



Astrophysique de laboratoire⁺

**Christophe Winisdoerffer (CRAL), Boris Dintrans (IRAP),
Andrea Ciardi (LERMA)
pour le CS**

Merci à tous les contributeurs

Colloque de prospective 2018 du PNPS
Montpellier, 26-28 mars 2018

“Astrophysique de laboratoire”

Thème transverse → colloque prospective Besançon 2014, présentation CSAA 2015

Expériences de laboratoire ✓

- Effort permanent du PNPS (pour les projets théoriques et pour les “consommables”)
- Workshop “Astrophysique de laboratoire, Lyon 2016”

Simulations multi-D ✓

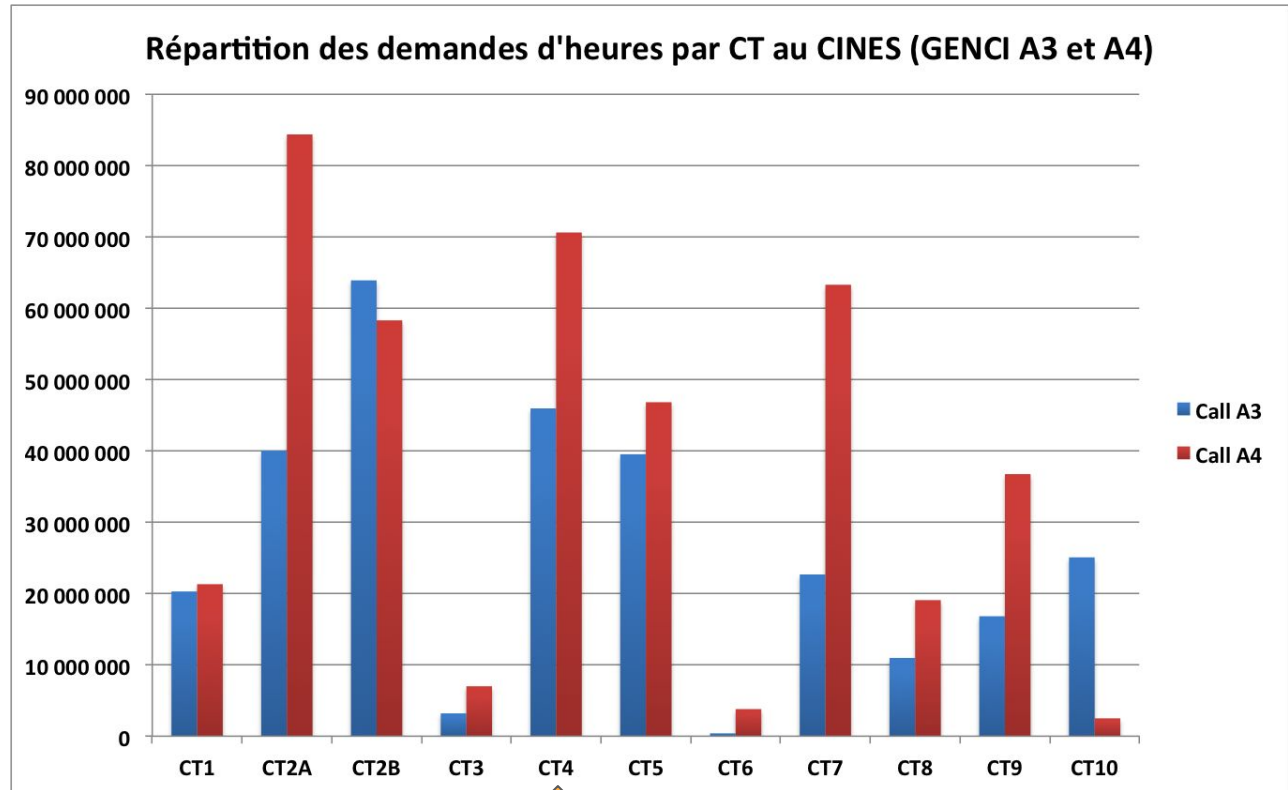
- Usage “universel”
 - CT4 (astrophysique/géophysique) très présent sur les moyens régionaux et nationaux (cf statistiques CINES)
- Pas de soutien (direct) pour du développement de code (≠ 2010-2014)
- Fort soutien à des écoles thématiques (3 écoles, ~150 participants)

Big data ✗

- N’a pas encore émergé (ou pris en charge en amont, cf données Gaia)
- Peut devenir critique avec l’arrivée de nouvelles approches
 - “An Application of **Deep Learning** in the Analysis of Stellar Spectra” Fabbro+, MNRAS (2017)
 - “Parameterizing Stellar Spectra Using Deep **Neural Networks**” Li+ (2017)

CT4 : gros comité thématique GENCI

→ importance simulations astrophysiques



- CT1 : Environnement
- CT2a : CFD non réactif
- CT2b : CFD réactif
- CT3 : biologie/santé
- CT4 : astrophysique/géophysique**
- CT5 : physique théorique/plasmas
- CT6 : informatique/algo/math
- CT7 : dynamique moléculaire en biologie
- CT8 : chimie quantique/modélisation
- CT9 : physico-chimie des matériaux
- CT10 : nouvelles applications HPC

Programme

Deux domaines de recherche majeurs

micro-physique

- Spectroscopie atomique et moléculaire
- Astrophysique “nucléaire”
- Équations d'état
- Opacités
- ...

