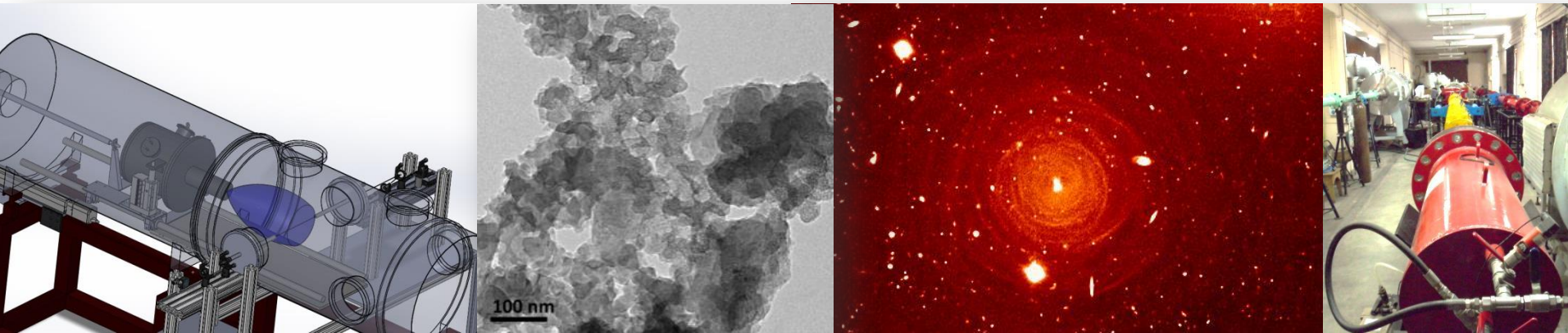


[Focus expériences]

Formation et destruction des espèces carbonées dans les enveloppes circumstellaires

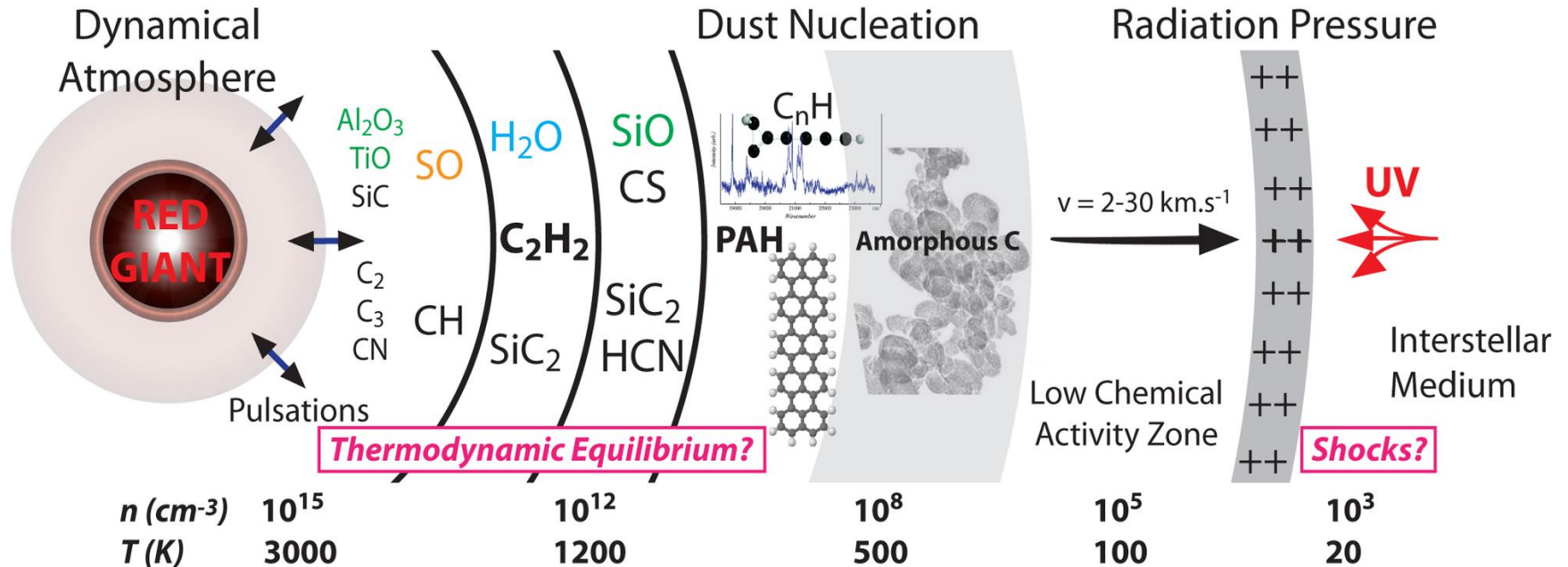


Ludovic Biennier et Robert Georges

Astrophysique de Laboratoire - IPR Université de Rennes 1 / CNRS

Problématique

- Caractériser les enveloppes d'étoiles en fin de vie et comprendre leur dynamique



