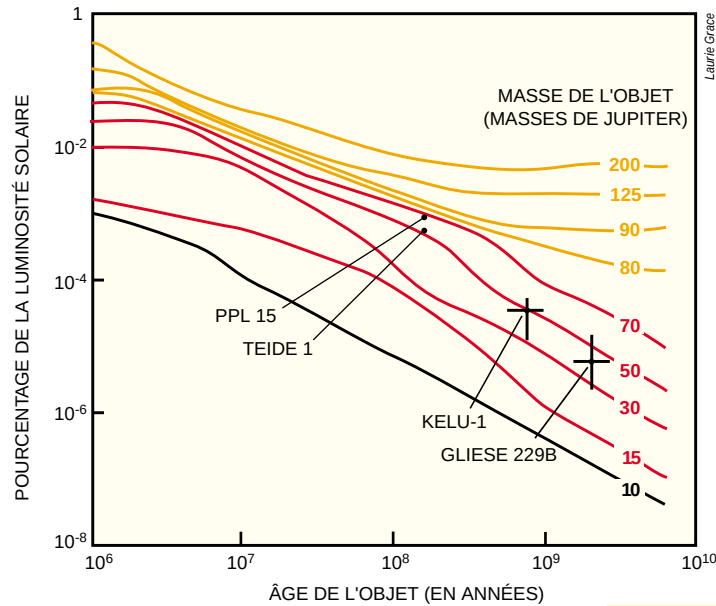


de la lumière de l'étoile principale, ce qui permettait de voir plus facilement un éventuel compagnon. En 1993, ils avaient repéré plusieurs candidates naines brunes. Afin de s'assurer que ces objets n'étaient pas des étoiles de l'arrière-plan, ils ont attendu un an, puis ils ont pris de nouveaux clichés. Comme ces objets sont relativement proches du Système solaire, leur mouvement dans la Galaxie se distingue de celui des étoiles de l'arrière-plan. L'un des compagnons ainsi étudié était 1 000 fois moins brillant que l'étoile principale, Gliese 229A. L'étoile principale étant déjà de faible luminosité, la luminosité du compagnon était nécessairement bien inférieure à celle de l'étoile la moins brillante possible. Avant d'annoncer leur découverte, le groupe a attendu d'obtenir un spectre infrarouge de l'objet.

La découverte de Gliese 229B, le compagnon naine brune de Gliese 229A, fut annoncée en octobre 1995, au cours d'une conférence à Cambridge. Très peu lumineux, Gliese 229B était nettement moins massif qu'une étoile et, surtout, l'analyse de son spectre a révélé qu'il contenait du méthane. On trouve couramment du méthane dans l'atmosphère des planètes géantes, mais les étoiles sont toutes trop chaudes pour qu'il s'y forme. Sa présence en quantité notable dans Gliese 229B prouvait que cet objet n'est pas une étoile.

Au cours de la même conférence, le groupe des Canaries a annoncé l'observation de plusieurs nouvelles candidates naines brunes dans l'amas des Pléiades : l'idée que ces objets soient rares s'évanouissait. En outre, Michel Mayor et ses collègues de l'Observatoire de Genève ont annoncé la découverte de la première planète extrasolaire, une géante gazeuse en orbite autour de l'étoile 51 de la constellation de Pégase. La même matinée, les astronomes apprenaient que la recherche, longtemps infructueuse, d'objets «substellaires» était enfin couronnée de multiples succès.

La plupart des astronomes considèrent Gliese 229B comme la première



4. L'ÉVOLUTION DE LA LUMINOSITÉ des étoiles peu massives (courbes jaunes), des naines brunes (courbes rouges) et des planètes (courbe noire) montre que seules les étoiles sont assez massives pour avoir une luminosité stable. La lumière émise par les naines brunes et par les planètes décroît quand elles vieillissent. Les données relatives aux naines brunes (points et croix noirs) indiquent leur âge et leur masse.

naine brune incontestable à avoir été découverte, car elle est un million de fois moins brillante que le Soleil, et sa température de surface est inférieure à 1 000 kelvins (c'est-à-dire très inférieure à la température minimale de 1 800 kelvins environ que produirait la moins brillante des étoiles possible). Elle a atteint cet état parce qu'elle est vieille de quelques milliards d'années. Nous ne connaissons pas son âge précis, et nous ne pouvons donc pas calculer précisément sa masse, qui est probablement comprise entre 30 et 40 fois la masse de Jupiter. PPL 15, Teide 1 et Calar 3 sont plus massives (de 50 à 70 masses de Jupiter) et bien plus chaudes (avec des températures de surface comprises entre 2 600 et 2 800 kelvins), principalement en raison de leur plus jeune âge.