PROGRAMME

› **Spectrométrie haute sensibilité de molécules marqueurs des étoiles froides**

Patrick Crozet, ILM, 14:50-15:05 (15min)

› **Laboratory astrophysics and analysis of stellar spectra**

Lydia Tchang-Brillet, LERMA, 15:05-15:20 (15min)

› **FemtoFusion, première expérience**

Jean-Eric Ducret, CELIA, 15:20-15:35 (15min)

› **Exploration ab initio des intérieurs stellaires et planétaires**

François Soubiran, Earth and Planetary Science, 16:30-16:45 (15min)

Deux domaines de recherche majeurs

micro-physique

- Spectroscopie atomique et moléculaire
- Astrophysique “nucléaire”
- Équations d'état
- Opacités
- ...

macro-physique

- Chocs
- Écoulements MHD
- Reconnexion magnétique
- Accélération des particules
- ...

PROGRAMME

› **Spectrométrie haute sensibilité de molécules marqueurs des étoiles froides**

Patrick Crozet, ILM, 14:50-15:05 (15min)

› **Laboratory astrophysics and analysis of stellar spectra**

Lydia Tchang-Brillet, LERMA, 15:05-15:20 (15min)

› **FemtoFusion, première expérience**

Jean-Eric Ducret, CELIA, 15:20-15:35 (15min)

› **Experimental study of laser-driven radiative shock relevant for stellar environments**

Raj Laxmi Singh, Queen's University Belfast, 16:00-16:15 (15min)

› **Laboratory astrophysics studies with magnetized laser-produced plasmas.**

Andrea Ciardi, LERMA, 16:15-16:30 (15min)

› **Exploration ab initio des intérieurs stellaires et planétaires**

François Soubiran, Earth and Planetary Science, 16:30-16:45 (15min)

Deux domaines de recherche majeurs

PROGRAMME

micro-physique

- Spectroscopie atomique et moléculaire
- Astrophysique “nucléaire”
- Équations d'état
- Opacités
- ...

macro-physique

- Chocs
- Écoulements MHD
- Reconnexion magnétique
- Accélération des particules
- ...

**Présentation de review du domaine de
l'astrophysique de laboratoire
à haute densité d'énergie**






> Astrophysique de laboratoire en France
Alessandra Ravasio, LULI, 14:20-14:50 (30min)

Projets financés







Nombre total de projets financés : **29 / 176** → **16%**

Financement (euros) : 119 k€ → 17%






AO 2015 : 7/41 projets

Responsable du projet	Titre du projet	Laboratoire
Biennier Ludovic	De la formation à la destruction des espèces carbonées dans les enveloppes circumstellaires	IPR
Ducret Jean-Eric	NUPLAS, Nucléosynthèse dans les plasmas pour l'Astrophysique	AIM 
Richard Olivier	Etude détaillée des variations de composition chimique à l'intérieur des étoiles	LUPM 
Stehlé Chantal	Etudes expérimentales de chocs radiatifs dans différents régimes	LERMA 
Tchang--Brillet Lydia	Physique atomique et moléculaire en physique stellaire : spectroscopie, opacités, collisions, magnétisme	LERMA 
Turck--Chièze Sylvaine	Magnétisme, Enveloppes stellaires, Opacités	AIM
Winisdoerffer Christophe	Physique microscopique des plasmas denses	CRAL 




AO 2016 : 8/42 projets

Responsable du projet	Titre du projet	Laboratoire
Balança Christian	Physique atomique et moléculaire en physique stellaire : spectroscopie, opacités, collisions, magnétisme	LERMA 
Crozet Patrick	Spectrométrie laser haute sensibilité des bandes de FeH et CrH	ILM 
Ducret Jean--Eric	NUPLAS, Nucléosynthèse dans les plasmas pour l'Astrophysique	AIM 
Richard Olivier	Etude détaillée des variations de composition chimique à l'intérieur des étoiles	LUPM 
Stehlé Chantal	Etudes expérimentales de chocs radiatifs dans différents régimes	LERMA 
Winisdoerffer Christophe	Physique microscopique des plasmas denses	CRAL 
Prugniel Philippe	Atelier National de Spectroscopie Stellaire	CRAL
Walder Rolf	International School Computational Astrophysics	CRAL

AO 2017 : 8/48 projets

Responsable du projet	Titre du projet	Laboratoire
Balança Christian	Physique atomique et moléculaire en physique stellaire : spectroscopie, opacités	LERMA 
Biennier Ludovic	Evolution des grains carbonés dans les enveloppes circumstellaires	IPR
Crozet Patrick	Spectres moléculaires de référence vis/IR proche pour l'astrophysique stellaire	ILM 
Richard Olivier	Etude détaillée des variations de composition chimique à l'intérieur des étoiles	LUPM 
Stehlé Chantal	Etudes expérimentales de chocs radiatifs dans différents régimes	LERMA 
Winisdoerffer Christophe	Physique microscopique des plasmas denses	CRAL 
Commerçon Benoît	ASTROSIM : école numérique de l'astrophysique	CRAL
Lesur Geoffroy	Ecole "Physique des plasmas"	IPAG

