

Mesurer l'importance des effets quantiques avec des ondes sonores : l'élasticité de l'hydrogène solide à haute pression

Le principe d'Heisenberg de la mécanique quantique interdit la détermination simultanée de la position et de la vitesse. Cela se traduit par des vibrations résiduelles des atomes même à température nulle. Aujourd'hui encore, l'importance de la contribution des effets quantiques avec l'augmentation de la densité fait débat. Il était jusqu'à présent admis qu'elle devait s'estomper dans les matériaux soumis à de hautes pressions, arguant que la partie répulsive des interactions entre atomes deviendrait prépondérante. Cette hypothèse a récemment été remise en question par des calculs suggérant l'existence de phases liquides à haute pression et température ordinaire dans des métaux alcalins.

Compte tenu de la faible masse de l'hydrogène, les «vibrations de point zéro» jouent un rôle important dans ses propriétés mécaniques entre autres, mais nous ignorons toujours si leurs contributions augmentent ou se réduisent à haute densité. C'est pour tenter d'y répondre que des chercheurs de l'IMPMC¹ ont mesuré les propriétés élastiques de l'hydrogène et ont constaté que les effets quantiques persistent et ne modifient que l'aspect quantitatif des propriétés mécaniques de l'hydrogène sous haute pression.

Le tenseur élastique est une sonde très sensible aux variations des propriétés des matériaux car il est directement relié à la dérivée seconde de l'énergie du système. Les méthodes expérimentales pompe-sonde que nous avons développées (acoustique laser picoseconde en conditions extrêmes²) permettent de le déterminer, in situ et sans modélisation, par la mesure des vitesses des ondes sonores se propageant dans les matériaux même de dimensions microscopiques. Ainsi, une impulsion laser de 100 femtosecondes (10–15 s), délivrée par un laser pompe, est focalisée sur la surface avant de l'échantillon (Figures 1 et 2).

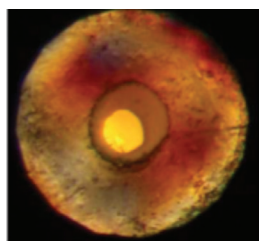


Figure 1

Hydrogène solide dans une enceinte haute pression. La photo mesure 300 μm de côté. Au centre dans l'échantillon de 100 μm de diamètre, le disque brillant correspond au générateur d'ondes acoustiques excité par un laser pulsé femtoseconde.

L'épaisseur de l'échantillon d'hydrogène est de 20 μm , celle du générateur d'ondes acoustiques de 0.2 μm . Le dispositif est schématisé de profil sur la figure 2.

- 1 Ce travail est une collaboration entre les équipes Propriétés des amorphes, liquides et minéraux (PALM) et Minéralogie des intérieurs planétaires (MIP) de l'IMPMC, leaders reconnues des mesures élastiques sous conditions extrêmes, et A.F. Goncharov, chercheur du Geophysical Laboratory (Carnegie Washington), spécialiste de l'hydrogène.
- 2 Ce banc expérimental unique au monde (financé par une ANR) a été développé par les chercheurs de l'IMPMC appuyés par la Cellule Projet de l'institut.

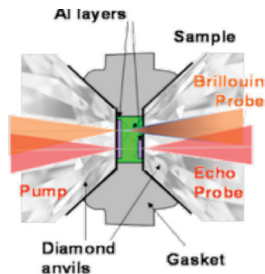


Figure 2

Schéma de principe de l'excitation et de la détection des ondes acoustiques dans un échantillon d'hydrogène soumis à des conditions extrêmes de pression.

Cela crée une contrainte qui se propage au travers du matériau et qui est détectée par un laser sonde via les perturbations qu'elle engendre lorsqu'elle émerge sur la face opposée. On peut alors par un « simple chronométrage » déterminer les vitesses des ondes sonores longitudinales et transverses en fonction des directions de propagation, mais également, si le matériau est transparent à la longueur d'onde du laser sonde utilisé, la fréquence du phonon Brillouin lié à l'interaction entre les ondes de densité se propageant dans l'échantillon et le laser sonde. L'ensemble de ces résultats (Figure 3) permet de remonter aux constantes élastiques du matériau et, dans ce cas spécifique, d'en déduire le comportement mécanique de l'hydrogène sous haute pression (Figure 4).

