

Effets du fer sur les profils sismiques. Applications aux manteaux terrestre et martien

Frédéric Béjina, IRAP, DIP–Belin, frederic.bejina@irap.omp.eu, 05 61 33 26 01

Les profils de vitesses sismiques en fonction de la profondeur est un des grands apports historiques de la sismologie (par ex., Dziewonski and Anderson, 1981) car ils ont dévoilé les grandes enveloppes et interfaces de l'intérieur de la Terre puis, de la Lune et plus récemment de Mars grâce au sismomètre SEIS déposé par la mission Mars Insight (Fig. 1, voir aussi Huang et al., 2022). En revanche, la sismologie ne peut, à elle seule, proposer des modèles de compositions chimique et minéralogique des intérieurs planétaires. Il faut coupler sismologie et expériences de laboratoire dans lesquelles est mesurée la propagation des vitesses sismiques (ondes P et S) dans différents minéraux. De ces mesures, sont déduits les paramètres thermo-élastiques qui définissent les propriétés sismiques des minéraux. On peut ensuite calculer les vitesses de mélanges (roches) ayant des compositions minéralogiques différentes et ajuster ces modèles aux données sismiques. Un raffinement supplémentaire est de varier les compositions chimiques des minéraux candidats comme phases mantelliques.

Ce projet consiste à explorer, à partir de modèles minéralogiques simplifiés de manteau (manteau supérieur uniquement), la sensibilité de ces profils de vitesses en fonction de la teneur en fer des minéraux. Ces profils pourront être comparés à ceux mesurés sur Terre et sur Mars (refs ci-dessus) et nous pourrons tester avec quelle précision la teneur en fer de ces manteaux peut être définie.

Après une recherche bibliographique des paramètres élastiques des minéraux des intérieurs planétaires, le code python BurnMan (Cottaar et al., 2014) sera utilisé pour calculer des profils sismiques.

Les résultats de cette étude entrent dans le cadre de notre projet In-Sight/SEIS : Exploring Mars Interior with Random Seismic Wavefields And Experimental Mineralogy, qui vise à ajuster un modèle minéralogique du manteau martien aux données sismiques. Ils permettront aussi de mieux cerner les effets de la chimie et de la minéralogie sur les profils sismiques, ainsi que de choisir quelles sont les expériences importantes de mesures V_p , V_s en laboratoire qui restent à réaliser.

Requis : programmation en python (dont librairies classiques numpy, matplotlib, etc.)

Bibliographie

- Dziewonski, A. and Anderson, D., 1981. Preliminary reference Earth model. *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, 25(4), 297-356.
- Stähler, S. C., Khan, A., Banerdt, W. B., Lognonné, P., Giardini, D., Ceylan, S., et al., 2021, *Science*, 373(6553), 443-448.
- Huang, Q., Schmerr, N. C., King, S. D., Kim, D., Rivoldini, A., Plesa, A.-C., et al., 2022, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(42), e2204474119.
- Cottaar, S., Heister, T., Rose, I., Unterborn, C. (2014). BurnMan : A lower mantle mineral physics toolkit. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 15(4), 1164-1179.

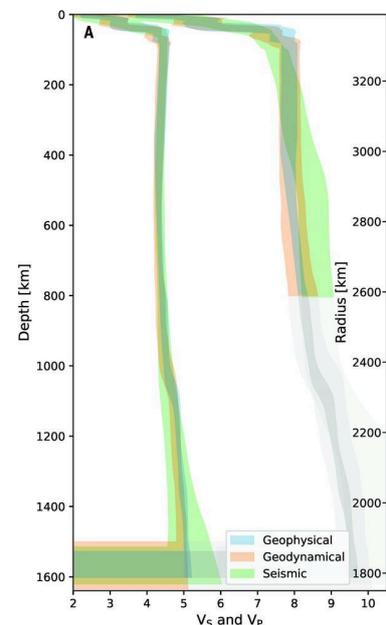


FIGURE 1 – Profils sismiques de l'intérieur de Mars. La zone en gris clair sous les 800 km pour les ondes P indique qu'aucune information directe n'est disponible pour cette région (Stähler et al., 2021).

