L'hélio-sismologie et l'énigme de l'opacité du fer

Jean-Christophe Pain (jean-christophe.pain@cea.fr)
Laboratoire de Physique Atomique des Plasmas, CEA, DAM, DIF, 91297 Arpajon

La mesure du spectre de pulsations d'une étoile permet d'obtenir des informations sur les processus physiques qui régissent sa structure et son évolution.

La révision récente des abondances chimiques solaires entraîne un désaccord entre le modèle stellaire standard et les mesures d'hélio-sismologie.

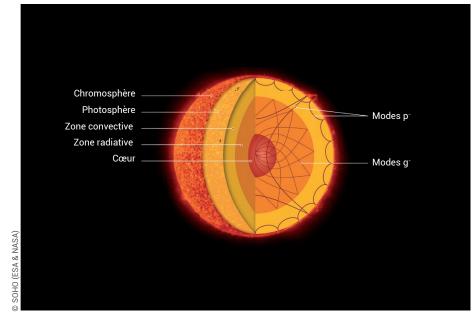
L'opacité du fer a été mesurée en laboratoire, dans des conditions proches de celles de l'interface entre les zones radiative et convective du Soleil.

Les opacités déduites des mesures sont, dans une gamme spectrale allant de 7 à 12,7 Å, de 30 à 400 % supérieures aux calculs, ce qui tend à réconcilier mesures hélio-sismiques et prédictions du modèle standard, mais demeure une énigme pour les théoriciens.

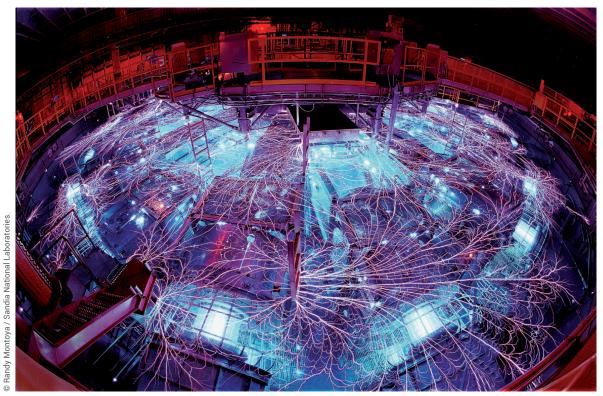
La structure du Soleil et le modèle standard

Le Soleil tire son énergie des réactions de fusion nucléaire qui transforment, en son cœur, l'hydrogène en hélium. Dans le cœur thermonucléaire, concentrant la moitié de la masse du Soleil dans un quart de son rayon de 700 000 km, la température décroît de 15 (au centre) à 7 (à la périphérie) millions de degrés. Dans la zone radiative, qui se situe approximativement entre 0,25 et 0,7 rayon solaire, la matière est si chaude et si dense que le transfert de la chaleur se fait uniquement par transfert de rayonnement. À mesure que l'on s'éloigne du cœur, la densité décroît de 1,4 10³¹ à 1,7 10²⁸ atomes/m³, la pression de 3 10¹⁰

à 6 106 atmosphères, et la température de 7 10⁶ à 2 10⁶ K. On pense que cette zone radiative contient entre un tiers et la moitié de la masse du Soleil (fig. 1). Autour de 0,7 rayon solaire, la température a suffisamment baissé pour qu'une partie des atomes conserve quelques électrons, ce qui rend la matière plus opaque. L'opacité (voir encadré, p. 11) ralentit le transfert radiatif, et l'accumulation de chaleur qui en résulte déstabilise le plasma, la chaleur s'évacuant alors par convection vers la surface dans les derniers 30 % du rayon solaire qui constituent la zone convective, dans laquelle la température varie de 2 10⁶ à 6 10³ K. La convection est également source de champs magnétiques qui donnent naissance, en émergeant à la surface, aux taches solaires.



1. Coupe du Soleil représentant les différentes zones. Les ondes acoustiques (modes p) sont localisées principalement dans la zone convective, et les ondes de gravité (modes g) dans la zone radiative et le cœur.