AO 2018 : 6/45 projets

Responsable du projet	Titre du projet	Laboratoire
Balança Christian	Physique atomique et moléculaire en physique stellaire : spectroscopie, opacités, collisions, magnétisme	LERMA 
Biennier Ludovic	Evolution des grains carbonés dans les enveloppes circumstellaires	IPR
Michaut Claire	Compréhension des chocs radiatifs	LUTh
Richard Olivier	Processus de transport dans les étoiles en rotation lente	LUPM 
Stehlé Chantal	Exploitation scientifique d'expériences de chocs	LERMA 
Rieutord Michel	Ecole Evry Schatzman 2018	IRAP

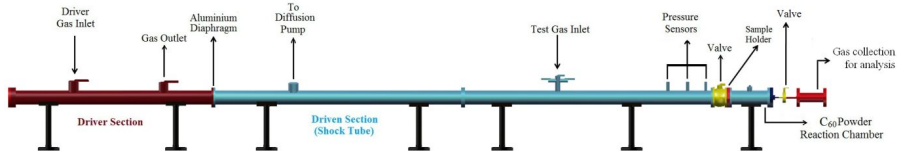
Micro-physique

Evolution des grains dans les enveloppes circumstellaires:

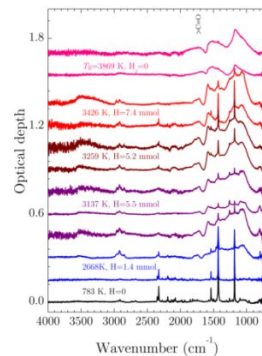
les apports de l'astrophysique de laboratoire (Ludovic Biennier, Robert Georges, Institut de Physique de Rennes)

Objectif : participer à la caractérisation des enveloppes d'étoiles en fin de vie et à la compréhension de leur dynamique

Mécanismes de **formation, d'évolution et de destruction** des grains (mieux comprendre les processus de pertes de masse) (L. Biennier A&A 2017)

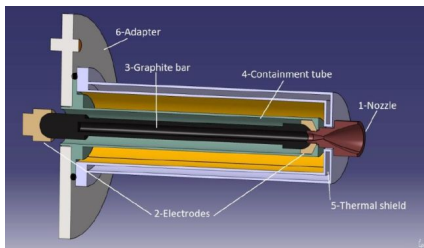


Méthodologie: expériences d'exposition d'analogues de grains carbonés en tube à choc (3000 – 10000 K) à IISc Bangalore, Inde

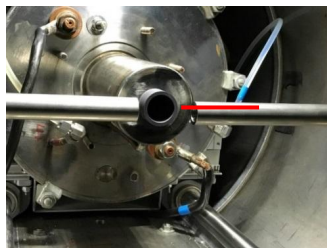


Analyses ex situ:
Spectres IR de résidus solides après exposition de fullérenes (E. Dartois)

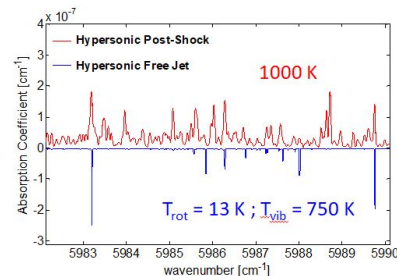
Spectroscopie infrarouge HT des composés gazeux de l'enveloppe : mise au point d'un réacteur de grains en écoulement, sondé par un spectromètre ultrasensible (Louviot JCP 2015 / Suas-David JPCA 2015)



Source HT (2000 K)



Laser de sonde (CRDS)

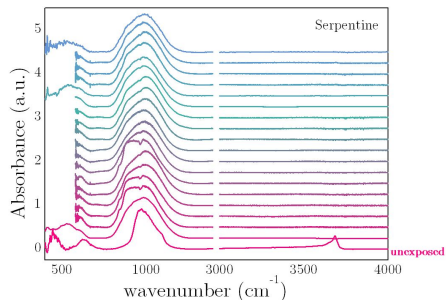


Test de faisabilité : détection CH₄ à l'ETL et hors ETL

Evolution des grains dans les enveloppes circumstellaires: les apports de l'astrophysique de laboratoire (Ludovic Biennier, Robert Georges, Institut de Physique de Rennes)

Prospective

Destruction de grains (silicatés et carbonés) par une onde de choc: identification de traceurs de chocs (E. Dartois ISMO, A. GUSDORF, P. LESAFFRE LERMA)



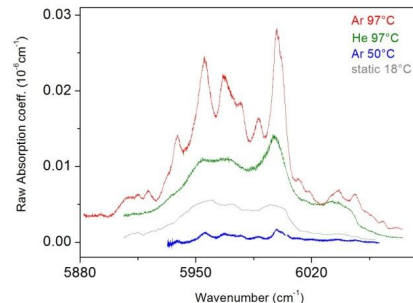
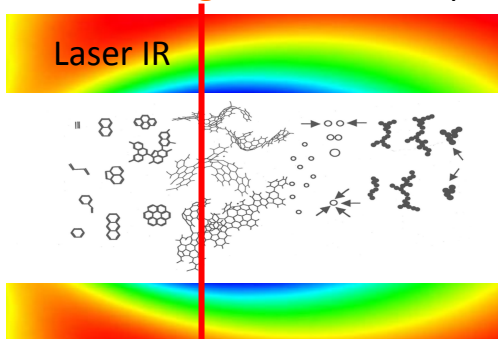
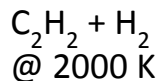
Analyses *ex situ* des résidus solides après exposition de silicate et carbonés amorphes hydrogénés.

