

# Le fer serait-il plus opaque que prévu dans le Soleil ?

C. BLANCARD - P. COSSÉ - G. FAUSSURIER - F. GILLERON - J.-C. PAIN / CEA – DAM Île-de-France  
J. E. BAILEY *et al.* / Sandia National Laboratory, États-Unis

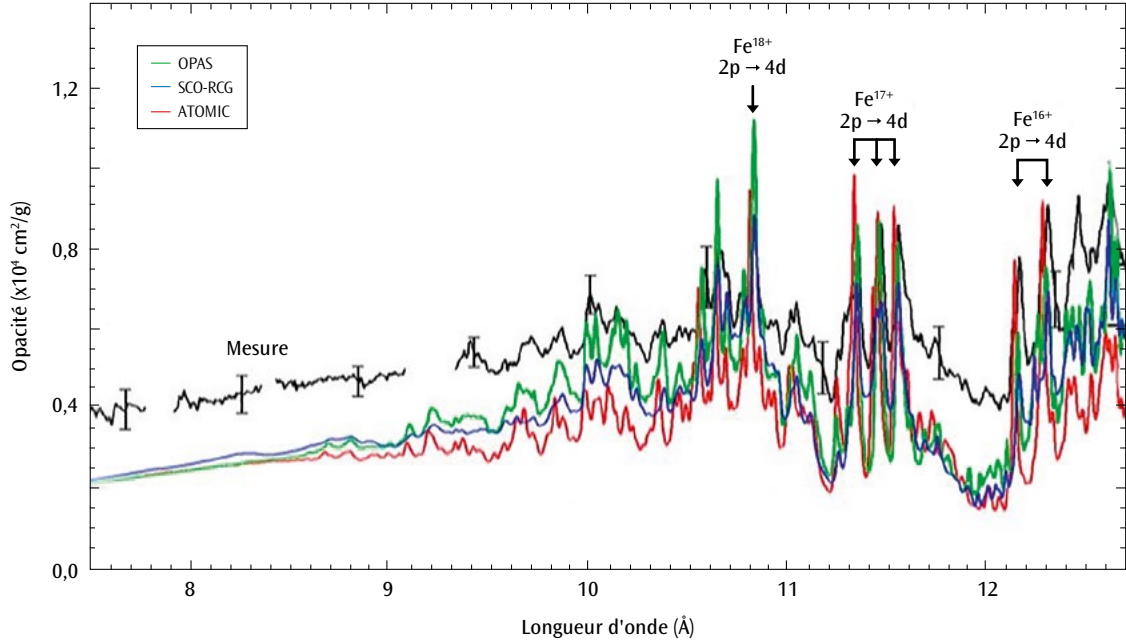
Avec la récente révision des abondances chimiques solaires, le modèle stellaire standard est en désaccord avec les résultats de mesures d'héliosismologie. Parmi les explications avancées, on estime qu'une augmentation de 5 à 20% de l'opacité, dans la zone radiative solaire, suffirait à rétablir l'accord entre le modèle et les observations. Récemment, l'opacité du fer a été mesurée en laboratoire, dans des conditions de température et de densité proches de celles attendues à l'interface radiative/convective solaire. Dans le domaine spectral considéré, les mesures s'avèrent notablement supérieures aux calculs.

L'opacité, grandeur caractérisant la résistance d'un milieu à la propagation de l'énergie radiative à une longueur d'onde donnée, est fondamentale pour décrire les milieux à grande densité d'énergie. Ceux-ci peuvent être créés en laboratoire et sont naturellement présents dans une grande variété d'objets astrophysiques. De longue date, on sait que les profils de température des intérieurs d'étoiles de type solaire sont contrôlés par les phénomènes radiatifs. Dans le cas du Soleil, composé essentiellement d'hydrogène, d'hélium et de quelques traces d'éléments plus lourds, ce sont ces derniers, qui, par transfert du rayonnement thermique, contribuent notablement au transport de l'énergie libérée au centre par les réactions de fusion, jusqu'à l'interface des zones radiative et convective. La récente révision à la baisse des proportions de carbone, d'azote et d'oxygène dans le mélange solaire a eu pour effet de dégrader l'accord précédemment observé entre les résultats de mesures d'héliosismologie et les prévisions du modèle stellaire standard. Afin de réconcilier observation et modélisation, il a été estimé qu'une augmentation de 5 à 20% de l'opacité dans la zone radiative était nécessaire. Faisant le constat qu'une telle augmentation est grande devant l'écart entre les différents calculs d'opacités moyennes utilisées par les astrophysiciens, la question de leur précision s'est posée et a motivé le développement d'un programme

expérimental sur le Z-pinch du Sandia National Laboratory [1].