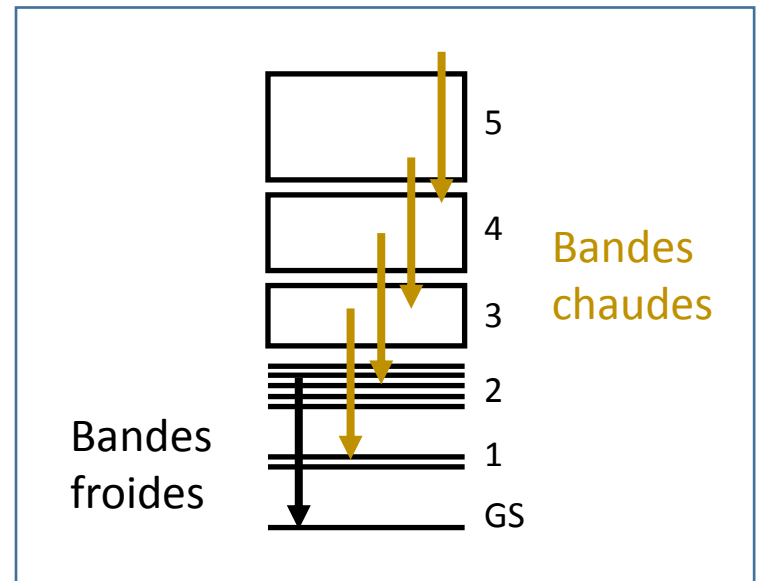
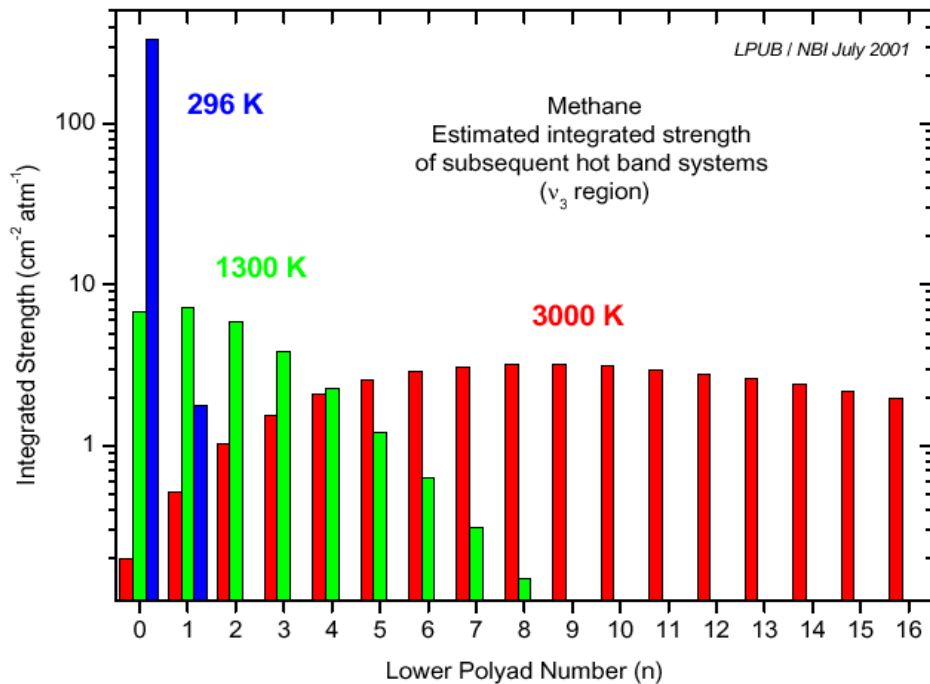
→ Spectroscopie infrarouge HT **S** des composés gazeux de l'enveloppe
 → Mécanismes de formation **F** et d'évolution et de destruction **D**
 des grains (mieux comprendre les processus de pertes de masse)