La machine Z, générateur de rayons X pulsés le plus puissant au monde, installée dans les locaux des laboratoires Sandia à Albuquerque, New-Mexico (USA). L'impulsion électrique est produite par un ensemble de 36 générateurs de Marx situés à la périphérie de l'installation et déclenchés par des éclateurs, permettant une décharge électrique extrêmement puissante en une fraction de seconde. Afin d'obtenir et de libérer en un temps suffisamment court la quantité considérable d'énergie nécessaire au fonctionnement de la machine, il faut au préalable stocker l'énergie dans des cuves remplies d'eau, qui jouent le rôle de condensateurs.

La tachocline [1], couche de fort cisaillement, épaisse d'environ 3000 km, séparant les zones radiative et convective, est supposée jouer un rôle important dans le mécanisme de production du champ magnétique solaire *via* l'effet dynamo dont la compréhension est un des défis actuels de la physique stellaire.

Les rayonnements X et γ libérés lors des réactions de fusion mettent un temps considérable pour traverser les zones radiative et convective avant d'atteindre la surface du Soleil, les photons étant constamment absorbés et réémis. On estime que le temps de transit du cœur à la surface se situe entre 10 000 et 170 000 ans.

La stabilité du Soleil résulte d'un équilibre entre la force de gravitation, qui tend à concentrer la matière, et la force de pression qui va dans le sens d'une expansion. Pour assurer la stabilité de cet équilibre il faut que la pression et la densité augmentent lorsque l'on s'enfonce à l'intérieur du Soleil. Le calcul d'un modèle de la structure interne du Soleil nécessite de faire des

hypothèses raisonnables sur la composition chimique, les taux de réactions nucléaires, les opacités, le transport par convection et l'équation d'état de la matière. Dans le modèle stellaire standard, l'évolution solaire est calculée en supposant que le mélange de la matière solaire se produit uniquement dans la zone convective. L'abondance relative des éléments lourds comme le carbone ou l'oxygène est choisie égale à celle observée dans l'atmosphère solaire. En l'absence d'une théorie rigoureuse de la convection

turbulente, la structure de l'enveloppe convective est modélisée de manière semiempirique faisant intervenir la « longueur de mélange », distance sur laquelle une particule de gaz peut être identifiée avant que sa trajectoire ne se confonde avec un mouvement d'ensemble. En faisant varier ce paramètre, qui sert à quantifier l'efficacité de la convection, et la quantité initiale d'hélium, il est possible de calculer un modèle du Soleil reproduisant, à son âge actuel, son rayon et sa luminosité.

Opacité d'un plasma chaud

L'opacité d'un milieu est la section efficace de photoabsorption (c'est-à-dire d'absorption de rayonnement) par unité de masse. Elle s'exprime traditionnellement en cm²/g.

L'opacité d'un plasma chaud (température supérieure à plusieurs centaines de milliers de degrés) à l'équilibre thermodynamique local, est due à quatre processus : la photoexcitation (à l'origine des raies spectrales), la photo-ionisation (ou effet photoélectrique), l'effet *Bremsstrahlung* inverse (accélération d'un électron libre due à l'absorption de rayonnement) et la diffusion Compton.

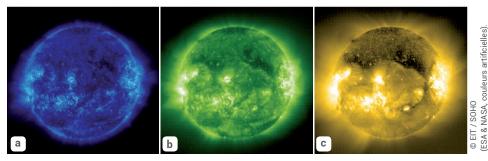
Hélio-sismologie

C'est en 1960 que des pulsations extrêmement faibles du Soleil, d'une période de 5 minutes, ont été mises en évidence pour la première fois par Robert Leighton de l'université de Caltech, par mesure de l'effet Doppler : elles provoquaient des déplacements de la photosphère à des vitesses de plusieurs km/s. Il faudra attendre les années 1970 pour que ce phénomène soit interprété comme la manifestation de la propagation d'ondes sonores dans le Soleil. Sous l'action d'un mécanisme d'excitation, des ondes (des modes propres) sont générées et se propagent [2]. Pour le Soleil, il s'agit essentiellement d'ondes acoustiques. Ayant un diamètre de 1 400 000 km, le Soleil « résonne » à une fréquence proche de 3 mHz, plusieurs dizaines d'octaves en dessous du seuil accessible à l'oreille humaine (environ 16 Hz).

