

L'hydrogène métallique

WILLIAM NELLIS

En recréant les conditions qui règnent dans le noyau de Jupiter, on obtient l'hydrogène sous la forme d'un métal.

Le canon à gaz du Laboratoire Lawrence Livermore, en Californie, mesure une vingtaine de mètres de longueur et il contient assez d'hydrogène pour exploser aussi violemment que dix bâtons de dynamite. Les projectiles qu'il tire ont une vitesse maximale de sept kilomètres par seconde, soit plus de 20 fois la vitesse du son et environ 15 fois celle d'une balle de fusil. Cet engin n'est pourtant pas une arme, mais un instrument de recherche. Il ne prend pour cible que quelques gouttes de liquide.

Ce liquide est fait de l'élément le plus commun de l'Univers : l'hydrogène. Malgré une structure très simple (l'atome est composé d'un proton et d'un électron), l'hydrogène a un comportement beaucoup plus complexe qu'on ne l'imaginait. Aux températures et pressions ambiantes, l'hydrogène est un gaz constitué de molécules à deux atomes, mais il devient liquide aux températures inférieures à 20 kelvins (-253°C) et solide au-dessous de 14 kelvins. Dans ces divers états, l'hydrogène est un isolant électrique. Cependant, à la fin du XIX^e siècle, des physiciens calculèrent que l'hydrogène fortement comprimé se dissocierait et deviendrait métallique. Il se trouve d'ailleurs dans la première colonne de la Classification périodique des éléments : celle des métaux alcalins.

Dès 1898, le physicien écossais James Dewar liquéfia de l'hydrogène ; Il le solidifia un an plus tard, mais, à la surprise générale, les phases condensées se révélèrent isolantes : l'hydrogène restait sous la forme de molécules diatomiques et se comportait comme les halogènes de la septième colonne de la Classification périodique (le fluor,

le chlore...). Avec la mécanique quantique, de nouvelles théories du comportement de l'hydrogène apparurent. En 1935, à l'Université Princeton, Eugene Wigner utilisa cette théorie pour confirmer que le solide moléculaire diatomique isolant devait se transformer en un solide monoatomique métallique à une pression suffisamment élevée. Plus tard, on estima que cette pression serait comprise entre 25 à 2 000 gigapascals, soit d'environ 250 000 à 20 millions de fois la pression atmosphérique au niveau de la mer. Selon des calculs plus récents, l'hydrogène moléculaire solide deviendrait métallique à partir de 400 gigapascals, soit environ quatre millions d'atmosphères, tandis que, d'après des mesures par diffraction des rayons X, la pression de transition serait de 620 gigapascals environ.

On obtient de telles pressions, voisines de celles qui règnent au centre de la Terre, en comprimant des échantillons entre deux surfaces extrêmement dures. Ainsi, dans les cellules à enclumes de diamant, la pression atteint 500 gigapascals (voir *La cellule à haute pression à enclumes de diamant*, par A. Jayaraman, *Pour la Science*, juin 1984). En utilisant de telles cellules, Russel Hemley et Ho-kwang Mao, de l'Institution Carnegie de Washington, Isaac Silvera, de l'Uni-

