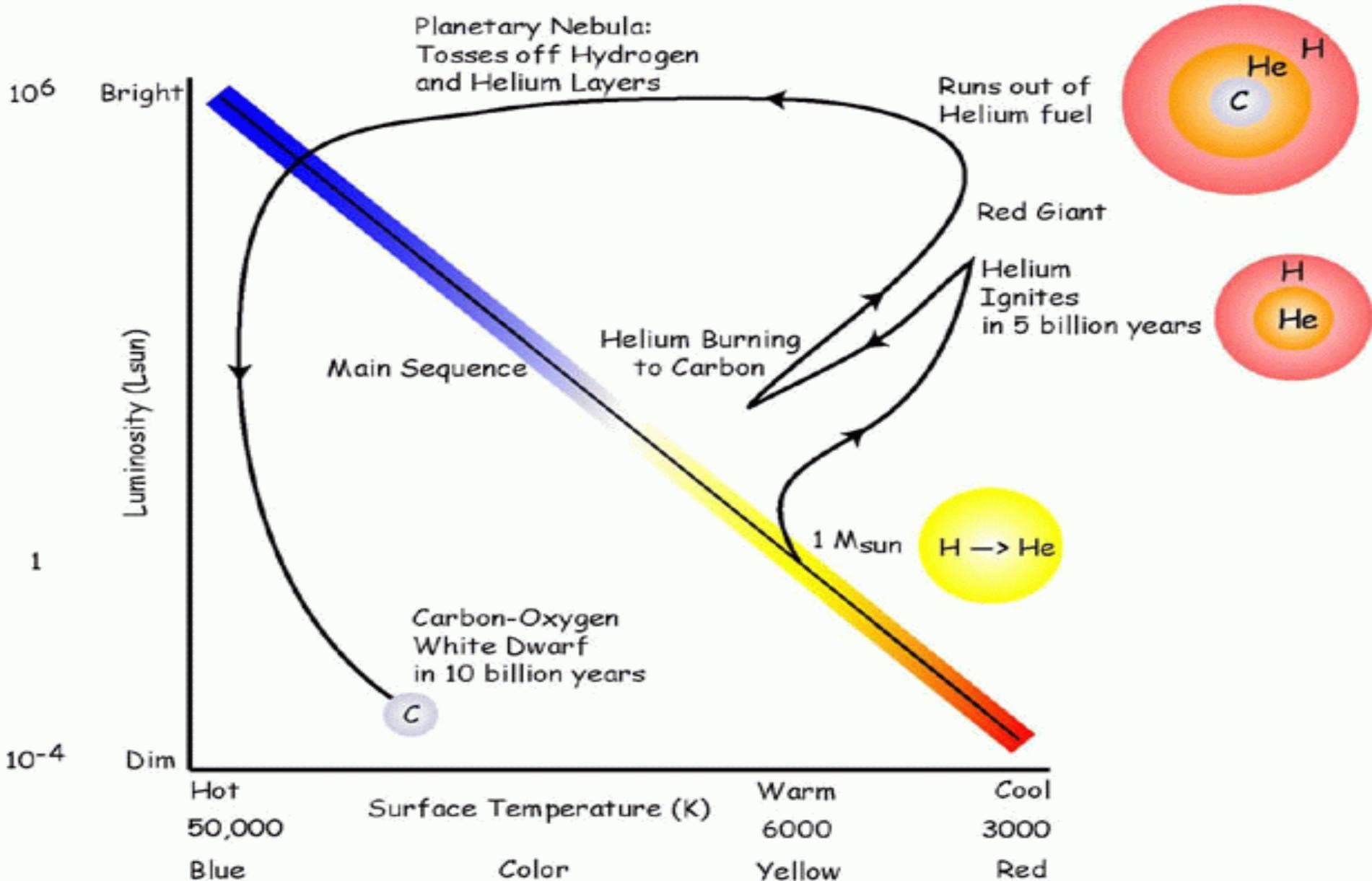
La nucléosynthèse primordiale

• En 1948, l'astronome anglais Fred Hoyle développe une théorie selon laquelle les éléments chimiques se forment dans les étoiles. Cette théorie, appelée *nucléosynthèse stellaire*, explique de façon satisfaisante les populations relatives d'un grand nombre d'atomes. Cependant certains atomes posent problème : le deutérium, l'hélium. C'est pour cela que l'on a introduit la **nucléosynthèse primordiale** qui aurait eu lieu aux tous premiers temps de l'Univers.

• Big Bang : formation de l'hydrogène du deutérium et de l'hélium

Réaction de fusion nucléaire dans le cœur des étoiles.

$M_{\text{étoile}} < 10 M_{\odot}$: nucléosynthèse d'He, C, N, O



Nébuleuse planétaire : éjection de matière des étoiles peu massives



La nébuleuse planétaire IC 418. L'étoile au centre s'est transformée en nébuleuse planétaire il y a quelques milliers d'années. Le diamètre de la nébuleuse atteint maintenant 0,2 années-lumière. Elle sera visible environs 30000 ans. L'étoile a perdu 1/5 de sa masse. Elle finira en naine blanche, 0.6 à 1 M_{\odot} et 10000 km de diamètre.

Les naines blanches

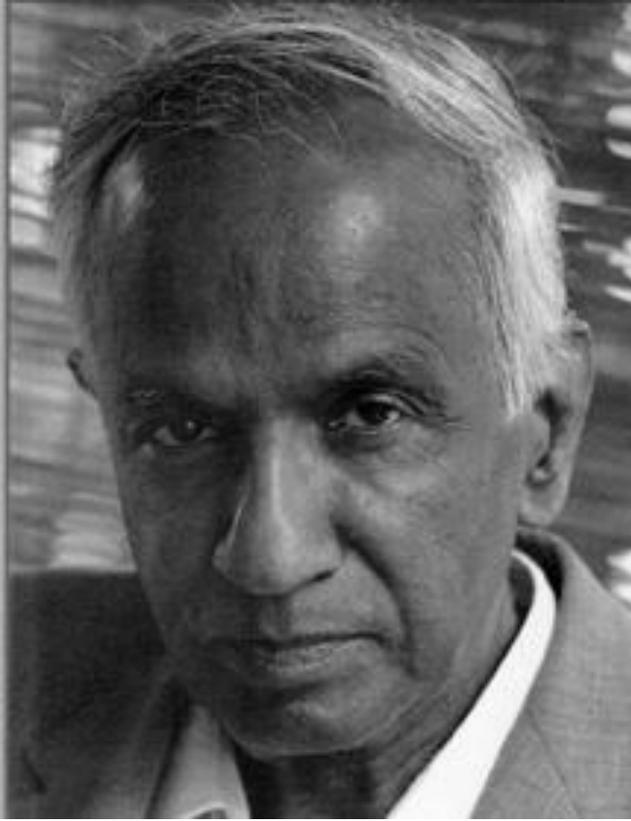
Dans les années 20, Arthur Eddington, travaillant sur la structure et l'évolution stellaire, ne parvenait pas à résoudre le problème de la fin de vie des étoiles, lorsque celles-ci ont épuisé leur combustible nucléaire. En 1930, lors de son long voyage en paquebot l'amenant d'Inde à l'université de Cambridge, Chandrasekhar, qui n'avait alors que 20 ans, reprit ce problème :