C'est l'excitation par la turbulence convective qui se révèle être l'effet dominant. L'interaction turbulence-convection joue en fait simultanément le rôle d'excitation et d'amortissement des modes propres.

L'excitation est également due, dans une moindre mesure, au « mécanisme κ », engendré par l'opacité de l'hélium, et localement actif à proximité de la surface, mais qui contribue moins que pour d'autres types d'étoiles pulsantes comme les β-Céphéides [3,4]. Ce mécanisme, aussi appelé "Eddington valve" (soupape d'Eddington) [5], permet à l'atmosphère de l'étoile d'osciller. La régulation des fuites de chaleur (provenant de l'intérieur de l'étoile) fonctionne comme une soupape : l'énergie est accumulée pendant la compression et évacuée pendant l'expansion. Au cours de la compression, l'opacité augmente, ce qui provoque une accumulation d'énergie dans la couche comprimée avant d'amorcer une expansion. Puis l'opacité diminue, ce qui accélère l'évacuation de l'énergie accumulée, ralentit l'expansion et amorce la compression suivante. La turbulence convective et le mécanisme κ sont susceptibles de fournir de l'énergie dans le même domaine de fréquences, spatiales et temporelles, et les pulsations se propagent depuis le centre du Soleil jusqu'à la chromosphère à la vitesse de 2 m/s.

La sismologie a permis la détermination de la stratification interne du Soleil, notamment du profil de vitesse du son



2. Images de la basse couronne solaire obtenues à plusieurs longueurs d'onde en ultraviolet (domaine réservé aux instruments en orbite) par le télescope EIT du satellite SoHO. La basse couronne apparaît émissive à des températures qui vont de 80 000 à plus de 2 millions de degrés.

- (a) Raie du fer IX (171 Å), $T = 0.7 \cdot 10^6 \text{ K}$.
- (b) Raie du fer XII (195 Å), $T = 1.4 \times 10^6 \text{ K}$.
- (c) Raie du fer XV (284 Å), $T = 2.0 \times 10^6 \text{ K}$.

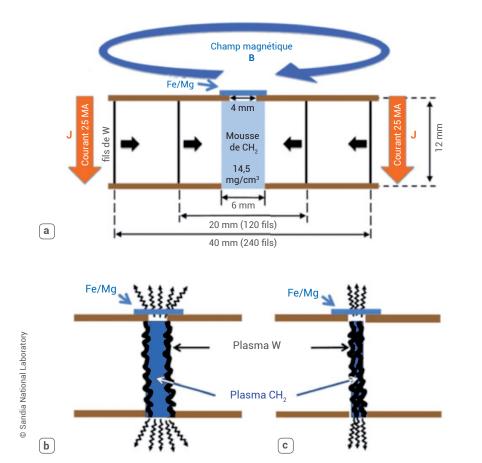
(pouvant atteindre plusieurs centaines de km/s) en fonction de la profondeur. Cette quantité dépend fortement des variations de température, densité et pression. Les transitions entre les différentes régions du Soleil peuvent ainsi être identifiées, dont la base de la zone convective, délimitant la région où s'effectue le mélange (et l'homogénéisation de la composition chimique observée à la surface solaire).

D'autres propriétés du plasma solaire ont pu être testées grâce à l'hélio-sismologie, comme l'abondance de l'hélium dans la zone convective (celle-ci ne pouvant être mesurée dans le spectre d'absorption du Soleil). La valeur obtenue était bien plus faible que celle attendue. Ce déficit a été compris comme résultant d'un processus de sédimentation de l'hélium et des éléments plus lourds au sein de la zone convective vers la zone radiative depuis l'apparition du Soleil. Ce mécanisme a pu être introduit dans les modèles d'évolution stellaire et ainsi améliorer leurs prédictions. De même, l'âge du Soleil a été contraint précisément à $4,57 \pm 0,11$ milliards d'années.