Ici: spectres IR de silicates (Serpentine) après exposition à une onde de choc (5000- 6400 K). Résultats préliminaires.



Identification *in situ* des produits gazeux de décomposition des silicates et carbonés amorphes hydrogénés par une onde de choc (< 10000 K) via des mesures d'émission visible résolues en temps.

Evolution de la formation de grains carbonés par spectroscopie laser CRDS dans un écoulement hypersonique



Spectre CRDS du naphtalène obtenu en écoulement

Stellar opacities: theory -vs- observations -vs- experiments

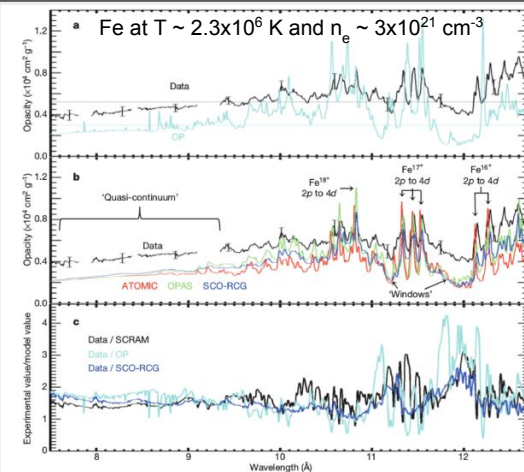
Franck Delahaye (LERMA)

Large discrepancies in stellar opacities (base of the convection zone)

- SANDIA experiments -vs- all Theoretical calculations
- Theoretical calculations -vs- Theoretical calculations

Reasons behind such differences:

- missing bound-free ?
- broadening ?
- EOS ?
- problem with the experiments ?



Prospective

Experiments

- National Ignition Facility is developing a platform to reproduce the Fe opacity measurement made at SANDIA (Laser vs Z-machine).
- MUMEO project (*PI: Delahaye*) is preparing new experiments (LULI, ORION and SACLA)
 - To measure opacities for lighter elements but with the same atomic structure (O-like, F-like and Ne-like) as the experiments at SANDIA.
 - Explore plasma effects on the broadening of the resonances in the photoionisation cross-sections

Theoretical calculations

- New calculation from The Opacity Project (OP)
 - 2 approaches: R-matrix vs Distorted Wave
 - Improve broadening modelling
 - LS coupling vs IC coupling
- Develop a common platform between different groups (OP, CEA, LLNL, LANL) to test all the different steps in opacity calculations

Macro-physique

Astrophysique stellaire et de laboratoire

équipe du LUTh (Claire Michaut) en collaboration avec CEA et LULI

Développement du code d'hydrodynamique radiative HADES

[C. Michaut et al., HEDP 2017]

Thèmes :

→ Instabilité de Vishniac dans les RSN et doublement de mode en phase tardive et radiative

[J. Minière et al., A&A 2018 ; J. Sanz et al., PoP 2016]

→ Propagation de chocs dans les enveloppes de céphéides, reconstruction d'une observable

→ Colonne d'accrétion dans les variables cataclysmiques de type Polar

[C. Busschaert et al., A&A 2015 ; J.M. Bonnet-Bidaud et al., A&A 2015 ; C. Busschaert et al., HEDP 2013]

En laboratoire - lasers LULI, GELLO XII Osaka, Orion, et LMJ en prép.

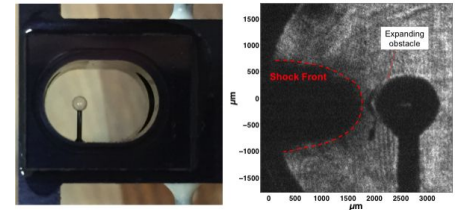
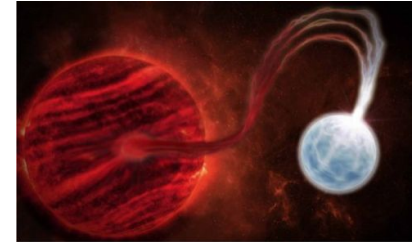
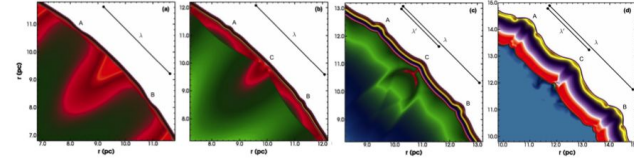
→ Chocs radiatifs

[Th. Michel et al., HPL SE 2017 ; M. Koenig et al., PoP 2017]

→ Instabilités de Rayleigh-Taylor

→ Chocs d'accrétion

[L. VanBoxSom et al., HPL SE 2017 ; J. E. Cross et al., Nature Comm. 2016 ; C. Busschaert et al., NJP 2013]



Prospective

projets Patrick Crozet (ILM) → Prospective

Caractérisation spectroscopique à très haute sensibilité de bandes stellaires d'hydrures et oxydes métalliques : CrH, FeH, VO, TiO, en champ nul et sous champ magnétique (< 0.6 Tesla). Connexion étroite avec spectropolarimètre **SPIRou** (Julien Morin, LUPM)

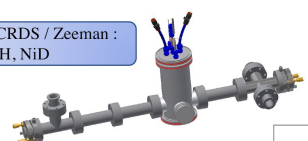
- Un projet **CSAA** vient d'être accepté (2018) axé sur la zone 0.8-1.0 micron.
- Un projet **ANR AAPG** de recherche collaborative est en cours de demande (phase 1 acceptée), axé sur 1.0-1.7 micron.

