

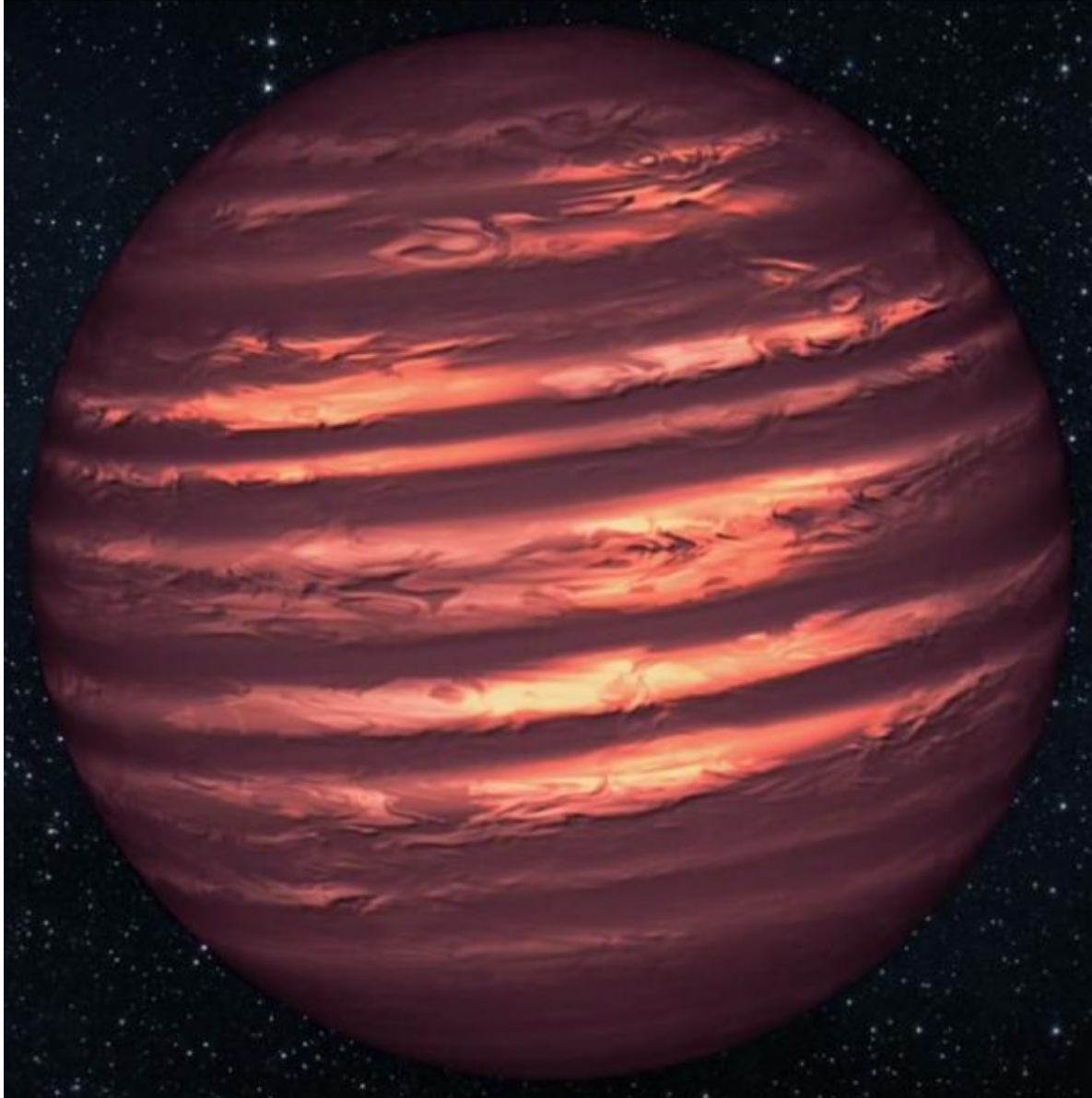
# Les naines brunes, késako ? Ça se mange ?