Une fois les méthodes de détection des naines brunes mises au point, les découvertes se sont enchaînées. Plusieurs groupes se sont à nouveau intéressés aux Pléiades : l'équipe espagnole y a découvert une naine brune dont la masse est à peine 35 fois celle de Jupiter ; c'est la plus légère des naines brunes détectées dans cet amas. Plus intéressant encore, ce même groupe a estimé le nombre de naines brunes des Pléiades en comptant les candidates les plus vraisemblables sur une petite région et en extrapolant le résultat à l'ensemble de l'amas : le nombre de naines brunes semble être du même ordre de grandeur

que celui des étoiles dans les Pléiades ! Si ce résultat est généralisable, notre Galaxie contient à elle seule environ 100 milliards de naines brunes. Toutefois, les naines brunes ne sont pas le principal constituant de la masse de l'Univers : légères, elles auraient dû être au moins dix fois plus nombreuses que les étoiles (on estime que la matière noire est dix fois plus massive que la matière visible, étoiles, galaxies, etc.). Les naines brunes ne résolvent pas le mystère de la matière noire.

Quel est l'éventail des masses des naines brunes ? Quelle est la limite inférieure de masse pour une naine brune ? Est-elle égale à la limite supérieure de masse des planètes (environ 13 fois la masse de Jupiter) ? Ou bien une différence de masse entre les naines brunes et les planètes résulte-t-elle de mécanismes de formation différents ? On cherche la réponse à ces questions en analysant les amas stellaires en formation, où les naines brunes très légères émettent assez pour être vues. Le recensement de la région du Taureau et celui de la région d'Orion a mis en évidence des objets dont la masse semble être à peine supérieure à 13 fois celle de Jupiter : les masses des naines brunes semblent très variées (voir l'encadré de la page 59).

En 1997, le groupe de M. Mayor a détecté une dizaine de naines brunes probables en cherchant des systèmes binaires associés à 600 étoiles semblables au Soleil. Néanmoins, l'idée d'un «désert de naines brunes» subsistait, car ces études du décalage Doppler révélaient bien moins de naines brunes que de planètes, alors que les naines brunes sont en principe plus faciles à trouver par cette méthode. Récemment, une analyse minutieuse des données du satellite d'astrométrie *Hipparcos* (qui a mesuré précisément la position des étoiles) a montré que la moitié au moins des candidates naines brunes de M. Mayor sont des étoiles légères : le désert des naines brunes s'est encore vidé. La suite de l'étude menée par G. Marcy sur un échantillon d'étoiles de type solaire

encore plus grand a confirmé l'absence de compagnons naines brunes pour de telles étoiles.

Néanmoins, les naines brunes pourraient n'être absentes qu'autour des étoiles massives. En 1998, R. Rebolo et ses collègues en ont découvert une en

orbite autour de la jeune étoile G196-3. Malgré son jeune âge, cette naine brune est déjà assez froide, ce qui signifie qu'elle doit être légère, de l'ordre de 20 fois la masse de Jupiter. Plusieurs naines brunes ont également été détectées autour d'étoiles en formation. Un

système binaire constitué de deux naines brunes a même été identifié. Avec E. Martín, j'ai déterminé que la naine brune PPl 15 des Pléiades est en réalité une paire de deux naines brunes rapprochées, dont la période orbitale est de six ans. Puis, avec l'astronome

