

un cadavre stellaire ultradense, qui concentre une masse supérieure à celle du Soleil dans un diamètre d'une vingtaine de kilomètres seulement (on parle d'étoile à neutrons) et qui émet en outre un signal radio périodique. L'événement qui a engendré ce monstre, l'explosion en supernova d'une étoile de 20 masses solaires, a été bien plus violent que la fin d'une étoile de type solaire, et il est impensable que des planètes y aient survécu. Cette première planète extrasolaire a donc dû naître des cendres de l'explosion.

Un système qui renaît de ses cendres

Bien que les supernovae éjectent l'essentiel de leurs débris dans l'espace, une petite partie reste liée par la gravitation et retombe en formant un disque en orbite autour du résidu stellaire. Les disques sont les berceaux des planètes. On pense que les systèmes stellaires, dont le nôtre, naissent d'un nuage interstellaire amorphe de poussière et de gaz qui s'effondre sous sa propre gravité. La loi de conservation du moment cinétique empêche une partie du matériau de s'effondrer jusque sur l'étoile nouvellement née et le conduit à former un disque. Au sein de ce dernier, la poussière et le gaz s'accrètent pour former des planètes. Un processus comparable a pu se produire dans le disque résiduel de la supernova.

Les astronomes ont découvert la première planète, puis deux autres, autour du pulsar PSR 1257+12 en observant des écarts périodiques dans les impulsions radio qu'il émet. En effet, l'attraction gravitationnelle des planètes fait légèrement osciller l'étoile, et modifie ainsi la distance que doivent parcourir les impulsions. Malgré des recherches intensives, on ne connaît pas de système comparable autour d'un autre pulsar. Le pulsar PSR B1620-26 possède au moins une planète (détectée de la même façon). Mais elle est tellement loin de l'étoile qu'elle ne s'est sans doute pas formée à partir de débris : elle aurait été arrachée à une autre étoile.

En 2006 cependant, le télescope spatial *Spitzer* a découvert une émission infrarouge inattendue en provenance de l'étoile à neutrons 4U 0142+61. Elle pourrait provenir de la magnétosphère de l'étoile ou d'un disque circumstellaire. Cette étoile à neutrons s'est formée lors de l'explosion

Les astronomes détectent en général les planètes extrasolaires par leurs effets sur le spectre lumineux (méthode des vitesses radiales), la luminosité (méthode des transits) ou la position (astrométrie) de leur étoile hôte. Dans la plupart des cas évoqués dans cet article, les astronomes se focalisent sur un indice plus indirect : la présence d'un disque de poussière autour de l'étoile. Certaines étoiles nouvellement nées sont accompagnées d'un disque protoplanétaire, lieu supposé de formation des planètes. Les étoiles mûres arborent parfois un disque de débris, résultant de collisions ou d'évaporation de comètes et d'astéroïdes. Il signale la présence de planètes actuelles ou passées.

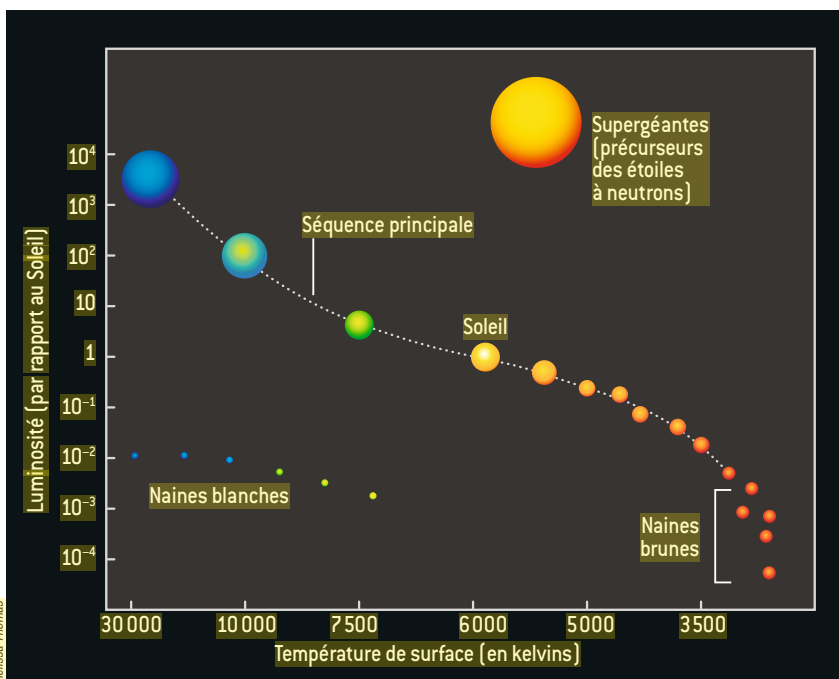
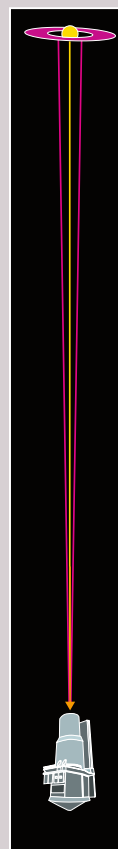
On distingue ces deux types de disques par la façon dont ils rayonnent dans l'infrarouge l'énergie de la lumière stellaire reçue. Le télescope spatial *Spitzer*, lancé en 2003, s'est révélé être une machine à découvrir des disques. Ses caméras infrarouges à grand champ cap-