écrit par Professeur Tetenlair | 20 septembre 2023

**Naine brune distante du soleil de 100 années-lumière**



## Naine brune distante du soleil de 100 années-lumière



Pour cet article, le sujet choisi est un peu particulier. Il est passionnant, mais ne s'adresse, peut-être, pas à tous car il traite d'une question relativement précise. Une fois n'est pas coutume, je suis pardonné ? Il s'agit des naines brunes.

Pour ton information, tu pourras lire dans d'autres littératures sur ce sujet, qu'il existe différents types de naines : les noires, les blanches, les jaunes, et les rouges. Ce qui fait classer une étoile dans la catégorie des « naines » est sa luminosité.

Seules deux catégories de naines n'ont rien à voir avec la

luminosité (pour leurs classifications) : les naines blanches et brunes qui sont liées directement à l'état de l'évolution des étoiles.

Les naines blanches sont des étoiles vieillissantes, en fin de vie, dont la masse est de l'ordre de celle du Soleil et la taille proche de celle de la Terre. Leur grande densité rend gigantesques les forces gravitationnelles qui y règnent. Ce sont des astres assez communs dans l'Univers ; la plus proche naine blanche est à une distance de 8,6 années-lumière, ce qui n'est rien du tout. On estime que le Soleil, qui est actuellement une étoile naine jaune (luminosité de type G), deviendra une naine blanche dans quelques milliards d'années. Quant aux naines brunes, nous allons en parler ensemble dans le présent et modeste article.

**Allez, ami passionné, entrons directement dans le vif du sujet : qu'est-ce qu'une naine brune ? Mais avant de répondre à cette question qui te fait baver j'en suis persuadé, il faut impérativement savoir ce qu'est une étoile.**

## **Qu'est-ce qu'une étoile ?**

Une étoile est un astre qui brille de lui-même par un rayonnement massif de surface qui consomme beaucoup d'énergie. Cette colossale consommation d'énergie est compensée par une production d'énergie nucléaire au centre de l'étoile. L'équilibre énergétique est ainsi quasi parfait.

**Située à près de 9 années-lumière de distance, Sirius est l'étoile la plus brillante de notre ciel nocturne, ce qui explique son nom, qui signifie « ardent » en grec.**



Les étoiles naissent principalement dans les nébuleuses de la façon suivante. Au sein de la nébuleuse une grosse quantité de gaz et de poussière interstellaire s'assemble par l'effet de la gravité. Ces gaz sont essentiellement composés d'hydrogène et d'hélium. Cette contraction due à la gravité augmente sans cesse et devient tel qu'à un certain moment le tout s'effondre, c'est ce que l'on appelle l'effondrement gravitationnel. C'est cet effondrement qui donne naissance à une étoile par une proto-étoile (étape précédent l'étoile définitive).

Cette contraction chauffe de façon importante la proto-étoile et son centre atteint environ 3 millions de degrés, température nécessaire à la fusion de l'hydrogène. Ceci entraîne des réactions nucléaires qui dégagent une énergie colossale, laquelle permet d'arrêter la contraction gravitationnelle de l'étoile. La contraction gravitationnelle stoppée, la production d'énergie continue par les réactions

nucléaires mais se trouve en quasi parfait équilibre à la consommation de l'étoile pour son rayonnement lumineux. Ainsi est née une étoile. Pour en savoir plus, consulte les 1) et 2) en fin d'article.



Pour ton information personnelle, et comme tu le sais déjà j'en suis persuadé, notre Soleil n'est qu'une étoile comme les autres parmi les milliards qui existent. Comme elle est beaucoup plus proche que les autres étoiles, son étude est facilitée et les résultats que l'on trouve se reportent sur toutes les autres étoiles.

**Alors, comment se situe une naine brune dans tout cela ? C'est tout simple, une naine brune est une étoile qui n'arrive pas à exister parce qu'elle ne peut pas maintenir de façon stable les réactions de fusion nucléaire de l'hydrogène au début de l'évolution stellaire (= des étoiles). Certains disent que c'est une étoile ratée. Les naines brunes sont, en générale, de taille et masse intermédiaire entre celles d'une planète gazeuse (type Jupiter) et d'une petite étoile.**

Prédites par les théoriciens dans les années 1960, longtemps recherchées, et finalement découvertes en 1995, les naines brunes, constituent le chaînon manquant entre le monde des étoiles et celui des planètes. Mais elles soulèvent des questions fondamentales sur la formation de ces deux grandes familles d'astres.