La sismologie globale a offert la possibilité de découvrir les larges mouvements au sein du Soleil mais ne donne pas accès aux mouvements locaux, à plus petite échelle. La sismologie locale, technique récente utilisant les modes les plus superficiels, a permis de mettre en évidence de nouveaux mouvements entre l'équateur et les pôles (la circulation méridienne). Elle a aussi permis de révéler la dynamique des taches solaires. L'observation de sa surface montre que le Soleil tourne plus vite à l'équateur (en 25 jours) qu'aux hautes latitudes (35 jours). On sait que la zone radiative présente une rotation solide : elle tourne d'un seul bloc, mais on n'avait pas accès jusqu'à présent à la dynamique du cœur solaire, qui requiert l'utilisation des modes de gravité. Cela va peut-être changer, car ces derniers ont été récemment observés et mesurés indirectement par l'effet de modulation qu'ils produisent sur le temps de parcours mis par les ondes acoustiques pour effectuer l'aller-retour le long du diamètre solaire en passant par son centre (environ 4 h 7 mn) [6]. La qualité et la

Élément	Estimations antérieures [8]	Estimations les plus récentes [9]
Н	12	12
He	10,93	10,93
С	8,52	8,43
N	7,92	7,83
0	8,83	8,69
Fe	7,50	7,50

Abondances photosphériques de quelques constituants du Soleil. Les quantités des deux dernières colonnes sont exprimées, selon la convention habituelle utilisée par les astrophysiciens, par $A_X = Log_{10}(N_X/N_H) + 12$, ou N_X est le nombre d'atomes de l'élément X (ici H, He, C, N, O et Fe).



3. Schéma du dispositif expérimental sur la machine Z-pinch.

- (a) Les deux cages concentriques de tungstène (W), la mousse de plastique (polyéthylène C_nH_{2n}) centrale et l'échantillon de fer/magnésium.
- (b) Lorsque le plasma de tungstène entre en collision avec la mousse de polyéthylène, le rayonnement généré par le choc est piégé dans la cage de tungstène et chauffe l'échantillon.
- (c) À la stagnation, un rayonnement X intense est généré, permettant de radiographier (sonder) l'échantillon.

quantité des données concernant désormais ces ondes ont permis de confirmer que le Soleil manifeste un phénomène de rotation différentielle spectaculaire : avec une période d'une semaine environ, son cœur tourne presque quatre fois plus vite que sa surface (la durée moyenne d'une rotation des couches externes du Soleil est de 27 jours). On peut voir sur la figure 1 les ondes acoustiques (modes p) localisées principalement dans la zone convective, et les ondes de gravité (modes g) confinées dans la zone radiative et le cœur du Soleil.

Une autre problématique importante concerne les neutrinos solaires [7] et leurs « oscillations ». L'hélio-sismologie apporte des contraintes importantes sur les conditions dans le cœur nucléaire du Soleil, auxquelles le flux de neutrinos émis est très sensible (il est proportionnel à la puissance 24 de la température dans le cœur).