Opacité des étoiles évoluées

L'opacité de la photosphère des objets froids présente un pic dans l'infrarouge

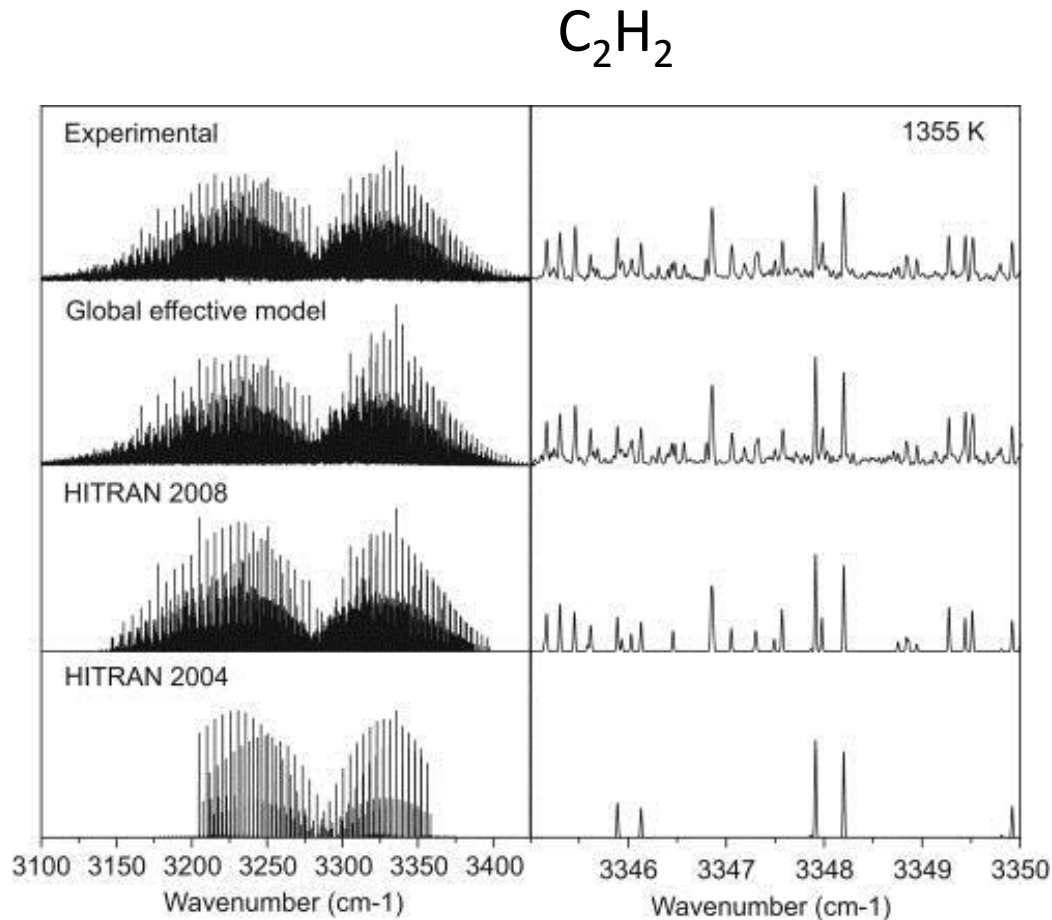
Elle est fortement influencée par la présence d'absorbants/émetteurs polyatomiques dont le spectre est très complexe à haute température

Il devient impossible de négliger la contribution de leurs états vibrationnels excités, fortement peuplés à haute température



Bases de données spectroscopiques HT

Usage périlleux des bases de données spectroscopiques « basses températures » (comme HITRAN) pour simuler une opacité à haute température (transitions rovibrationnelles à hautes valeurs de J et bandes chaudes manquantes)



Production de données IR fiables jusqu'à 2000 K

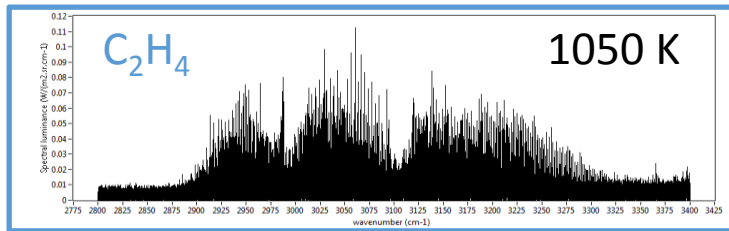
Utilisation des données pour l'élaboration de modèles moléculaires complexes (BXL CH₄ / Reims C₂H₄ / ExoMol UCL)

