



**ASTROPHYSIQUE DE LABORATOIRE** Les progrès des lasers ont fait naître l'astrophysique de laboratoire : au lieu d'observer l'Univers, il s'agit d'en faire un sujet d'expérimentation, sur des échantillons de quelques centimètres cubes. Un nouveau champ prometteur pour valider modèles et calculs et progresser dans la compréhension d'une réalité complexe.

TEXTE : Anne Orliac

# L'UNIVERS EN ÉCHANTILLONS

Pendant longtemps, l'astrophysique s'est surtout nourrie de beaucoup d'observations et d'une bonne dose d'imagination. Grâce à des lunettes, des télescopes puis des satellites, les scientifiques accumulaient des images de l'Univers dont ils essayaient ensuite de rendre compte dans des modèles théoriques. Mais faute d'instruments adaptés, recréer ces phénomènes sur Terre et les soumettre à l'expérience était tout simplement impensable. Depuis une dizaine d'années pourtant, ce rêve prend forme grâce aux progrès réalisés sur les lasers. Il a même donné naissance à un nouveau domaine de recherche : l'astrophysique de laboratoire. Des équipes du CEA-Irfu<sup>1</sup>, du CEA-Iramis<sup>1</sup> et de la Direction des applications militaires (Dam) du CEA, en collaboration avec l'observatoire de Paris-Meudon et le Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses (Luli), ont déjà remporté ces dernières années de beaux succès dans cette voie. Et elles attendent aujourd'hui avec impatience la mise en service à partir de 2010 des grands lasers, comme le laser Mégajoule au Cesta, centre Dam du CEA près de Bordeaux, ou

Non contents de scruter l'espace dans ses moindres recoins, les astrophysiciens comptent bien en reproduire des parcelles en laboratoire

la Nif (*National ignition facility*) en Californie, qui donneront tout son sens à cette jeune discipline.

Car non contents de scruter l'espace dans ses moindres recoins, les astrophysiciens comptent bien en reproduire des parcelles en laboratoire. Mais comment peut-on fabriquer un bout d'Univers ici-bas ? « *Les échantillons concernés mesurent tout au plus quelques centimètres cubes.*

*Nous devons définir les lois d'échelle, c'est-à-dire adapter toutes*

*les autres grandeurs physiques, comme les vitesses et temps de réaction ou encore la nature des matériaux nécessaires à l'expérience, pour coller aux phénomènes qui nous intéressent »,* explique Serge Bouquet, astrophysicien à la Dam qui travaille sur ce sujet. Autant dire que trouver ces fameuses lois d'échelle requiert des >>>

note : 1. Voir p. 3, rubrique « Et aussi... »

Sphère diffusante qui mesure l'énergie lumineuse dégagée lors d'une expérience d'interaction laser-matière.



## Faits marquants

**1987**

Observation de la supernova SN1987A, qui contredit les théories admises.

**1990**

Premières expériences américaines d'astrophysique de laboratoire, pour tester une nouvelle théorie.