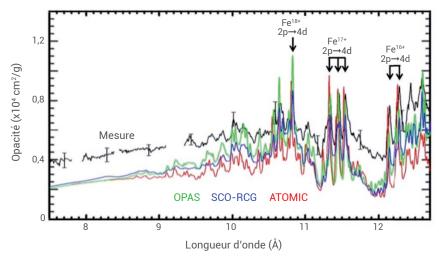
Le problème de l'abondance de C, N et O

Au début des années 2000, les astrophysiciens se réjouissaient, car les prédictions du modèle standard solaire étaient en accord avec l'essentiel des observations. Mais des scientifiques ont analysé différemment les spectres solaires, en s'appuyant sur des simulations 3D d'hydrodynamique radiative (dépendant du temps) de l'atmosphère solaire et en effectuant des recoupements avec des données météoritiques. Ils ont conclu que les abondances de C, N, O et Ne devaient être revues à la baisse de manière significative (voir le tableau et les références [8, 9]). Cela a suscité un émoi dans la communauté des astrophysiciens, car le Soleil fait office d'étalon pour de nombreux objets stellaires. Ainsi, si une réduction de 50 % de l'abondance de l'oxygène dans le Soleil est annoncée, cela signifie qu'il doit y avoir également à peu près 50 % d'oxygène en moins dans de nombreuses étoiles. Les atomes qui contrôlent le transport de rayonnement dans le Soleil ne sont pas complètement ionisés ; ils possèdent toujours des électrons liés. Le fer (fig. 2) et l'oxygène sont des éléments clés, du fait de leur abondance et de leur forte opacité. Une réduction de la quantité d'oxygène engendre une diminution de sa contribution à l'opacité. C'est également vrai pour le fer (qui contribue à hauteur de 25% à l'opacité à l'interface des zones radiative et convective), mais sa quantité n'a pas été significativement remise en question par les analyses photosphériques récentes.

Mesure de l'opacité du fer : un mystère...

La récente révision à la baisse des proportions de carbone, d'azote et d'oxygène dans le mélange solaire a eu pour conséquence de dégrader l'accord précédemment observé entre les résultats de mesures d'hélio-sismologie et les prévisions du modèle stellaire standard. Cet accord pourrait être restauré si la quantité de fer était plus élevée (hypothèse considérée comme peu probable d'après les analyses photosphériques récentes) ou si la contribution du fer à l'opacité totale était supérieure à ses valeurs actuelles, de 5 % à la base de la zone radiative solaire à 25% à sa périphérie. Le problème est que les calculs d'opacité du fer n'ont jamais été testés dans les conditions de l'intérieur de l'étoile. Constatant qu'une telle augmentation est grande comparée à l'écart entre les différents calculs d'opacité, la question de leur précision s'est posée et a abouti à la mise en place d'un programme de validation expérimentale sur la machine Z-pinch (photo de la p. 11) du Sandia National Laboratory [10] à Albuquerque, aux États-Unis.

Les machines *Z-pinch* (machines à striction axiale) constituent une des voies pour le contrôle de la fusion nucléaire, avec le projet ITER de fusion magnétique à Cadarache et le Laser Mégajoule pour la fusion inertielle par laser à Bordeaux. Lors d'une forte décharge électrique dans une cage à fils de tungstène (impulsion de courant de l'ordre de 25 méga-ampères et d'une durée de 100 ns), ces fils se transforment en plasma (fig. 3). Les forces de Lorentz entrainent la striction du plasma sur son axe z (d'où la dénomination *Z-pinch*)

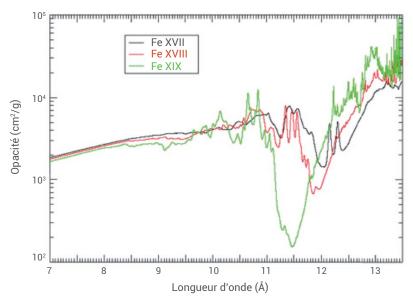


4. Opacité du fer à une température de 2,11 10⁶ K et une densité électronique de 3,1 10²² e⁻/cm³. L'expérience (en noir) est comparée à trois codes de calcul différents : ATOMIC (USA), SCO-RCG et OPAS (CEA, France).

jusqu'à une phase de stagnation, où le plasma s'arrête brutalement. L'énergie cinétique du plasma est alors convertie en rayonnement X qui peut être utilisé pour comprimer une capsule contenant le combustible dans le cas d'une expérience dédiée à la fusion, ou pour chauffer et irradier un échantillon et accéder à son opacité dans le cas qui nous intéresse ici.