Bases de données

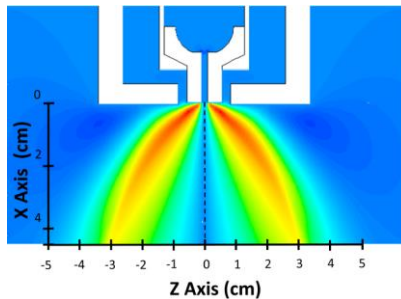
**Logiciels d'inversion
Modélisation des atmosphères**

Production de données IR à HT

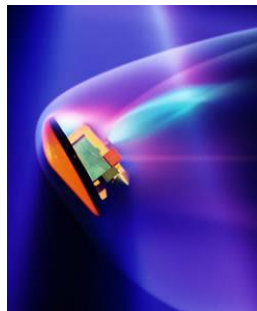
Plusieurs dispositifs sont utilisés pour générer des données spectroscopiques à haute température dans l'infrarouge:



1. Spectroscopie d'émission en conditions d'ETL



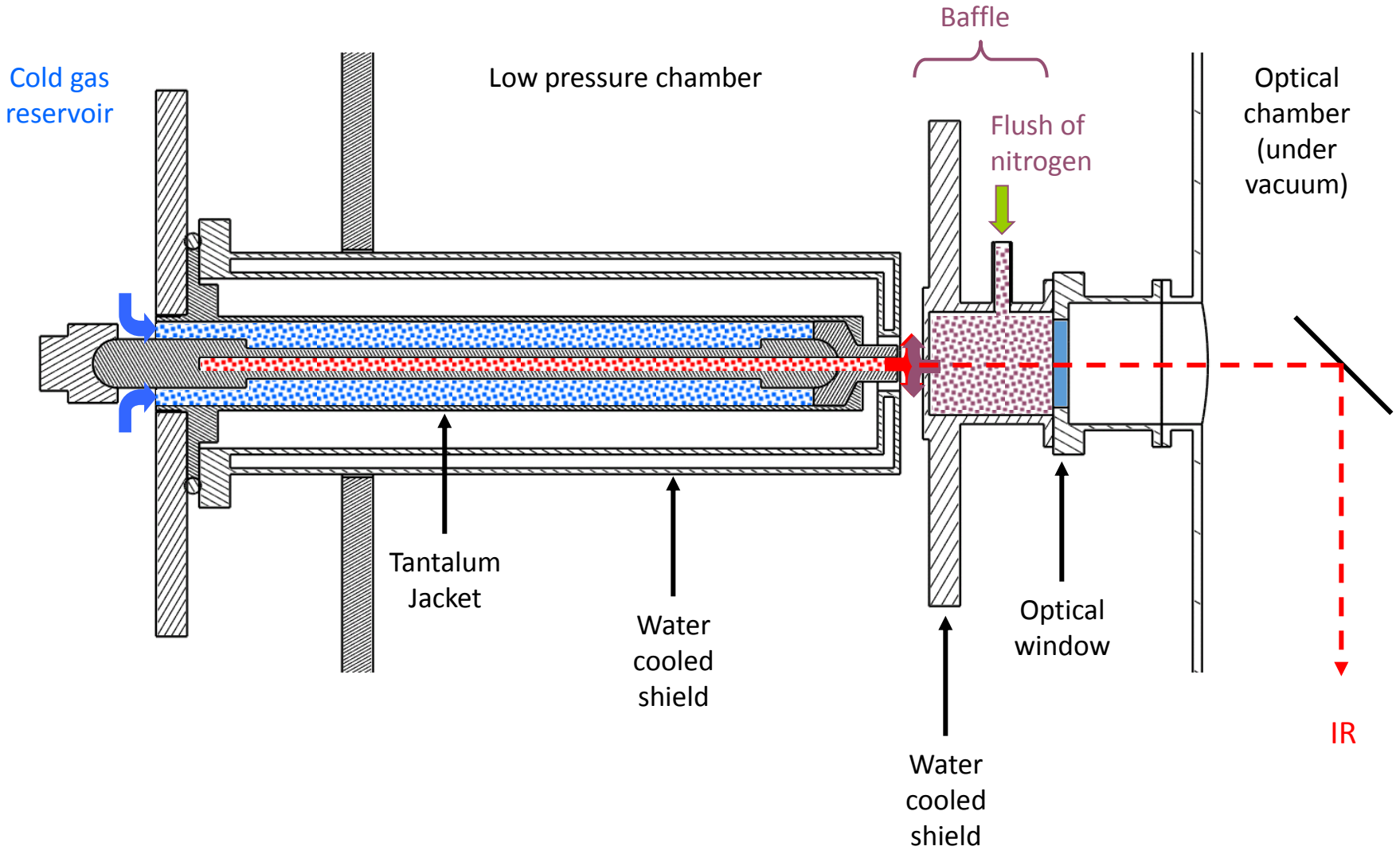
2. Détente hypersonique sondée par spectroscopie d'absorption ($T_{vib} \gg T_{rot}$)