turent en une seule image des centaines d'étoiles et repèrent celles ayant peut-être un disque et méritant une étude plus approfondie.

Spitzer s'inscrit dans le prolongement des télescopes spatiaux infrarouges tels que IRAS (*Infrared Astronomical Satellite*) dans les années 1980 et ISO (*Infrared Space Observatory*). Contrairement à IRAS, qui réalisait un relevé complet du ciel, *Spitzer* pointe des corps célestes particuliers pour les étudier avec précision.

Après plus de cinq ans d'observations, la réserve d'hélium liquide de *Spitzer* destinée à maintenir la température du télescope proche du zéro absolu est épuisée. *Spitzer* s'est réchauffé à une trentaine de kelvins, ce qui réduit considérablement son acuité infrarouge. Il pourra cependant continuer à scruter le ciel dans l'infrarouge proche jusqu'à mi-2011 au moins. L'Observatoire spatial *Herschel*, lancé en mai 2009, et le télescope spatial *James Webb*, dont le lancement est prévu en 2014, prendront le relais.

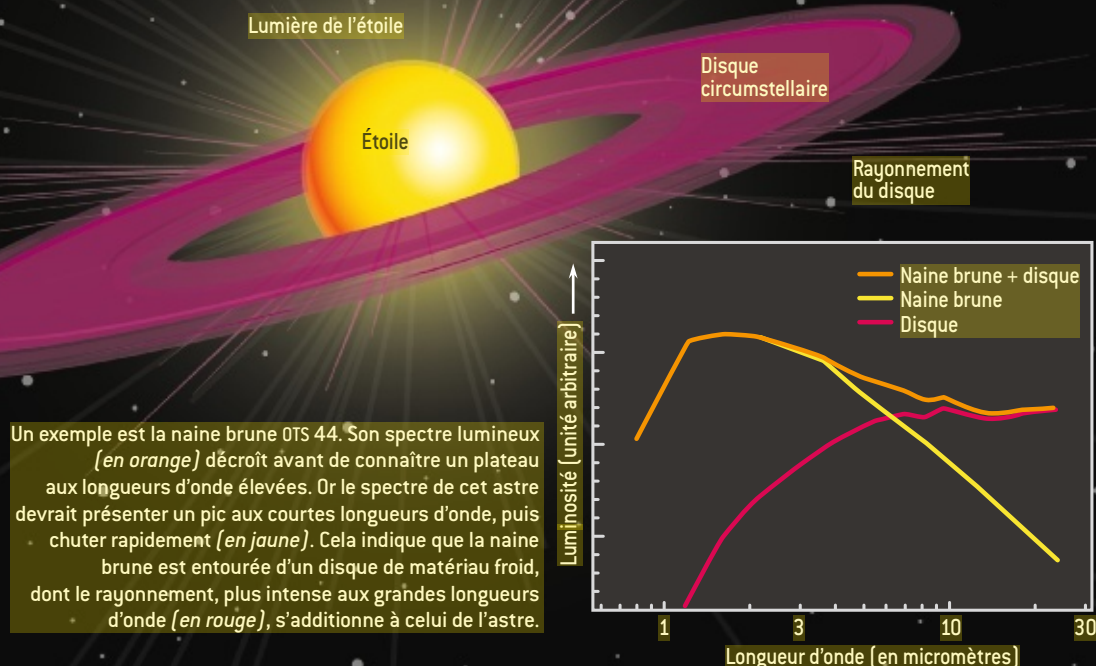
Même lorsque le système stellaire observé est trop lointain pour être spatialement résolu, le spectre lumineux révèle sa composition.



2. C'EST AUTOUR DES ÉTOILES ORDINAIRES, appartenant à la « séquence principale » (bande bien définie dans le diagramme liant la luminosité à la température de surface), que les astronomes ont d'abord recherché des systèmes planétaires semblables au nôtre. Mais il existe des systèmes autour d'objets hors de la séquence principale, telles les naines blanches et les naines brunes.