Les naines brunes sont très répandues dans notre Galaxie, où elles sont trois fois moins nombreuses que les étoiles. Leur contribution totale en masse est cependant environ trente-cinq fois plus faible que celle des étoiles. On avait pensé un moment que les naines brunes pouvaient expliquer la masse manquante galactique de l'univers. Puis on s'est aperçu que cela était complètement faux.



**Photographie de la naine brune W1200-7845, située à environ 100 parsecs de la Terre (336 années-lumière) entourée d'un tout jeune disque protoplanétaire qui pourrait potentiellement former des planètes.**



En savoir plus : *les lignes italiques et rouges* ci-dessous peuvent être zappées bien que passionnantes. Pour bien les comprendre, il faut les lire et relire 2 ou 3 fois. C'est simple, mais pour des non habitués, des relectures sont nécessaires. Cependant, leurs non-lecture n'affectera pas la suite de l'article.

### ***Pourquoi une naine brune ne devient pas une étoile ?***

*Si la masse de la proto-étoile (naine brune) est trop faible, la température critique de fusion de l'hydrogène ne peut être atteinte avant que la matière ne devienne dégénérée, au sens quantique du terme. Lors de la contraction gravitationnelle, la densité augmente, les électrons se rapprochent les uns des autres, et deviennent dégénérés. Une pression dite de dégénérescence s'instaure, qui va s'opposer à la contraction*

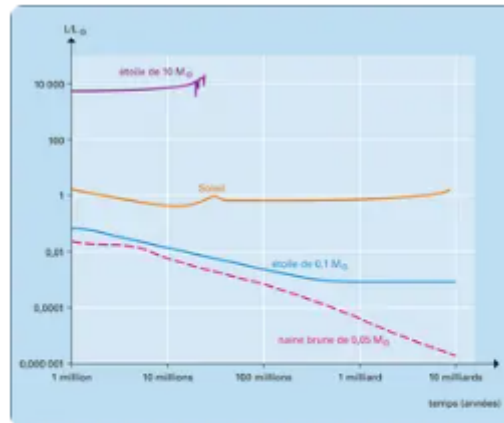
*gravitationnelle. Cette pression possède une propriété remarquable : elle ne dépend pas de la température (en mécanique classique, la pression est proportionnelle à la température). La matière dégénérée a alors un comportement paradoxal : lors d'une compression où densité et pression augmentent, la température diminue. Une future naine brune ne peut atteindre, lors de sa contraction gravitationnelle initiale, la température critique qui la ferait basculer dans le monde des étoiles. La masse critique en deçà de laquelle la fusion de l'hydrogène ne peut s'amorcer est déterminée théoriquement : elle est d'environ 0,07 masse solaire, soit 70 masses de Jupiter.*

La vie d'une étoile est marquée par des phases principales de combustion nucléaire. Les étoiles semblables au Soleil atteignent la première phase de combustion, celle de l'hydrogène, en quelques dizaines de millions d'années ; cette phase durera dix milliards d'années.

Les étoiles plus massives que le Soleil, beaucoup plus chaudes et plus brillantes, épuisent plus rapidement leurs différents combustibles nucléaires. Une étoile de 10 masses solaires ne vivra qu'une vingtaine de millions d'années et son existence, caractérisée par des changements rapides de ses propriétés de surface, en termes de luminosité (c'est-à-dire de puissance rayonnée) et de température, se terminera par une explosion finale donnant lieu à une supernova. Les étoiles de masse inférieure à celle du Soleil ont en revanche une vie lente et monotone : une fois les réactions de fusion de l'hydrogène amorcées, leur évolution va se figer. Il faudrait plus de 10 000 milliards d'années, soit mille fois l'âge actuel de l'Univers, pour qu'une étoile dix fois moins massive que le Soleil épuise son réservoir d'hydrogène central. Ami passionné, c'est là un phénomène maintenant bien connu.