3. Spectroscopie d'absorption post-choc hypersonique

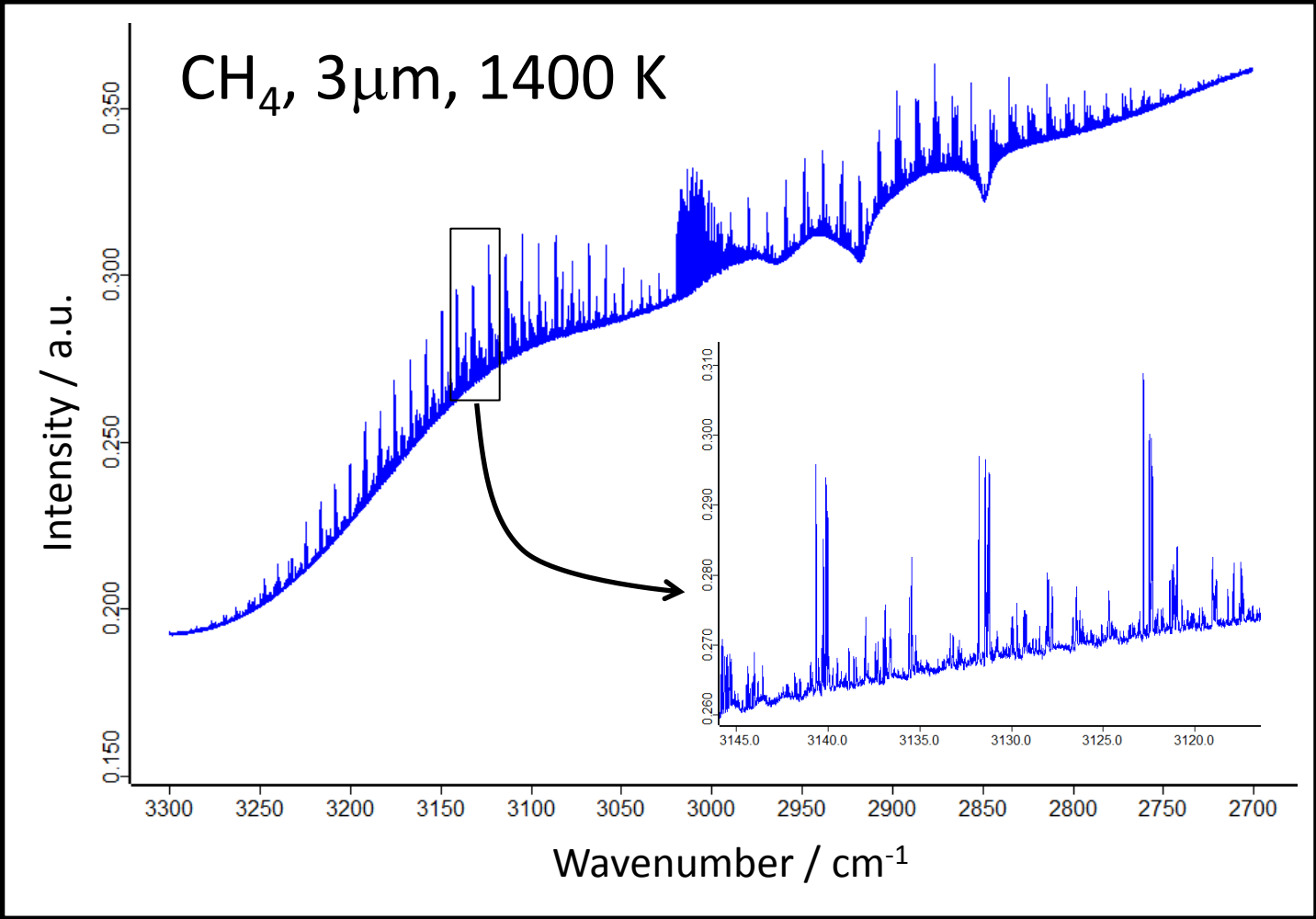
Emission spectroscopy under LTE conditions