L'INFRAROUGE RÉVÈLE LES DISQUES ABRITANT LES PLANÈTES

Un disque circumstellaire de poussière et de gaz, comme celui qui a donné naissance aux planètes du Système solaire, absorbe la lumière de l'étoile et réémet une partie de l'énergie sous forme de rayonnement infrarouge. La lumière que nous observons est la somme de ces deux composantes.



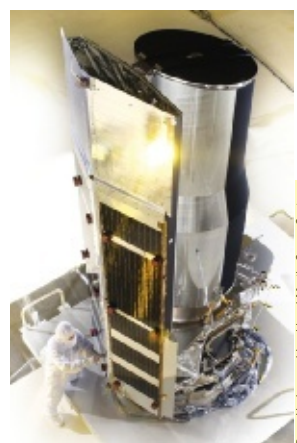
d'une supernova il y a quelque 100 000 ans, et il faut de l'ordre d'un million d'années pour que les planètes s'agglomèrent. Si ce rayonnement infrarouge signale la présence d'un disque de débris, alors ce système pourrait un jour ressembler à celui du pulsar PSR 1257+12.

Des astéroïdes au menu

De nombreuses naines blanches ont aussi des disques, mais d'un type un peu différent : ils trahissent la présence effective de corps en orbite et pas seulement la possibilité d'en former. Comme avec l'étoile 4U 0142+61, l'indice est un excès d'émission infrarouge. En 1987, l'IRTF (*Infrared Telescope Facility*), au sommet du Mauna Kea, à Hawaï, a détecté un excès de lumière infrarouge provenant de la naine blanche G29-38. Le spectre de ce surplus de rayonnement était celui d'un corps ayant une température de 1 200 kelvins, beaucoup plus froid que la surface de l'étoile, à 12 000 kelvins. Les astronomes

ont d'abord pensé qu'une autre étoile plus froide était en orbite autour de la naine blanche. Mais en 1990, ils ont montré que l'émission infrarouge variait à l'unisson avec la luminosité de l'étoile, indiquant un rayonnement réfléchi ou réémis. L'explication la plus vraisemblable est la présence d'un disque circumstellaire chauffé par la naine blanche.

L'étoile G29-38 présente une autre propriété étrange : d'après son spectre lumineux, ses couches externes contiennent des éléments lourds tels que du calcium et du fer. C'est surprenant, car le champ gravitationnel à la surface d'une naine blanche est si intense que ces éléments devraient sombrer dans les profondeurs. En 2003, l'un d'entre nous (M. Jura) a proposé une explication simple à la fois pour l'excès d'infrarouge et pour les éléments lourds : la naine blanche a récemment déchiqueté un astéroïde qui s'était aventuré dans son intense champ gravitationnel. Une cascade de collisions a réduit les débris en un disque de poussière, qui est en partie tombé à la surface de l'étoile.



3. LE TÉLESCOPE SPATIAL
Spitzer, ici en construction, est le pendant pour l'infrarouge du télescope spatial Hubble.

Des observations ont depuis confirmé ce scénario. Des télescopes au sol et le télescope spatial *Spitzer* ont permis d'identifier une quinzaine de naines blanches présentant des excès d'infrarouge et des

tils tels que le carbone et le sodium, par rapport aux éléments plus stables sous forme solide, tels le silicium, le fer et le magnésium. Cette répartition correspond à celle des astéroïdes et des planètes

notée UA) et ne sont pas plus massifs qu'un astéroïde de 30 kilomètres de diamètre, ce qui est en accord avec l'hypothèse qu'ils proviennent de la désintégration d'un tel objet. Ce ne sont pas des lieux de formation de planètes, mais plutôt des indicateurs que du matériau planétaire a survécu à la mort de l'étoile. Des calculs théoriques suggèrent que des astéroïdes et des planètes de type terrestre peuvent survivre à la transformation de leur étoile en géante rouge s'ils gravitent à plus d'une unité astronomique. Quand notre Soleil mourra, par exemple, Mars devrait s'en sortir, alors que le destin de la Terre est incertain.

La naine blanche WD 2226-210 nous donne une idée des régions d'un système planétaire qui pourraient survivre à la fin de l'étoile. Cette naine blanche est toute récente, si bien que les couches externes éjectées par l'étoile de type solaire initiale sont encore visibles sous la forme d'une des nébuleuses planétaires les plus

LES DISQUES OBSERVÉS AUTOUR DES NAINES BLANCHES sont sans doute des astéroïdes réduits en poussière à la suite d'un passage trop près de l'étoile.

anomalies en éléments lourds comparables. Pour G29-38 et sept autres étoiles, *Spitzer* a même identifié l'émission infrarouge de silicates présents dans les disques. Ces silicates ressemblent à la poussière dans le Système solaire et sont très différents de la poussière de l'espace interstellaire. De plus, les éléments lourds ne se trouvent pas en quantités égales dans les couches externes de ces naines blanches. Elles sont déficientes en éléments vola-

rocheuses du Système solaire. Tous ces indices étayent l'hypothèse selon laquelle les disques observés sont des astéroïdes réduits en poussière.