La masse limite de Chandrasekhar est la masse maximum que peut supporter la pression de dégénérescence des électrons, elle obéit à la loi :

$$M_{\text{ch}} = 5,75 (Z/A)^2 M_{\odot}$$

La naine blanche est l'aboutissement d'une étoile composée principalement de carbone; dans ces conditions: $M_{\text{ch}} = 5,75(6/12,011)^2 = 1,437 M_{\odot}$

En dessous de cette masse limite, la gravitation est stoppé par la pression électronique et le cœur des étoiles devient une naine blanche, de la taille de la terre, elle sont extrêmement denses, très chaudes et de faibles luminosités. Certaines étoiles plus lourdes mais ayant perdu de la matière peuvent terminer en naine blanche. Les naines blanches se refroidissent très doucement et faiblissent. C'est le destin de notre soleil. La matière sera perdusauf si elles s'approchent d'un voisin plus massifs!



Né à Lahore, cité des Indes britanniques (aujourd'hui ville pakistanaise), Subrahmanyan Chandrasekhar est le troisième enfant d'une famille aisée et cultivée de dix frères et sœurs. Après des études secondaires à Madras, il se voit offrir par le gouvernement indien une bourse pour aller étudier à l'étranger. Le jeune Chandrasekhar décide de suivre l'exemple de son oncle, sir Chandrasekhara Venkata Raman, formé en Angleterre, devenu prix Nobel de Physique en 1930, et quitte son pays le 31 juillet 1930. Il rejoint le Trinity College de l'université de Cambridge, où il obtient son doctorat en 1933, avant d'y occuper un poste pendant quatre années. En 1937, Chandrasekhar fait le choix des Etats-Unis – il sera naturalisé américain en 1953 – et intègre l'université de Chicago. C'est là qu'il poursuivra le reste de sa carrière de chercheur et de professeur.

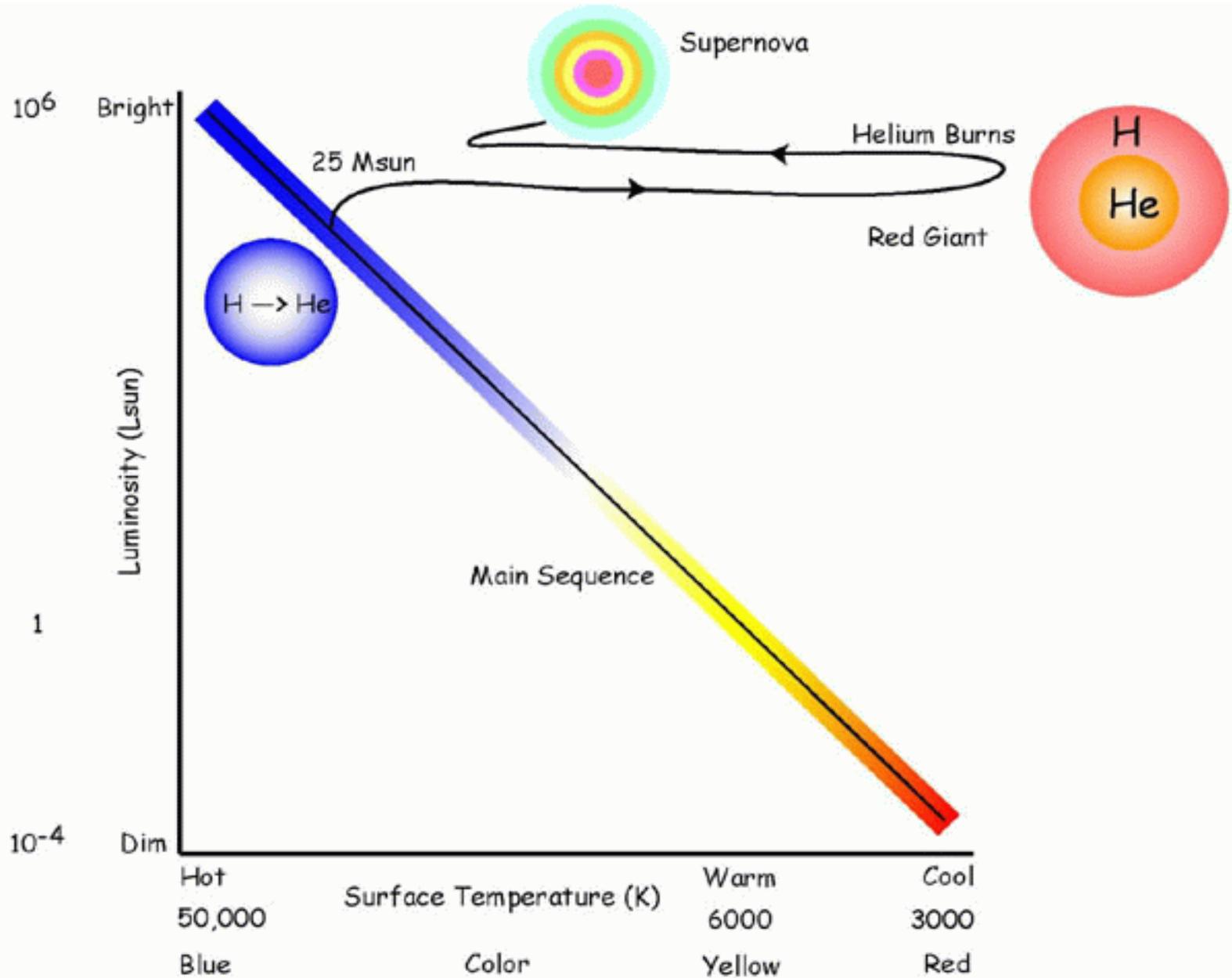
Parmi les travaux dont il est l'auteur, le plus connu est celui donnant naissance à ce qu'on appelle la limite de Chandrasekhar. L'astrophysicien montre qu'une étoile de masse inférieure à 1,44 fois celle du Soleil évolue, en fin de vie, en une naine blanche.

Pour ses recherches sur la structure et l'évolution des étoiles, Chandrasekhar recevra en 1983 le prix Nobel de Physique, conjointement avec l'astrophysicien nucléaire William Fowler. Il meurt le 21 août 1995, à Chicago, dans l'Illinois.

