

Retour sur la structure interne des étoiles

Les étoiles sont des systèmes physique complexes¹, où interviennent simultanément un grand nombre de processus physiques. On peut admettre *à priori* que les processus qui interviennent dans les étoiles sont les mêmes que les processus connus des physiciens, la difficulté étant cependant que l'on ne sait pas à l'avance quels sont les processus les plus importants qui interviennent et quels sont ceux dont l'importance est négligeable. C'est là que se trouvent toutes les difficultés d'expliquer les phénomènes observés.

Une autre difficulté vient de ce qu'il n'y a pas deux étoiles identiques. Comparant les données provenant de l'observation de deux étoiles qui se ressemblent, on trouve toujours des différences entre ces deux objets d'étude. Trouver la nature de ces différences, trouver leur explication, est un des sujets fondamentaux de l'étude des étoiles.

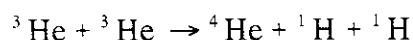
En même temps, l'étude des systèmes stellaires permet d'évaluer leur âge. Ce qui a changé au cours des dernières années est l'acquisition de données précises, en particulier des distances des étoiles. Une détermination plus précise des distances fixe la puissance lumineuse des étoiles des amas d'étoiles et permet d'obtenir des meilleurs valeurs de leur âge. C'est ainsi que l'on a obtenu récemment (1996) de nouvelles valeurs de l'âge des amas globulaires, qui se retrouvent en accord avec les données de l'expansion de l'univers. Cette relation d'un problème de **structure interne** avec une question de **cosmologie** montre à quel point l'étude des étoiles, de leur structure et de leur évolution, joue un rôle essentiel pour l'ensemble de l'astrophysique.

L'exposé qui suit n'est pas une revue de tous les problèmes de structure interne. Il ne sera pas question ni de novae, ni de supernovae, ni des étoiles à neutrons, ni des étoiles de grande masse (100 masses solaires) ... mais des sujets proches de ceux étudiés par l'auteur.

Structure interne.

Rappelons ici brièvement en quoi consiste la structure interne des étoiles et sa relation avec les données d'observation.

Dans son principe, la théorie de la structure interne consiste à calculer les propriétés d'une sphère de gaz, en équilibre de gravitation, et à établir leurs relations avec les données observationnelles : masse, luminosité, rayon et composition chimique de la surface². Les premières tentatives datent du milieu du XIX^{ième} siècle³ et c'est à Eddington (1926) que l'on doit la première mise au point cohérente sur ce sujet. Bien des données physiques manquent encore. La théorie du transfert du rayonnement est encore balbutiante et l'idée des sources nucléaires d'énergie des étoiles (Henry Norris Russell, 1919 ; Jean Perrin, 1920) n'est que qualitative. Elle permet cependant de mettre en accord l'âge du Soleil et l'évaluation géologique de l'âge de la Terre. L'explication de la puissance rayonnée par les étoiles par les réactions thermonucléaires est donnée par Bethe en 1938. Le taux des réactions thermonucléaires dépend de la température et de la densité, et l'écran des charges négatives des électrons autour de chaque noyau facilite ces réactions (Schatzman, 1948). Les cycles de réactions dépendent bien évidemment des sections efficaces et Schatzman (1951) met en évidence peu avant Fowler (1951) le rôle de la réaction :



Fowler (1957) donne l'ensemble des réactions thermonucléaires qui la suivent, mettant en évidence les réactions de production de béryllium, lithium et bore. Ces réactions indiquent les différents régimes de production de neutrinos et presque immédiatement Ray Davis met en route la célèbre expérience de mesure du flux de neutrinos solaires avec le chlore ^{37}Cl .

Ondes acoustiques.

Il s'agit ici de propriétés certainement présentes dans les étoiles en général, mais qui n'ont été observées que dans le Soleil. Le Soleil sert ici d'exemple en attendant l'observation de ce phénomène dans d'autres étoiles. L'intérêt des ondes acoustiques est que leurs propriétés nous renseignent sur l'intérieur du Soleil.