"En plus des mesures d'opacités et des facteurs de Landé, il faut souligner **le rôle primordial joué par la simulation** d'un très grand nombre de raies moléculaires, à des résolutions de plus en plus élevées en astrophysique (70000 et plus).

Des outils comme **PGOPHER** (C. Western), se sont révélés très précieux dans notre cas pour simuler les spectres à des résolutions et températures différentes par exemple (fonctionne bien sur CrH, N₂, ...)."

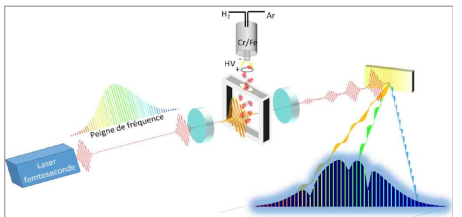
PNPS 2015/2018 : projets P. Crozet *Institut Lumière Matière, CNRS / UCBL Lyon 1*

Expérience CRDS / Zeeman : NiH, NiD



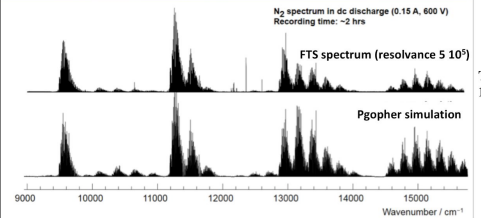
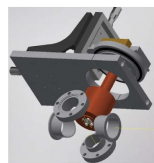
"A CRDS sputter-source experiment to study MH radicals", G. Dobrev, J. Morville, D. W. Tokaryk, A. J. Ross & P. Crozet, *Mol. Phys.*, 114(19) : 2777 (2016).

Expérience Vernier : CrH, N₂



"A new broadband Cavity-Enhanced Direct-Frequency-Comb Spectroscopy using a continuous Vernier filtering", J. Morville, L. Rutkowski, P. Crozet, and A. J. Ross, *FLAIR 2016 (5th International Conf. on Field Laser Applications in Industry and Research)*.

Nouvelle source moléculaire : décharge dans N₂, spectre de référence 0.64 - 2.2 μm



N₂ spectrum in dc discharge (0.15 A, 600 V)
Recording time: ~2 hrs

FTS spectrum (resolution 5 10³)

PGopher simulation

The spectrum of N₂ from 4500 to 15700 cm⁻¹ revisited with PGOPHER
C. M. Western, P. Crozet, A. J. Ross, J. Morville, D. Tokaryk, and L. Carter-Blatchford, (submitted to *JQSRT*, 2018)

voir talk de P. Crozet

projets François Soubiran (LGLTPE) → Prospective

Étoiles : déterminer les effets de **non-idéalité** sur l'évolution et sur les spectres astérosismologiques pour pouvoir mieux caractériser les étoiles et donc les planètes, car tout est relatif à l'étoile hôte. Regarder également les propriétés de transport à haute-T.

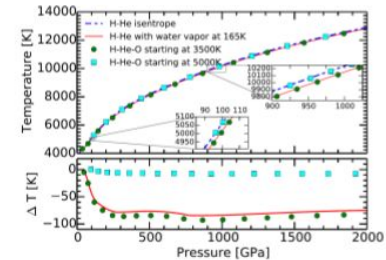
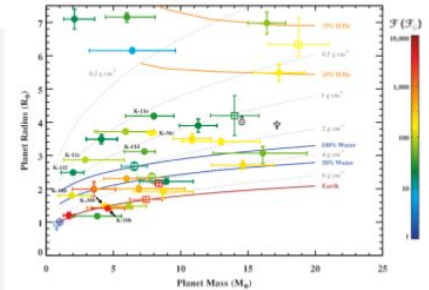
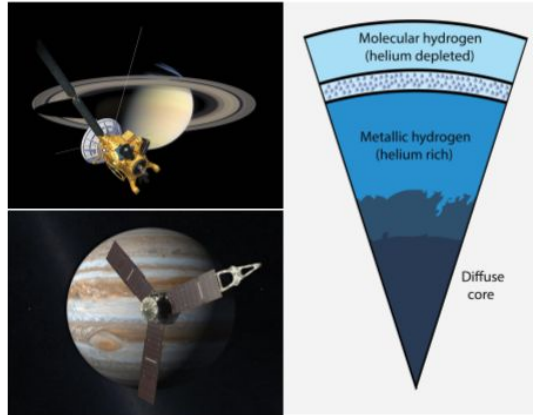
Planètes du SS : apporter un soutien aux missions courantes (**Juno**) et à venir (futures explorations Uranus et Neptune). Nécessité d'améliorer les modèles non adiabatiques → **simulations hydro, modélisation**, caractérisation des matériaux.

Exoplanètes : compléter les observations **TESS** et **Kepler**. Soutenir les projets d'observations. Nécessité d'avoir une excellente statistique sur les planètes détectées. **Améliorer** les modèles de structure, de formation et d'évolution.

Soutenir les collaborations **expériences + numériques + astrophysique** pour que l'ensemble des communautés échangent. Maintien d'**équipements de taille intermédiaire** (~LULI) pour les expériences.