Le mystère des aurores polaires bleues

Frédéric Pitout, Irap (Peps, site Roche) ; frederic.pitout@irap.omp.eu ; 05 61 55 67 02

Description

Les aurores polaires se produisent quand des particules chargées électriquement, d'origine solaire ou magnétosphérique, se déversent dans l'atmosphère des hautes latitudes. Les atomes et molécules atmosphériques sont alors excités et en se désexcitant, ils émettent une lumière caractéristique, c'est l'aurore.

À l'automne 2023, un astrophotographe amateur a pris des clichés d'aurores à partir de la France. Ceci est en soit une rareté et nous tâcherons d'expliquer pourquoi, cette nuit-là, les conditions étaient favorables à ce que des aurores soient visibles à de si basses latitudes.

Mais une autre particularité anime la communauté scientifique : par moment, au lieu d'être rouges comme souvent à nos latitudes, les aurores photographiées sont bleues et uniquement bleues. Est-ce là leur vraie couleur ? Auquel cas, quel élément est excité par quel type de particule pour n'émettre que du bleu ? Sont-ce des électrons énergétiques qui impactent les molécules de diazote (N_2) ? Ou des protons qui mènent dans des émissions $H\beta$? Il existe aussi un phénomène de diffusion résonance de la lumière solaire par les ions N_2^+ qui peut provoquer des émissions lumineuses bleues. Comment savoir quel processus est à l'œuvre ? Mais ne serait-ce pas tout simplement un problème instrumental qui ferait qu'une émission plus classique (comme la raie verte de l'oxygène atomique O) serait détectée comme du bleu ? Voilà les principales questions auxquelles il faudra répondre.

Plus largement, ce Pir sera l'occasion de plonger dans la physique aurorale et de se familiariser avec les concepts et les outils (instruments et modèles numériques) de la discipline.

Bibliographie

Gallardo-Lacourt, B., Frey, H.U. & Martinis, C. (2021). Proton Aurora and Optical Emissions in the Subauroral Region. *Space Sci Rev* 217, 10, <https://doi.org/10.1007/s11214-020-00776-6>

Jokiaho, O., Lanchester, B. S., and Ivchenko, N. (2009). Resonance scattering by auroral N_2^+ : steady state theory and observations from Svalbard, *Ann. Geophys.*, 27, <https://doi.org/10.5194/angeo-27-3465-2009>, 2009.

Whiter, D. K., Partamies, N. Gustavsson, B. and Kauristie (2023). K. The altitude of green OI 557.7nm and blue N_2^+ 427.8nm aurora, *Ann. Geophys.*, 41, <https://doi.org/10.5194/angeo-41-1-2023>

Caractérisation du champ magnétique d'étoiles jeunes à l'aide d'observations en spectroscopie haute-résolution infrarouge

Alexis Lavail, IRAP, équipe PS2E (Site Belin), astro@lavail.net

Les champs magnétiques jouent un rôle important pour l'évolution stellaire, et influent de nombreux processus physiques à l'intérieur, à la surface, et autour des étoiles (transport d'énergie, rotation, convection, vents, accrétions etc ...). La question de l'origine des champs magnétiques stellaires est encore bien débattue, et il est utile d'observer des étoiles jeunes (comme des étoiles T Tauri) et de caractériser leurs champ magnétiques pour contraindre les scénarios de formation et d'évolution des champs magnétiques stellaires.

Observationnellement, on peut caractériser le champ magnétique d'une étoile en modélisant son effet sur le spectre stellaire *via* l'effet Zeeman : certaines raies spectrales s'élargissent voire même se séparent en plusieurs raies sous l'effet du champ magnétique. C'est ce travail que j'ai effectué pour des étoiles T Tauri dans l'article [Lavail et al. 2019](#).