Les naines brunes, incapables de produire de l'énergie nucléaire, vont ainsi continuer à se contracter et à se refroidir, contrairement aux étoiles. Lorsqu'elles sont

jeunes, elles sont encore suffisamment brillantes pour pouvoir être détectées assez facilement. Après cent millions d'années, leur luminosité est déjà mille fois inférieure à celle du Soleil ; après quelques milliards d'années, elles sont un million de fois moins brillantes que celui-ci, ce qui rend leur détection bien difficile !



Évolution de la luminosité de différentes étoiles et d'une naine brune

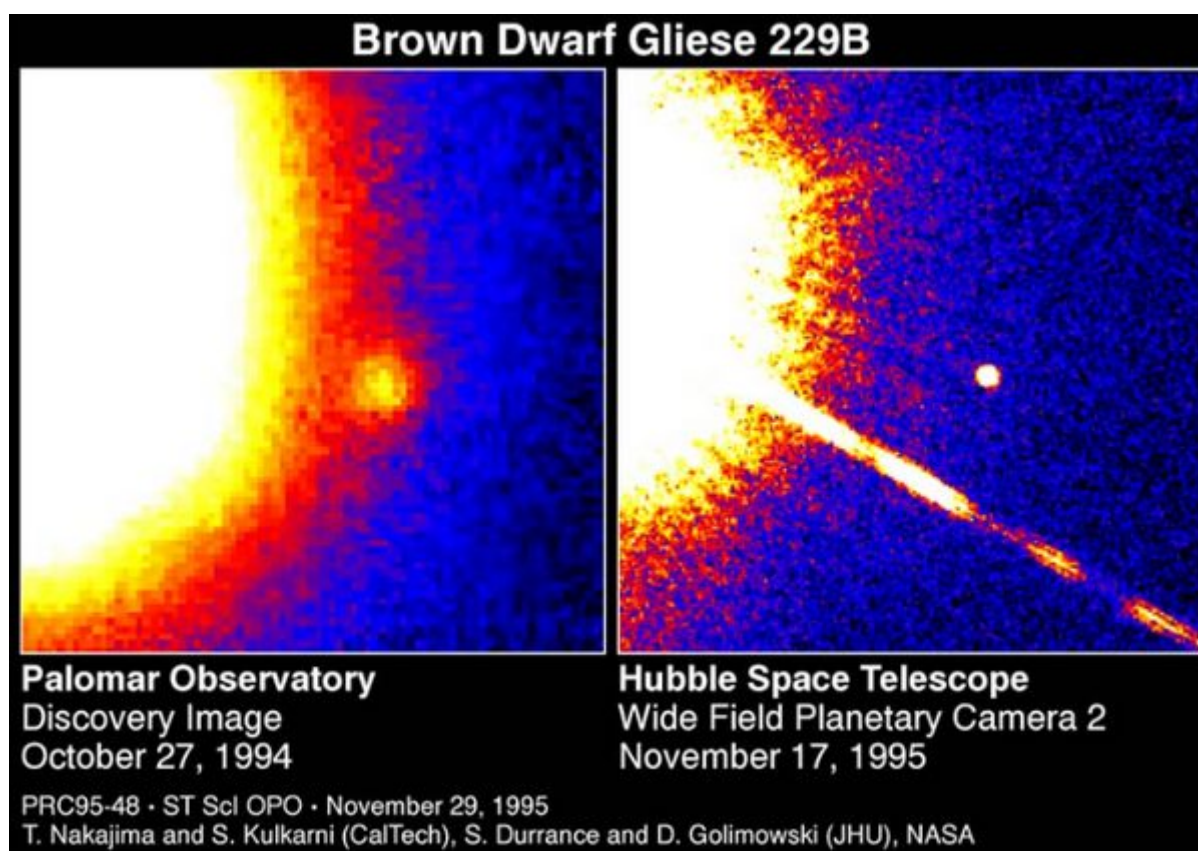
## La détection des naines brunes

La détection des naines brunes fut tardive, à cause de leur faible luminosité. Ce n'est qu'en 1995 que la preuve indéniable de l'existence de ces objets fut apportée avec la découverte du **système binaire Gliese 229B, une naine brune compagne de l'étoile Gliese 229A**. Cette découverte fut possible grâce à l'utilisation d'un coronographe, qui supprime artificiellement la lumière du compagnon stellaire, beaucoup plus brillant. En effet, bien que Gliese 229A soit une étoile de faible masse (0,5 masse solaire environ), elle n'en reste pas moins 1 000 fois plus brillante que son compagnon substellaire.