Chandrasekhar, Subramanyan (1910-1995)

Réaction de fusion nucléaire dans le cœur des étoiles.

Métoile $> 10 M_{\odot}$: nucléosynthèse des éléments lourds du C jusqu'au Fe



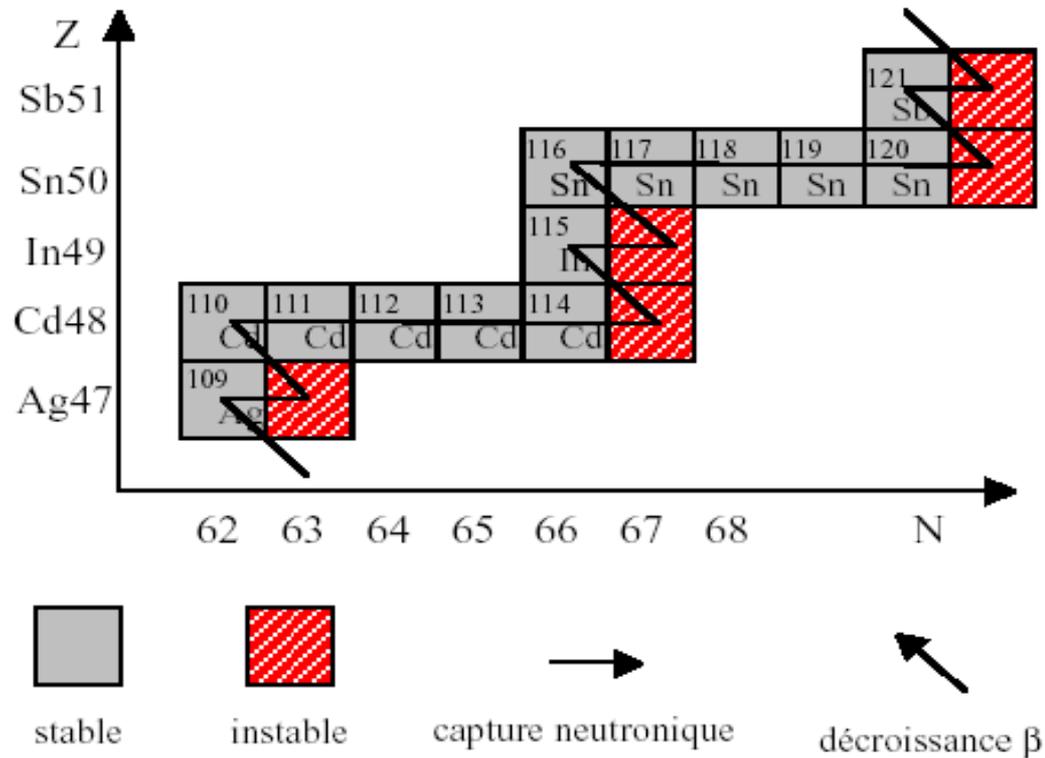
Formation des éléments atomiques lourds

- Capture de neutrons

Métoile $< 10 M_{\odot}$: *processus s* (faible densité de neutron mais durée de plusieurs millions d'années) possible pendant la phase géante rouge : production principale des noyaux jusqu'au Plomb. Le *processus s* s'arrête lorsque les noyaux subissent la désintégration α .

Métoile $> 10 M_{\odot}$: *processus s et r* (forte densité de neutron mais durée de quelques secondes) possible lors de l'explosion finale : production de noyaux les plus lourds jusqu'à l'Uranium

Formation des isotopes et radioactivité

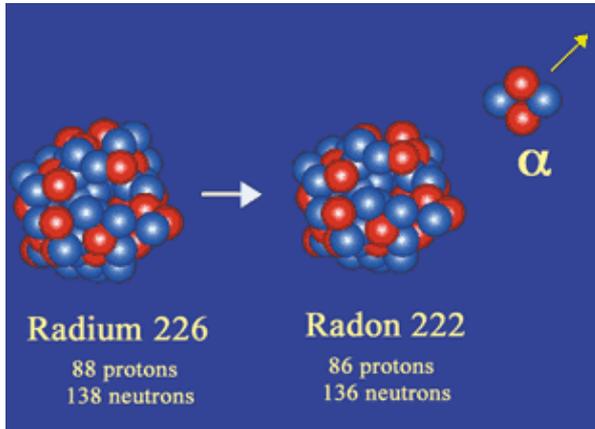


- La capture de neutrons : création des isotopes

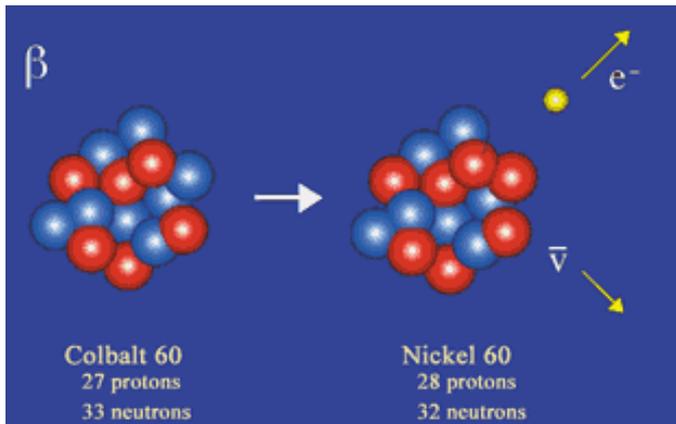
Les processus de radioactivité sélectionne les isotopes stables :

- la radioactivité β : émission d'électron suite à la transformation d'un neutron en proton
- La radioactivité α : émission d'un noyau d'He, perte de 2 protons et 2 neutrons
- La radioactivité γ : émission de photons à haute énergie