On sait, depuis les travaux de Unsöld (1938) et surtout ceux de Erika Böhm-Vitense (1953) qu'existe juste au dessous de l'atmosphère solaire une profonde zone convective. De la même manière que dans l'atmosphère terrestre, quand les conditions sont réalisées, les mouvements de convection sont des mouvements turbulents. Les ondes acoustiques nous renseignent en particulier sur la profondeur de la zone convective qui est d'environ 200 000 km, presque un tiers du rayon solaire.

Dans une région proche de la surface solaire, à environ mille kilomètres de profondeur, la relation entre pression et densité dépend de la façon dont le transport d'énergie s'effectue. L'énergie thermique est transportée en partie par le mouvement de matière. Il y a alors un grand écart entre la relation, **dans le milieu**, entre pression P en fonction du rayon r et la densité ρ en fonction du rayon :

$$\left(\frac{d \log P}{dr} \right) / \left(\frac{d \log \rho}{dr} \right)$$

et la relation adiabatique, qui localement ne dépend que de l'équation d'état donc seulement des valeurs locales de la pression de la densité et de la température :

$$\left((d \log P) / (d \log \rho) \right)_{ad}$$

On admet que les bulles de gaz qui montent ont une densité moyenne plus faible que la densité moyenne du milieu et doivent leur mouvement à la poussée d'Archimède. La vitesse de cette ascension devient si grande après un certain parcours que la bulle subit une forte interaction avec le milieu et perd son énergie cinétique qui se trouve répartie dans le gaz. Une partie de l'énergie de la bulle contribue au transport d'énergie de l'étoile, une autre partie sert à la production d'ondes de pression ou encore d'ondes acoustiques.

Ces ondes acoustiques se propagent jusqu'à la surface du Soleil, et le mouvement qui lui est associé se traduit par un effet Doppler. L'étude d'une raie spectrale en fonction du temps permet de mettre en évidence des changements de fréquence en fonction du temps et de découvrir par une analyse de Fourier un très grand nombre d'oscillations de petite amplitude, qui sont la manifestation à la surface du Soleil de modes propres de petite amplitude. Ces oscillations sont engendrées par la turbulence qui règne dans la zone convective dans la région située à environ mille kilomètres au dessous de la surface du Soleil (telle qu'elle a été définie précédemment). L'effet Doppler ainsi mis en évidence révèle des vitesses de 10cm / s ou même de 1cm / s.

L'intérêt de l'étude de ces mouvements est que l'on a affaire à l'excitation de modes propres. On a mis en évidence depuis 1983 environ 3000 modes différents, qui révèlent à travers l'indice de réfraction des ondes de pression, ou encore de leur vitesse de propagation, une propriété physique essentielle de l'intérieur du Soleil : la température en fonction du rayon.

Dès le milieu des années 80, l'accumulation des données observationnelles permet de mettre en évidence la subdivision des modes par effet Doppler dû à la rotation, et par conséquent d'en déduire la vitesse de rotation de l'intérieur de Soleil en fonction de la profondeur. Les résultats les plus récents ont été obtenus au moyen d'une série d'observations dans l'espace, faites dans l'expédition spatiale Soho. Ces résultats, décrits de façon schématique, sont les suivants. Dans la zone convective solaire, la vitesse de rotation dépend de la latitude et elle varie peu le long d'un rayon. Dans la zone radiative stable de l'intérieur, la rotation est très proche de la rotation solide. Ces données observationnelles se sont trouvées être complètement à l'écart de tout ce que les modèles de structure interne avaient prévu antérieurement. La nécessité de mettre en évidence une physique oubliée a été nécessaire pour comprendre ces derniers résultats.

Ondes de gravité.