Contribuant à 25% de l'opacité à l'interface des zones radiative et convective [2], le fer a été retenu pour cette validation. Mélangé à du magnésium et tamponné par des couches d'éléments légers, des échantillons de fer ont pu être portés, de manière homogène, à des températures ( $T$ ) comprises entre 1,91 et 2,26  $10^6$  K et à des densités électroniques ( $N_e$ ) comprises entre 0,71 et 4,0  $10^{22}$   $\text{cm}^{-3}$ . Ces températures élevées, encadrant celle de l'interface des zones radiative et convective, sont obtenues grâce à un chauffage radiatif assuré par le rayonnement X intense délivré par le Z-pinch. Bien que la nature et la structure des cibles aient été optimisées, les densités électroniques atteintes restent inférieures de plus d'un facteur 2 à celle attendue à l'interface des zones radiative et convective. La transmission spectrale de l'échantillon est déduite du rapport des enregistrements de l'atténuation d'un rayonnement sonde par l'échantillon tamponné et le tampon seul. Connaissant la masse surfacique de l'échantillon, l'opacité est déduite de la loi de Beer-Lambert. Pour chaque mesure, les conditions de température et de densité électronique sont déduites d'une analyse spectroscopique des raies d'absorption du magnésium au voisinage du seuil d'ionisation de la couche K.

L'opacité du fer mesurée à  $T = 2,11 \cdot 10^6$  K et  $N_e = 3,1 \cdot 10^{22}$   $\text{cm}^{-3}$  est présentée sur la **figure 1**.



**Figure 1.** Résultats de mesure (en noir) de l'opacité du fer à une température de  $2,11 \cdot 10^6$  K et une densité électronique de  $3,1 \cdot 10^{22}$   $\text{cm}^{-3}$  comparés à ceux des calculs OPAS (en vert) [2], SCO-RCG (en bleu) [3] et ATOMIC (en rouge) [4]. L'opacité mesurée est 30 à 400 % plus élevée que celles calculées cohérentes entre elles.

Entre 7 et 9,5 Å, le spectre est dominé par la contribution des processus de photo-ionisation directe en couche L 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-4d des ions  $\text{Fe}^{18+}$ ,  $\text{Fe}^{17+}$  et  $\text{Fe}^{16+}$ . La **figure 1** montre la comparaison, réalisée dans le cadre de la collaboration DAM-NNSA Basic Science, de l'opacité mesurée avec celles calculées à l'aide des codes OPAS [2], SCO-RCG [3] développés à la DAM et le code ATOMIC [4]. De conception récente, ces trois codes se caractérisent par un traitement précis et exhaustif des transitions entre états liés. De ce fait, ils restituent correctement la position et l'amplitude de nombreuses structures résonantes aux grandes longueurs d'onde. Bien que ces trois codes s'accordent sur le calcul du niveau moyen de l'opacité dans la gamme spectrale considérée, ils donnent des valeurs significativement moindres que la mesure.

Une mesure de l'opacité du fer, dans des conditions de température et de densité proches de celles attendues à l'interface radiative/convec-tive solaire, a été réalisée sur le Z-pinch du Sandia National Laboratory. Dans le domaine spectral considéré (7,0 à 12,7 Å), les mesures se révèlent de 30 à 400 % supérieures aux calculs

les plus raffinés 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 mesures suggèrent que la description communément admise des processus de photo-absorption dans les plasmas à haute densité d'énergie doit être réexaminée.

## Références

- [1] J. E BAILEY *et al.*, "A higher-than-predicted measurement of iron opacity at solar interior temperatures", *Nature*, **517**, p. 56 (2015).
- [2] C. BLANCARD, P. COSSÉ, G. FAUSSURIER, "Solar mixture opacity calculations using detailed configuration and level accounting treatments", *Astrophysical Journal*, **745**, p. 10 (2012).
- [3] J.-C. PAIN, F. GILLERON, "Accounting for highly excited states in detailed opacity calculations", *High Energy Density Physics*, **15**, p. 30 (2015).
- [4] J. COLGAN *et al.*, "Light element opacities from ATOMIC", *High Energy Density Physics*, **9**, p. 369 (2013).