Explications des deux images ci-dessous :



Les deux images ci-dessous de télescope en fausses couleurs révèlent l'objet le plus faible jamais vu autour d'une étoile au-delà de notre Soleil, et la première détection sans ambiguïté d'une naine brune. La naine brune, comme ci-dessus citée, est appelée GL229B, et elle orbite autour de l'étoile naine rouge Gliese 229, située à environ 18 années-lumière dans la constellation de Lepus. La naine brune a environ 20 à 50 fois la masse de Jupiter, mais elle est si dense qu'elle a à peu près le même diamètre que Jupiter (142 984 km). Je ne te dis pas, ami astronomes, l'incroyable densité qui y règne !



**Image de gauche :** la naine brune (au centre) a été observée pour la première fois dans une lumière rouge lointaine le 27 octobre 1994 en Californie. Une autre année a été nécessaire pour confirmer que l'objet était réellement lié gravitationnellement à l'étoile compagne. GL229B (la naine brune) est à au moins quatre milliards de kilomètres de son étoile compagne, à peu près la séparation entre la planète naine Pluton et notre Soleil.

Image de droite : cette image du GL229B (naine brune au centre) a été prise avec la caméra planétaire à champ large du télescope spatial Hubble, en lumière rouge lointaine, le 17 novembre 1995. Bien que l'étoile Gliese 229 soit hors du bord de l'image, elle est si brillante qu'elle inonde le détecteur Hubble. La ligne diagonale est un pic de diffraction produit par le système optique du télescope.

À la suite de la détection de Gliese 299B, les découvertes de naines brunes se sont enchaînées, soit dans le voisinage solaire, où elles sont relativement vieilles (de quelques centaines de millions d'années à un milliard d'années) et peu brillantes, soit dans des amas d'étoiles jeunes, plus éloignés mais où elles sont plus brillantes. Des avancées remarquables sont dues à plusieurs projets de cartographie du ciel avec des instruments sensibles aux sources infrarouges. Les projets européen DENIS (Deep Near Infrared Survey), américain 2MASS (Two Micron All-Sky Survey) et international SDSS (Sloan Digital Sky Survey) ont ainsi permis de détecter plusieurs centaines de naines brunes.

La plupart des naines brunes observées ont des températures effectives, caractérisant la température de surface, comprises entre 1 000 et 2 500 kelvins (K), soit entre 727 et 2 227 °C (3). Les naines brunes les plus froides ont une température effective de 600 à 700 K soit de 327 et 427 °C (3) et une luminosité un million de fois plus faible que celle du Soleil.

## **L'atmosphère des naines brunes**

L'impact de la découverte de Gliese 229B fut énorme, d'une part dans le monde de l'astronomie stellaire, car cela confirmait les prédictions théoriques concernant l'existence des naines brunes, d'autre part, dans le monde de la planétologie, car le spectre de Gliese 229B ressemble à celui

de Jupiter, avec en particulier des signatures caractéristiques d'absorption due à la vapeur d'eau et au méthane.

**LA PRÉSENCE DE MÉTHANE IMPLIQUE UNE TEMPÉRATURE EFFECTIVE MAXIMALE DE 1 600 K ENVIRON (SOIT 1 327 °C ENVIRON (3)), NETTEMENT INFÉRIEURE À LA TEMPÉRATURE MINIMALE DE L'ÉTOILE LA MOINS MASSIVE, SOIT 0,07 MASSE SOLAIRE.**

