Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 13 (1968)
Heft: 105

Artikel: Les plus jeunes étoiles
Autor: Herbig, George H.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-899961

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Les plus jeunes étoiles

Les variables T Tauri sont des étoiles très instables, que l'on trouve dans des régions riches en poussières et en gaz. Leur comportement donne à penser qu'elles se sont formées récemment par condensation de la matière interstellaire.

par George H. Herbig, traduction E. Antonini*)

Die jüngsten Sterne

Seit wir erkannt haben, dass die Sterne davon leben, dass sie Wasserstoff in Helium verwandeln und die bei diesem Prozess freiwerdende Energie ausstrahlen, wissen wir auch, dass Sterne hoher Leuchtkraft und grosser Masse nur wenige Millionen Jahre alt sein können. Sterne entstehen und vergehen, und aus der beobachteten Zahl der absolut hellsten Sterne können wir abschätzen, dass in unserm Milchstrassensystem alle 500 bis 1000 Jahre solch ein Stern hoher Leuchtkraft entstehen muss. Viel langsamer geht dieser Vorgang bei den Sternen kleinerer Masse vonstatten, die andererseits wesentlich zahlreicher sind als die Sterne grosser Masse, auch sie entstehen und vergehen, aber in einer weit gedehnteren Zeitskala, und alle Sterne bilden sich aus ungeheuren Wolken von Gas und Staub, wie sie längs der Spiralarme unseres Milchstrassensystems in grosser Zahl vorhanden sind.

In derartigen Wolken entdeckte man einst Veränderliche einer besonderen Art, T-Tauri-Sterne genannt, die nach dem spektralen Befund – dem Kontinuum mit den Absorptionslinien überlagern sich helle und breite Emissionslinien – Sterne sind, die von einer sehr ausgedehnten Chromosphäre umhüllt werden, einer Chromosphäre, die ähnlich ist der unserer Sonne, nur viel, viel mächtiger. Grösse und Oberflächenhelligkeit dieser Sterne verraten uns ferner, dass sie noch sehr jung sein müssen, dass sie vor nicht zu langer Zeit in jenen Wolken entstanden sind, in denen sie sich jetzt noch befinden.

Wir verstehen heute den Bildungsprozess eines Sternes ganz gut. Während sich zuerst die Wolkenmaterie unter der Wirkung der Gravitation relativ langsam zusammenballt, kommt es nach einiger Zeit zu physikalischen Prozessen, die zu einer Dissoziation von Molekülen und einer Ionisation von Atomen und damit zu einer Verminderung des Gasdruckes führen, wodurch in überraschend kurzer Zeit ein Gravitationskollaps bewirkt wird, die Materie fällt äusserst rasch auf das Gravitationszentrum zu, erst durch wachsenden Druck, durch wachsende Temperatur kommt dies zum Stillstand, aber nun ist der Stern geboren, es ist ein sichtbarer Stern entstanden. Im Jahre 1936 ist in FU Orionis tatsächlich die Geburt eines Sterns beobachtet worden. Weitere langsame Kontraktion führt bei gleichbleibender Oberflächentemperatur zu einer Verringerung der Leuchtkraft, aber zu einer Erhöhung der Temperatur im Innern, und wenn diese im Sternzentrum etwa 10 Millionen Grad erreicht hat, dann setzt hier die Umwandlung von Wasserstoff in Helium ein, nun wird die Kontraktion allmählich abgebremst, und der Stern vermag seine Ausstrahlung durch die aus dem Kernumwandlungsprozess gewonnene Energie zu decken.

Der Stern hat jetzt einen stabilen Zustand erreicht, und im bekannten Hertzsprung-Russel-Diagramm befindet er sich nun auf der Hauptreihe und bleibt hier die längste Zeit seines Lebens, da dieser Prozess sehr lange andauert. Wie rasch der Stern die Phase der Kontraktion durchläuft und wie lange er auf der Hauptreihe verweilt, hängt von seiner Masse ab. Wir können heute diese Zeiten recht genau berechnen und können umgekehrt aus dem Ort des Sterns im Hertzsprung-Russel-Diagramm sein Alter entnehmen. Daher wissen wir auch, dass die T-Tauri-Sterne noch nicht die Hauptreihe erreicht haben, sie sind erst kürzlich geboren, sie sind noch im Zustand der Kontraktion.

Das Studium der Spektren der T-Tauri-Sterne enthüllt noch manche Besonderheiten. Starke Linienverschiebungen zeigen, dass diese Sterne laufend Materie an den Raum abgeben; man kann ausrechnen, dass sie einen merklichen Teil ihrer ursprünglichen Masse verloren haben, bis sie als stabile Sterne auf der Hauptreihe angekommen sind. – Interessant sind auch die Helligkeitsschwankungen; im allgemeinen sind sie ganz unregelmässig, in einigen Fällen konnte man aber auch periodische Helligkeitsänderungen erkennen, mit Perioden von einigen Tagen. Man kann dies durch eine Rotation des Sterns erklären; die Sterne erscheinen uns heller, wenn sie uns ihre aktive Seite zuwenden, und diese Rotationsperioden stimmen auch gut überein mit den aus Linienverbreiterungen erschlossenen Rotationsgeschwindigkeiten. – Auffallend ist ferner, dass diese Sterne 80 bis 400 mal mehr Lithium enthalten, als wir in der Sonnenatmosphäre finden.