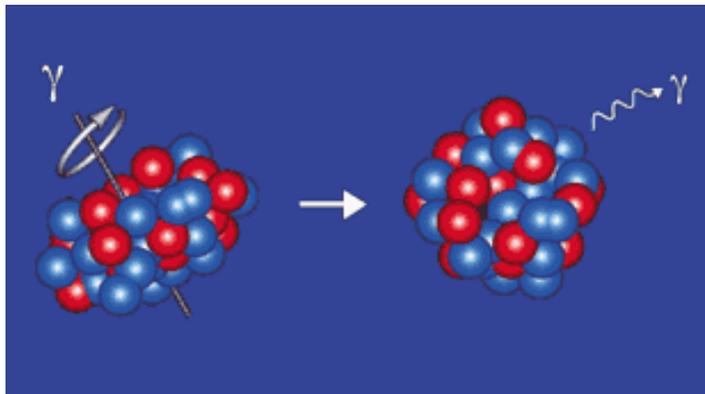
Les différents types de radioactivité



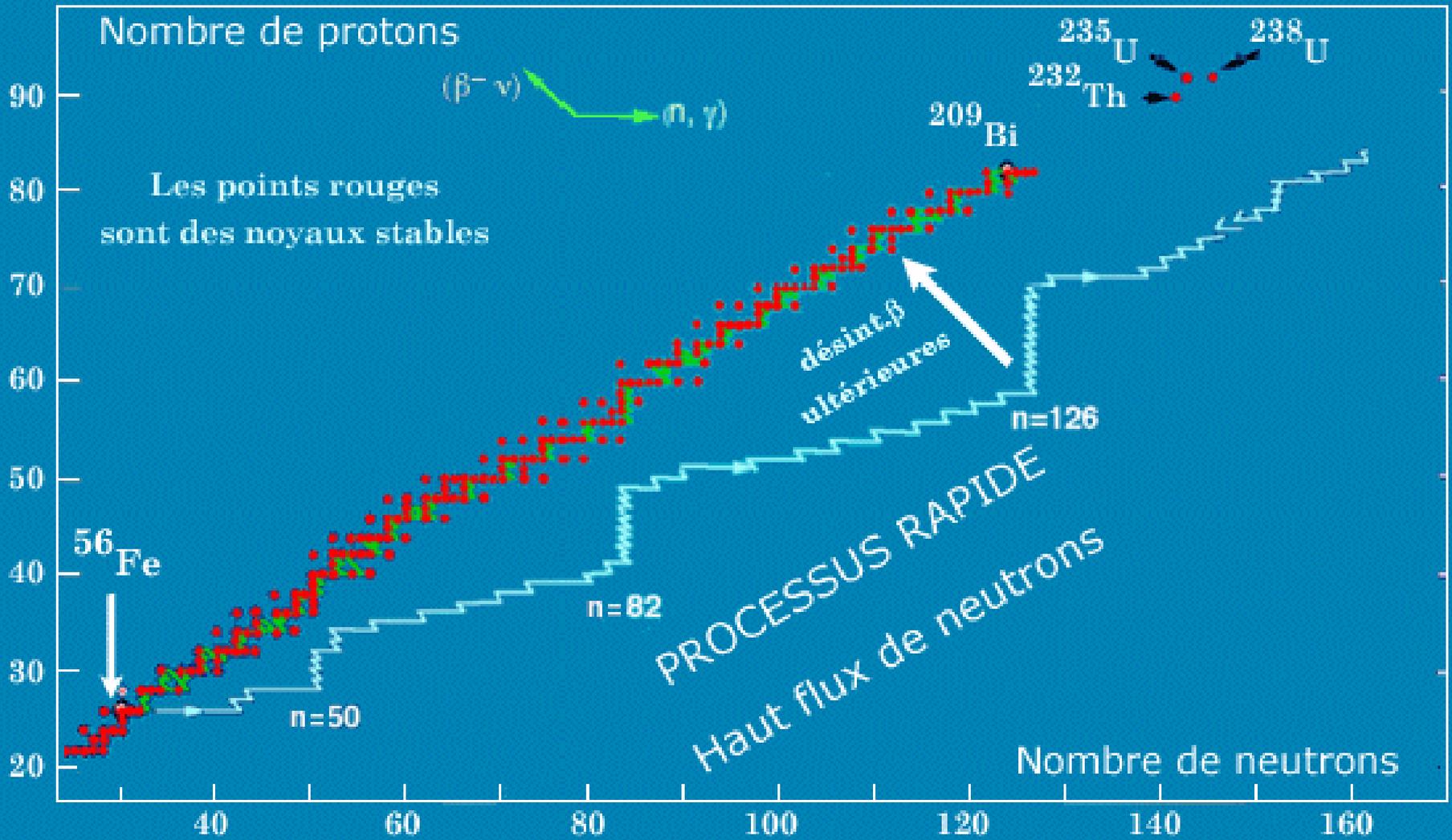
Ce gros noyau de 226 nucléons, dont 88 protons et 138 neutrons, émet une particule alpha composée de deux protons et deux neutrons. Il se transforme alors en noyau de radon-222, lui-même radioactif, contenant deux protons et deux neutrons de moins. La désintégration libère 4,6 millions d'électronvolts d'énergie. La particule alpha en emporte les 222/226 ièmes et le radon 4/226 ièmes. Il faut attendre la désintégration 2300 ans en moyenne.



Un noyau de Cobalt-60, qui contient 33 neutrons et 27 protons, présente un excès de 6 neutrons (représentés en bleu). Pour se débarrasser de cet excès, un neutron se transforme en proton (représenté en rouge). Le noyau est devenu un noyau stable de nickel-60 avec 28 protons (un de plus) et 32 neutrons (un de moins), mais toujours 60 nucléons. Lors de la désintégration, deux corpuscules sont créés, un électron et un antineutrino qui échappe à la détection.



