

Le Γ -Plateau

J. CLÉROUIN - P. ARNAULT - G. ROBERT / CEA – DAM Île-de-France
C. TICKNOR - L. COLLINS - J. KRESS / Los Alamos National Laboratory, États-Unis

Le domaine des plasmas chauds et denses couvre les températures de 100 000 K à quelques millions de Kelvin et les compressions de une à plusieurs fois la densité du solide. Dans ce domaine, nous montrons l'existence d'un régime dans lequel ionisation et température se compensent pour produire un couplage constant entre particules. Une modélisation simple de ce comportement permet de prédire les propriétés de ces plasmas.

Lorsque la matière est fortement chauffée (million de Kelvin) et comprimée (dizaines de g/cm^3), les atomes perdent tout ou partie de leurs électrons. Ils sont à l'état plasma. Ils sont ionisés et portent une charge Q positive, égale au nombre d'électrons perdus. Les interactions entre les ions, proportionnelles au carré de cette ionisation Q , deviennent fortes. Pour mesurer l'intensité de ces interactions, on définit une constante de couplage $\Gamma = Q^2 e^2 / akT$ qui est le rapport entre l'énergie de répulsion entre les ions $Q^2 e^2 / a$ et l'énergie cinétique moyenne kT (a est l'ordre de grandeur de la distance entre deux ions).

Par exemple, un plasma de tungstène comprimé à deux fois la densité normale et à 1 MK, sera ionisé 14 fois, ce qui correspond à une constante de couplage Γ de l'ordre de 23. Pour cet état thermodynamique, le tungstène est un plasma fortement corrélé dont les propriétés sont plus proches de celles d'un liquide que d'un gaz. Pour explorer ce domaine de plasmas chauds et denses, nous utilisons la méthode de dynamique moléculaire sans-orbitales (OFMD) décrite précédemment [1] qui se base sur une description semi-classique Thomas-Fermi des électrons. Le raccord avec les calculs de dynamique moléculaire avec orbitales pour des températures inférieures à 100 000 K n'est pas abordé ici, mais a fait l'objet de travaux séparés [2].

Une expérience numérique surprenante

Nous avons effectué une série de simulations isochores sur du tungstène à deux fois la densité normale et pour des températures comprises entre 10 eV et 5 keV (soit 0,11 MK et 55 MK) [3]. Pour chaque température, nous avons directement évalué le paramètre de couplage et nous avons été très surpris de constater que, sur une large gamme de température (de 100 à 2 000 eV), ce

dernier restait à peu près constant. Sur ce plateau (le Γ -plateau), toute augmentation de la température est donc compensée par une augmentation de l'ionisation Q , proportionnelle à la racine carrée de la température. Expérimentalement, une expérience de diffraction X mettrait en évidence la persistance d'un anneau de diffraction sur toute la gamme de température (figure 1).

Lois d'échelle

Le comportement $Q \propto \sqrt{T}$ avait déjà été repéré par Raizer dans les années 1960 et plus récemment par R. More [4]. Bien entendu, à très haute température, lorsque l'on tend vers l'ionisation totale, ou à basse température, cette loi n'est plus valable.

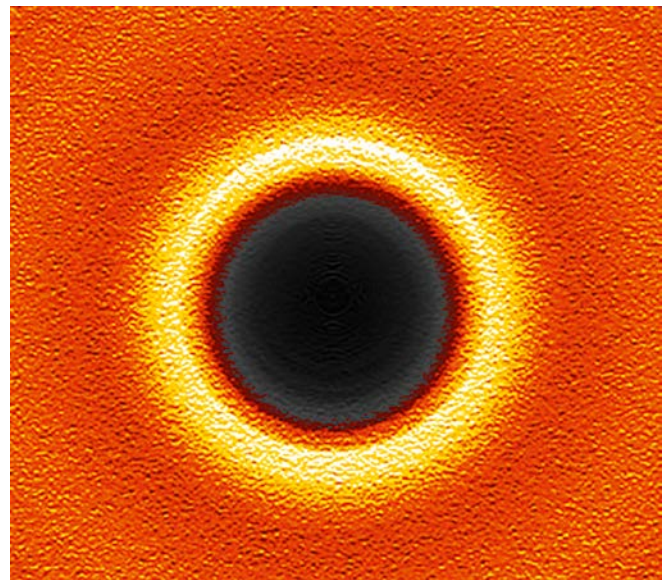


Figure 1. Figure de diffraction synthétique pour un plasma de tungstène à $40 \text{ g}/\text{cm}^3$ et 400 eV. Le modèle du Γ -plateau prédit une image identique entre 100 et 2000 eV.