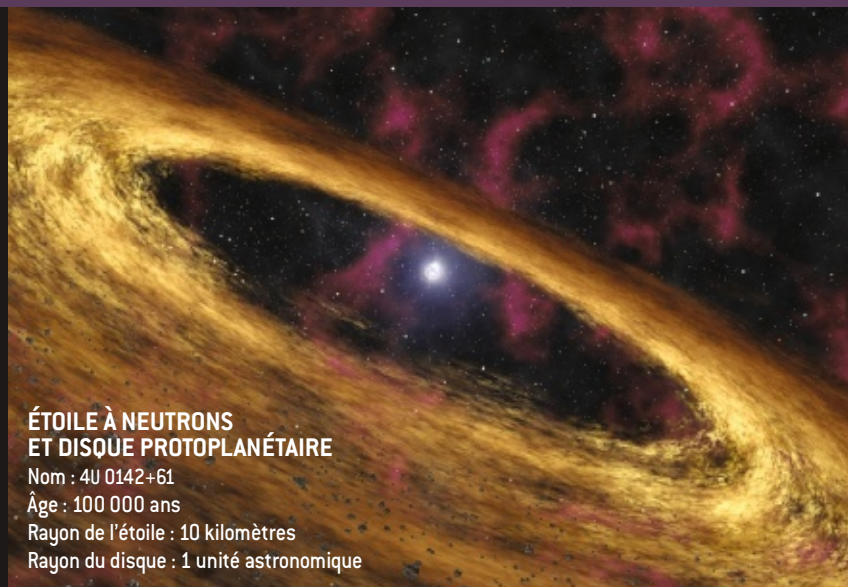
Les disques des naines blanches sont beaucoup plus petits que ceux qui donnent naissance aux planètes autour des jeunes étoiles de type solaire. À en juger par l'émission infrarouge, ils ne s'étendent que sur 0,01 unité astronomique (la distance moyenne du Soleil à la Terre,

LES SYSTÈMES AUTOUR D'ÉTOILES À NEUTRONS

Les étoiles à neutrons, vestiges d'étoiles massives ayant explosé en supernova, sont sans doute les hôtes les plus inattendus pour des systèmes planétaires. L'étoile à neutrons 4U 0142+61, âgée de 100 000 ans, est ceinturée d'un disque de débris stellaires. Ces débris pourraient être en train de s'agréger en briques planétaires (*vue d'artiste à droite*). La présence de planètes a été confirmée autour d'une autre étoile à neutrons, PSR 1215+12. Ses impulsions radio, normalement périodiques, sont légèrement décalées dans le temps (*ci-dessous à droite*), indiquant que l'étoile est perturbée par trois corps en orbite (*à gauche*).

ÉTOILE À NEUTRONS ET DISQUE PROTOPLANÉTAIRE

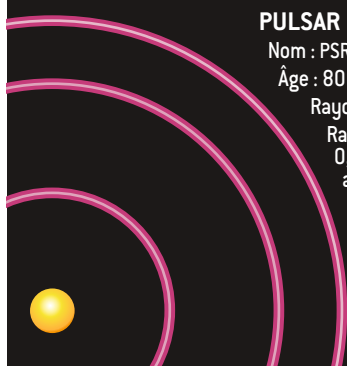
Nom : 4U 0142+61
Âge : 100 000 ans
Rayon de l'étoile : 10 kilomètres
Rayon du disque : 1 unité astronomique



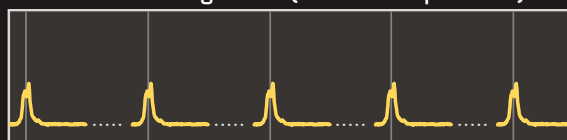
NASA/JPL-CALTECH/R. HURT Spitzer Science Center

PULSAR ET PLANÈTES

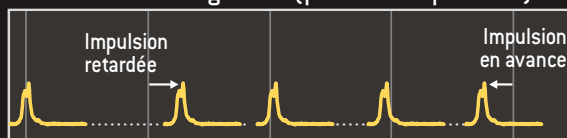
Nom : PSR 1257+12
Âge : 800 millions d'années
Rayon de l'étoile : 10 kilomètres
Rayon des orbites planétaires : 0,19, 0,366 et 0,46 unités astronomiques
Masses des planètes : 0,02, 4,3 et 3,9 masses terrestres



Émissions radio régulières (absence de planètes)



Émissions radio irrégulières (présence de planètes)



Melissa Thomas