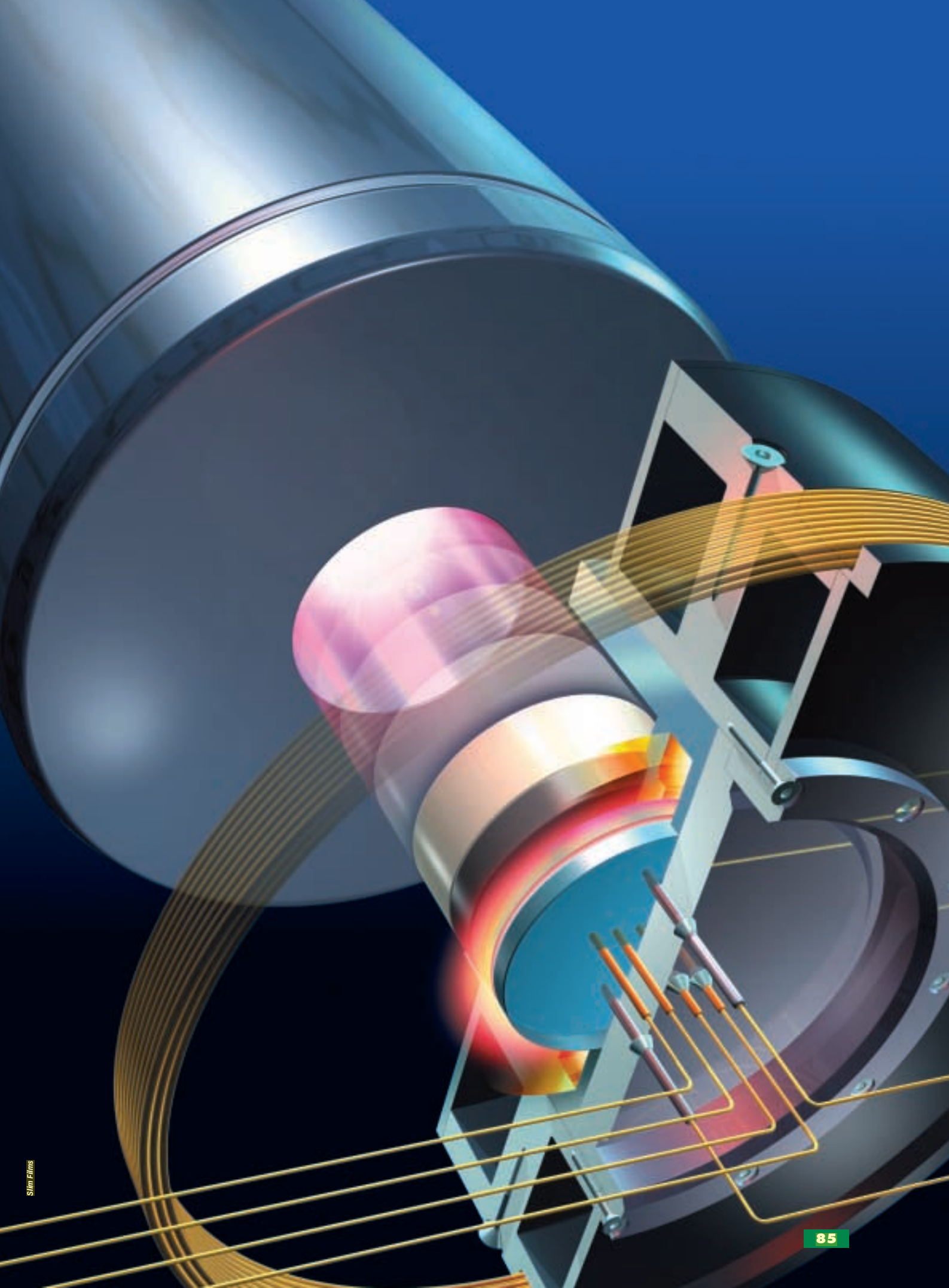
versité Harvard, et Arthur Ruoff, de l'Université Cornell, ont tenté de rendre l'hydrogène métallique en le soumettant à une pression de 340 gigapascals. Bien que l'hydrogène se soit solidifié, les physiciens n'ont pas mesuré sa conductivité électrique, car les instruments se sont brisés sous l'effet de la pression. En outre, ils n'ont pas rendu l'hydrogène liquide métallique, car celui-ci diffuse rapidement à travers les parois de la cellule.

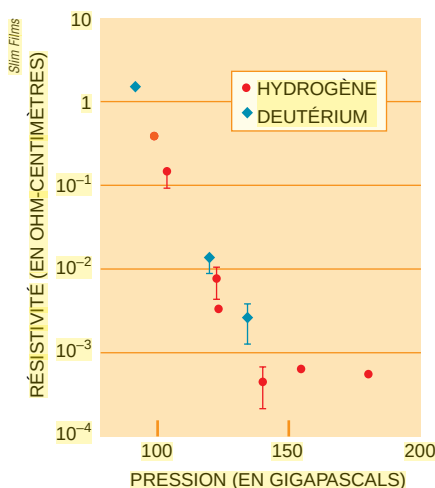
En utilisant le canon à gaz de Livermore, mes collègues et moi-même sommes parvenus à comprimer de l'hydrogène liquide à tel point qu'il se transforme en métal liquide. Il reste dans cet état moins d'un millionième de seconde, mais c'est assez pour mesurer sa conductivité. Bien que nous n'ayons pas encore créé d'hydrogène métallique solide, nos résultats donnent un aperçu du comportement de l'hydrogène à des pressions et à des températures extrêmes.