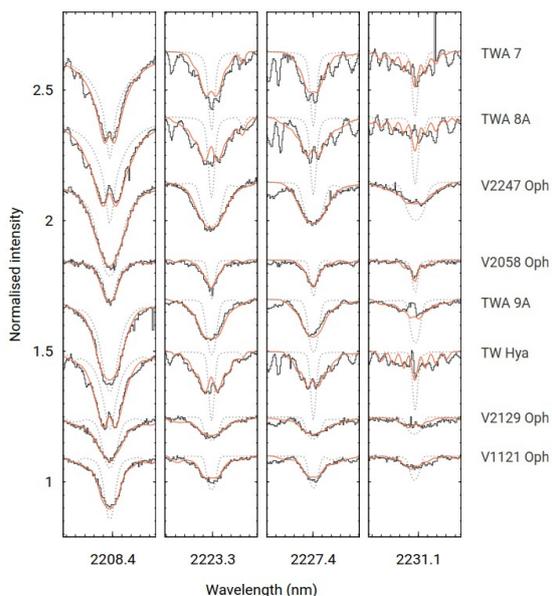


Figure 1: observations (en noir) de plusieurs étoiles T Tauri dans le proche infrarouge centrées sur 4 raies spectrales sensibles au champ magnétique, spectres synthétiques pour ces étoiles sans champ magnétique (gris pointillé) et avec champ magnétique (orange).

Ma proposition de PIR est de pousser ce travail un peu plus loin en améliorant l'approche. Au lieu de faire l'hypothèse que certains paramètres stellaires sont connus (comme la température effective ou la gravité de surface de l'étoile), l'idée serait de faire varier ces paramètres et de les inclure dans la méthode MCMC pour obtenir des barres d'erreur plus réalistes sur les valeurs de champ magnétique obtenues.

Je fournirai les spectres observés, [le code python](#) utilisé pour l'article, ainsi que la grille de spectre synthétique nécessaire pour effectuer les calculs

Bibliographie

- Lavail et al., 2019, A&A, 630, A99

La tension sur la constante de Hubble et l'énergie sombre

Isaac Tutusaus, IRAP, GAHEC (Belin), isaac.tutusaus@irap.omp.eu, 05 61 33 28 12

La valeur directement mesurée du taux de l'expansion de l'univers aujourd'hui (ou constante de Hubble) est significativement supérieure à la valeur dérivée des observations cosmologiques en supposant le modèle de concordance en cosmologie. Cette différence a été nommée la tension sur la constante de Hubble et actuellement est un des plus grands problèmes du modèle de base. Une possibilité qui a été étudié pour résoudre cette tension est de considérer de l'énergie sombre au-delà d'une constante cosmologique. Mais, comme on peut observer dans la figure ci-dessous (Raveri 2023), les distances mesurées avec les supernovae de type Ia et celles mesurées avec les oscillations acoustiques des baryons ne sont pas compatibles, ce qui fait que même le modèle le plus général d'énergie sombre ne peut pas résoudre la tension sur la constante de Hubble.

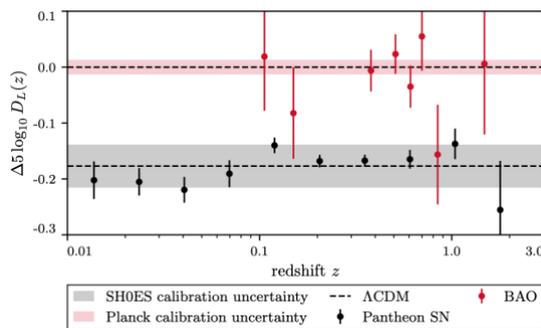


Fig. 1.1: The luminosity distance residuals with respect to the Λ CDM model best fit to CMB observations from Planck [7]. BAO [8, 9, 10] data points, in red, are calibrated by the Planck determination of the physical scale of the sound horizon in the Λ CDM model. Pantheon SN [11] data points, in black, are calibrated by the SHOES [12] measurement of absolute SN magnitude, M_0 . The upper colored band shows the uncertainty in the sound horizon calibration while the lower band shows the errors in the measurements of M_0 . The separation between the two bands shows in full display the Hubble tension. The gap between the data points of the two data sets shows the difficulty of solving the tension with late times modifications to the expansion history: SN and BAO data overlap in redshift, but, once calibrated, do not overlap in distance space. Figure adapted from [13].

L'objectif dans ce projet est de comprendre et reproduire tous les éléments de cette figure, qui montre visuellement la tension sur la constante de Hubble. La première partie consistera à comprendre les différentes sondes cosmologiques impliquées et comment on passe des observables aux distances cosmologiques. Ensuite, l'idée est de reproduire cette figure avec les dernières données cosmologiques. Finalement, les étudiants montreront que différents modèles d'énergie sombre ne peuvent pas expliquer toutes les mesures en même temps.