Einen schwachen Abglanz der Besonderheiten der T-Tauri-Sterne, aktive Chromosphäre, Abgabe von Materie an den Raum, beobachten wir auch bei unserer Sonne und noch mehr bei Sternen, die jünger sind als unsere Sonne, doch beschränkt es sich hier auf relativ kleine Oberflächengebiete, aktive Stellen, die, wie wir wissen, von starken lokalen Magnetfeldern beherrscht werden. Die Suche nach Magnetfeldern auf T-Tauri-Sternen hat leider noch zu keinem Erfolg geführt, doch mag dieser negative Befund daran liegen, dass diese Magnetfelder eben nur in kleinen Gebieten vorhanden sind, und da wir bei den Sternen ja nur das Gesamtlicht von der ganzen uns zugewandten Oberfläche empfangen, verwischen sich diese lokalen Effekte.

Dass die Sonne heute wenig Lithium enthält, ist dadurch zu verstehen, dass hier Lithium in grösserer Tiefe, in der Konvektionszone, durch Protonen-Stösse in Helium verwandelt wurde. Gewisse Steinmeteoriten weisen einen höheren Lithiumgehalt auf; man kann annehmen, dass sich diese aus Kondensationen in den äusseren Hüllen unserer Sonne gebildet haben, als sie noch viel grösser war, also damals enthielt unsere Sonne auch noch mehr Lithium. – In den grossen Staubwolken findet man häufig kleine nebelartige Formationen, Herbig-Haro-Objekte genannt, und zwar gerade in solchen Gebieten, wo auch T-Tauri-Sterne vorhanden sind; sicherlich ist die Vermutung nicht unberechtigt, dass diese die Vorstufen des Prozesses darstellen, der dann einst zur Sternbildung führt.

Ein interessanter Befund ist schliesslich noch, dass die T-Tauri-Sterne mehr Infrarotstrahlung emittieren, als ihrer Oberflächentemperatur entspricht. Man kann sich vorstellen, dass diese Infrarotstrahlung aus grossen Materiekonzentrationen von der Temperatur von 700 Grad stammt, die nahe beim Stern sind; vielleicht entstehen einst aus diesen Wolken Planeten. – Kürzlich entdeckten Becklin und Neugebauer ein Objekt, das im gewöhnlichen Licht nicht sichtbar ist, aber viel Infrarot-Strahlung aussendet; man kann es erklären als einen kühlen dunklen Körper, der etwa 1500 mal grösser ist als unsere Sonne, und gemäss seiner Grösse könnte es ein werdender Stern sein, aber vor dem Gravitationskollaps, vor der Geburt. Stimmt diese Idee, dann sollte man in den nächsten 10 bis 20 Jahren dort die Geburt eines Sterns erwarten können. H. Müller

Il y a moins d'un quart de siècle encore, les étoiles apparaissaient aux astronomes comme une collection dépareillée de types divers, entre lesquels il était difficile de trouver des relations systématiques. Le ciel était peuplé d'une diversité presque zoologique d'objets, dont les caractéristiques pouvaient être mesurées et décrites, mais difficilement comprises. Aujourd'hui, bien que certains phénomènes demeurent mystérieux et que de nouveaux modèles apparaissent constam-

*) avec l'aimable autorisation de l'auteur et de l'éditeur. Copyright © 1967 by Scientific American, Inc. All rights reserved.

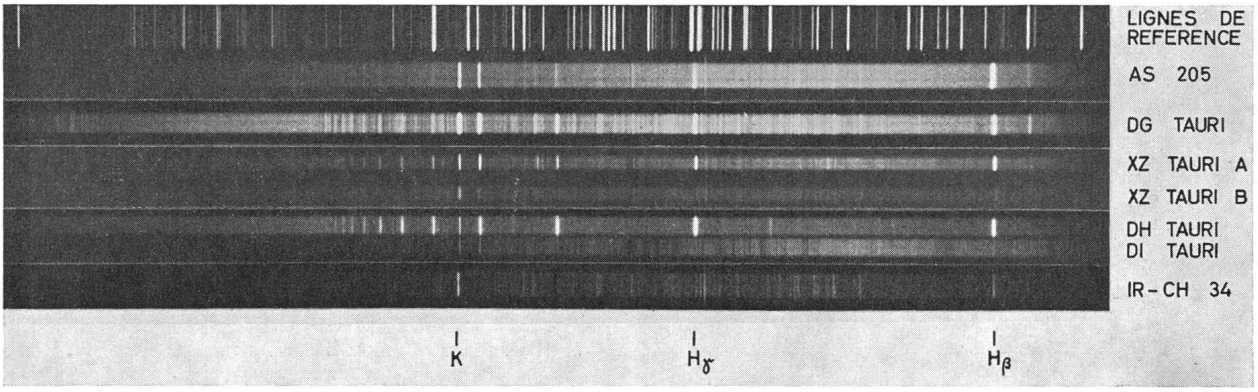


Figure 1: Spectres d'un certain nombre d'étoiles T Tauri, montrant les raies brillantes d'émission produites dans les régions actives de leur chromosphère. En un cas (DI Tauri) les raies d'émission sont faibles, et les raies sombres d'absorption de l'étoile sous-jacente sont visibles. Les raies Hβ et Hγ sont produites par l'hydrogène. La raie «K» est produite par le calcium ionisé. Dans de nombreux spectres, quelques raies brillantes étrangères aux étoiles traversent le spectrogramme du haut en bas (par ex. juste à droite de la raie Hγ): elles sont dues à l'illumination du ciel nocturne au-dessus de l'Observatoire Lick par les lampes aux vapeurs de mercure éclairant les rues de la ville de San José. Les raies de référence placées en haut sont produites par une lampe à l'hélium-argon située dans le spectroscope.

ment, le chaos apparent du ciel est en train de s'ordonner. Nous sommes enfin en possession d'une philosophie de l'évolution stellaire clairement formulée, qui s'insère dans tous les aspects de l'astronomie et commence à ajuster les éléments structuraux de l'Univers en un tout cohérent.