High Enthalpy Source



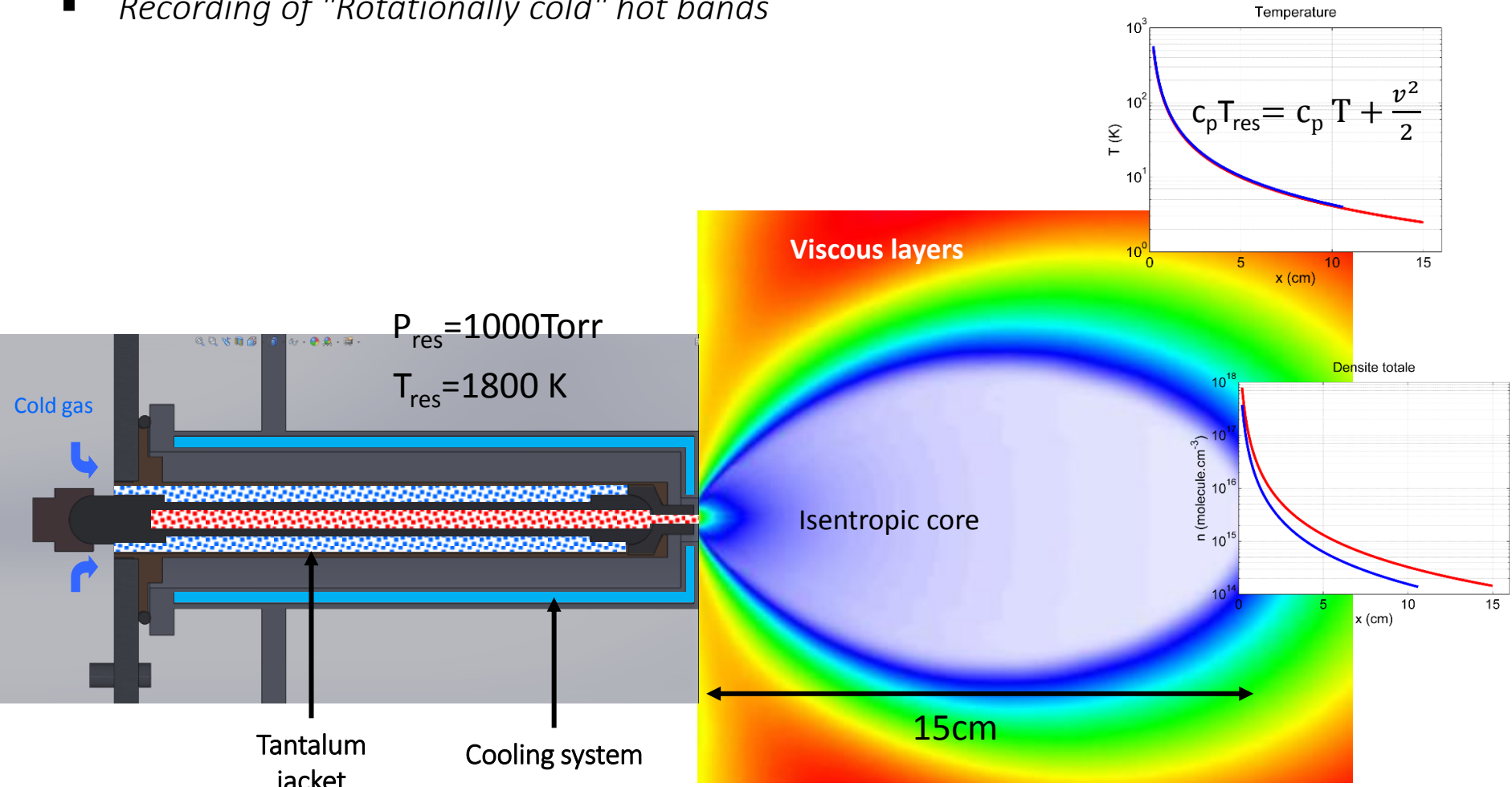
Application to methane: Pentad region

High-resolution (Doppler limited) emission spectrum



Hypersonic expansion probed in absorption