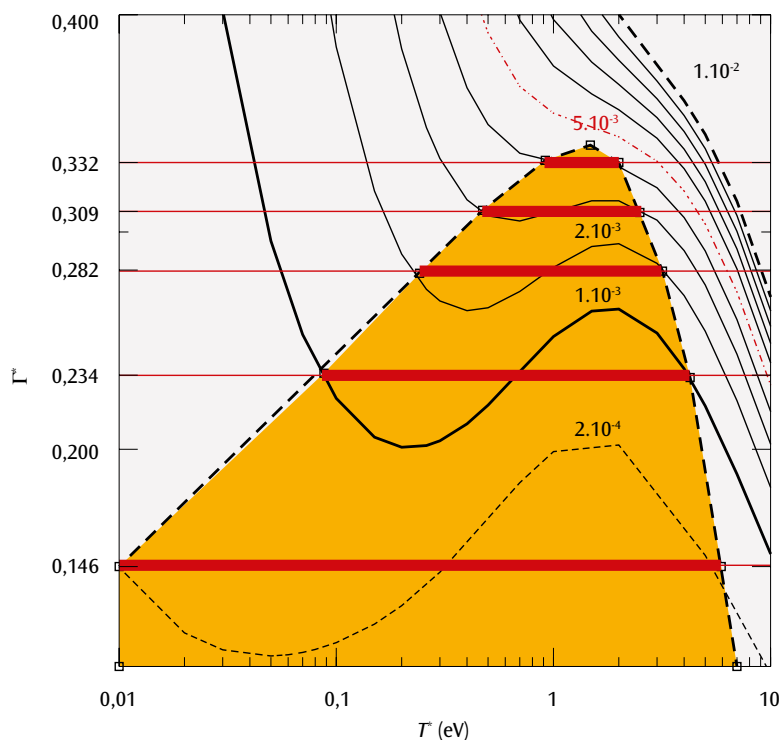


Figure 2. Couplage réduit $\Gamma^* = \Gamma/Z$ en fonction de la température réduite $T^* = T/Z^{4/3}$ (figure universelle) pour différentes densités réduites (de 2.10^{-4} à 1.10^{-2} mole.cm⁻³). Pour chaque boucle, on fait correspondre un couplage moyen (trait rouge). La zone jaune représente le domaine de paramètres où le Γ -plateau se manifeste.

Pour expliquer ce comportement, il nous faut revenir aux lois d'échelle qui sont à la base du modèle Thomas-Fermi. En désignant la densité réduite par $\rho^* = \rho/AZ$ (où Z et A sont le numéro et la masse atomique) et la température réduite par $T^* = T/Z^{4/3}$, le couplage réduit, Γ^* , est défini par $\Gamma^* = \Gamma/Z$. La formule d'ionisation à température finie de More permet de tracer Γ^* en fonction de T^* pour différentes isochores ρ^* .

Ces courbes, universelles en coordonnées réduites, sont reportées sur la **figure 2**. Elles ne sont pas monotones, mais montrent une oscillation au-dessous d'une certaine densité critique $\rho_c^* = 0,0045$, plus ou moins marquée suivant la densité. Cette oscillation est approximée par une constante (le Γ -plateau) sur une certaine plage de température (trait rouge sur la **figure 2**).

À la densité critique correspond un couplage critique $\Gamma_c^* = 0,335$. C'est la valeur maximale du couplage stabilisé que l'on peut espérer atteindre pour un élément de numéro atomique Z donné.

Pour l'aluminium, ce couplage est de 4,3, pour le fer 8,7, pour l'or 26 et pour l'uranium 30. Ainsi, pour créer de manière stabilisée un plasma couplé, il faut se tourner vers des Z élevés.

Conclusion

L'universalité des courbes de couplage de la **figure 2** justifie un ajustement par une relation $\Gamma^* = f(\rho^*)$ qui donne le couplage du plateau en fonction de la seule densité réduite [5]. Cette modélisation simple permet de comprendre nos simulations, de prédire pour un corps donné l'existence d'un plateau, et surtout, d'en déduire différentes propriétés (équation d'état, ionisa-

tion, coefficients de transport) [5,6]. Tout élément peut produire un Γ -plateau, mais les plasmas très couplés ne peuvent être obtenus qu'avec des Z élevés. Des perspectives intéressantes découlent de ce phénomène de stabilisation en chauffage isochoire comme les récentes expériences sur les couches enterrées (*buried layers*) chauffées par laser ultra-bref.

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une collaboration DAM-NNSA (P184).

Références

- [1] F. LAMBERT, J. CLÉROUIN, S. MAZEVET, "Structural and dynamical properties of hot dense matter by Thomas-Fermi molecular dynamics", *Europhys. Lett.*, **75**, p. 681 (2007).
- [2] J. F. DANIEL, L. KAZANDJIAN, G. ZERAH, "Equation of state of dense plasmas by ab initio simulations: Bridging the gap between quantum molecular dynamics and orbital-free molecular dynamics at high temperature", *Phys. Plasmas*, **19**, 122712 (2012).
- [3] J. CLÉROUIN, P. ARNAULT, G. ROBERT, L. COLLINS, J. KRESS, "Behavior of the coupling parameter under isochoric heating in a high-Z plasma", *Phys. Rev. E*, **87**: 061101, (2013).
- [4] R. M. MORE, "Atoms in dense plasmas", *rapport UCRL 93926* (1986), disponible sur : www.osti.gov/scitech/servlets/purl/6278776.
- [5] P. ARNAULT, J. CLÉROUIN, G. ROBERT, C. TICKNOR, L. COLLINS, J. KRESS, "Thomas-Fermi Z-scaling laws and coupling stabilization for plasmas", *Phys. Rev. E*, **88**: 063106 (2013).
- [6] P. ARNAULT, "Modeling viscosity and diffusion of plasma for pure elements and multicomponent mixtures from weakly to strongly coupled regimes", *High Energy Density Phys.*, **9**, p. 711-721 (2013).