Nous connaissons typiquement les ondes de gravité en mer : ce sont les vagues, dans lesquelles la force de rappel est la gravité. Ces ondes se propagent dans un milieu stable, si bien que dans le Soleil c'est dans la région en équilibre radiatif, situé sous la zone convective, que se propagent ces ondes. Ce que l'on trouve est à l'heure actuelle une formule de théoricien ! Les ondes de gravité, en traversant la zone convective, subissent un amortissement et on cherche leur manifestation à la surface du Soleil. En atteignant la surface, elles ont une très faible amplitude, si bien que les efforts qui ont été faits pour les détecter observationnellement à la surface du Soleil ont été jusqu'ici sans résultat.

Cependant trois effets des ondes de gravité ont été envisagés. Le premier, mis en évidence par Press (1981), est un processus de transport par diffusion, qui permet d'expliquer de façon cohérente les problèmes d'abondance du lithium. Le deuxième concerne le transport de moment angulaire par ondes de gravité et permet d'expliquer la quasi rotation solide des régions centrales du Soleil. Le troisième, plus subtil encore, se rapporte à de très petites modifications de la structure interne du Soleil, avec lesquelles on espère expliquer le déficit de neutrinos solaires. Mais tout cela doit être repris point par point.

Lithium.

Les très grandes différences d'abondance du lithium d'une atmosphère stellaire à une autre ont été mises en évidence il y a déjà trente ans par Herbig. Peu à peu, la multiplication des observations a permis de mettre en évidence l'ensemble des propriétés, tout en laissant un certain nombre de caractéristiques inexplicables. On peut s'en désoler, ou au contraire y voir la possibilité de mettre en évidence le rôle de nouveaux processus physiques.

Les caractéristiques essentielles se rapportent à des étoiles de la séquence principale. L'étude des amas ouverts permet de voir la différence d'abondance dans des amas d'âges différents. On constate une grande dispersion de l'abondance de lithium dans les amas « jeunes », et au contraire une très faible dispersion dans les amas « vieux ».

L'exemple le meilleur est celui des Hyades, âgé de 600 millions d'années. Dans cet amas, on observe pour les étoiles de type spectral G une décroissance régulière de l'abondance de lithium en fonction du type spectral, du type spectral F8 au type spectral K0.

Pour des étoiles plus chaudes que F8, on trouve dans un étroit intervalle de type spectral une chute rapide, puis une remontée rapide de l'abondance de lithium et ensuite, dans les étoiles plus chaudes, une abondance plus grande de lithium, que l'on serait tenté de considérer comme l'abondance de lithium dans ces étoiles au moment de leur formation.

Dans l'intervalle spectral F8-K0 la décroissance régulière de l'abondance de lithium paraît reliée à l'augmentation progressive de la profondeur de la zone convective.

Initialement, on a cherché à interpréter le déficit d'abondance de lithium par un processus de diffusion engendré par la rotation stellaire. Ce processus de diffusion aurait assuré le transport de lithium depuis la base de la zone convective jusqu'au niveau de destruction thermonucléaire du lithium. Cependant, ce mode de transport est très dépendant de la vitesse de rotation stellaire et on aurait dû trouver une relation entre l'abondance de lithium et la rotation stellaire. Or cette relation n'apparaissant pas, il a été nécessaire de trouver un autre mode de transport de la matière, de la base de la zone convective jusqu'au lieu de combustion du lithium.

C'est un processus de diffusion macroscopique dû aux ondes de gravité. Il est engendré à la frontière de la zone radiative par la turbulence présente dans la zone convective. La rapidité de ce transport dépend de la distance entre la base de la zone convective et le niveau de combustion du lithium. On arrive ainsi de cette façon à une représentation cohérente du déficit de lithium dans les amas ouverts. Le déficit de lithium dans le petit intervalle spectral F2-F7 est dû probablement à une profondeur de la zone convective plus grande que celle des étoiles voisines plus chaudes ou plus froides. La question est encore à l'étude.