La base permettant de comprendre la nature et l'histoire des étoiles naquit de la découverte, il y a à peine une trentaine d'années, de l'origine de leur énergie: le procédé thermonucléaire par lequel elles «brûlent» leur hydrogène et le convertissent en hélium. L'énergie produite est de 6×10^{18} ergs par gramme d'hydrogène converti. Sur la base du débit connu d'énergie de notre Soleil, cela signifie qu'il doit brûler de l'hydrogène au taux de 700 millions de tonnes par seconde. A ce taux, la réserve d'hydrogène du Soleil lui permettra de vivre durant environ 10 milliards d'années. Lorsque nous considérons des étoiles plus massives, nous en arrivons à une conclusion assez saisissante au sujet de leur durée de vie. Les étoiles les plus massives (50 à 100 fois la masse du Soleil) ont des luminosités indiquant qu'elles brûlent leur hydrogène un million de fois plus vite que le Soleil. Bien plus, dans les étoiles de cette taille, la moitié seulement de la réserve d'hydrogène est utilisable dans le four nucléaire. Le résultat inexorable est que ces étoiles doivent réellement se consumer en peu de millions d'années, et disparaître ensuite de la scène en un temps relativement bref.

Habitués que nous sommes à considérer les étoiles comme des objets permanents, il est surprenant de réaliser que les étoiles actuellement les plus lumineuses – Rigel d'Orion par exemple – ne doivent pas avoir brillé du même éclat lorsque les premiers hommes apparurent sur la Terre.

Les conséquences d'une si courte vie stellaire sont encore plus frappantes. Si la population d'étoiles de haute luminosité de notre Galaxie demeure à peu près constante, ainsi que cela semble être le cas actuellement, les étoiles âgées doivent alors être continuellement remplacées par de nouvelles étoiles. En considérant qu'il y a environ 6000 étoiles très lumineuses dans la Galaxie, de tels remplacements doivent se produire à un train qu'en termes astronomiques on pourrait presque qualifier de fiévreux – environ une étoile brillante nouvelle en moyenne doit apparaître quelque part dans la Galaxie tous les 500 à 1000 ans. En bref, la formation d'étoiles nouvelles doit se produire *actuellement* et pas si loin de nous.

Durant leur courte vie, les jeunes étoiles ne peuvent guère s'être beaucoup éloignées de leur lieu d'origine – probablement pas plus d'une centaine d'années-lumière dans le cas d'une étoile telle que Rigel.

Le raisonnement que nous venons de tenir ne s'applique pas naturellement aux seules étoiles massives de haute luminosité, les chiffres qui les concernent sont simplement plus élevés. Toutes les étoiles plus petites, bien qu'elles vivent longtemps, ont une durée de vie finie, et doivent aussi mourir. La formation d'étoiles doit se faire aujourd'hui à tous les échelons de masse, en raison du fait observé que des étoiles lumineuses se rencontrent fréquemment au milieu d'objets moins massifs mais semblables physiquement et formés environ en même temps, toujours dans une région remplie de poussière interstellaire.

D'où vient la matière première qui forme continuellement de telles étoiles massives ou qui produit un système tel que les Pléiades, amas de quelque 300 étoiles avec une masse totale d'environ 500 fois celle du Soleil? Les seules sources connues qui peuvent fournir une si énorme quantité de matière sont les nuages diffus de poussière et de gaz qui se situent le long des bras spiraux de notre Galaxie. (Une autre possibilité a été suggérée: il pourrait y avoir dans la Galaxie des corps très denses qui se divisent spontanément et dont les fragments deviennent des étoiles.

Mais il n'y a aucune indication de l'existence de tels corps, et il y a d'autres objections sérieuses à cette idée.)

La question de la formation de nouvelles étoiles nous amène à l'objet particulier de cette étude. Au début de 1940, ALFRED H. JOY, le distingué spectroscopiste des Observatoires du Mont Wilson et du Mont Palomar, commença une étude systématique de certaines étoiles variables qui présentaient des propriétés assez particulières. JOY les nomma les étoiles T Tauri, d'après l'étoile de ce type qui était connue depuis presque un siècle. Une de leurs particularités était qu'à l'examen au spectroscope elles montraient un spectre dominé par des raies d'émission très intenses (voir *fig. 1*). Habituellement, dans le spectre ordinaire des étoiles normales, on ne repère que les raies sombres d'absorption correspondant aux longueurs d'onde de la lumière de l'étoile absorbées par les gaz plus froids de son atmosphère extérieure. Nous voyons des raies d'émission dans le spectre du Soleil, par exemple, lorsque, lors d'une éclipse totale, la Lune couvre la brillante surface du Soleil, et nous permet de détecter la lumière d'un bord étroit de l'atmosphère solaire qui n'est pas caché par la Lune. Cette frange extérieure de l'atmosphère solaire a été nommée la «chromosphère» par les premiers observateurs d'éclipses. Or, l'étrangeté des étoiles T Tauri est qu'elles présentent le même phénomène, mais très fortement amplifié. Leurs chromosphères sont d'épaisses régions extrêmement actives dont le débit énergétique est souvent plus élevé que celui du corps même de l'étoile; en fait, l'émission est souvent si puissante qu'elle masque le spectre ordinaire de raies d'absorption.

Les étoiles T Tauri ont d'autres propriétés étranges que nous allons étudier rapidement, mais auparavant nous noterons un fait particulier qui peut être considéré comme un indice que ces étoiles doivent être très jeunes: elles sont toutes situées au milieu de nuages de poussière interstellaire; elles montrent une préférence frappante pour les régions de la Galaxie qui sont remplies de poussière, et qui, comme nous l'avons vu, sont les seuls endroits où la matière première pour la formation d'étoiles se trouve en quantité (v. *figures 2* et *3*). Lorsque JOY présenta son premier rapport d'observation de ces étoiles dans l'Astrophysical Journal, en 1945, cela ne provoqua aucune réaction enthousiaste de la part du monde astronomique. L'astronomie n'était simplement pas prête à apprécier la signification de cette découverte. Il est juste de dire, cependant, que dix ans plus tard, il eût été nécessaire d'inventer les étoiles T Tauri si JOY ne les avait pas déjà découvertes, car dans l'intervalle il était devenu clair, non seulement que la formation d'étoiles nouvelles devait être un phénomène relativement commun dans notre voisinage, mais aussi que le étoiles T Tauri remplissaient toutes les conditions exigées pour des étoiles très jeunes.