Créer des standards de prop. physiques (thermo, transport...) des matériaux.

Microphysique des plasmas denses (F.Soubiran+)



EOS + transport prop. : **DFT-MD / PIMC / exp.**

Crédits : Wahl+ (2017), Lissauer+ (2014), Soubiran+ (2016)

voir talk de F. Soubiran

projets Christian Balança (LERMA) → Prospective

Projets : lanthanides moyennement ionisés, éléments groupe Fe, HD

Projets : développement de méthodes approchées pour les atomes complexes (Fe)

Projets : développement de méthodes adaptées aux hautes températures ; application à de nouvelles espèces (radicaux, chaînes carbonées,...)

Projets : largeur et déplacement Stark des raies d'atomes complexes.

Bases de données

→ Portail de données MOLAT (données atomiques et moléculaires)

→ STARK-B (largeurs Stark)

Physique atomique et moléculaire en physique stellaire



C. Balança, F. Dayou, N. Feautrier, L. Tchang-Brillet, S. Sahal-Bréchet, C. Blaess, N. Champion et collaborateurs

Objectifs : **interprétation d'observations et modélisation des atmosphères stellaires et des environnements circumstellaires** (opacités, excitation/de-excitation radiative et collisionnelle, facteurs de Landé)
projets liés à des observations VLT, HST, FUSE, GAIA, Herschel, ALMA
plus de 40 publications depuis 2014

Outils :

- **Expériences** : spectromètre VUV de 10m sous vide (Observatoire de Paris, Meudon)
- **Théorie** : physique et chimie quantique, collisions, élargissement Stark

Thèmes :

Spectroscopie VUV à haute résolution (longueur d'onde, forces d'oscillateur, énergies des niveaux, facteur de Landé)

- ions lourds multichargés (métaux de transition, terres rares)
- H₂ et ses isotopologues

Projets : lanthanides moyennement ionisés, éléments groupe Fe, HD

Modélisation hors ETL des atmosphères d'étoiles froides et des environnements circumstellaires

→ **Collisions avec H. Modélisation de spectres Gaia**

- Potentiels interatomiques et couplages pour l'excitation collisionnelle par H (Mg, Ca, O)
- Dynamique collisionnelle

Projets : développement de méthodes approchées pour atomes complexes (Fe)

→ **Excitation ro-vibrationnelle de petites molécules par collision avec H₂**

- Interactions moléculaires et dynamique collisionnelle
- Nouveaux résultats pour SO₂, SiO

Projets : développement de méthodes adaptées aux hautes températures application à de nouvelles espèces (radicaux, chaînes carbonées,...)

voir talk de L. Tchang-Brillet

projets Chantal Stehlé (LERMA) → Prospective

→ maintien d'installations de taille intermédiaire (~ kJ)

→ maintien de l'expertise fabrication de cible (GEPI)

→ tables d'opacités de qualité et publiques

→ codes RMHD “ouverts”

Radiative shock experiments (PALS and ORION lasers)

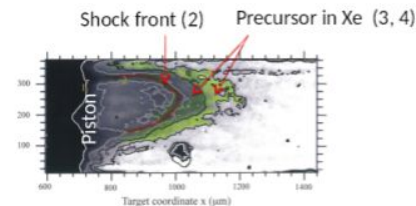
C. Stehlé, U. Chaulagain, R. L. Singh, J. Larour (LERMA et LPP)



First XUV probing of a near 1D radiative shock wave. Identification of the precursor, shock front and piston (CH-Au).

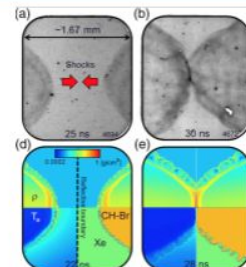
State of the art Xe opacity calculations

Chaulagain et al. HEDP 2015
Rodriguez et al. PRE 2015
Cotello et al HEDP 2015



First collision of 2 identical 3D radiative shocks waves (70 km/s) probed with several diagnostics.

Suzuki Vidai et al PRL 2017
Clayson et al, HEDP 2017
Spindloe et al. High Power Lasers 2017
Singh et al. HEDP 2017
In prep Rodriguez et al. 2018



Key imaging of the 2 shocks, showing the shock fronts and pistons (50 μm CHBr)

Good agreement with 2D NYM-PETRA simulation indicating a strong compression at the collision and rippled shock fronts

voir talk de R.L. Singh

Prospective: Magnetized plasmas and laboratory astrophysics

Many laboratories involved: CEA, CELIA, LERMA, LNCMI, LPP, LULI, LUTH, ...