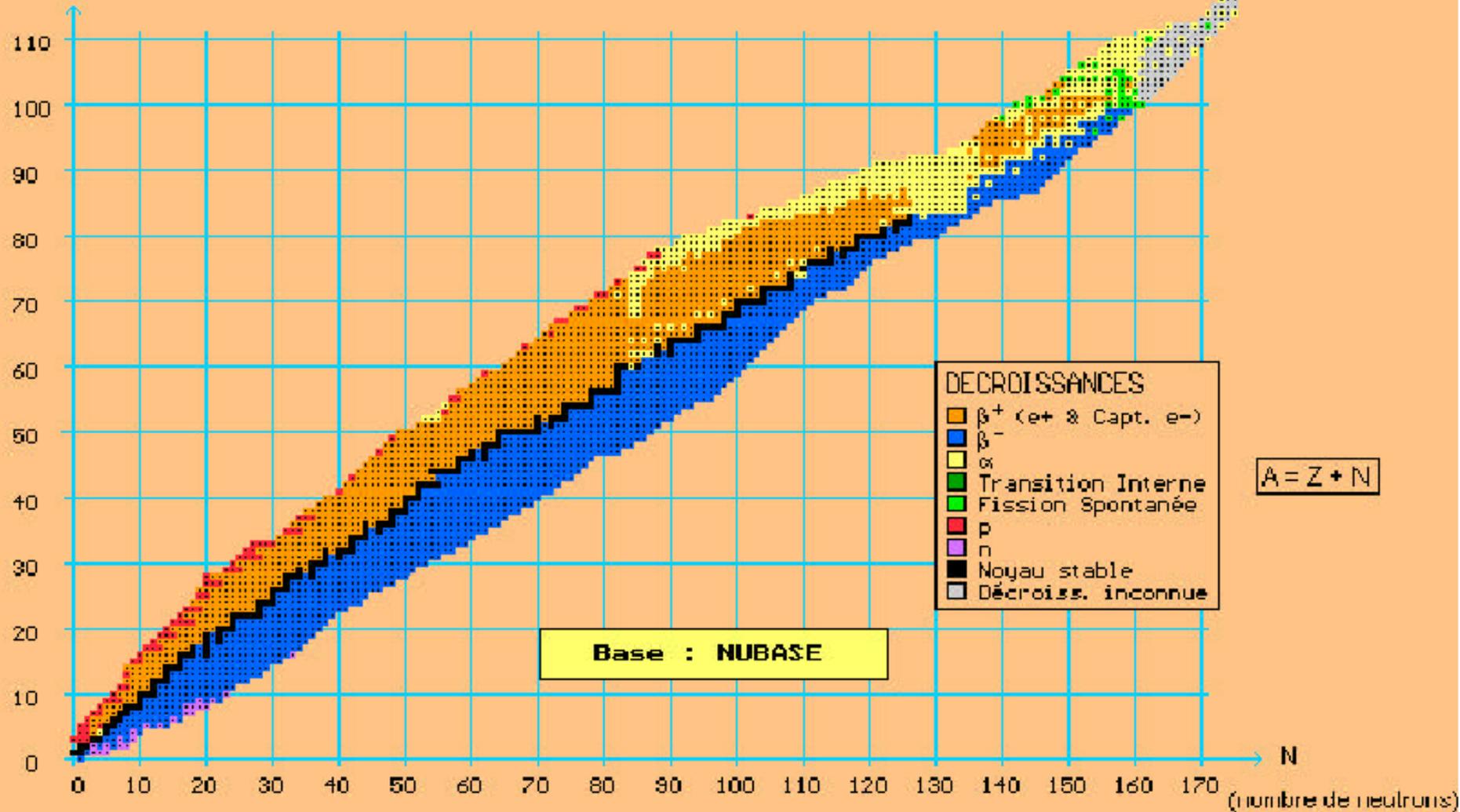
La radioactivité gamma se produit quand une désintégration ou un événement comme la capture d'un neutron a laissé le noyau avec un trop plein d'énergie. Le noyau "excité" revient généralement très rapidement à un état plus normal. Dans cette illustration, le noyau déformé et animé d'une rotation autour d'un axe retrouve une forme sphérique et perd sa rotation en émettant une radiation gamma qui emporte l'excédent d'énergie. Les rayons gamma sont de même nature que les photons de lumière émis par les atomes, mais leurs énergies sont des centaines de milliers de fois plus grandes.



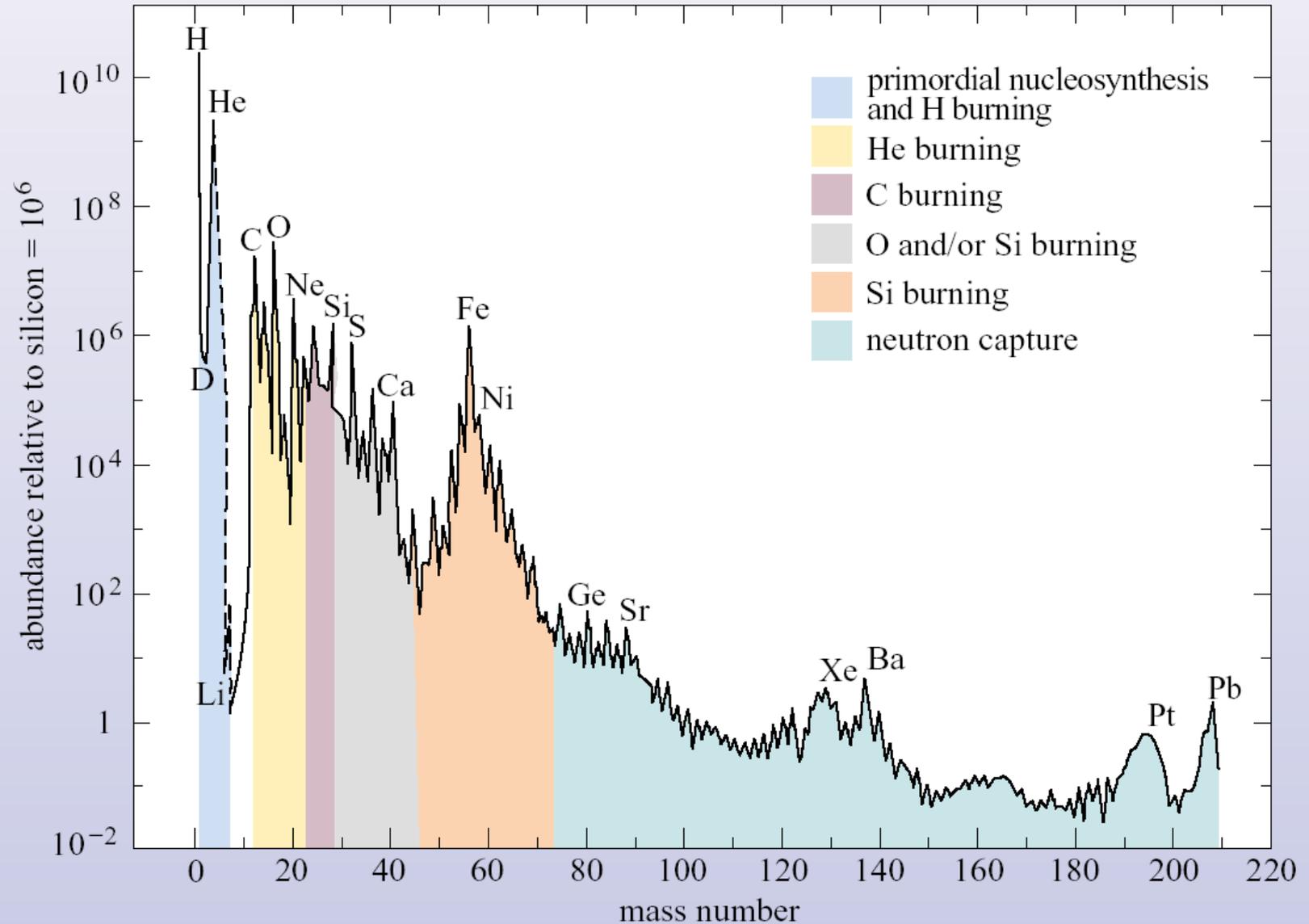
Nucléosynthèse des éléments lourds

Z (nombre de protons)

Nombre de Nucleides Affiches : 3156



Distribution des éléments atomiques qui ont permis la formation du système solaire



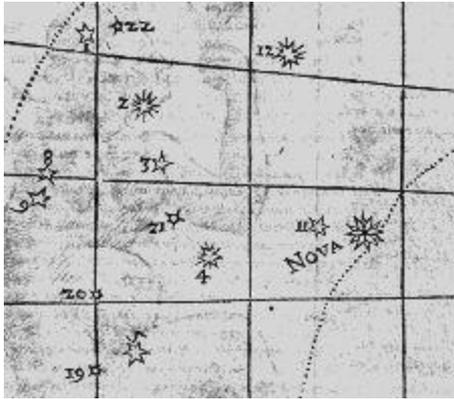
Supernovae : éjection explosive des étoiles massives



