

Un outil ouvert à la communauté scientifique via l'Institut lasers et plasmas (ILP)

Outils essentiels du programme Simulation de la Direction des applications militaires du CEA, le laser Mégajoule (LMJ) et son prototype, la Ligne d'intégration laser (LIL), seront également ouverts à la communauté scientifique pour des expériences sur les lasers de haute énergie et les plasmas, en particulier stellaires.

Dès la fin de 2004, le grand instrument scientifique qu'est la Ligne d'intégration laser (LIL), accompagnée d'une chaîne laser de plusieurs pétawatts, sera ouvert à la recherche académique, comme le sera dans les années 2010 le laser Mégajoule (LMJ). Le CEA, le CNRS, l'École polytechnique et l'université Bordeaux 1 ont signé le 3 mars 2003 la convention-cadre créant l'Institut lasers et plasmas (ILP)⁽¹⁾. Cet institut à vocation nationale a pour mission de coordonner et développer, d'une part, les domaines scientifiques et techniques concernés par les lasers de haute énergie et leurs applications et, d'autre part, la physique des plasmas denses et chauds créés par lasers. Il comprend une fédération de recherche (ILP-Recherche) qui regroupe actuellement plus d'une vingtaine de laboratoires, répartis dans cinq régions. L'ILP a également vocation à stimuler la valorisation et le transfert des technologies issues de la construction des lasers de haute énergie et à participer à la dynamique européenne autour des grandes installations laser. Il a aussi pour mission de construire et exploiter de nouveaux instruments de recherche, avec la possibilité d'en assurer ou d'en déléguer la maîtrise d'œuvre ou la maîtrise d'ouvrage : c'est le cas du laser Multi Pétawatt associé à la Ligne d'intégration laser.

La fédération ILP-Recherche assure une triple mission de recherche, de formation et de service d'accès aux grandes installations lasers. Son programme scientifique s'articule autour des sciences de la fusion par confinement inertiel (FCI), dans la perspective de la production d'énergie, et ménage une large place à l'avancement des sciences de la matière placée dans des conditions extrêmes. Les grandes thématiques se regroupent essentiellement autour :

- de la physique de la fusion par confinement inertiel, qui s'ouvre sur plusieurs domaines de recherche fondamentale et appliquée ;
- des diagnostics des plasmas de fusion, où l'accent est porté sur la complémentarité entre les sources de rayonnement X et les sources de particules (radiographie par protons, imagerie neutronique) ;
- de l'optique et des lasers. Dans ce domaine clef pour l'avenir de la fusion par confinement inertiel, les recherches visent notamment à identifier et surmonter les phénomènes qui limitent les performances des lasers et à accroître leur taux de répétition. Enfin, dans le domaine des lasers de très haute intensité, l'ILP entreprend, avec la région Aquitaine et le CEA/Cesta, d'ouvrir la voie qui conduit du pétawatt (10^{15} watts) à l'exawatt (10^{18} watts). Quelques exemples empruntés à l'astrophysique

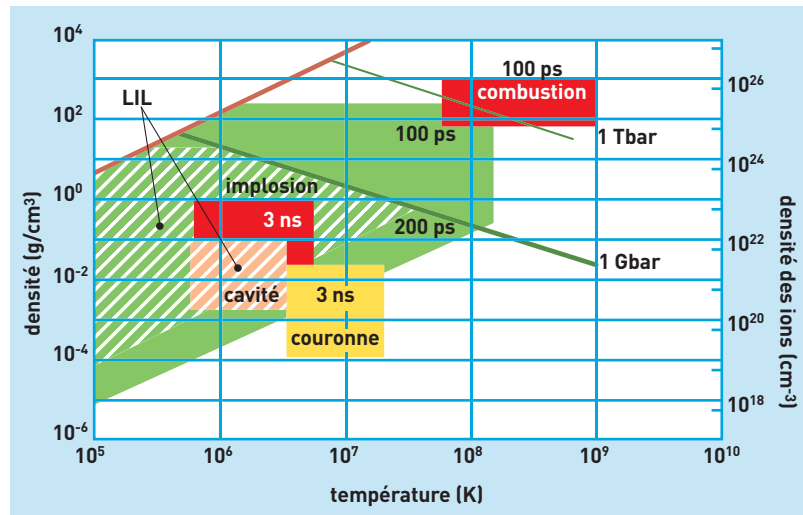


Figure.