Bibliographie

- ☒ M. Raveri 2023. arXiv: <https://arxiv.org/pdf/2309.06795.pdf>

Champs aléatoires imitant la turbulence des fluides astrophysiques

Jean-Baptiste Durrive, IRAP, Micmac/Gahec, jdurrive@irap.omp.eu, 0561556648

La turbulence est omniprésente dans l'Univers, notamment dans les milieux interstellaires, intra-amas et intergalactiques, mais sa modélisation est difficile. Les solutions analytiques complètes des équations du mouvement étant inaccessibles, l'outil principalement utilisé sont les simulations MHD numériques directes, mais celles-ci sont très coûteuses, en temps et en CPU. Les nouvelles méthodes numériques (machine learning, etc) améliorent les performances mais éloignent de la compréhension physique (fonctionnement en boîte noire). Nous développons donc une approche complémentaire aux simulations, en construisant des champs stochastiques physiquement motivés qui imitent des champs turbulents, i.e. qui reproduisent les statistiques des champs simulés. En plus d'améliorer notre compréhension fondamentale des processus en jeux, cette approche analytique aide à l'interprétation des observations car les paramètres libres de nos modèles peuvent être ajustés aux données et permettent également de générer des données synthétiques à bas coûts [1].

La figure 1 illustre la méthode sur un cas simple. A gauche se trouve un bruit blanc Gaussien, dans lequel les pixels sont indépendants. Les images suivantes en sont des convolutions (plus précisément des champs Gaussiens fractionnaires¹) utilisant une fenêtre de taille L de plus en plus grande. On observe que le champ résultant est structuré (pixels non-indépendants) et L contrôle la taille typique des structures. Physiquement, L représente l'échelle intégrale de la turbulence, à laquelle de l'énergie est injectée dans le système (e.g. par explosions de supernovae dans le milieu interstellaire ou jets AGN dans le milieu intra-amas).

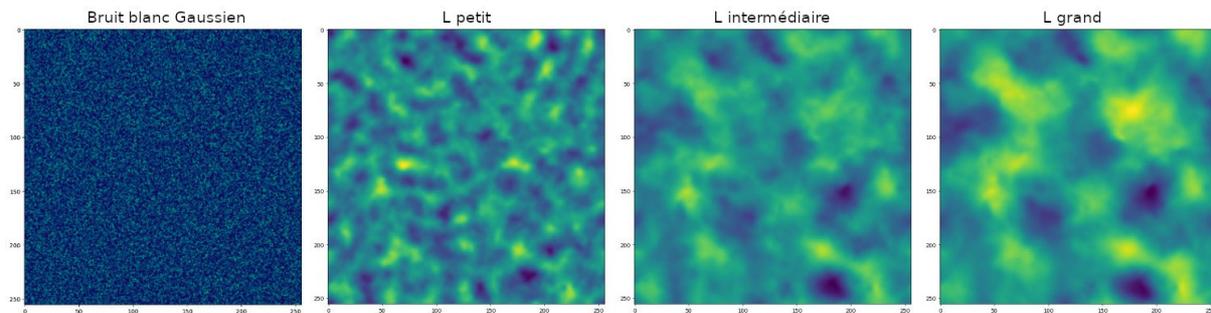


Fig. 1 : Génération de champs scalaires 'turbulents' par simple convolution d'un bruit blanc.

Le projet, basé sur [1], introduira au calcul stochastique pour apprendre à décrire les phénomènes fluides (cascade d'énergie, fractalité, etc) régissant la formation des étoiles et des galaxies, par exemple dans les nuages moléculaires [2]. Le travail sera orienté sur des aspects plus analytiques ou numériques (mais pas de simulation) selon les préférences des étudiant.es.

Bibliographie

- [1] Durrive, Lesaffre, Ferrière, MNRAS, 496, 3015-3034 (2020)
- [2] Stutzki et al, A&A, v.336, p.697-720 (1998)

1 https://en.wikipedia.org/wiki/Fractional_Brownian_motion