

Une bouffée d'oxygène pour le Soleil



Date de mise en ligne : mardi 1er juillet 2008

L'abondance de l'oxygène dans le Soleil a été, pendant les 40 dernières années, très controversée, avec des hauts et des bas. Une équipe de chercheurs de l'Observatoire de Paris, en collaboration avec des astronomes étrangers, ont re-dérivé l'abondance de l'oxygène de la photosphère solaire. Ils se sont servis pour cela des meilleurs spectres disponibles du Soleil, et aussi d'un modèle réaliste à 3D, de l'hydrodynamique de l'atmosphère solaire, alors que les modèles traditionnels sont à 1D. Le modèle permet de dériver la structure en température 3D, et le champ de vitesses à la surface des couches où sont formées les raies spectrales. L'abondance d'oxygène qu'ils trouvent est en bien meilleur accord avec les mesures d'héliosismologie que ne le sont les travaux d'Asplund et al. (2004), mais l'abondance de l'oxygène est encore un peu trop basse pour sortir le Soleil de la "crise".

Etant si proche et si brillant par rapport aux autres étoiles, on pourrait penser que le Soleil n'a plus de secrets pour nous. Naïvement, on pourrait croire que la composition chimique du Soleil est bien connue, au moins pour les éléments présents dans le spectre solaire, ou dans les météorites. Mais ce n'est pas le cas : pour plusieurs éléments il y a encore débat sur leur abondance solaire. Parmi eux, l'oxygène est l'exemple le plus important, et en conséquence un des éléments les plus étudiés.

Après l'hydrogène et l'hélium, l'oxygène est l'élément le plus abondant dans l'univers, et son abondance a été très étudiée, dans la Galaxie et bien au delà. Dans ces travaux, l'abondance de l'oxygène solaire est un étalon naturel. Cette abondance a de plus des répercussions importantes en physique solaire et stellaire. Par exemple, l'oxygène est l'élément qui contribue le plus à l'opacité de l'enveloppe convective du Soleil. L'oxygène a ainsi un impact direct sur la structure interne et l'évolution du Soleil, et des étoiles semblables. Pour autant, la détermination spectroscopique de l'abondance de l'oxygène dans la photosphère solaire n'est pas une tâche aisée : peu de raies atomiques sont disponibles dans le spectre solaire, et la plupart d'entre-elles sont mélangées à des raies d'autres éléments. Par ailleurs, l'abondance météoritique de l'oxygène ne peut pas être utilisée, car l'oxygène est un élément trop volatil, qui s'est condensé incomplètement dans le refroidissement de la proto-nébuleuse solaire. Beaucoup d'effort a été consacré à la détermination spectroscopique de l'abondance photosphérique de l'oxygène, sans que l'on ait atteint une convergence sur une valeur définitive.

Les déterminations de l'abondance solaire de l'oxygène sont montrées en Figure 1. Après une phase de « concordance », l'abondance de l'oxygène a subi une chute sévère dans les dix dernières années. Cela a conduit Ayres et al. (2006) à remarquer, en plaisantant, que cette tendance aboutirait à ce que le Soleil n'ait plus d'oxygène vers 2015. Plaisanterie mise à part, une basse abondance de l'oxygène est incompatible avec la structure interne du Soleil déduite des observations d'héliosismologie.

Dans un effort pour contribuer à la controverse entre une abondance « haute » ou « basse » de l'oxygène, une équipe de chercheurs de l'Observatoire de Paris en collaboration avec d'autres ont redéterminé l'abondance photosphérique de l'oxygène solaire, indépendamment des déterminations antérieures. Pour ce faire, ils ont utilisé les meilleurs spectres solaires actuellement disponibles et employé un modèle hydrodynamique 3D de l'atmosphère solaire, calculé avec le code CO5BOLD. En contraste avec un modèle d'atmosphère traditionnel 1D, une simulation 3D, donne une description physique ab initio du transport convectif, et en conséquence, un modèle cohérent de la structure 3D en température et en champ de vitesses des couches superficielles solaires dans lesquelles les raies spectrales sont formées. Dans la Figure 2, le modèle CO5BOLD (moyenné horizontalement), ligne continue, est comparé à celui (3D) d'Asplund et al. (2004), tirés, et au modèle semi-empirique (1D) d'Holweger-Müller (cercles). Le résultat de la présente analyse est une abondance de l'oxygène entre 8.73 et 8.79, encadrant la valeur obtenue par Holweger (2001), et un peu supérieure à la valeur d'Asplund et al. (2004). Dans la Fig. 1, l'astérisque

verte est la valeur de Holweger (2001), La bleue la valeur d' Asplund et al. (2004) et le point rouge, à contre-courant, la présente détermination.