Le cycle de vie des naines brunes

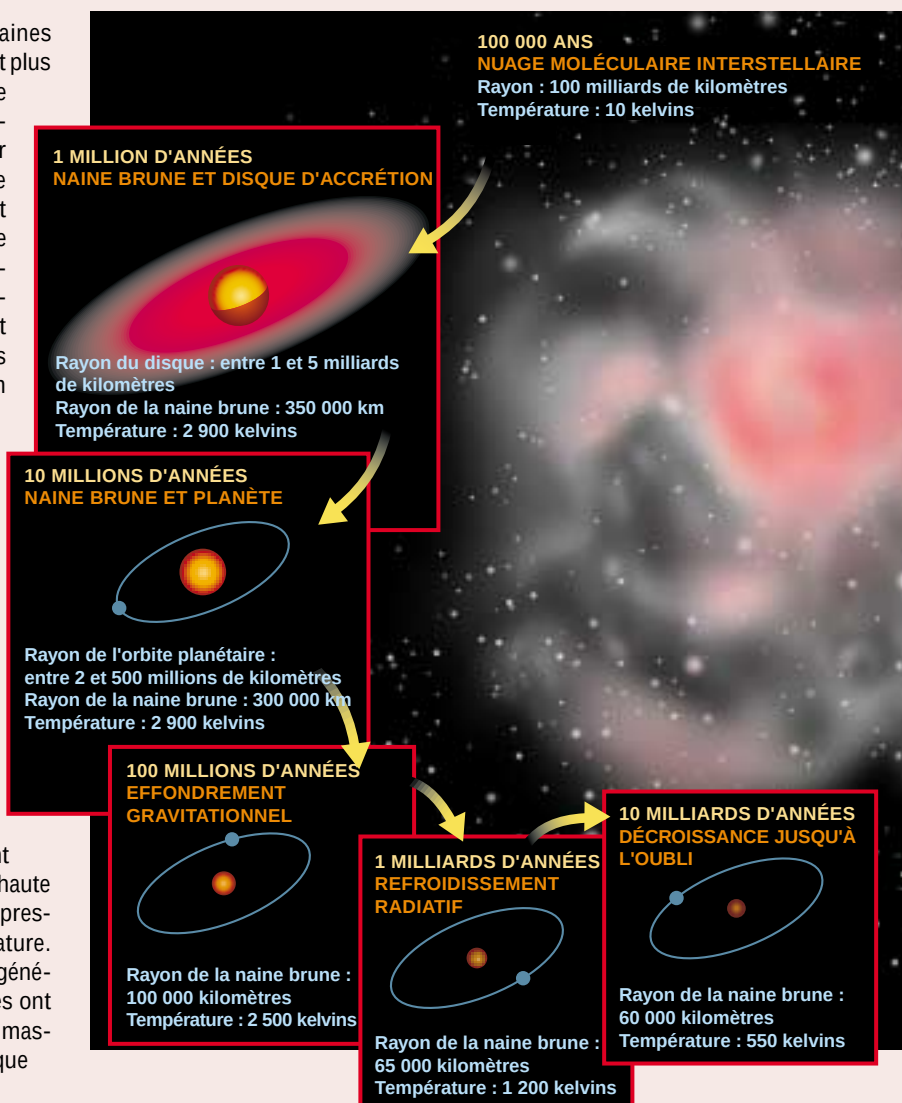
Les étoiles et les naines brunes ont une genèse similaire : elles résultent initialement de l'effondrement gravitationnel de nuages de gaz et de poussières interstellaires. Ces nuages, constitués principalement d'hydrogène et d'hélium, contiennent également de petites quantités de deutérium et de lithium, qui sont les sous-produits des réactions nucléaires ayant eu lieu quelques minutes après le Big Bang.

Quand les jeunes étoiles et les naines brunes se contractent, leur cœur devient plus chaud et plus dense, et les noyaux de deutérium fusionnent en noyaux d'hélium 3. La fusion du deutérium peut avoir lieu dans les naines brunes, car elle nécessite une température inférieure (et donc une masse plus faible) que celle de la fusion de l'hydrogène. L'énergie libérée par ces réactions arrête momentanément la contraction gravitationnelle et elle rend les objets brillants. Après quelques millions d'années, le deutérium est épuisé, et la contraction reprend. La fusion du lithium se produit alors dans les étoiles et dans les naines brunes plus de 60 fois plus massives que Jupiter.

Au cours de la contraction d'une naine brune, la pression thermique augmente dans le cœur et s'oppose à l'effondrement. Tous les électrons sont éjectés de leur noyau. Quand le cœur est très dense, tous les états quantiques d'énergie inférieure sont occupés ; comme deux électrons ne peuvent occuper le même état quantique (c'est le principe d'exclusion de Pauli), de nombreux électrons sont contraints d'occuper des états de très haute énergie. Ce phénomène engendre une pression qui ne dépend pas de la température. Les objets dans un tel état sont dits dégénérés. De ce fait, toutes les naines brunes ont à peu près la taille de Jupiter, les plus massives étant simplement plus denses que les autres.

Le cœur des étoiles n'est pas dégénéré, car la fusion de l'hydrogène fournit la pression qui soutient l'étoile contre sa propre gravité. Lorsque la fusion est bien amorcée, l'étoile cesse de se contracter et atteint un équilibre, avec une taille, une luminosité et une température stables. Dans les naines brunes massives, la fusion d'hydrogène commence, mais s'interrompt rapidement. Tandis que la pression de dégénérescence des naines brunes ralentit leur effondrement, leur luminosité, liée à la contraction gravi-

tationnelle, décroît. Bien que les étoiles de très faible masse puissent briller pendant des milliers de milliards d'années, les naines brunes s'éteignent progressivement, de sorte que plus elles sont âgées, plus il est difficile de les détecter. Dans un avenir très lointain, lorsque toutes les étoiles auront fini de brûler, les naines brunes seront le principal réservoir d'hydrogène de l'Univers.



UNE NAINE BRUNE NAÎT de la contraction d'un immense nuage de gaz et de poussières. Après un million d'années, c'est une boule de gaz rougeoyante, peut-être entourée d'un disque d'accrétion, qui pourrait engendrer une planète en orbite autour de la naine brune (on n'a pas encore détecté de telles planètes ; leur existence n'est qu'hypothétique). Progressivement, les naines brunes se contractent et se refroidissent. Les rayons et les températures de surface indiqués ici correspondent à un objet 40 fois plus massif que Jupiter.