Feu sur l'hydrogène !

Nous avons commencé nos expériences avec le canon à gaz il y a environ dix ans. Cet appareil, mis au point par la Société *General Motors* pour des recherches en balistique, date des années 1960.

1. UN IMPACT VIOLENT engendre une onde de choc qui comprime un échantillon d'hydrogène liquide jusqu'à ce qu'il devienne métallique. Un canon à gaz (*en haut*) accélère un projectile (un petit disque métallique sur un support en plastique) jusqu'à une vitesse de sept kilomètres par seconde. Lorsque le projectile frappe le porte-échantillon (*représenté en coupe, en bas*), il crée une onde de choc dans la couche d'hydrogène liquide (*en jaune*). Cette onde se réverbère entre deux plaques de saphir (*seule l'une d'elles est visible, en bleu*), comprimant l'hydrogène à des pressions qui atteignent 180 gigapascals. Les sondes de déclenchement violettes activent le dispositif d'enregistrement, et les électrodes (*en orange*) mesurent la conductivité de l'hydrogène pour déterminer le moment où il devient métallique.





2. LA RÉSISTIVITÉ DE L'HYDROGÈNE LIQUIDE diminue quand la pression augmente. À des pressions comprises entre 93 et 120 gigapascals, l'hydrogène liquide est semi-conducteur, mais, à partir de 140 gigapascals, il devient métallique (sa résistivité diminue jusqu'à 0,0005 ohm-centimètre). Le deutérium, un isotope de l'hydrogène, se comporte de la même façon.

Une version plus grande du canon a accéléré des modèles réduits de missiles, afin de tester les effets de la rentrée dans l'atmosphère à haute vitesse. Le Laboratoire Lawrence Livermore a finalement acquis le petit canon, car il permet de soumettre les matériaux à des conditions extrêmes et, notamment, d'étudier la conductivité de l'hydrogène fluide.

Lorsque la pression de l'hydrogène augmente, sa température de fusion s'élève, dépassant 1 500 kelvins sous une pression de 100 gigapascals : on doit le chauffer pour éviter qu'il ne se solidifie. Afin de comprimer et de chauffer l'hydrogène en même temps, on utilise une onde de choc, telle celle que crée un avion lorsqu'il franchit le mur du son : une onde de choc est une variation soudaine de pression qui comprime les molécules très rapidement, augmentant ainsi leur température. En 1991, nous avons commencé à utiliser le canon à gaz pour produire une onde de choc qui se réverbérerait dans l'hydrogène liquide.

Au premier étage du canon, une culasse remplie de poudre à canon (jusqu'à 3,3 kilogrammes) met en mouvement un piston dans un tube de dix mètres de long et de neuf centimètres de diamètre (voir la figure 3). Ce tube contient 60 grammes d'hydrogène gazeux (ce n'est pas celui que l'on cherche à rendre métallique). Le piston, qui pèse 6,8 kilogrammes, comprime l'hydrogène jusqu'à 0,1 gigapascal,

avant que la pression ne déclenche l'ouverture d'une valve. L'hydrogène pénètre alors dans le second étage du canon, constitué d'un cylindre de neuf mètres de long et de 2,8 centimètres de diamètre. Comme il est plus étroit que le tube précédent, la différence de volume accélère le gaz.

Après avoir franchi la valve, le gaz pousse un projectile (l'hydrogène est le meilleur accélérateur de projectile qui soit, car sa masse molaire est plus faible que celle des autres gaz). Cette petite plaque métallique, qui pèse 20 grammes, atteint sept kilomètres par seconde, soit plus de 25 000 kilomètres par heure. À l'extrémité du cylindre, elle frappe un porte-échantillon en aluminium contenant une couche d'hydrogène liquide entre deux plaques de saphir. Avant l'impact, on refroidit l'hydrogène à 20 kelvins, pour augmenter sa densité.