**TOUT ASTRE PLUS FROID QUE CETTE LIMITE SERA UN OBJET SUBSTELLAIRE, NAINE BRUNE OU PLANÈTE.**

**DE NOMBREUSES NAINES BRUNES DU MÊME TYPE, NOMMÉES NAINES-T OU NAINES À MÉTHANE, ONT ÉTÉ AINSI DÉCOUVERTES.**

L'atmosphère des naines brunes est due à la formation de grains de poussière : lorsque la température devient inférieure à 2 000 K (1 727 °C (3)), certaines molécules présentes dans ces atmosphères peuvent s'assembler en entités plus grosses et plus complexes pour former des grains, voire des nuages. Les grains plus petits que le micromètre vont absorber le rayonnement dans le visible, opérant comme un couvercle posé sur l'objet, ce qui a pour effet de réchauffer globalement l'atmosphère. Il s'agit d'un effet semblable à l'effet de serre bien connu sur la Terre. Bloqué dans le visible, le flux va s'échapper dans l'infrarouge, expliquant les couleurs rouges des naines-L.

Ce qui aussi est particulièrement intéressant dans ces objets est la détection de lithium en surface. Le lithium est en effet présent dans le nuage à partir duquel s'est formée l'étoile ou la naine brune.

Naine brune nommée W1906+40 découverte en 2011 par le satellite Wise avec sa grande tache due à des tempêtes, comme Jupiter !



En savoir plus : *les lignes italiques et rouges* ci-dessous peuvent être zappées bien que passionnantes. Cela n'affectera pas la suite de la lecture de cet article, ami ! Cependant, leurs non-lecture n'affectera pas la suite de l'article.

*Les projets DENIS et 2MASS ont révélé des objets très rouges qui furent dénommés naines-L. Cette propriété particulière est due à la formation de grains de poussière dans l'atmosphère : lorsque la température devient inférieure à 2 000 K (1 727 °C (3)), certaines molécules présentes dans ces atmosphères peuvent s'assembler en entités plus grosses et plus complexes*

pour former des grains, voire des nuages. Les grains plus petits que le micromètre vont absorber le rayonnement dans le visible, opérant comme un couvercle posé sur l'objet, ce qui a pour effet de réchauffer globalement l'atmosphère. Il s'agit d'un effet semblable à l'effet de serre bien connu sur la Terre. Bloqué dans le visible, le flux va s'échapper dans l'infrarouge, expliquant les couleurs rouges des naines-L.

Une autre caractéristique importante des naines brunes fut mise en évidence à la même époque que la détection de Gliese 229B, avec la découverte de deux naines brunes – Teide 1 et Calar 3 – dans l'amas relativement jeune (environ 120 millions d'années) des Pléiades. Toutes deux ont une masse de l'ordre de 0,06 masse solaire, très proche de la limite entre étoiles et naines brunes. Elles sont beaucoup plus chaudes que Gliese 299B car beaucoup plus jeunes, avec une température effective de l'ordre de 2 500 K (2 227 °C (3)).

Mais ce qui rend ces objets particulièrement intéressants est la détection de lithium en surface. Le lithium est en effet présent dans le nuage à partir duquel s'est formée l'étoile ou la naine brune. Cet élément est détruit par réaction nucléaire à une température inférieure à celle de la fusion de l'hydrogène, mais cette destruction ne fournit pas assez d'énergie pour stopper la contraction initiale du nuage. En revanche, elle peut fournir des informations essentielles sur l'âge, la masse et la température centrale d'un objet, les raies spectrales du lithium étant assez intenses à la surface d'objets froids, donc facilement repérables. Les naines brunes présentent en plus la particularité remarquable d'être complètement convectives : leur intérieur est brassé par des mouvements macroscopiques qui homogénéisent complètement leur composition chimique.

L'abondance de lithium observée en surface reflète ainsi son abondance centrale, et par conséquent les conditions de température dans les régions centrales, qui sont les plus chaudes. Au-dessous d'une masse d'environ 0,06 masse solaire,



*la température nécessaire à la fusion du lithium ne peut être atteinte : la présence de lithium à la surface d'un objet peut donc servir de test pour savoir si l'on a affaire à une naine brune ou non.*

## **Naines brunes et planètes**

Si l'on connaît la masse maximale d'une naine brune, sa masse minimale reste inconnue, du point de vue théorique aussi bien qu'observationnel. A priori, une naine brune pourrait atteindre des masses aussi petites que celle de Jupiter. La limite observationnelle atteinte est de l'ordre de 5 masses de Jupiter. Elle est obtenue dans les régions de formation stellaire très jeunes, âgées d'environ un million d'années, où des objets de masse aussi petite sont encore suffisamment brillants pour pouvoir être détectés individuellement. Ces observations sont cependant à la limite de la portée des télescopes, et rien ne permet d'affirmer que la limite inférieure des naines brunes ait été atteinte.