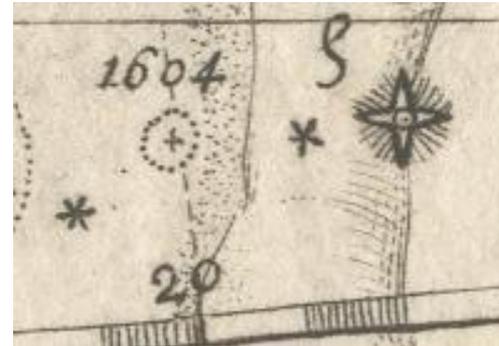
Nébuleuse du crabe,
reste d'une supernovae
(M1) qui mesure 10
années lumières.
L'explosion a eu lieu en
1054.

Cette explosion fut observée par les astronomes chinois et japonais le 4 juillet 1054.
Pendant 23 jours, l'étoile fut visible en plein jour, éclairait quatre fois plus fort que
Vénus

La fréquence des supernovae



Observation de
Tycho-Brahe en
1572



Observation de
Kepler en 1604

Dans notre galaxie :

La dernière supernova vu dans notre galaxie a eu lieu en 1604 et a été observé sans télescope par Kepler. D'autres supernovae ont été observé en 1572, 1054 et 1006.

La fréquence serait donc de 4 visible à l'œil nu en 1000 ans. D'autres se produisent probablement mais ne sont pas observées à cause de l'obscurcissement du milieu interstellaire concentré dans le plan de la galaxie.

Dans les autres galaxies :

On compte une supernovae tous les 25 à 50 ans dans les autres galaxies. Plusieurs supernovae sont détectées par les astronomes chaque année (249 en 2004).

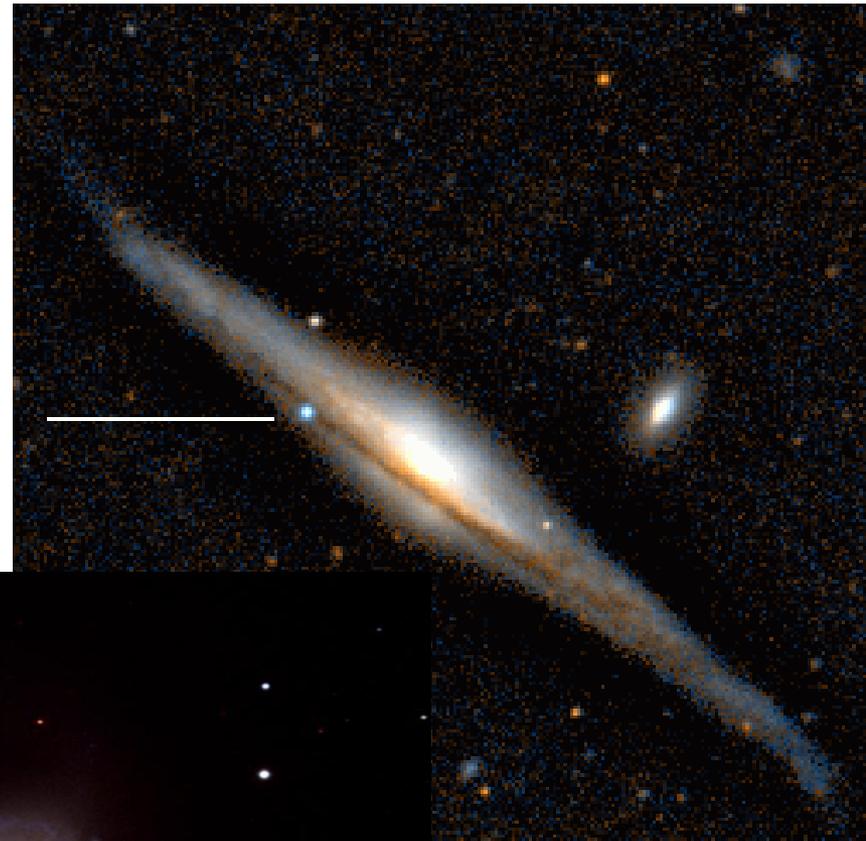
Supernova 1987A

400 ans d'attente et enfin une supernova brillante. Elle a eu lieu dans une galaxie voisine, le grand nuage de Magellan le 24 Février 1987.

Observation des supernovae dans les autres galaxies



SN 1998aq



SN 2001cm



SN 1998bu

Observation de la supernova 1987A

L'étoile qui a explosé était catalogué : une super géante bleue de classe spectrale B et de masse $20 M_{\odot}$, elle a aujourd'hui disparu.

après



avant

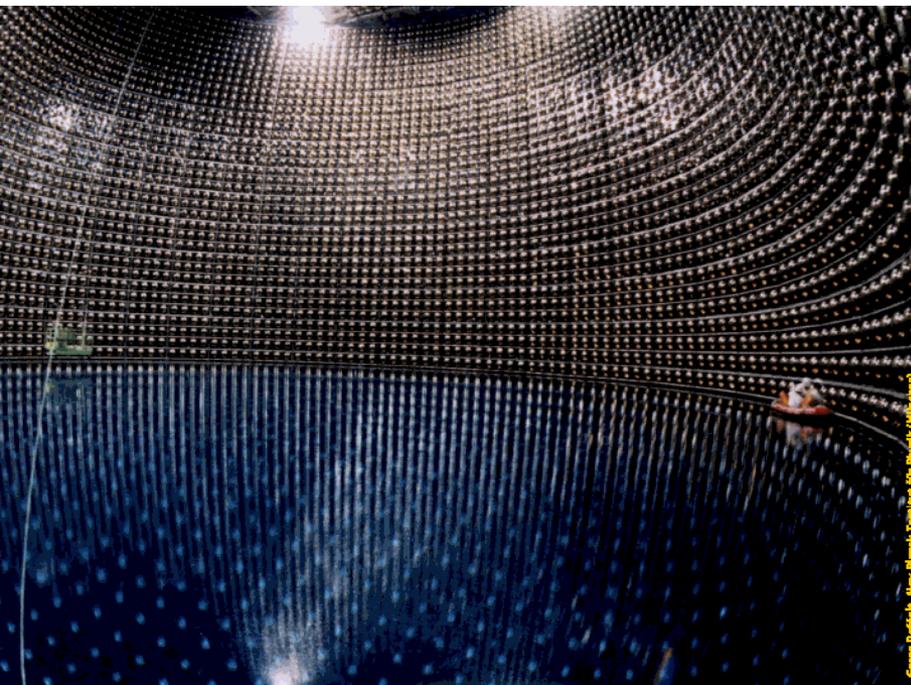


Quelques preuves obtenus par l'observation

La détection des neutrinos :