Rotation

Avant 1933, on supposait que le transport de moment angulaire à l'intérieur des étoiles était assuré par la turbulence présente aussi bien dans la zone convective que dans la zone radiative. Dans la zone convective, le rôle déterminant est celui de la convection et de la turbulence associée à la convection. Naturellement le cas critique est celui du Soleil, tout simplement parce que, grâce à l'héliosismologie, on arrive à *voir* l'intérieur du Soleil. Disons, pour simplifier, en faisant de grands mouvements des bras, que le transport de moment angulaire par la circulation méridienne d'une part et par la convection d'autre part explique la variation de la vitesse de rotation des couches superficielles du Soleil, de l'équateur au pôle.

Par contre, on supposait que la turbulence dans la zone radiative était engendrée par la rotation différentielle. Ce modèle conduisait à un modèle de la vitesse de rotation en fonction du rayon, à l'intérieur du Soleil, qui s'est trouvé sans aucun rapport avec les résultats tirés de l'héliosismologie. L'efficacité étonnante du transport de moment angulaire par les ondes de gravité résout le problème, au moins dans son principe : il reste sans aucun doute beaucoup de choses à faire. Il faut que les spécialistes se mettent d'accord sur l'amplitude des ondes de gravité engendrées à la frontière de la zone convective.

Il faut appliquer le modèle aux étoiles en général, et la situation, lorsque l'étoile possède une zone convective, centrale est sans aucun doute inattendue. Dans le cas solaire, où la zone convective est *extérieure*, le moment angulaire présent dans la zone radiative *intérieure*, est transporté vers l'*extérieur*.

On pourrait s'attendre, lorsqu'il y a une zone convective *intérieure*, à ce que le moment angulaire soit transporté vers l'*intérieur*. le résultat serait une zone convective centrale tournant plus vite que la zone radiative qui l'entoure. Cette proposition est provocante et il reste à la vérifier. Il faut enfin être cohérent et mettre à la fois en jeu le transport de moment angulaire et le processus de diffusion. macroscopique dû aux ondes de gravité stochastiques. Comme on le voit, les perspectives sont riches et un important domaine de recherche est ouvert.

Neutrinos solaires

Ce problème est passionnant, car il réunit un problème fondamental de physique des particules et un problème d'astrophysique. Dans le Soleil, les neutrinos sont produits par trois réactions thermonucléaires :

- la première réaction, fondamentale, est la réaction proton-proton, qui s'accompagne de la production d'un électron positif et d'un neutrino.

- la deuxième réaction est la capture d'un électron par le béryllium ${}^7\text{Be}$, lui-même produit par la réaction ${}^3\text{He} + {}^4\text{He}$.

- le troisième groupe de réactions vient de la production de bore ${}^8\text{B}$ par capture d'un proton par le béryllium. Le bore, en émettant un électron positif et un neutrino devient du ${}^8\text{Be}$, qui se dissocie immédiatement en deux noyaux d'hélium. L'énergie maximum de ces neutrinos est de 14 MeV.

L'expérience de Homestake Goldmine consiste à mesurer le flux de neutrinos au moyen de ${}^{37}\text{Cl}$. Elle donne le flux de neutrinos d'énergie supérieure à 0,816 MeV, provenant des réactions (2) et (3).

Les expériences SAGE (russo-américaine au Caucase) et GALLEX (européenne au Gran Sasso) détectent avec du gallium les neutrinos d'énergie inférieure à 0,25 MeV.

Elles détectent essentiellement les neutrinos de la première réaction.

La détection de neutrinos par l'expérience de Kamiokande et maintenant de super-Kamiokande détectent seulement les neutrinos de la troisième réaction d'énergie supérieure à environ 7 MeV.

