

Résumé

Contexte

En astrophysique des données précises de transition de raies atomiques sont des paramètres fondamentaux. Les calculs de synthèse du spectre sont d'une importance capitale pour le développement de modèles complexes qui décrivent, analysent et expliquent les étoiles et les planètes, leurs structures internes, leurs atmosphères et leur évolution par rapport à leur environnement. Les incertitudes et les erreurs dans les données atomiques fondamentales adoptées peuvent se propager systématiquement dans tous les domaines de l'astrophysique, de la formation des étoiles aux planètes à l'évolution galactique à grande échelle. Il est difficile d'obtenir des données atomiques fondamentales précises d'intérêt astrophysique à partir de mesures en laboratoire. Il n'y a qu'un nombre limité de références qui offrent ces importantes valeurs de données atomiques. Les valeurs de référence atomiques sont souvent complémentaires plutôt que redondantes et peuvent fournir des informations incomplètes ou inexacts. Les évaluations importantes de la qualité des valeurs des données atomiques fournies sont rares (et pour la plupart absentes), ce qui complique beaucoup la validation des résultats qui découlent de leur application.

Méthodologie

L'objectif principal de BRASS était d'évaluer correctement la qualité des données atomiques nécessaires pour la recherche en astrophysique. En particulier, les données de transition de raies atomiques sont des paramètres fondamentaux pour la spectroscopie stellaire quantitative. L'accent a été mis sur le développement et l'application de nouvelles méthodes pour éliminer et réduire les erreurs systématiques dans les ensembles de données atomiques proposés dans la littérature et les plus grands référentiels en ligne en comparant des spectres stellaires observés de très haute qualité avec des spectres théoriques de pointe.

L'objectif de BRASS était de fournir la plus grande évaluation systématique et homogène de la qualité des données atomiques fondamentales à ce jour en matière de longueurs d'onde et d'espèces atomiques. Nous avons combiné des spectres stellaires de très haute qualité, observés avec des spectrographes modernes à haute résolution, avec des données atomiques fondamentales soigneusement sélectionnées et nécessaires pour calculer des spectres stellaires théoriques précis. Nous avons comparé les spectres observés et théoriques en détail, raie par raie, pour évaluer la validité et la qualité des données atomiques sélectionnées. Les spectres théoriques ont été calculés avec des codes de transfert radiatif avancés qui utilisent des modèles d'atmosphère modernes d'étoiles des types spectraux K, G, F, A et B.

Un objectif important de BRASS était également de fournir une plate-forme ouverte de données dynamiques avec des représentations de données standardisées permettant l'interaction de l'utilisateur avec les données atomiques étudiées (hyperliées), en combinaison avec des outils d'affichage graphique avancés qui offrent de nouvelles fonctionnalités puissantes pour la recherche spectroscopique stellaire.

Pour atteindre ces objectifs, les questions suivantes ont été abordées:

- (1) Les données atomiques fondamentales nécessaires à la recherche spectroscopique en astrophysique, mais dispersées dans une grande variété de référentiels de données en ligne et dans la littérature scientifique, peuvent-elles être combinées dans une seule base de données en accès libre? Quelles méthodes sont nécessaires pour combiner uniformément ces ensembles de données? Cet objectif a été atteint en développant deux méthodes pour ordonner les données de raies atomiques selon la méthode traditionnelle de correspondance croisée en utilisant des longueurs d'onde de la transition, et une nouvelle approche plus avancée qui peut prendre en compte des informations uniques de configuration de la transition électronique.
- (2) Peut-on évaluer la qualité des données sur les raies atomiques combinées dans les bases de données et la littérature lorsqu'elles résultent principalement de mesures effectuées en laboratoire et/ou sont produites à l'aide de calculs de la structure atomique et des probabilités de transition des raies? Leur précision limitée est inhérente à ces méthodes de production traditionnelles. Cet objectif a été atteint en mesurant de nouvelles données sur les raies atomiques, que nous avons testées de manière approfondie en comparant les spectres d'étoiles théoriques et observées. Nous avons effectué des évaluations approfondies de la qualité des données atomiques sélectionnées en utilisant des calculs avancés de transfert radiatif pour les spectres stellaires qui ont été comparés avec précision aux spectres Mercator-HERMES et KPNO-FTS à haute résolution des étoiles de type FGK observées avec des rapports signal-sur-bruit très élevé.
- (3) Les résultats de l'analyse de la qualité des données atomiques testées peuvent-ils être fournis de manière complète et accessible? Cet objectif a été atteint en développant une plate-forme de données modernes qui offre ces résultats avec toutes les données d'entrée. Les ensembles de données validées sont proposés de manière interactive via brass.sdf.org en combinaison avec les spectres d'étoiles observées et théoriques. La combinaison de données de lignes atomiques avec des spectres stellaires de haute qualité est une nouvelle évolution pour le développement d'une base de données spectrales-atomiques modernes qui fournit une référence universelle à la recherche spectroscopique contemporaine.