Les réactions nucléaires qui se produisent à l'intérieur des étoiles forment des quantités de neutrinos. Ces particules n'interagissent quasiment pas avec la matière et contrairement aux photons de lumière s'échappent sans interaction du cœur de l'étoile. Un laboratoire aux USA et un au Japon ont relevé le défi de tenter leur détection. Sur 10^{11} neutrinos qui arrive sur terre /cm²/s, les détecteurs en capte un par semaine. Le 24 Février 1987, en 10 secondes, 12 ont été détecté au Japon et 8 aux USA, exactement 3 heures avant l'observation de l'augmentation de la luminosité. Le décalage temporelle est du au fait que les neutrinos sont produit par l'effondrement du cœur de l'étoile alors que l'augmentation de la luminosité se produit progressivement lors du passage de l'onde de choc à travers l'enveloppe de l'étoile

Remarque : Le nuage de Magellan n'est visible que du ciel austral, et a été détecté en Australie. La détection des neutrinos s'est fait dans l'hémisphère nord !! Les neutrinos ont traversé la Terre !!



Super-Kamiokande, Japon

Bassin sous terrain de 50000 tonnes d'eau très pure, équipé de 11000 détecteurs de lumières

« Système d'alerte à supernova »

Quelques années après la supernova 1987A :



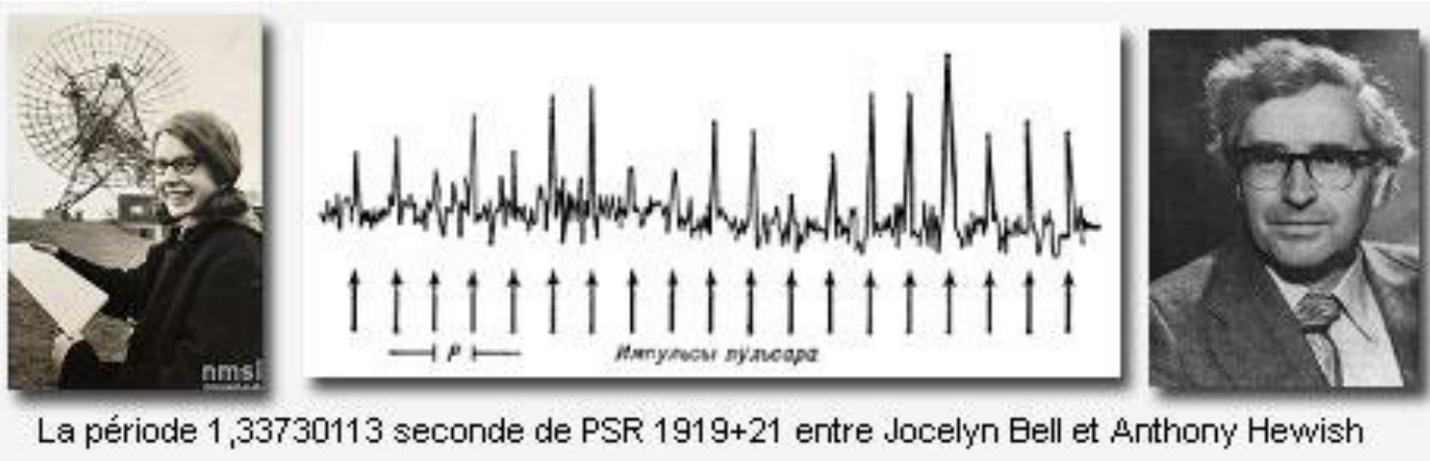
Les étoiles à neutrons

Au centre de l'étoile produit par la supernova reste un noyau extrêmement dense (10^8 tonnes/cm³) et la matière ne subsiste que grâce à la pression de dégénérescence des neutrons qui permet de stopper l'effondrement gravitationnel de l'étoile mais le rayon ne fait plus que 10 km !!! La théorie prévoit que l'objet tourne sur lui même plusieurs fois par seconde (conservation du moment angulaire), qu'il est chaud comme le centre du soleil et que le champ magnétique est 10^{12} fois plus fort que celui de la terre.

S'ils sont vraiment si chaud, ils doivent irradier dans les rayons X.

Mais leur taille fait qu'ils sont peu lumineux et donc quasiment indétectable

La découverte des pulsars



En 1967, à Cambridge une étudiante en thèse découvre des signaux récurrents extrêmement précis sur l'enregistrement des son radiotélescope. Aucune étoile ne pouvait envoyé des signaux aussi rapide (période d'1 secondes). L'objet devait être beaucoup plus petit, de la taille.....d'une étoile à neutron.

Tout le monde fut convaincu lorsqu'on découvrit un pulsar au centre de la nébuleuse du crabe !!