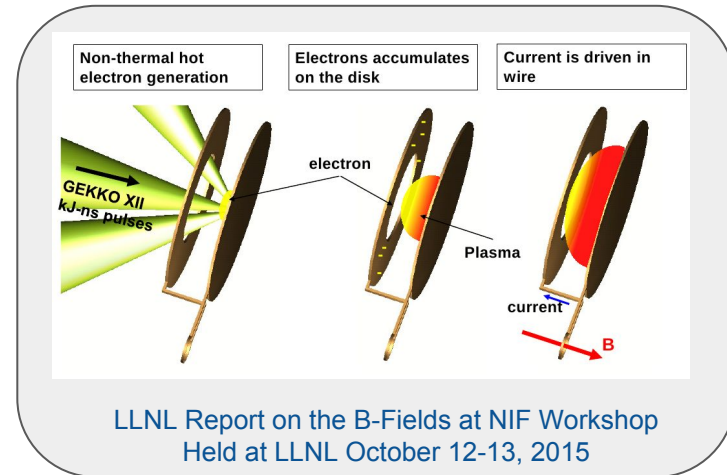
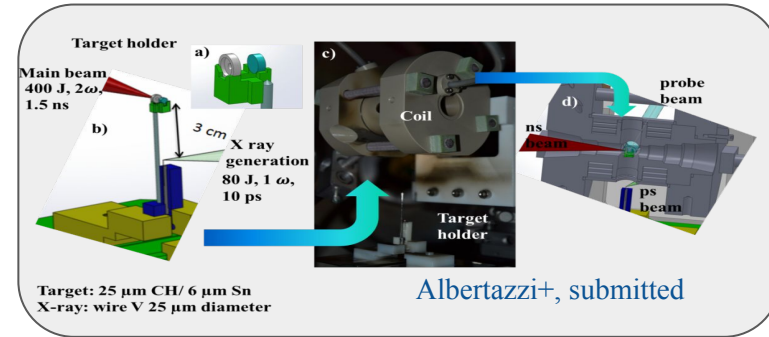
$v \sim 100\text{-}1000\text{ km/s}$; $T \sim 1\text{ MK}$; $\text{plasma-beta} \sim 1$

For steady, applied magnetic fields current technology is limited to $< 1\text{ MG}$

Key developments may come from laser-driven pulsed magnetic fields: $B \sim \text{few} \times 100\text{ MG}$ (Santos, CELIA)

Currently the magnetic field generation technology employed at LULI+coll is the state-of-the-art

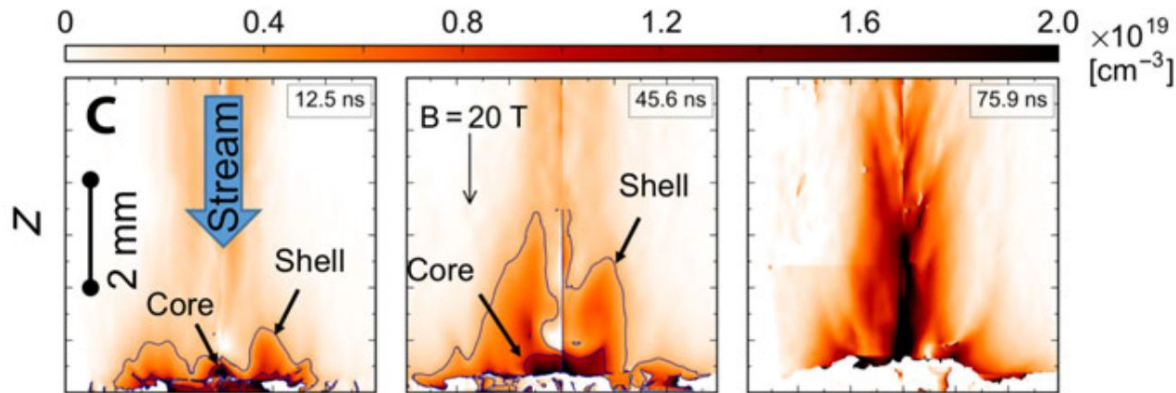
Prospective: Develop similar (steady) platforms for LMJ/Petal or Apollon.



Prospective: Magnetized plasmas and laboratory astrophysics

Many laboratories involved: CEA, CELIA, LERMA, LNCMI, LPP, LULI, LUTH, ...

- Dynamique des colonnes d'accrétion
- Reconnexion magnétique
- Collimation et stabilité des jets
- Accélération de particules aux chocs et instabilités des "rayons cosmiques"



Revet+ 2017 Science Advances

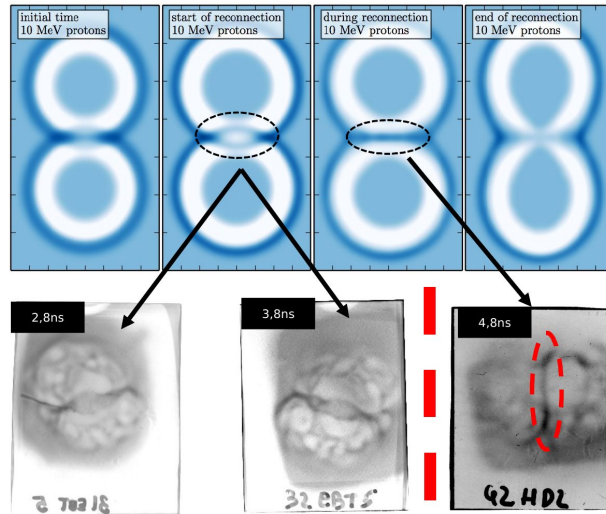
Prospective : Caractérisation des instabilités

voir talk de A. Ciardi

Prospective: Magnetized plasmas and laboratory astrophysics

Many laboratories involved: CEA, CELIA, LERMA, LNCMI, LPP, LULI, LUTH, ...