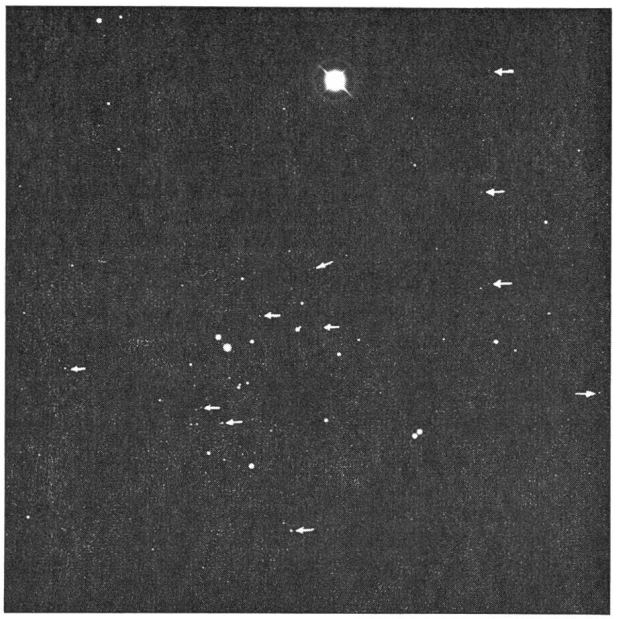


Figure 2: Le très jeune amas IC 348, qui contient un certain nombre d'étoiles T Tauri désignées par des flèches. Cette photographie prise dans l'infra-rouge supprime la lumière bleue diffusée par la poussière entourant les étoiles brillantes de l'amas, et fait aussi ressortir maintes étoiles faibles et froides.

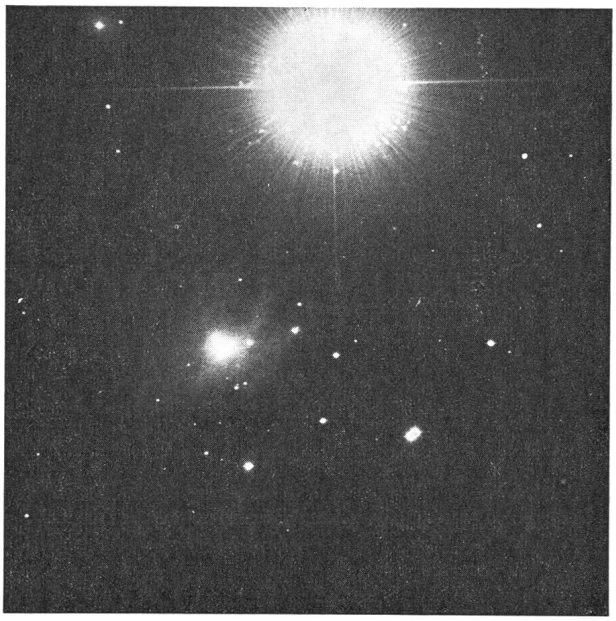


Figure 3: Le même amas IC 348 apparaît ici en lumière bleue. La très brillante étoile du haut, Omicron Persei, était beaucoup moins remarquable en lumière rouge. IC 348 fait partie de l'amas Zêta Persei, qui n'est âgé que de quelques millions d'années.

Pour commencer, les étoiles T Tauri se trouvent précisément dans les régions (et dans ces régions seules) où l'on s'attend à trouver des étoiles jeunes, récemment formées: c'est à dire dans les nuages denses de matière interstellaire. Leurs mouvements montrent qu'elles ne sont pas des étoiles normales passant par hasard à travers ces régions, et elles sont trop nombreuses pour y avoir été captées par un effet gravita-

tionnel. De plus, leur comportement et leurs caractéristiques physiques étranges les signalent comme des étoiles intrinsèquement inhabituelles.

Une autre preuve évidente est le fait qu'elles sont généralement groupées en amas avec des étoiles de haute luminosité et de courte vie, dont l'extrême jeunesse ne fait pas de doute, si l'on s'en réfère à leur émission énergétique.

En outre, le nombre d'étoiles T Tauri dans le voisinage de notre Soleil correspond en gros au taux attendu de naissances nouvelles, si l'on admet que la population stellaire se maintient approximativement à un niveau constant.