Dès les premiers résultats de Ray Davis (expérience au chlore) le désaccord avec les prévisions du modèle solaire est apparu. Il s'est confirmé avec les autres expériences. Pour résumer, on peut donner la tableau des prédictions⁴ et de ce qui a été mesuré :

- Expérience au chlore :	prédit : $\approx 7 \text{ SNU} \cdot \text{s}$	observé : $\approx 2,5 \text{ SNU} \cdot \text{s}$
- Expérience au gallium :	prédit : $\approx 120 \text{ SNU} \cdot \text{s}$	observé : $\approx 80 \text{ SNU} \cdot \text{s}$
- cerenkov :	prédit : $\approx 4,4 \cdot 10^6 / \text{cm}^2$	observé : $\approx 2,9 \cdot 10^6 / \text{cm}^2$

Il y a clairement un déficit de neutrinos par rapport aux prédictions du modèle standard.

Deux explications ont été envisagées :

(1) il s'agit d'un effet dû aux propriétés des neutrinos. Les neutrinos auraient une masse, et la transformation du neutrino ν_e en neutrino ν_μ au cours de la traversée du Soleil expliquerait le déficit.

(2) il s'agit d'un défaut de prédiction propre au modèle solaire standard. Il faut poursuivre jusqu'au bout la correction du modèle solaire.

C'est bien évidemment la deuxième hypothèse qui est privilégiée chez les astrophysiciens. La mise en évidence du rôle des ondes de gravité fait apparaître aussi la possibilité d'importantes corrections du modèle standard. Le processus macroscopique de diffusion change un peu la structure du Soleil dont les régions centrales se trouvent enrichies en ^3He . Cela entraîne une baisse de la température centrale, donc une diminution du flux de neutrinos. A cela viennent s'ajouter des effets non linéaires dus aux oscillations dans les régions centrales. Cela entraîne également une diminution de la température, donc une diminution du flux de neutrinos. La combinaison des effets thermiques et d'une nouvelle distribution des concentrations des différentes espèces de noyaux pourrait rapprocher appréciablement la nouvelle prédiction des flux de neutrinos des données observationnelles. Il suffirait peut-être alors de compléter par de petites modifications des sections efficaces et de tenir compte plus complètement des problèmes de plasma pour mettre en accord théorie et observation. On pourrait alors affirmer que les neutrinos ont une masse nulle.

Conclusions

On se trouve aujourd'hui face à un grand renouvellement de la théorie de la structure interne. Les nouvelles données observationnelles et expérimentales ont obligé les théoriciens à regarder de plus près la nature de l'écart entre théorie et observation. Cela a conduit à tenir compte de processus physiques dont on n'avait pas tenu compte et dont l'importance apparaît aujourd'hui comme considérable. Nous allons vers une meilleure compréhension des propriétés des étoiles. Et, comme l'histoire nous l'a déjà montré, vers une meilleure compréhension de l'Univers.

Eury Schatzman ■

Notes :

¹ Ne pas confondre l'emploi ici du mot « complexe » avec la notion de « complexité » que l'on trouve dans bien des publications, terme utilisé en particulier par Edgar Morin. Le mot « complexité » me paraît toujours exprimer un refus de regarder la nature des problèmes.

² Le mot « surface » désigne la frontière entre l'intérieur et l'extérieur de l'étoile. A l'extérieur la matière stellaire est transparente, tandis qu'à l'intérieur la matière stellaire est opaque. Cela veut dire qu'à l'intérieur le libre parcours des photons est « petit » devant le rayon de l'étoile. Il y a naturellement une formule mathématique conventionnelle qui définit cette frontière. un rayon lumineux qui passe au bord d'une étoile a son intensité diminuée par $\exp(-2)$, un facteur $\exp(-1)$ avant d'arriver au bord, multipliée par un facteur $\exp(-1)$ en allant du bord de l'étoile jusqu'à l'oeil de l'observateur.

³ On trouve dans les notes bibliographiques du livre de Chandrasekhar « *an introduction to the Study of Stellar Structure* » une excellente mise au point des données historiques (jusqu'en 1938 !) sur la structure interne.

⁴ T. Kirsten (1994).