**1997**

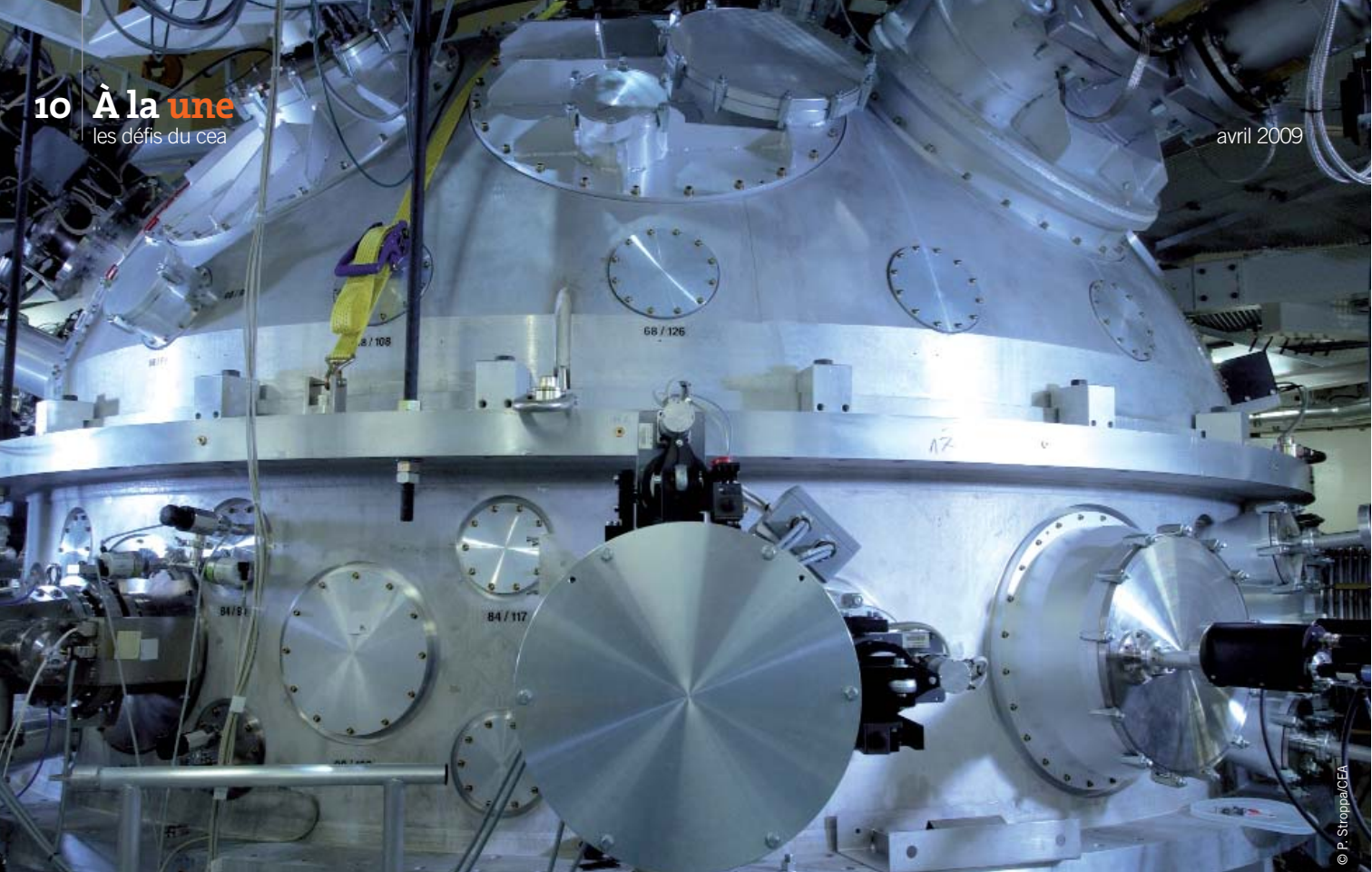
Le gouvernement français annonce l'ouverture du laser Mégajoule aux applications civiles.

**1999**

Premières expériences françaises d'astrophysique de laboratoire sur le laser Phébus.

**2004**

Première expérience d'astrophysique sur le prototype du laser Mégajoule, la Lil.



© F. Stroppa/CEA

>>> manipulations très complexes d'équations décrivant les phénomènes tels que les turbulences créées lors des explosions d'étoiles ! Le passage au format « échantillon » nécessite surtout de fournir des quantités phénoménales d'énergie pour reproduire le comportement des objets astrophysiques. Car 90 % de la matière visible de l'Univers se trouve dans les étoiles, sous forme de **plasmas**, gaz d'ions et d'électrons, portés à des températures et pressions considérablement plus élevées que celles que nous rencontrons sur Terre. Il faut donc chauffer et comprimer très violemment les échantillons de matière (isotopes d'hydrogène, hélium... selon l'expérience) pour espérer observer des phénomènes similaires à ceux qui existent dans l'espace. Et c'est là qu'interviennent les lasers.

#### Un consortium mis en place

Les lasers utilisés par les astrophysiciens sont de deux types. Les premiers, appelés lasers à haute énergie, donnent des impulsions très énergétiques et – relativement – longues : elles durent quelques nanosecondes ( $10^{-9}$  s). Parmi eux, on compte le Luli2000 de l'École polytechnique et bien sûr le prototype du laser Mégajoule, la Lil<sup>2</sup> installée au Cesta. En portant la matière à haute énergie, ces instruments permettent de simuler les événements violents qui agitent les astres et le milieu interstellaire. Les lasers du second type sont conçus pour délivrer des impulsions ultra-brèves (de l'ordre de  $10^{-12}$  s pour le laser Petal<sup>3</sup>, qui sera construit par la région Aquitaine en collaboration avec l'Institut lasers et plas-

Plasma // État de la matière constituée de particules chargées (ions, électrons).

▲  
Chambre d'expérience de la Lil, de 4,5 m de diamètre, qui contient l'échantillon de quelques  $\text{cm}^3$ .

mas sur le site du Cesta), et atteindre des puissances supérieures à 1 015 watts. Ils permettent de créer des flashes de rayons X et des jets de particules (protons et électrons), capables de sonder, quasiment en instantané, les plasmas denses créés par les lasers du premier type.