Du fait de sa contribution importante à l'opacité, le fer a naturellement été choisi pour cette campagne expérimentale. Mélangés à du magnésium (les raies du magnésium sont exploitées pour les diagnostics de température et densité) et tamponnés par des couches d'éléments

légers (plastique ou béryllium) pour limiter la détente et conserver une densité élevée et homogène, des échantillons de fer ont pu être portés à des densités électroniques (N_e) comprises entre 0,71 et 4 10^{22} cm⁻³ et à des températures comprises entre 1,91 et 2,26 106 K. Ces températures élevées, encadrant celle de la tachocline, sont obtenues grâce à un chauffage radiatif assuré par le rayonnement X intense délivré par le Z-pinch. Les échantillons de fer/magnésium sont chauffés pendant 10 ns pendant la phase de compression et radiographiés pendant 3 ns par le rayonnement du pinch à la stagnation (fig. 3). Le rayonnement planckien » (température radiative de



5. Contributions, calculées par le code SCO-RCG, des trois principaux ions, Fe XVII (Fe $^{16+}$), Fe XVIII (Fe $^{17+}$) et Fe XIX (Fe $^{18+}$), à l'opacité du fer à une température de 2,11 10^6 K et une densité électronique de 3,1 10^{22} e $^-$ /cm 3 .

210 eV) impose l'équilibre thermodynamique local (ETL) aux populations. La transmission spectrale T de l'échantillon est déduite du rapport des enregistrements de l'atténuation d'un rayonnement sonde par l'échantillon tamponné et par le tampon seul. Connaissant la masse surfacique de l'échantillon, l'opacité est déduite de la loi de Beer-Lambert-Bouguer : $T(hv) = I / I_0 = \exp \left[-\rho L\kappa(hv)\right], \text{ où } \rho$ représente la densité (en g/cm³), L l'épaisseur (en cm) et κ l'opacité (en cm²/g). Les signaux atténué I et non atténué I_0 sont mesurés simultanément. Différentes épaisseurs ont été utilisées pour vérifier la validité de la loi de Beer-Lambert-Bouguer, des tirs avec tampons seuls (différentes épaisseurs de béryllium ou de plastique) ont été effectués pour connaitre leur transmission, et des plasmas de différentes températures et densités ont été étudiés. Le spectre expérimental a été obtenu en moyennant 450 spectres mesurés au cours de 22 campagnes expérimentales.

Pour chaque tir, quatre spectromètres étaient mis en œuvre et la masse surfacique ρL était mesurée in situ par rétrodiffusion Rutherford. Les expérimentateurs ont examiné les erreurs systématiques dues à l'incertitude sur la masse surfacique, la précision des diagnostics, les écarts à l'ETL, le bruit de fond (rayonnement ambiant), les gradients spatiaux et temporels, et l'atténuation due aux tampons. Ils ont abouti à une incertitude de l'ordre de 10 %. Pour chaque mesure, les conditions de température et de densité électronique N_e sont estimées à partir d'une analyse spectroscopique des raies d'absorption du magnésium au voisinage de son seuil photoélectrique K. Bien que la nature et la structure des cibles aient été optimisées, les densités électroniques restent inférieures de plus d'un facteur 2 à celles attendues.

L'opacité du fer mesurée à $T = 2,11 \, 10^6 \, \mathrm{K}$ et $N_e = 3,1 \, 10^{22} \, \mathrm{cm}^{-3}$ est présentée sur la figure 4. Entre 7 et 9,5 Å, le spectre est dominé par la contribution des processus de photo-ionisation en couche L (nombre quantique principal n=2) d'atomes de fer partiellement ionisés et plus ou moins excités. À plus grande longueur d'onde, les structures résonantes les plus marquées peuvent être attribuées à des transitions du type $2p \rightarrow 4d$ des ions Fe^{16+} , Fe^{17+} et Fe^{18+} (Fe XVII, Fe XVIII et Fe XIX en notation spectroscopique). La figure 4 montre la comparaison de l'opacité mesurée avec celles calculées à l'aide des codes SCO-RCG