Nos comparaisons détaillées des données de transition de raies (les valeurs $\log(gf)$) extraites de divers référentiels de données atomiques et de la littérature ont révélé des différences remarquablement importantes allant jusqu'à 3 ordres de grandeur, voir plus. Les valeurs peuvent considérablement changer au fil du temps, parfois en quelques années, ce qui montre l'importance de fournir une évaluation externe de leur précision en comparant aux valeurs obtenues à partir d'observations spectroscopiques astrophysiques contemporaines de haute qualité.

En combinant les analyses de données atomiques et spectroscopiques de BRASS (c'est-à-dire en utilisant des listes de raies spectrales et des étoiles de référence de haute qualité), le projet a compilé une longue liste de raies spectrales de référence adaptées à l'évaluation de la qualité des données atomiques récupérées. Les résultats de ces méthodes d'analyse complémentaires ont déterminé la fiabilité des données de raies atomiques. Dans le cas où les méthodes produisaient des valeurs similaires (en tenant compte des barres d'erreur), les

données atomiques récupérées étaient considérées comme fiables, sinon un ou plusieurs facteurs de complication pourraient les exclure d'une analyse plus approfondie.

Les objectifs du projet ont été atteints en effectuant une analyse systématique des raies spectrales sélectionnées dans chaque étoile de référence FGK. Il a abouti à la liste finale de 1091 raies spectrales qui ont été examinées et comparées quantitativement entre les divers référentiels de données atomiques et les spectres de référence stellaires observés. Un sous-ensemble de 845 raies atomiques a été retenu avec des valeurs $\log(gf)$ qui sont cohérentes avec les critères de sélection astrophysique. Les valeurs 'astrophysiques' ont donc été utilisées comme valeurs de calibration pour l'évaluation de la qualité par rapport à celles extraites des référentiels et de la littérature. Dans le cas où ces dernières valeurs étaient en accord avec les valeurs de calibration, elles sont recommandées comme étant fiables pour la recherche spectroscopique avancée.

Conclusions

Le projet BRASS a produit d'importants nouveaux résultats avec le développement de nouvelles méthodes pour l'évaluation de la qualité des données de raies atomiques au cœur de la recherche spectroscopique moderne en astrophysique. Il a fourni les résultats de l'évaluation de la précision des valeurs $\log(gf)$ atomique requises pour la modélisation théorique des spectres stellaires à haute résolution en utilisant sept étoiles de référence du type FGK, y compris le Soleil. Des valeurs de $\log(gf)$ astrophysique ont été calculées pour 1091 transitions de raies non affectées par des raies proches en longueur d'onde, et soigneusement sélectionnées entre 420 nm et 680 nm en utilisant deux méthodes différentes. La conformité des deux méthodes a permis de retenir 845 raies adaptées à cette évaluation de la qualité. Une analyse sur les valeurs moyennes de $\Delta\log(gf)$ a révélé de grandes différences pour les raies avec une qualité de données atomiques limitée proposées dans la littérature pour $-3 \leq \log(gf) \leq -0,5$.

Les résultats de BRASS ont montré que ~53% des raies de qualité évaluées ont au moins une valeur $\log(gf)$ en accord avec les valeurs astrophysiques, tandis que les valeurs des autres raies peuvent s'écarter de plus de 0,5 dex. Seulement 38% des raies Fe I étudiées ont des valeurs $\log(gf)$ suffisamment précises, ce rapport grimpe à 70% à 75% pour les autres raies d'éléments du groupe du fer. Le pourcentage élevé de valeurs $\log(gf)$ théoriques de Fe I de faible qualité proposées dans la littérature résulte principalement de raies de force moyennes et faibles dans des multiplets atomiques avec des niveaux de d'énergie inférieurs à 4 eV. Cela est dû au mélange entre les niveaux d'énergie des transitions/configurations atomiques voisines et des niveaux d'énergie inexacts ou incomplets. Les résultats ont également montré que la majorité des valeurs de $\Delta\lambda$ restent inférieures à $\pm 0,01 \text{ \AA}$, ce qui est comparable à la grande précision de l'échelle de longueur d'onde des spectres de calibration de HERMES.

Les données des raies atomiques contrôlées et les spectres d'étoiles observées et théoriques sont proposés en ligne dans l'interface publique de données BRASS (BDI). Les utilisateurs de la base de données BRASS peuvent interroger les "Lines" et "Spectra" BDI pour télécharger les données atomiques, y compris les références bibliographiques correspondantes, grâce à l'affichage interactif de graphiques dynamiques permettant de comparer toutes les valeurs de $\log(gf)$. Le "Spectra" BDI fournit des outils interactifs pour

afficher les spectres de calibration observés et théoriques, combinés avec l'identification des raies et au téléchargement des données de raies atomiques et des propriétés des raies par l'utilisateur. Le BDI contient des pages interactives avec les résultats des évaluations de la qualité de 1091 raies examinées. Il propose également des outils de mesure interactive des largeurs équivalentes de raies spectrales, ainsi que des pages d'aide et des vidéos d'instruction détaillées pour ses utilisateurs.