En portant la matière à haute énergie, ces instruments permettent de simuler les événements violents qui agitent les astres et le milieu interstellaire

Grâce à ces deux types d'outils très sophistiqués, les astrophysiciens ont pu se lancer dans le vif du sujet. Car l'expérience présente bien des avantages sur l'observation. Globalement bien moins coûteuse, elle offre aussi la possibilité de recommencer les manipulations si nécessaire et de placer autour de l'échantillon de matière autant d'instruments de mesure que désiré. « Mais elle permet surtout d'acquérir des données de physique fondamentale qui n'étaient jusque-là accessibles que par le calcul, et d'analyser des phénomènes astrophysiques dynamiques où se mélangent instabilités, rayonnement et champ magnétique », explique Jean-Pierre Chièze, chef du laboratoire Théorie et modélisation du CEA-Irfu. C'est dans cet esprit qu'un consortium Irfu/Iramis/Dam s'est mis en place pour étudier les

notes : 2. Ligne d'intégration laser. 3. Petawatt Aquitaine laser.

## « L'expérience permet d'acquérir des données de physique fondamentale qui n'étaient jusque-là accessibles que par le calcul »

Jean-Pierre Chièze, chef du laboratoire  
Théorie et modélisation du CEA-Irfu

transferts d'énergie entre photons et matière dans les plasmas, décrits par des grandeurs appelées « opacités ». Encore mal quantifiées, ces données jouent pourtant un rôle crucial dans l'évolution des étoiles, ou dans la pulsation des étoiles appelées céphéides, par exemple. Pour tenter de mesurer finement ces opacités, les chercheurs du CEA participent à une expérience sur Luli2000 : ils envoient de puissants rayonnements sur une cible portée à une température et une densité très élevées et comparent leurs résultats à ceux des codes numériques utilisés pour décrire l'évolution stellaire. Il faudra attendre les expériences sur le couple Petal/Lil pour atteindre les millions de degrés et les densités qui règnent dans le cœur des étoiles. Cette étape à moindre énergie reste primordiale, non seulement pour valider les codes de calcul mais aussi pour arbitrer entre les différents modèles théoriques, qui donnent parfois des

**Opacité //** Coefficient d'absorption du rayonnement par la matière.

résultats contradictoires. « Cette démarche pas à pas est très importante pour ne pas s'égarer dans l'interprétation de ces mesures très complexes », commente Sylvaine Turck-Chièze, chef du laboratoire d'Astrophysique nucléaire et de physique stellaire du CEA-Irfu, et l'un des membres du consortium.

Les expériences sur les propriétés microscopiques des plasmas ne seront d'ailleurs pas les premières à être lancées sur la Lil. Avant elles, au premier semestre 2010, les chercheurs tenteront de percer les mystères de phénomènes violents appelés chocs radiatifs. Sous ces termes sont regroupés tous les chocs accompagnés d'un rayonnement si intense qu'il structure la matière et contribue largement à son mouvement. Dans l'espace, on les retrouve par exemple dans les restes en expansion de supernovae, dans les immenses jets que l'on observe souvent de part et d'autre des étoiles en formation, ou, à l'inverse, dans la matière qui tombe sur la surface d'étoiles jeunes, en suivant les lignes de champ magnétique qui les relient au disque de matière qui les entoure encore. On les retrouve également entre certaines étoiles doubles. Car si le Soleil poursuit sa course dans l'espace en solitaire, la plupart des étoiles évoluent par paire. Mais elles n'ont que rarement la même taille : il est donc inévitable que l'une d'entre elles meure avant l'autre. Avant d'exploser, la malchanceuse se transforme en un objet très compact appelé naine blanche. Elle porte alors une masse équivalant à celle du Soleil dans une sphère aussi petite que la Terre. Sa gravité devient si forte qu'elle >>>

## UNE DISCIPLINE NÉE DANS UNE EXPLOSION

### HISTORIQUE

Les premières expériences mondiales d'astrophysique de laboratoire eurent lieu en 1990, aux États-Unis, mais l'on doit remonter encore trois ans en arrière pour trouver les sources de cette jeune discipline. Cette année-là, les astrophysiciens ont eu la chance d'observer une supernova (SN1987A), l'explosion d'une étoile en fin de vie, dans une galaxie proche de la nôtre : le Grand Nuage de Magellan. Si proche, en fait, qu'ils ont pu suivre son agonie dans le détail. Hélas, leurs observations contredisaient largement les théories communément admises. Ils ont en particulier détecté la signature du cobalt en périphérie de la supernova, un élément lourd que l'on pensait caché dans le cœur de l'étoile. Abandonnant l'idée

qu'en explosant l'astre gonfle comme un ballon en gardant sa structure interne intacte, des astrophysiciens postulent que le choc doit mélanger les différentes couches de matière, laissant ainsi apparaître un peu de cobalt en surface. C'est pour tester cette hypothèse qu'ont été lancées les premières expériences aux États-Unis, puis en 1999 en France, sur le laser Phébus du CEA sur le centre de Limeil-Valenton. Ce furent les premiers pas de cette approche très novatrice.