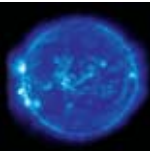
Représentation du domaine de température (exprimée en kelvins) et de densité (exprimée en nombre d'ions par centimètre cube) couvert lors d'une expérience d'implosion d'une capsule de DT conduisant à l'ignition et à la fusion dans le régime de l'attaque indirecte. Une fois que l'énergie électromagnétique des faisceaux lasers ultraviolets pénètre à l'intérieur de la cavité, où elle est convertie en rayonnement X caractéristique d'une température de quelques millions de degrés, plusieurs types de plasmas de caractéristiques différentes sont produits. L'ablation de l'or du *Hohlraum* produit le "plasma de cavité", tandis que celle de la coquille de la cible de DT produit un plasma moins dense, lancé en détente violente. C'est naturellement à l'intérieur même de la capsule en implosion que sont produits les plasmas les plus denses et les plus chauds. L'allumage des réactions thermonucléaires élève finalement la température du plasma de fusion à environ un milliard de degrés. Les régions hachurées correspondent au domaine qui pourra être exploré par la Ligne d'intégration laser, prototype du Laser Mégajoule. Sont également portés sur cette figure l'ordre de grandeur du temps de vie des plasmas de chaque domaine caractéristique (ns = nanoseconde, ps = picoseconde), et deux droites d'égale pression (isobares) permettant de situer le domaine de pression compris entre 10 gigabars (Gbar) et 1 térabar (Tbar). Le trait diagonal rouge représente les caractéristiques des plasmas rencontrés dans le Soleil, depuis sa surface (la photosphère) jusqu'au cœur, à noter que les plasmas de fusion par confinement inertiel sont un peu plus denses que le cœur du Soleil et également beaucoup plus chauds.

illustrent, dans le cadre de ce numéro consacré à notre étoile, l'étendue des domaines de recherche liés à la fusion par confinement inertiel. Les dispositifs expérimentaux mis en œuvre pour maîtriser le confinement inertiel des plasmas sont, par leur principe même, des moyens puissants d'exploration de la physique de la matière placée dans des conditions extrêmes. De plus, le couplage très étroit entre les expériences laser et la simulation numérique intensive est un facteur efficace de développement de la modélisation des objets astrophysiques.

Simuler l'univers violent

Le caractère non stationnaire des expériences laser est mis à profit pour simuler un grand nombre de phénomènes violents se déroulant dans l'univers : ondes de choc, explosions de supernovae... Cet aspect est propre

(1) Contact : Arnold Migus, directeur de l'ILP ; arnold.migus@polytechnique.fr



aux plasmas créés par laser, où la grande souplesse dont on dispose vis-à-vis de la nature des cibles permet de générer des chocs de différentes natures, se déplaçant à plus d'une centaine de kilomètres par seconde dans des milieux homogènes ou hétérogènes. La pertinence astrophysique de ces expériences repose en partie sur l'existence de lois de transformation d'échelles qui permettent de ramener à une expérience de laboratoire l'étude d'un phénomène dont les temps et les longueurs caractéristiques relèvent des échelles astronomiques.

Vers la physique de l'extrême

Les plasmas rencontrés dans les intérieurs planétaires et stellaires couvrent un très vaste domaine thermodynamique que seuls les lasers de puissance de nouvelle génération permettent d'explorer. Ils ouvrent la voie à la détermination expérimentale de données physiques fondamentales comme les propriétés radiatives des plasmas denses et chauds, pertinentes pour plusieurs types d'objets astrophysiques (intérieurs stellaires, **disques d'accrétion** au voisinage des **trous noirs**...). Ou encore comme l'**équation d'état** de plasmas plus froids, portés à des pressions très élevées (supérieures à 1 **mégabar**), et donc dominés par les interactions coulombiennes entre les particules.

Au cœur des planètes...

L'étude expérimentale des propriétés thermodynamiques de la matière dense et chaude est un exemple d'activité transverse, aussi bien liée à la conception des cibles à gain (propriétés de D_2 , CHBr ou BeCu) qu'à la compréhension de la structure interne des planètes. Depuis plus d'une vingtaine d'années, la description, par des modèles parfois contradictoires, du comportement des fluides dans les conditions qui règnent à l'intérieur des planètes, constitue un problème de physique atomique épineux. Les propriétés sous très haute pression du fer, dans le cœur de la Terre, de l'**hydrogène** dans Jupiter et Saturne, ou de celles de l'eau dans Neptune et Uranus, sont loin d'être bien comprises. Là règnent des pressions de plusieurs centaines de **gigapascals** et des températures relativement faibles, de quelques dizaines de milliers de degrés. Les lasers de très haute puissance permettent

d'explorer ce domaine particulier: il s'agit bien de créer – pendant quelques **nanosecondes** – de minuscules "cœurs de planète" afin d'en étudier les propriétés thermodynamiques. La courbe de fusion de divers matériaux, leur équation d'état et les transitions de phase solide-liquide-plasma pourront être explorées en faisant varier l'intensité des faisceaux lasers.