Les grandeurs et luminosités des étoiles T Tauri donnent la preuve physique de leur jeunesse, selon les idées actuelles au sujet de la formation des étoiles et leur développement. Pour mieux le comprendre, examinons brièvement les dernières phases du processus de formation, d'après les théories courantes. Considérons un nuage de gaz et de poussières ayant à peu près la masse de notre Soleil, et qui est en train de se condenser en une étoile. Lorsque cet objet, au bout d'un temps relativement long, s'est contracté jusqu'à n'avoir plus que le diamètre de notre système solaire, c'est encore un nuage relativement froid et sombre. Mais à ce point, alors que l'attraction gravitationnelle continue à le condenser, un nouveau phénomène apparaît: une partie de l'énergie dégagée par la contraction commence, non à échauffer le gaz, mais à effectuer un travail interne qui aboutit à la fission des molécules d'hydrogène et à l'ionisation d'atomes. Ce changement d'orientation de l'énergie a pour résultat de diminuer la pression du gaz interne jusqu'au dessous du point qui lui permet de supporter les couches extérieures du nuage. En conséquence, le nuage s'écroule rapidement sur lui-même. Il se contracte en passant de la dimension du système solaire à celle d'une balle dont le rayon est égal à la distance du Soleil à Mercure, c'est-à-dire à une grandeur égale à cent fois celle de notre Soleil actuel. Cet écroulement, s'exécutant à la vitesse d'une chute libre, prend moins d'une demi-année. Il est finalement arrêté par une augmentation de la chaleur et de la pression à l'intérieur du nuage, qui restaure l'équilibre structural. A ce stade, l'étoile embryonnaire est devenue visible, avec une température de surface de quelque 4000° Kelvin et une luminosité d'environ cent fois celle de notre Soleil actuel. En bref, le résultat est qu'une étoile nouveau-née apparaît soudain dans le ciel. C'est A. G. W. Cameron, alors à l'Institut Goddard pour les études spatiales à New-York, qui reconnut le premier qu'un tel écroulement rapide devait se produire et culminer, pour ainsi dire, dans l'ignition de l'étoile. Sa suggestion a depuis été reprise dans les études plus détaillées de Shushiro Hayashi et T. Nakamo, de l'Université de Kyoto.

Un évènement, qui rappelle la description d'un affaissement de ce genre, a été observé actuellement: en 1936, une nouvelle étoile, nommée depuis FU Orionis, apparut soudainement dans une concentration de gaz et de poussière de la constellation d'Orion. Un seul exemple ne peut évidemment suffire à vérifier complètement une théorie. Mais, du point de vue statistique, nous pouvons nous considérer comme ayant eu de la chance de pouvoir observer un tel évènement avec un équipement moderne, car nous pouvons prévoir qu'il ne s'en produira dans notre voisinage qu'à la moyenne d'un tous les 500 ou 1000 ans.

Après la «naissance» de l'étoile, son développement initial se poursuit assez vite, bien que moins rapidement que sa transformation de nuage sombre en étoile visible. La jeune étoile se contracte graduellement, et sa luminosité diminue temporairement. Hayashi a précisé que dans les très jeunes étoiles, l'énergie thermale de l'intérieur doit être transportée à la surface principalement par le mouvement convectif du gaz chaud qui s'élève. La température de surface demeure à peu près constante, mais l'intérieur devient plus chaud au fur et à mesure de la contraction. Lorsque l'énergie fournie par la contraction a élevé la température au centre jusqu'à environ 10 millions de degrés K, des réactions thermonucléaires convertissant l'hydrogène en hélium, fournissent une importante contribution à l'énergie de l'étoile. Par la suite, elle approche lentement de son état final d'équilibre, dans lequel la contraction s'arrête et où la seule source d'énergie est la combustion de l'hydrogène. Dans une étoile telle que notre Soleil, le temps nécessaire à cette maturité, c'est-à-dire le temps de la contraction, est d'environ 50 millions d'années. Pour les étoiles très massives, la durée est beaucoup plus courte, seulement quelque 30 000 ans environ pour une étoile représentant 30 fois la masse solaire par exemple.

Le déroulement de ce processus, décrivant les lents changements de structure et les états successifs d'équilibre d'étoiles de masses variées, est maintenant calculé d'une façon extrêmement détaillée et approfondie à l'aide de grands ordinateurs. Les résultats en sont généralement rapportés sur le diagramme d'Hertzsprung-Russell qui compare les températures et les luminosités des étoiles (v. *figure 4*). Parmi les études les plus récentes sur ce sujet figure celle d'Icko Iben Jr., du Massachusets Institute of Technology. De tels calculs ont permis d'établir une chronologie de l'évolution stellaire qui permet de déterminer les âges des étoiles d'après leur position observée sur le diagramme. Il en ressort que la position des variables T Tauri les identifie à nouveau comme étant des étoiles très jeunes: elles se trouvent en effet dans une classe d'âge où elles doivent encore se contracter et où elles n'ont pas encore commencé à produire une quantité marquée d'énergie par combustion d'hydrogène. Ce sont en quelque sorte des étoiles observées peu après leur naissance (naissance signifiant ici l'acte de condensation à partir de la matière interstellaire). Ce sont des étoiles en transit, pour ainsi dire, entre la matière interstellaire et l'état d'une étoile

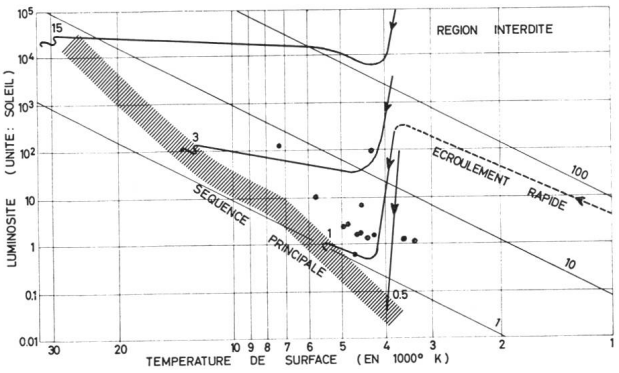


Figure 4: Le diagramme d'Hertzsprung-Russell, qui relie températures de surface et luminosités des étoiles. Les points noirs donnent la position approximative d'un certain nombre d'étoiles T Tauri, rassemblées dans une région du diagramme habitée par des étoiles qui se contractent. La séquence principale (bande grise) contient des étoiles homogènes chimiquement, qui ont accompli leur contraction et qui maintenant brûlent intérieurement de l'hydrogène. Le long de cette bande, les étoiles sont rangées d'après leur masse, des moins massives en bas à droite aux plus massives en haut à gauche. Les lignes noires sont les chemins parcourus par des étoiles de masses variées en se contractant pour atteindre finalement la séquence principale, les chiffres les accompagnant indiquent les masses en multiples de celle du Soleil. Le trait oblique plus fin (rapid collapse) montre l'écroulement rapide d'une étoile de masse égale à celle du Soleil durant les derniers cent jours de sa période de formation (une vingtaine d'années en tout). Les traits obliques rectilignes sont des lignes d'égal rayon: les chiffres qui les accompagnent indiquent les rayons en multiples de celui du Soleil.

parvenue à sa maturité, brûlant son hydrogène comme notre Soleil.