• • • • • • •

[11] et OPAS [12] développés au Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) et du code américain ATOMIC [13]. Les contributions des trois principaux degrés de charge, calculées par le code SCO-RCG, sont représentées sur la figure 5. De conception récente, ces trois codes se caractérisent par un traitement précis et exhaustif des transitions entre états liés. De ce fait, ils permettent une restitution correcte de la position et de l'amplitude de nombreuses structures résonantes aux grandes longueurs d'onde. Bien que ces trois calculs s'accordent sur le niveau moyen de l'opacité dans la gamme spectrale considérée, ils se révèlent cependant plus faibles que la mesure d'un facteur supérieur à 1,5. Plusieurs pistes ont déjà été explorées, comme les profils des raies spectrales dues aux collisions entre électrons, le calcul de la photo-ionisation, la modélisation des états très excités, l'absorption multiphotonique; mais aucune n'a permis d'expliquer le désaccord, même en partie...

Conclusion

Vingt-cinq ans d'efforts de la communauté internationale ont abouti à une précision dans la connaissance de la structure interne du Soleil qui ne semblait pas imaginable au début des années 1980. Le premier résultat spectaculaire a été le gain sur la localisation de la base de la zone de convection. Évalué à 10 % près il y a 30 ans, son rayon est aujourd'hui connu avec trois décimales : 0,713 rayon solaire. Cette contrainte sismique sur les modèles est

sévère et exige une grande précision sur l'opacité dans la zone radiative. C'est l'incertitude sur l'abondance des éléments lourds qui limite la précision sur l'opacité, et il a fallu imaginer cette abondance stratifiée par une lente sédimentation allégeant les couches les plus hautes, pour améliorer l'accord.

Une mesure de l'opacité du fer, dans des conditions de température et de densité proches de celles attendues à l'interface radiative/convective solaire, a été réalisée sur la machine *Z-pinch* du Sandia National

Laboratory. Dans le domaine spectral considéré (de 7 à 12,7 Å), les résultats expérimentaux sont 30 à 400% supérieurs aux calculs les plus précis effectués à ce jour. En attendant d'être étendues à des éléments chimiques voisins du fer et éventuellement confirmées par des expériences sur des installations laser de classe Mégajoule, ces expériences suggèrent qu'il faut réexaminer la description communément admise des processus de photoabsorption dans les plasmas à haute densité d'énergie.

Références

- 1• A. Mazumdar et H.M. Antia, "Seismic detection of stellar tachoclines", A&A 368 (2001) L8-L12.
- 2• P. Lambert, « À l'écoute des étoiles », Reflets de la physique 2 (2006) 9-13.
- 3• A.A. Pamyatnykh *et al.*, "Asteroseismology of the β Cephei star v Eridani: interpretation and applications of the oscillation spectrum", *MNRAS* **350** (2004) 1022-1028.
- 4• S. Turck-Chièze et al., "Detailed opacity comparison for an improved stellar modeling of the envelopes of massive stars", Ap.J 823 (2016) 78.
- 5• A.S. Eddington, "Theories of Cepheid variation", *The Observatory* **49** (1926) 88.
- 6• E. Fossat et al., "Asymptotic g modes: Evidence for a rapid rotation of the solar core", A&A 604 (2017) A40.
- 7• S. Lavignac et M. Zito, « Les neutrinos n'ont pas livré tous leurs secrets », Reflets de la Physique **50** (2016) 4-9.

- 8• N. Grevesse et A.J. Sauval, "Standard solar composition", Space Sci. Rev. 85 (1998) 161-174.
- 9• M. Asplund et al., "The Chemical Composition of the Sun", Annu. Rev. Astron. Astrophys. 47 (2009) 481-522.
- 10• J.E. Bailey et al., "A higher-than-predicted measurement of iron opacity at solar interior temperatures", Nature 517 (2015) 56-59.
- 11• J.-C. Pain et F. Gilleron, "Accounting for highly excited states in detailed opacity calculations", *High Energy Density Phys.* 15 (2015) 30-42.
- 12• C. Blancard et al., "Solar mixture opacity calculations using detailed configuration and level accounting treatments", ApJ 745 (2012) 10.
- 13• J. Colgan et al., "Light element opacities from ATOMIC", High Energy Density Phys. **9** (2013) 369-374.