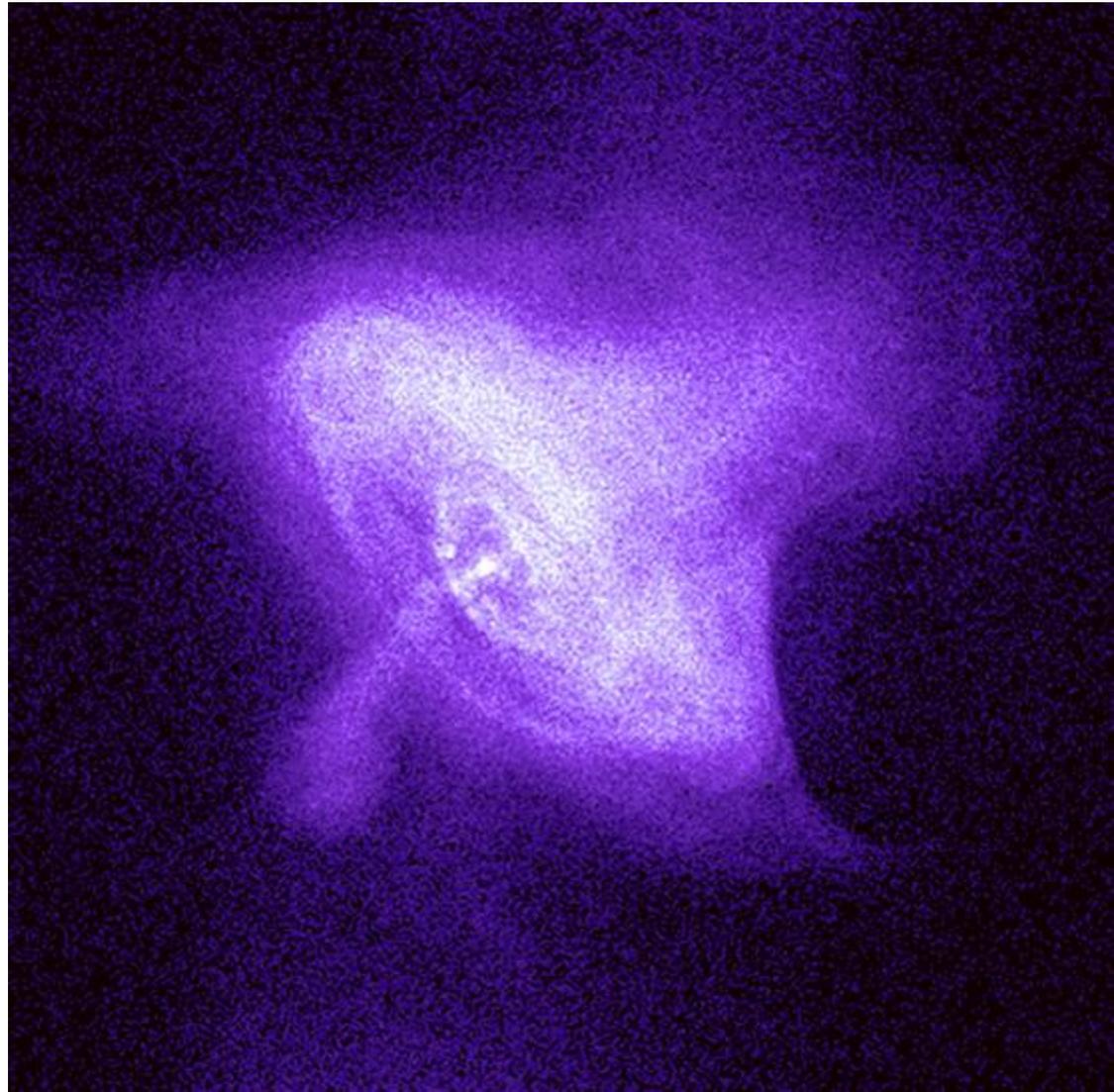
Depuis, plus de 1000 pulsars ont été découvert avec des périodes entre 0.033 et 3.75 secondes .



L'image du pulsar du crabe vu en rayon X montre le gaz très chaud et les jets de matières provoqués par le champ magnétique intense de l'étoile à neutron.

L'activité des pulsars peu durer quelques millions d'années mais ils ralentissent tous inexorablement.

Mais tous les pulsars ne sont pas au centre des supernovas et il n'y a pas de pulsars au centre de toutes les supernovas !!



Les trous noirs

Les étoiles encore plus massives peuvent dépasser la limite supporté par la pression de dégénérescence des neutrons et la contraction gravitationnelle va finalement gagner la partie car la nature n'a pus rien à lui opposer. C'est ce qu'on appelle un trou noir.

Pour ses objets massifs, on peut calculer que la vitesse d'échappement est supérieur à la vitesse de la lumière ce qui veut dire que même la lumière ne peut s'en échapper. C'est pour cela qu'on les a nommé des trous noirs.

A la recherche des trous noirs

Le meilleur moyen est de rechercher des systèmes d'étoiles binaires massives et de rechercher les effet gravitationnelle que pourrait subir une étoile massive a proximité d'un trou noir

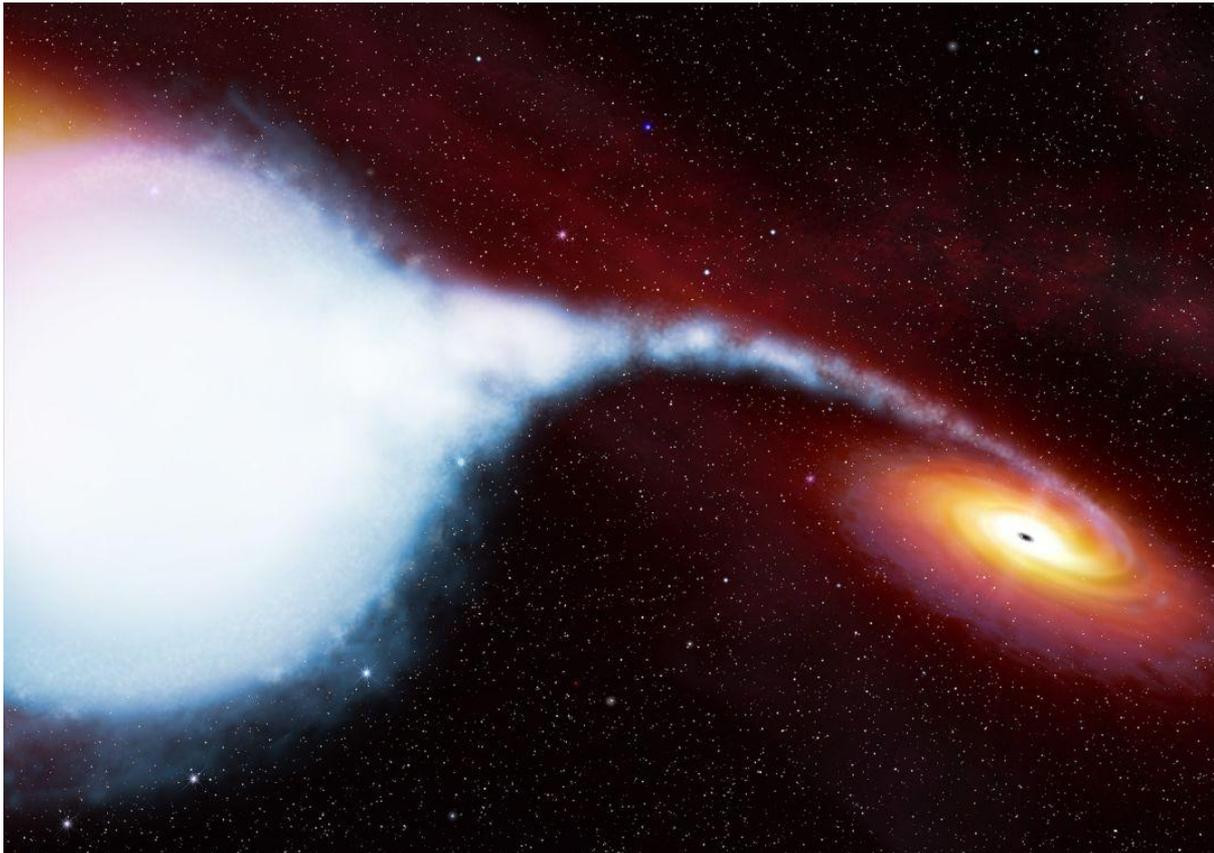


Illustration de Cygnus X-1, système binaire composé d'une étoile massive de type O et un objet compact invisible mais qui provoque un déplacement Doppler du à l'attractivité ainsi qu'un flux de matière entre les deux objets.