Joy a observé en 1945 que les étoiles T Tauri se placent dans une région du diagramme température-luminosité qui est pratiquement vide d'étoiles normales, mais à cette époque ce fait n'éveilla pas l'attention, étant considéré simplement comme une des bizarreries de ces objets étranges. En 1950, E. E. Salpeter, de l'Université Cornell, reconnaissait dans une ébauche d'étude théorique du problème, qu'il devait précisément en être ainsi. Dans l'intervalle, nombre d'astronomes, parmi lesquels Guillermo Haro à Mexico, M. Dolidze en U.R.S.S., et Pik-Sin The en Indonésie, entreprirent une active recherche spectroscopique des étoiles T Tauri, et aujourd'hui plus de 1000 d'entre elles ont été trouvées dans la Galaxie. Les recherches sont actuellement orientées en vue de comprendre leurs propriétés extraordinaires et leur comportement.

Nous avons déjà mentionné une de ces particularités: l'atmosphère inhabituellement épaisse et active des étoiles T Tauri, contrastant avec la chromosphère mince et faible des étoiles ordinaires. Une seconde étrangeté est le fait que, pour les étoiles T Tauri présentant un spectre d'absorption, les raies spectrales sont anormalement larges, en raison d'un effet Doppler. On ne sait pas encore comment déterminer si la cause de l'élargissement des raies provient de mouvements de masses verticaux dans certaines régions de l'étoile, ou de la rotation rapide de l'astre entier.

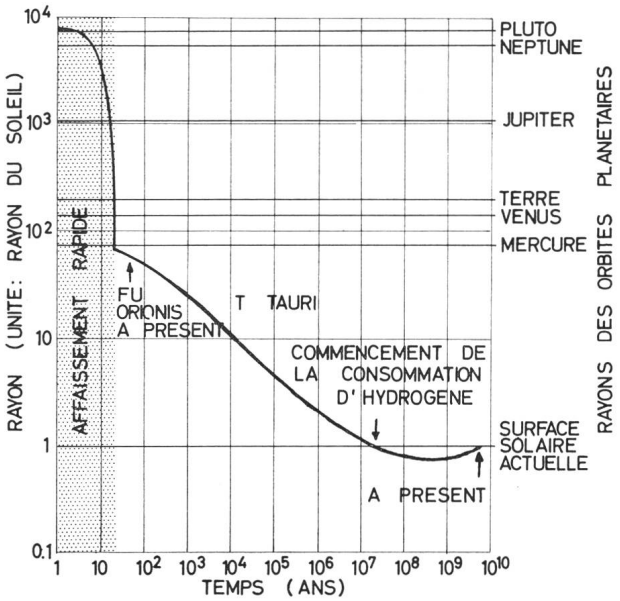
Une troisième particularité des étoiles T Tauri est qu'elles éjectent toutes, et rapidement, de la matière dans l'espace. Apparemment les gaz s'échappant de la surface sont d'une manière quelconque accélérés et expulsés au-delà du domaine de contrôle gravitationnel de l'étoile. (La force responsable de l'expulsion n'est certainement pas la force centrifuge, car les étoiles ne peuvent avoir une rotation assez rapide pour cela.)

Dans le spectre de nombreuses étoiles T Tauri, on peut observer des raies d'absorption provenant de ces matières, et qui sont décalées par effet Doppler, indiquant que les matériaux expulsés s'enfuient à des vitesses atteignant 200 à 300 km/sec. Il n'y a pas d'indice que ces matériaux retournent jamais à l'étoile. Or, s'il y a éjection complète, ces étoiles doivent perdre une fraction substantielle de leur masse. L. V. Kuhi, de l'Université de Californie à Berkeley, a calculé qu'une étoile T Tauri, dans la phase la plus active de son évolution, perd de la matière à raison d'une masse solaire tous les 30 millions d'années, et qu'au moment où elle parvient à maturité et devient une étoile stable, elle doit avoir perdu au moins le $^1/_3$ de sa masse originelle.

Une quatrième propriété des étoiles T Tauri est que leur luminosité varie habituellement d'une façon irrégulière et imprévisible, ne présentant aucun cycle régulier. Les unes fluctuent en l'espace de quelques heures, d'autres ne montrent aucune variation durant des années. L'astronome allemand Cuno Hoffmeister a cependant trouvé une tendance à la régularité des fluctuations de nombreuses étoiles T Tauri: elles paraissent présenter un cycle de quelques jours, ou d'une semaine, qui est occasionnellement perturbé par des explosions irrégulières, mais qui parfois se rétablit ensuite. Hoffmeister pense, sur la base d'une étude serrée de ces astres, que la variation cyclique provient de la rotation de l'étoile, qui amène à la vue des régions actives, et les cache ensuite. Si c'est bien le cas, le cycle de luminosité nous donne une indication sur la période de rotation, et il est intéressant de noter que la vitesse de rotation deduite de ce fait correspond à celle tirée de l'hypothèse que cette rotation rapide est responsable de l'effet Doppler élargissant les raies spectrales des étoiles T Tauri.