© CEA

▲  
Salle d'expérience  
du laser Phébus du CEA.

>>> aspire les gaz des couches externes de sa compagne : de véritables colonnes de matière tombent violemment sur la naine blanche et rebondissent à la surface. À une dizaine de kilomètres d'altitude, les chocs retour sont stoppés dans leur ascension. Les modèles théoriques prédisent que le responsable en est le rayonnement créé dans la matière choquée. Ces photons ont la fâcheuse tendance à s'échapper vers l'espace en emportant avec eux une grande partie de l'énergie du jet, le forçant même à interrompre sa course. Ce phénomène fait l'objet du projet expérimental Polar, qui se déroulera au Luli en mai 2009. Plusieurs campagnes d'expériences ont été menées par des astrophysiciens du CEA, en collaboration avec des équipes du Luli et de l'observatoire de Paris-Meudon, sur le laser 6-faisceaux du Luli, en 2004, et sur le laser Pals<sup>4</sup> à Prague (2005-2007). Une autre débute sur le laser Alisé<sup>5</sup> du Cesta en mars 2009. L'idée est ici de développer et de valider des

codes numériques capables de rendre compte de l'ensemble des interactions entre le rayonnement et la matière lors de ces collisions. Munis de ce précieux bagage, les chercheurs pourront ensuite travailler à des énergies plus grandes encore sur la Lil.

Développer et valider des codes numériques capables de rendre compte des interactions rayonnement-matière

Le chemin de l'astrophysique de laboratoire est jalonné de manipulations de plus en plus sophistiquées, d'interprétations de plus en plus élaborées, mais c'est un challenge fascinant pour tenter d'appréhender l'Univers dans toute sa complexité.

notes : 4. Prague Asterix laser system. 5. Activité laser impulsif pour les études.

Jean-Pierre Chièze, chef du laboratoire Théorie et modélisation au CEA-Irfu, en charge du pilotage de diverses activités en astrophysique de laboratoire.

## interview

Au CEA-Irfu, le travail en laboratoire fait de l'astrophysique un objet d'expérimentation. Une voie riche d'enseignements pour l'astrophysique, mais aussi en physique de base comme en matière de fusion nucléaire.



© CEA

**LES DÉFIS DU CEA** Comment décrivez-vous l'astrophysique de laboratoire ?

**J.-P. C.** | C'est une approche qui peut sembler plus austère que l'astrophysique classique : nos résultats se présentent sous une forme moins spectaculaire que les splendides images rapportées par les télescopes terrestres et spatiaux ! Mais c'est surtout une discipline très jeune, introduisant, plus que par le passé, la notion d'expérimentation en astrophysique, promise à un brillant avenir. Elle est d'ailleurs très formatrice pour les jeunes

chercheurs, car elle se trouve à la croisée de plusieurs domaines de la physique.

**LES DÉFIS DU CEA** Qu'a-t-elle à apporter à la physique en général ?

**J.-P. C.** | Avec la Lil, nous produirons, flash après flash, des plasmas à des densités d'énergie jamais atteintes ! Et nous engrangerons des mesures de plus en plus précises de données jusqu'alors inaccessibles. Nous pourrions alors valider les codes de calculs utilisés en astrophysique, bien sûr, mais aussi

en physique de base, qui concernent aussi bien d'autres domaines, comme la fusion thermonucléaire.

**LES DÉFIS DU CEA** Jusqu'où le couple Petal/Lil amènera-t-il cette discipline ?

**J.-P. C.** | Dans un premier temps, elle permettra de reproduire une large gamme de conditions de température et de pression que subissent les objets astrophysiques, et de comprendre comment le rayonnement peut modéliser la matière et influencer sur ses mouvements, lors des phénomènes violents qui agitent les étoiles et le milieu interstellaire. Par la suite, nous tenterons d'intégrer également des champs magnétiques, malgré les difficultés que cela représente, puisque c'est ce que fait la nature, à tour de bras !