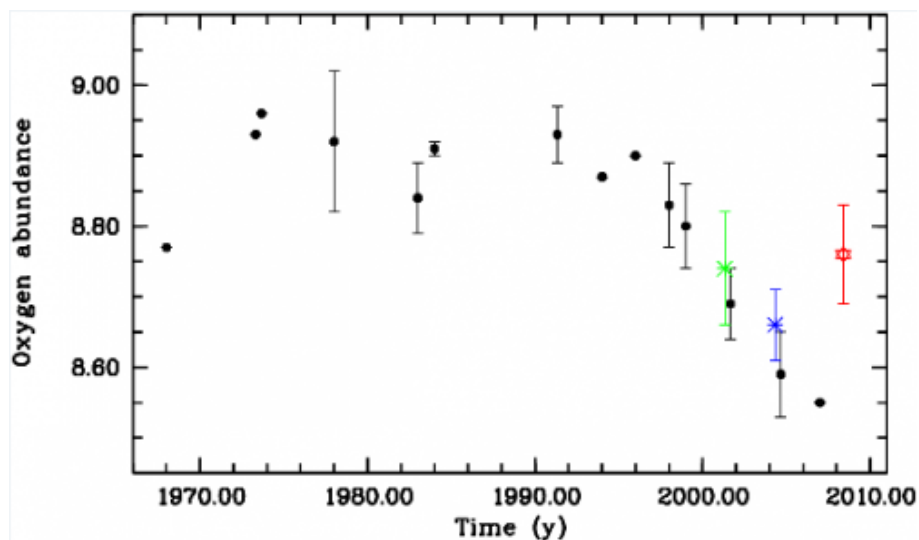


Figure 1 : Déterminations de l'abondance de l'oxygène en fonction du temps. L'ordonnée est la quantité $A(O) = \log(N(O)/N(H)) + 12$. L'étoile rouge représente le résultat du présent travail.

L'analyse détaillée révèle que la baisse de l'abondance de l'oxygène solaire d'environ 8.9 à celle d' Holweger 8.73 est due à l'amélioration des données atomiques et la prise en compte des écarts à l'équilibre thermodynamique local. La décroissance supplémentaire donnée par Asplund et al. (2004) était attribuée à l'emploi d'un modèle hydrodynamique 3D du modèle solaire. Le présent travail ne confirme pas cette assertion. Pour les auteurs, l'abondance 3D est légèrement supérieure à celle obtenue par le modèle 1D correspondant. Les principales différences entre la présente analyse et celle d'Asplund et al. (2004) sont :

les mesures de largeurs équivalentes des raies, qui sont supérieures dans la présente analyse les hypothèses dans le calcul des écarts à l'ETL, qui sont plus faibles ici une différence entre les deux modèles 3D (voir Fig. 2).

L'abondance solaire recommandée pour l'oxygène solaire est 8.76 , impliquant une métallicité dans l'intervalle $Z = 0.014 - 0.016$, dépendant du choix de l'abondance pour d'autres éléments comme le carbone et l'azote. Les auteurs considèrent $Z = 0.015$ comme la valeur la plus probable, à comparer à celle d'Asplund et al. (2004) $Z = 0.012$. Ces métallicités solaires obtenues par spectroscopie sont à confronter avec celles obtenues à partir de l'héliosismologie, telle que $Z = 0.172$ d'Antia & Basu (2006), ou $Z = 0.016$ de Basu & Antia (2008). La conclusion est que le présent résultat est en meilleur accord avec ceux de l'héliosismologie que ceux d' Asplund et al. (2004), mais que l'abondance solaire est encore un peu trop basse pour résoudre entièrement la « crise de l'oxygène ».

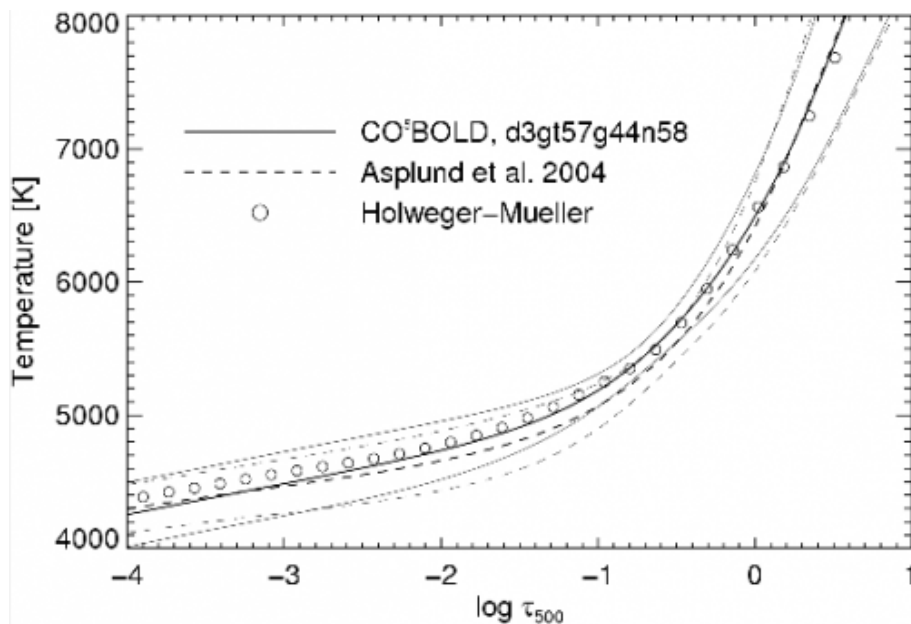


Figure 2 : Comparaison des structures en température (moyennées horizontalement) du modèle CO5BOLD employé dans ce travail, et de celle d' Asplund et al. (2004) , également 3D, et du modèle semi-empirique (1D) d'Holweger-Müller. Pour les modèles 3D, les lignes fines de part et d'autre de la courbe moyenne (trait épais) indiquent l'excursion en température autour de la valeur moyenne. Cliquer sur l' image pour l'agrandir