Une cinquième propriété inhabituelle des étoiles T Tauri est le fait, découvert d'abord spectroscopiquement par l'Allemand Kurt Hunger, qu'elles présentent une extraordinaire abondance de lithium. Les atmosphères de ces étoiles contiennent 80 à 400 fois plus de lithium que celle du Soleil, selon les estimations de W. K. Bonsack et Jesse L. Greenstein, des Observatoires des Monts Wilson et Palomar.

Quels processus ou qualités physiques doivent donc entrer en jeu pour donner aux étoiles T Tauri leurs traits distinctifs: chromosphères extrêmement actives et lumineuses, expulsions massives de matière superficielle, variations de luminosité, grande abondance de lithium? Aucun de ces phénomènes n'est prévu dans



Le rayon du Soleil est présenté à différentes époques de son histoire. L'étape initiale d'affaissement rapide s'est terminée en 20 ans environ. La contraction lente subséquente vers un état stable avec consommation d'hydrogène prit quelque 50 millions d'années, avec une certaine incertitude due au fait que le terme de cette étape est mal défini. Par la suite le rayon s'est quelque peu agrandi lorsque l'hydrogène a été consumé à l'intérieur. La position marquée pour l'étoile FU Orionis (30 ans après la fin de l'étape de l'affaissement) est seulement schématique, du fait que son rayon actuel n'est que de 20 à 25 fois le rayon actuel du Soleil, et non de 60 fois comme l'indique la courbe. Comme la masse de FU Orionis est inconnue, il n'est pas possible de connaître la signification de cette différence. L'allure générale de ce diagramme est probablement la même pour d'autres étoiles de masse point trop différente de celle du Soleil, mais l'échelle du temps est raccourcie pour des masses plus élevées.

les théories modernes sur la contraction des jeunes étoiles. Chacun est en soi un mystère complet.

Le Soleil est une étoile d'âge moyen qui a probablement passé par la phase T Tauri il y a environ 5 milliards d'années (quelques millions d'années après qu'il eût atteint une existence lumineuse). Montre-t-il encore quelques restes de son active jeunesse? Apparemment oui: l'activité de la surface solaire semble être un faible écho de l'énorme activité de surface qui caractérise les étoiles T Tauri, et le vent solaire pourrait être une trace (réduite à moins d'un millionième) rappelant les immenses éjections de matière de sa jeunesse de T Tauri.

Cherchant à reconstituer le déclin de l'activité chromosphérique dans ces étoiles, D. C. Wilson, des Observatoires du Mt Wilson et du Mt Palomar, rangea des étoiles normales du type solaire suivant leur âge, et trouva que les plus jeunes montraient des raies d'émission chromosphériques nettement plus fortes que les étoiles plus âgées. Les fortes émissions des étoiles jeunes, et celles encore plus puissantes de la phase première T Tauri, peuvent-elles être rattachées à une cause spécifique? Sur la surface du Soleil, l'Allemand Albrecht Unsöld a mis en évidence que les aires marquées par une émission particulièrement intense sont situées là où les champs magnétiques locaux ont une force dépassant la normale, et le déclin avec l'âge des émissions chromosphériques des étoiles serait dû à l'affaiblissement de tels champs superficiels. Cela incite à rechercher immédiatement de puissants champs magnétiques dans les étoiles T Tauri. Malheureusement, une étude menée par Horace W. Babcock, des Observatoires des Monts Wilson et Palomar, pour repérer un tel champ sur T Tauri, n'a pas obtenu de résultat. Cela ne signifie pas nécessairement que des champs locaux puissants n'existent pas, mais comme on n'observe que le champ moyen à la surface de l'étoile, des champs locaux intenses peuvent facilement passer inaperçus.

L'exploration du problème du lithium s'est révélée quelque peu plus productive. Qu'a-t-il pu advenir de tout le lithium que devait avoir le Soleil lorsqu'il était une étoile T Tauri? Nous avons une preuve indirecte qu'au début le Soleil contenait substantiellement davantage de cet élément qu'aujourd'hui. Cette preuve se trouve dans certaines sortes de météorites pierreuses, qui peuvent être considérées comme des échantillons de la matière externe du Soleil primitif. Dans ces météorites, le contenu de lithium est au moins 35 fois plus élevé que dans l'atmosphère solaire actuelle. Si un tel taux de lithium se trouvait originellement dans le Soleil, comment une quantité aussi importante en a-t-elle disparu? L'opinion courante est, en bref, qu'une grande partie du lithium solaire originel a été convertie en hélium, par le choc de protons à de grandes profondeurs en dessous de la surface du Soleil, comme conséquence de la circulation de matière superficielle à travers la région convective de la surface.

Evry Schatzman et Christian Magnan, de l'Institut d'astrophysique de Paris, ont étudié la question du début du développement du nuage préstellaire, quand le lithium lui-même a dû être synthétisé par des processus nucléaires. Ils ont récemment émis l'intéressante suggestion qu'un flux violent de protons provenant du centre du nuage qui se condensait, pouvait avoir ionisé un volume considérable de gaz autour du noyau. Le gaz ionisé, à leur avis, pouvait être visible comme une petite nébuleuse lumineuse. Or, il se trouva qu'en 1946 un certain nombre de petites nébuleuses assez spéciales, qui remplissaient assez convenablement les conditions de Schatzman-Magnan, furent découvertes dans certains nuages de poussières et de gaz interstellaires. Environ 40 de ces nébuleuses spéciales (nommées objets de Herbig-Haro) ont été trouvées actuellement, et toutes sont situées dans des nuages de poussière environnant des étoiles T Tauri. T Tauri elle-même est enfouie dans l'une des plus brillantes de ces nébuleuses. Il semble également que les objets de Herbig-Haro marquent l'endroit de quelque activité préliminaire qui doit culminer par l'apparition d'une étoile.