- Dynamique des colonnes d'accrétion
- Reconnexion magnétique
- Collimation et stabilité des jets
- Accélération de particules aux chocs et instabilités des "rayons cosmiques"

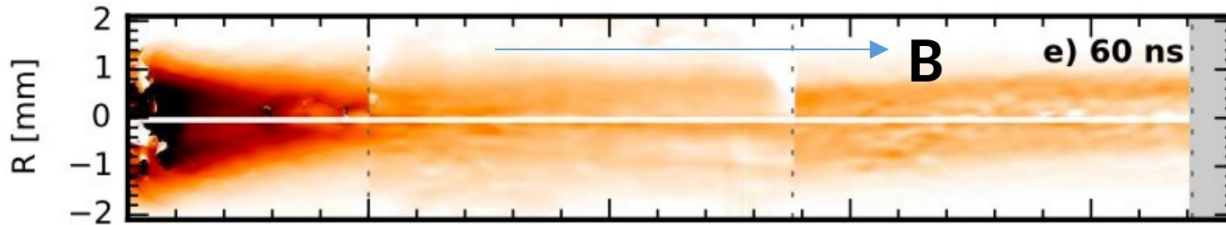


Prospective : Expériences sur le LMJ en 2019

Prospective: Magnetized plasmas and laboratory astrophysics

Many laboratories involved: CEA, CELIA, LERMA, LNCMI, LPP, LULI, LUTH, ...

- Dynamique des colonnes d'accrétion
- Reconnexion magnétique
- Collimation et stabilité des jets
- Accélération de particules aux chocs et instabilités des "rayons cosmiques"



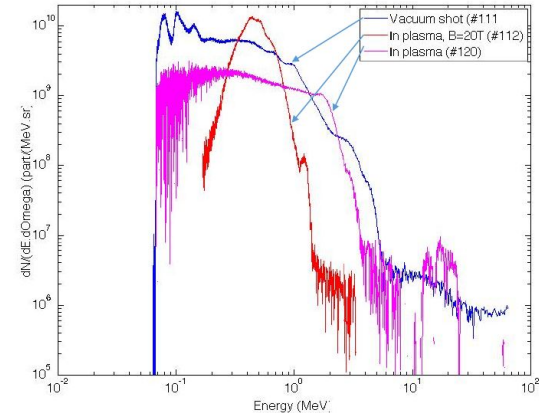
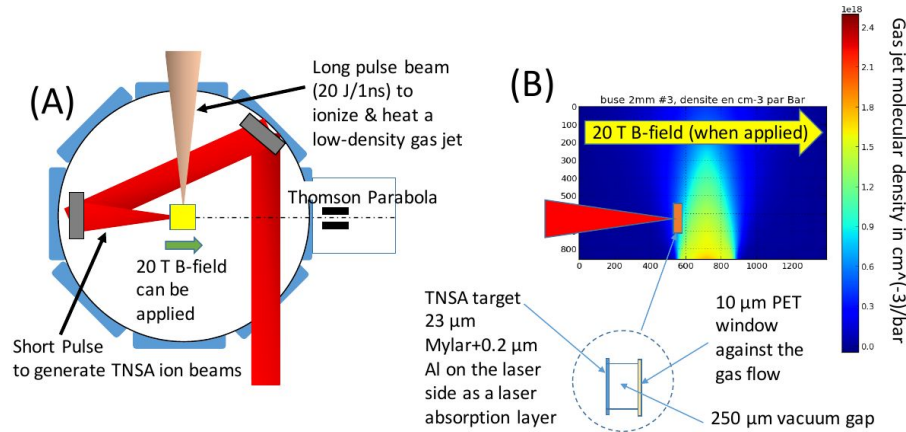
Ciardi+ 2013 PRL; Albertazzi+ 2014 Science; Higginson+ 2017 PRL

Prospective : Jets pulsés → formation de chocs internes, accrétion non stationnaire....

Prospective: Magnetized plasmas and laboratory astrophysics

Many laboratories involved: CEA, CELIA, LERMA, LNCMI, LPP, LULI, LUTH, ...

- Dynamique des colonnes d'accrétion
- Reconnexion magnétique
- Collimation et stabilité des jets
- Accélération de particules aux chocs et instabilités des "rayons cosmiques"



Prospective : Nouvelle plateforme expérimentale sur ELFIE (LULI). Expériences 2018 (en cours)

PROSPECTIVE

Interdisciplinarité

- Soutenir les collaborations **expériences + numériques + astrophysique** pour que l'ensemble des communautés échangent

Simulation numérique

- Troisième pilier de la science (théorie/observations/simulations)
- Besoin de **codes ouverts** (plasmas de labo) RMHD (et autres, cf Lundi-Mardi)
- Le Big Data est là ! Astro = observations dans l'ADN = besoin **chaîne intégrée instrument** → **traitements**
- Rupture technologique en cours → il faut **adapter** les codes pour rester compétitif
- Besoin de +formation, +d'accompagnement, +de structuration aussi en **mode projet**
→ *grosse simulation = campagne d'observations = gros projet avec des WP*
demande d'heures cpu, préparation et lancement des runs, post-traitement, valorisation...
→ rôle crucial des "ITA numériques" type IR/IE calcul dont on a un besoin vital avec la rupture hw/sw en cours

Installations expérimentales

- Maintien d'**équipements de taille intermédiaire** (kJ) pour les expériences
→ lobbying de soutien
- Assurer la **jouissance** des "petites" expériences d'astrophysique de laboratoire