## LE SAVAIS-TU ?



Théoriquement, la distinction entre naine brune et planète repose sur leurs différents processus de formation. Une naine brune se forme comme une étoile, à partir de la contraction gravitationnelle d'un nuage interstellaire. Quant aux planètes, différents scénarios existent, mais tous sont fondés sur l'idée qu'une planète naît dans un disque de gaz et de poussière entourant une étoile « parente » naissante.

Le modèle le plus largement accepté est le modèle d'accrétion de cœur, où une planète se forme par collisions de minuscules particules dans le disque de poussière.

Ces « planétésimaux », constitués de glace et de roche, s'accumulent jusqu'à atteindre quelques masses terrestres et formeraient le cœur solide des planètes géantes, telles que Jupiter, Saturne, Neptune et Uranus.



Une fois ces cœurs formés, du gaz est accrété, permettant ainsi la formation de planètes pouvant atteindre la masse de Jupiter, voire plus. ***Ainsi, une signature indiscutable d'une planète la distinguant d'une naine brune serait la présence de ce cœur enrichi en éléments lourds que sont la glace et la roche, par rapport à l'hydrogène et l'hélium, composants essentiels d'une naine brune.*** Cette signature a été obtenue pour Jupiter et Saturne, à partir de la mesure des moments gravitationnels, liés à leur rotation, et permettant de remonter à leur structure interne, par les sondes Pioneer, Voyager et Galileo.

Une autre signature observationnelle pourrait être fournie par l'analyse spectrale, car on suppose que l'atmosphère des planètes géantes est enrichie en éléments plus lourds que l'hydrogène et l'hélium, cet enrichissement provenant de la matière rocheuse accrétée avec le gaz après la formation du cœur rocheux. La sonde Galileo a en effet mesuré in situ sur Jupiter un enrichissement d'un facteur deux à trois, par rapport aux abondances dans le Soleil, du carbone, de l'azote et d'autres éléments plus lourds.



## Autres caractéristiques des naines brunes

*Les lignes italiques et rouges* ci-dessous peuvent être zappées bien que passionnantes. Cela n'affectera pas la suite de la lecture de cet article, ami !

*Grâce aux observations et à l'élaboration de modèles atmosphériques, une séquence d'évolution spectrale s'est dessinée, caractérisant les propriétés atmosphériques de ces objets en fonction de leur température de surface. Les surfaces des naines brunes jeunes et suffisamment massives peuvent atteindre des températures supérieures à 2 000 K (1 727 °C (3)), où sont présentes de nombreuses molécules, comme l'oxyde de titane, la vapeur d'eau, l'oxyde de carbone...*

*Ces molécules conduisent à une distribution spectrale d'énergie rayonnée beaucoup plus complexe que celle d'un simple corps noir, caractéristique des étoiles plus chaudes. En dessous de 2 000 K (1 727 °C (3)), nous avons vu ensemble, ami astronome, que certaines molécules se condensent en grains. En plus de l'effet de réchauffement, une modification*

*drastique de la composition chimique atmosphérique s'opère.*

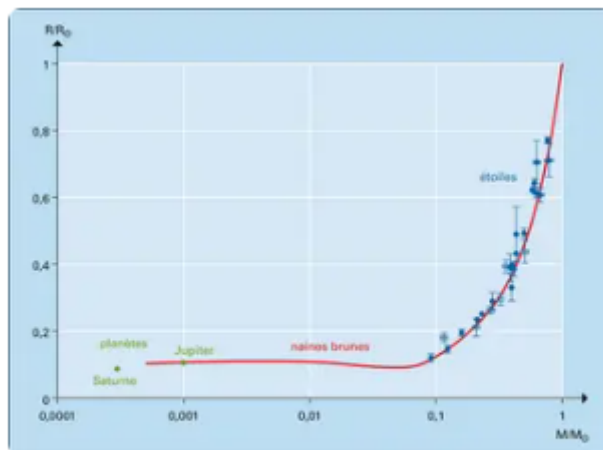
*Sous l'effet de leur propre poids, ces « grosses » particules vont sédimenter dans les couches plus profondes de l'atmosphère et ne seront plus décelables dans le spectre. Par exemple, le fer, dont la présence est signalée par l'absorption de la molécule gazeuse d'hydride de fer, se condense sous forme solide en dessous de 2 000 K (1 727 °C (3)), et disparaîtra de l'atmosphère.*