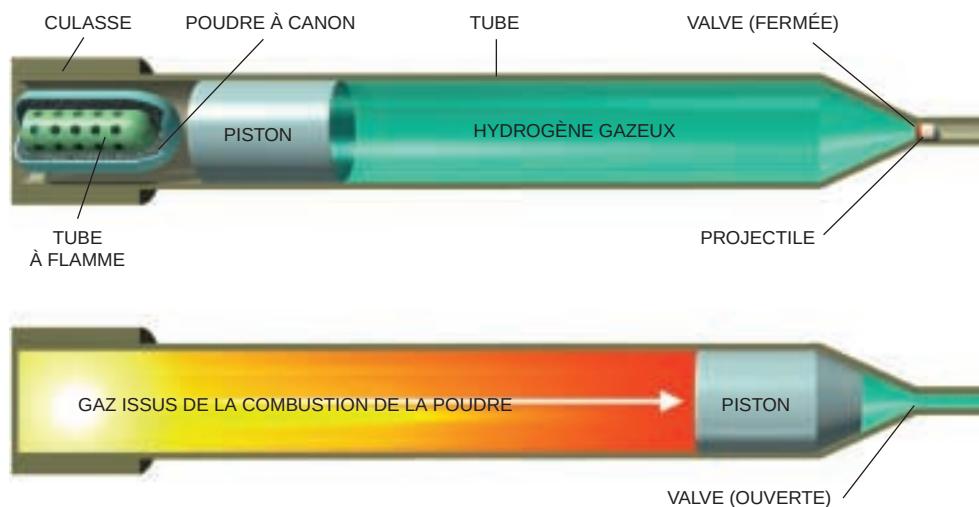
L'impact engendre une onde de choc puissante, qui traverse le porte-échantillon et l'hydrogène liquide. Les plaques de saphir la réfléchissent, de sorte qu'elle se réverbère plus de dix fois sur l'hydrogène, créant des pressions de 180 gigapascals et des températures de 3 000 kelvins. La réverbération de l'onde de choc et la pression qu'elle crée dans l'hydrogène sont les clés du succès de l'expérience : si l'on soumettait l'hydrogène à une seule onde de choc, il chaufferait beaucoup trop.

Dans le porte-échantillon, une sonde de déclenchement active le dispositif d'enregistrement dès qu'elle détecte que la première onde de choc a pénétré dans l'hydrogène. Bien que l'échantillon ne

soit soumis à la pression maximale que pendant environ 100 nanosecondes (soit un dixième de millionième de seconde), l'hydrogène a le temps d'atteindre l'équilibre thermique. En revanche, il n'a pas le temps de diffuser hors du porte-échantillon ou de réagir chimiquement avec ce dernier.

Cette expérience n'est pas sans danger. Nous nous sommes assurés que l'hydrogène gazeux du canon ne se mélangerait pas avec l'oxygène de la chambre cible, car s'ils réagissaient ensemble, ils libéreraient la même énergie que l'explosion de deux kilogrammes de TNT. Notamment, nous avons vérifié que la chambre cible était assez solide pour supporter l'impact. Nous avons aussi conçu notre expérience de sorte que, si de l'air s'infiltrait, il ne suffirait pas à déclencher une explosion. Nous coupons le courant dans les appareils de mesure de la chambre cible juste après la mise à feu du canon, pour qu'aucune étincelle ne puisse enflammer l'hydrogène. En outre, après chaque tir, nous introduisons de l'azote dans la chambre cible afin de diluer l'hydrogène restant dans un gaz inerte.

Avec cette expérience, nous pensions observer de l'hydrogène fluide dans un état proche de l'état métallique, mais nous n'imaginions pas atteindre ce dernier état. Pour déterminer la conductivité électrique de l'hydrogène liquide, nous avons envoyé un faible courant dans les électrodes du porte-échantillon. Ainsi, nous avons mesuré une résistivité (la résistance d'un fil métallique à un courant électrique est égale à sa résistivité multipliée par sa



3. LE CANON À GAZ est constitué d'une culasse et d'un tube qui se prolonge par un cylindre plus étroit. Avant la mise à feu, la culasse contient 3,3 kilogrammes de poudre à canon (*en haut*). Quand la poudre s'enflamme, les gaz brûlants issus de l'explosion poussent un pis-