... et des étoiles

L'écoulement du rayonnement dans les étoiles et les atmosphères stellaires conditionne leur structure, leur évolution et leur durée de vie. Il est contrôlé par les processus de diffusion, d'absorption et d'émission des **photons** par les **électrons** qui cadencent la lente progression du rayonnement X de l'intérieur de l'étoile vers sa surface, d'où l'énergie est enfin rayonnée dans l'espace. C'est dans la gamme spectrale de 0,1 à 1 **keV** (12,4 à 124 **nanomètres**) que l'interaction entre les photons et la matière (partiellement **ionisée**) est la plus intense, mais aussi la plus difficile à calculer! Depuis quelques années, les expériences d'absorption du rayonnement dans les plasmas chauds contribuent à la progression de la modélisation de leur **opacité** au rayonnement X. Ces avancées en physique atomique, fondamentales pour la maîtrise de la physique de la FCI, ont également permis de mieux maîtriser la modélisation des étoiles pulsantes comme les Céphéides, étalons de l'échelle des distances dans l'univers. Elles contribuent aussi à consolider l'accord entre les modèles de la structure interne du Soleil et les données issues des observations **héliosismologiques** qui fournissent des indications précises sur les conditions physiques régnant à l'intérieur de notre étoile.

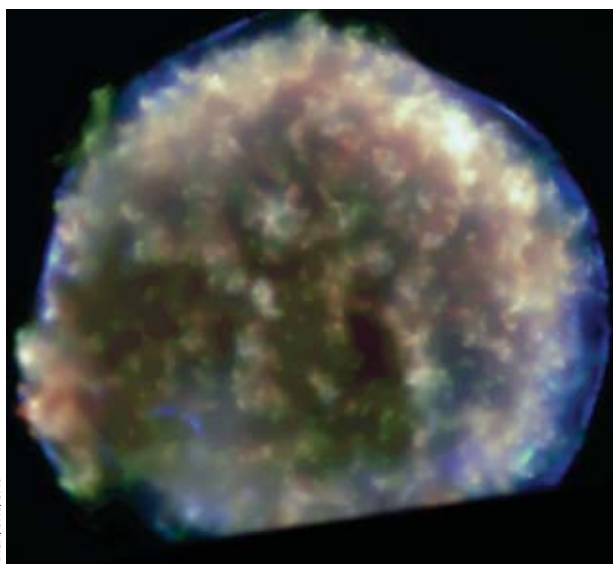
Ainsi, la Ligne d'intégration laser et son successeur le laser Mégajoule, en permettant d'accéder à des conditions de plus en plus proches des plasmas astrophysiques, devraient constituer une étape marquante de l'évolution de la plus ancienne des sciences: l'astronomie.

> **Jean-Pierre Chièze**

Direction des sciences de la matière
CEA centre de Saclay
Institut lasers et plasmas
Université de Bordeaux 1



CEA-DAM



NASA/CXC/SAO

Image acquise par le satellite d'observation X Chandra, dans la bande spectrale 300 eV-7 keV, du reste de la supernova de type Ia dont l'explosion a été observée par Tycho Brahe en 1572. Ce reste est circonscrit par une onde de choc [qui émet des photons couvrant la bande 2,56 keV-7 keV, codés en bleu], qui se propage dans le milieu interstellaire. Elle est engendrée par l'expansion rapide mais décélérée des matériaux même de la supernova (appelés *ejecta*) dont on voit la surface externe festonnée, observée entre 0,3 et 2,65 keV. Cette décélération est susceptible d'engendrer le développement d'instabilités de type Rayleigh-Taylor, responsables de l'apparence "spongieuse" de l'interface *ejecta*-milieu interstellaire. Le même type d'instabilité (à gauche) a été reproduit et analysé expérimentalement (expérience Astrolabe I) après le passage d'un choc fort, à l'interface séparant un matériau lourd d'un matériau léger, portés sous choc à l'état de plasma. L'énergie utilisée pour engendrer, dans le matériau lourd (à gauche), l'onde de choc débouchant dans le matériau léger, a été délivrée par un des deux faisceaux du laser Phébus (CEA/DAM). Le second a été utilisé pour produire, par radiographie X latérale, l'image présentée ici de l'interface, déstabilisée par le ralentissement du matériau lourd imprimé par le matériau léger. Ce type d'expérience exploite la capacité des lasers de puissance de porter des plasmas denses et chauds à des vitesses très élevées, supérieures à 100 km/s.