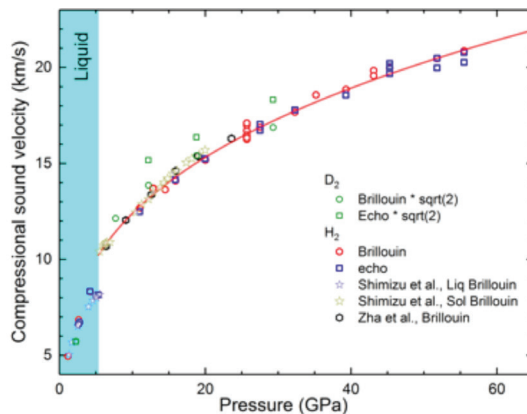


Figure 3

La courbe montre l'accord de nos déterminations de la vitesse du son dans l'hydrogène obtenue à la fois par diffusion Brillouin et temps de propagation de pulses acoustiques.

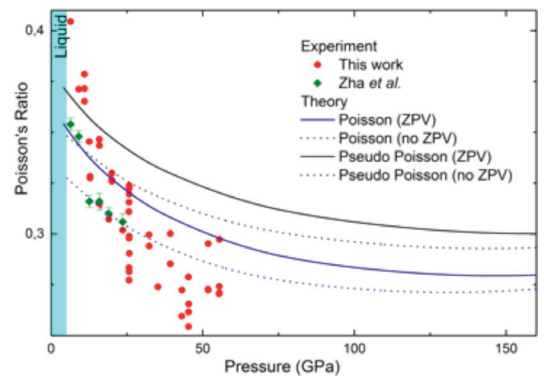


Figure 4

Elasticité de l'hydrogène sous haute pression. Vers 50 GPa, la variation du coefficient de Poisson en fonction de la pression devient très faible. Ce comportement était attendu mais à plus haute pression. Les courbes pointillées incluent les effets quantiques. On n'observe pas de différences qualitatives lorsqu'on néglige les aspects quantiques (courbes continues).

Nos calculs prévoient que le coefficient de Poisson, qui mesure le rapport entre la déformation suivant l'axe de contrainte et perpendiculairement à celui-ci, présente un minimum en fonction de la pression. Nos résultats montrent que la très forte décroissance du coefficient de Poisson, observée à basse pression, ralentit à partir d'environ 40-50 GPa. De plus, ils indiquent que les vibrations d'origine quantique « de point zéro » restent non négligeables mais ne font que décaler les comportements classiques et quantiques d'une valeur quasi constante. Le comportement quantique n'est donc dans ce cas ni renforcé ni amoindri par la pression, ce qui était difficilement prévisible a priori.

Les développements en cours visent à l'extension des applications de l'acoustique laser picoseconde à haute pression en couplant le dispositif actuel avec des systèmes de chauffage laser. L'objectif est de pouvoir mesurer les propriétés élastiques des matériaux dans un très grand domaine de pressions et températures, avec des applications allant de la physique des intérieurs planétaires, aux études des métaux liquides, en passant par les matériaux à fort intérêt technologique.

Référence

Elasticity and Poisson's ratio of hexagonal close-packed hydrogen at high pressures

Alexander. F. Goncharov, Michel Gauthier, Daniele Antonangeli, Simon Ayrinhac, Frédéric Decremps, Marc Morand, Alexei Grechnev, S. M. Tretyak, Yu. A. Freiman

PHYSICAL REVIEW B Volume: 95 Issue: 21 Article Number: 214104 DOI: 10.1103/PhysRevB.95.214104

Contact

Michel Gauthier : Michel.Gauthier@upmc.fr