*Ces processus complexes donnent lieu à la formation de « nuages » de différentes espèces chimiques condensées à différentes altitudes et sont certainement à l'origine des variations de flux observées de plus en plus fréquemment à la surface des naines brunes : on peut parler de phénomènes météorologiques analogues à ceux de notre planète bleue.*

*Puis, en dessous de 1 600 K (1 327 °C (3)), le méthane devient la forme dominante du carbone, caractérisant le type spectral des naines-T. Enfin, si la température atteint la limite de condensation de l'eau, soit environ 300 K (27 °C (3)), on peut s'attendre à de nouvelles modifications importantes des propriétés spectrales.*

Les naines brunes possèdent une autre caractéristique particulière qui concerne cette fois leur structure interne et leur relation masse-rayon. Les propriétés thermodynamiques de la matière à l'intérieur d'étoiles telles que notre Soleil sont régies par la loi des gaz parfaits ; le rayon stellaire est alors simplement proportionnel à la masse. Dans des objets complètement dégénérés, comme les naines blanches ou les étoiles à neutrons, l'inverse se produit : plus l'objet est massif, plus son rayon est petit. La situation est intermédiaire pour les naines brunes. À l'intérieur de celles-ci, les particules qui contribuent à la pression, grandeur qui contrebalance la force gravitationnelle et détermine le rayon, sont les ions et les électrons. Les premiers se conduisent de façon classique, comme dans les étoiles, alors que les seconds

sont partiellement dégénérés. La contribution des électrons est comparable à celle des ions ; il en résulte que le rayon est pratiquement constant quelle que soit la masse. Au même âge que Jupiter la plus massive des naines brunes a un rayon légèrement plus petit que celui de la planète géante, bien que le rapport de masse soit d'un facteur 70 !



Relation masse-rayon des étoiles et des naines brunes

## Conclusion du schmilblick mon ami passionné

Les naines brunes représentent de formidables laboratoires cosmiques où se produisent différents processus, touchant à des domaines aussi variés que les propriétés fondamentales de la matière dense ou la chimie atmosphérique et la météorologie. Leur quête est toujours intense, nous rapprochant de plus en plus du monde planétaire. Elle nous permettra peut-être de résoudre certains mystères concernant la formation des étoiles et des planètes. Qui sait, ma cousine ?

Voilà, le sujet n'était pas des plus simples, ni des plus courant. J'espère que cela t'a plu et que tu as pu t'émerveiller une fois de plus...



Bye bye !

A la prochaine !

## **Professeur Têtenlair**

\*\*\*\*\*

1) Ton serviteur a écrit sur Résistance républicaine un article le 21/04/2021 intitulé « Mais au fait, comment naît, vit, et meurt une étoile ? » que tu peux lire ou relire en [cliquant ici](#).

2) Ton serviteur a écrit sur Résistance républicaine un article le 16/12/2020 intitulé « Professeur Têtenlair : les amas d'étoiles (stellaires) » que tu peux lire ou relire en [cliquant ici](#).

3) Quelques précisions sur les unités de température :

- le degré Fahrenheit, c'est celui utilisé aux Etats-Unis.
- le degré Celsius, c'est celui utilisé dans le monde entier hors Etats-Unis.
- le degré kelvin est l'unité officielle du système international d'unité utilisée par les scientifiques.

Le froid extrême, aussi appelé « zéro absolu », correspond à 0 K (kelvin) soit -273,15 °C. L'eau pure gèle à 0 °C (soit 32 °F) et boue à 100 °C (soit 212 °F).

La température moyenne du corps humain correspond à environ 98 °F (36,6 °C).