En 1966, l'astrophysicien mexicain Eugenio E. Mendoza V, travaillant à l'Université d'Arizona, dé-

couvrit que les étoiles T Tauri émettaient une grande quantité de radiations infrarouges. Cette quantité était supérieure à celle que l'on pouvait attendre d'étoiles d'une telle température de surface. Cela pouvait s'expliquer en admettant que ces radiations provenaient de grands nuages de poussière très proches des étoiles, et ayant des températures de surface d'environ 700 degrés K. Cette observation faisait naître la possibilité que la poussière environnante, si telle était bien l'origine de l'excès d'infrarouge, pouvait représenter la matière rejetée par la condensation de l'étoile, peut-être de la même manière qu'a été formé notre système planétaire.

E. E. Becklin et G. Neugebauer, du California Institute of Technology, ont découvert récemment, lors d'une étude de la nébuleuse d'Orion dans l'infra-rouge, un objet qui pourrait être un nuage émettant des radiations infra-rouges froides dans la phase de formation précédant l'écroulement. Il émet des radiations infra-rouges semblables à celles des étoiles T Tauri, mais en bien plus grande quantité. La source de cette radiation est invisible en lumière ordinaire, et peut être représentée comme un corps froid et sombre d'environ 1500 fois la taille du Soleil. Cela correspond à la grandeur prévue pour la condensation préstellaire d'une étoile de la masse du Soleil, juste avant l'écroulement. Hayashi et Nakano ont calculé qu'un nuage de cette masse doit compléter sa transformation de grand corps froid en étoile visible en l'espace de vingt ans environ.

De nouveaux développements sont attendus avec grand intérêt. Si, d'ici une ou deux décades, une nouvelle étoile semblable à FU Orionis apparaît soudainement à l'endroit de l'objet Becklin-Neugebauer, cela sera un véritable triomphe pour la coopération entre la théorie et l'observation, qui commença par la découverte des étoiles T Tauri par Joy en 1942.

Adresse de l'auteur · Dr. George H. Herbig, Lick Observatory, University of California, Santa Cruz, California 95060, USA.

Hochalpine Forschungsstation Jungfraujoch

Der letzte Geschäftsbericht der Jungfraubahn für 1966 enthält eine aufschlussreiche Zusammenfassung über die auf der Hochalpinen Forschungsstation auf dem Jungfraujoch ausgeführten wissenschaftlichen Arbeiten. Zwölf internationale Forschergruppen haben in 1161 Arbeitstagen wertvolle Arbeit geleistet. Die Forschungen verteilen sich auf folgende Länder: Belgien (651 Arbeitstage), Deutschland (9 Arbeitstage), Frankreich (41 Arbeitstage), Italien (47 Arbeitstage), Schweiz (413 Arbeitstage).

Eine belgische Gruppe befasste sich mit der Aufnahme von Sonnenspektren im infraroten und ultravioletten Bereich in Fortsetzung früher begonnener Arbeiten. Belgien hat auch einen Honeywell-Computer beschafft und im Laboratorium des Sphinx-Observatoriums eingerichtet. Dieses Gerät erlaubt, die Messungen auf ganz geringe Absorptionen auszudehnen, wodurch die Beobachtungen ergiebiger gemacht werden können.

Schon seit einiger Zeit war vorgesehen, die alte Kuppel auf dem Sphinx-Observatorium durch eine neue, grössere Kuppel zu ersetzen. Durch ein Missgeschick beim Helikoptertransport ging diese Kuppel indessen kurz vor der Installation verloren. Bald darauf gelang es aber, dieselbe durch eine zweite neue Kuppel zu ersetzen und im Jahre 1967, nach Überwindung einiger Schwierigkeiten, (niedriger Luftdruck in 3500 m Höhe über Meer!) mittels Helikopter an Ort und Stelle zu bringen. Die Flüge konnten nur bei ganz günstigen Wetterbedingungen vorgenommen werden und stellten an die Piloten höchste Anforderungen. Inzwischen ist auch ein neues Teleskop mit einem Spiegel von 76 cm Durchmesser im Sphinx-Observatorium aufgestellt worden. Das neue Teleskop, die Spektrographen und der Computer bilden eine einzigartige, leistungsfähige Anlage für spektrographische Untersuchungen.

Eine Gruppe aus dem Physikalischen Institut der Universität Bern registriert seit einigen Jahren die Nucleonen-Komponente der kosmischen Strahlung mit einer IGY-Neutronen-Monitor-Pile. Sie wurde inzwischen umgebaut und empfindlicher und zuverlässiger gemacht. Die beobachtete Nucleonen-Komponente zeigt Schwankungen, die mit der gegenwärtigen Zunahme der Sonnenaktivität in der 11jährigen Periode der Sonnenflecken im Zusammenhang stehen.

Zwei Gruppen von Physiologen aus Deutschland und der Schweiz befassten sich mit der Lungenfunktion und der Leistungsfähigkeit des Menschen in grosser Höhe. Eine Untersuchung wurde im Hinblick auf die Olympischen Spiele in Mexiko vorgenommen. – Der Pegel und die Änderung des grossen Aletschgletschers wurden das ganze Jahr hindurch beobachtet. Die Messungen dienen einer Untersuchung über den Massenhaushalt des Gletschers.

Die dringenden Renovationsarbeiten am Gebäude der Forschungsstation konnten bis zum Herbst 1966 teilweise abgeschlossen werden. Die alte Kuppel des Sphinx-Observatoriums wurde mit Helikopter auf eine neue Zweigstation, Hotel Gornergrat, Zermatt, versetzt. Dort wurde inzwischen auch ein Teleskop montiert, zwecks Prüfung der Sichtverhältnisse im Hinblick auf die Errichtung einer weiteren, permanenten Forschungsstation im schweizerischen Hochgebirge.

R. A. Naef