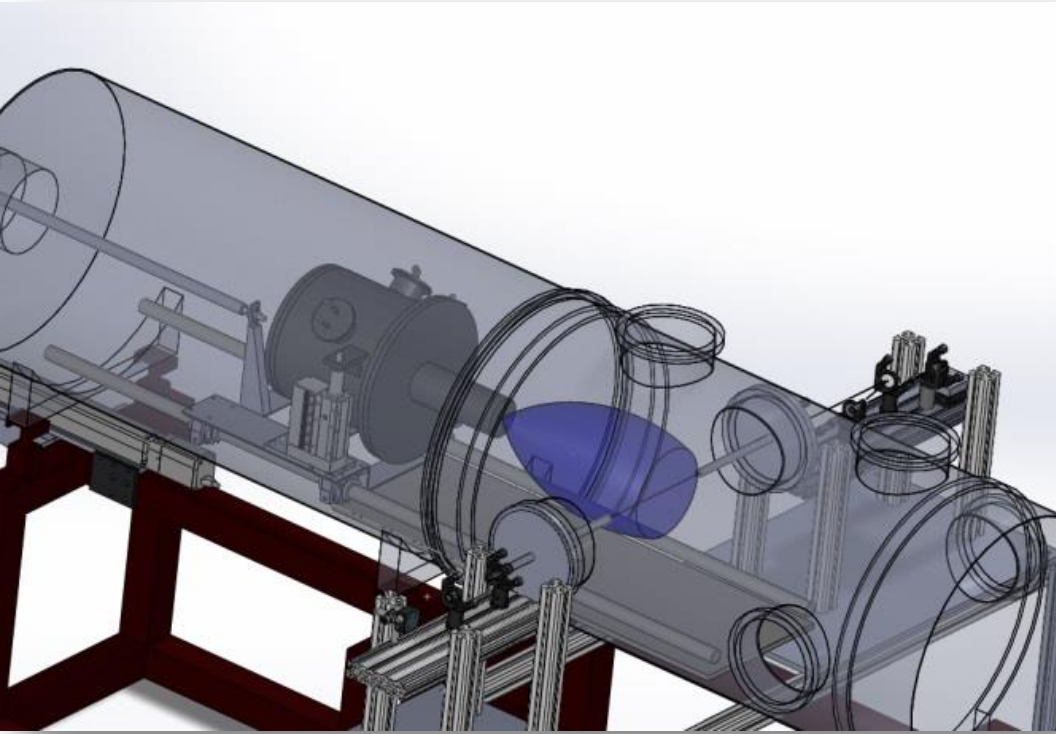
- Recording of "Rotationally cold" hot bands



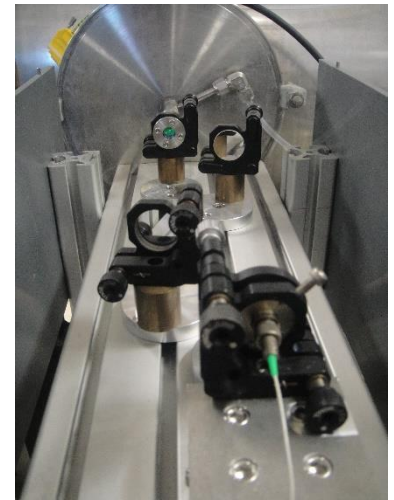
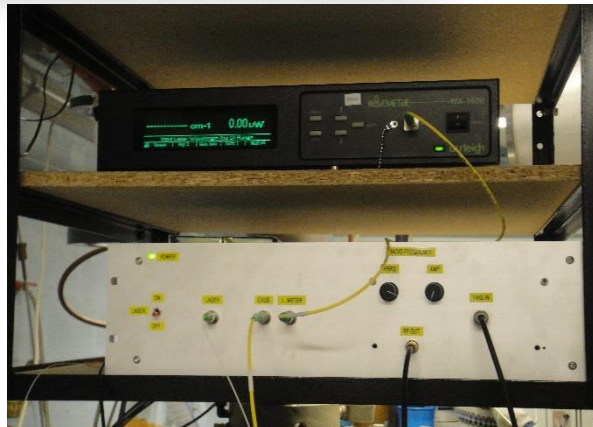
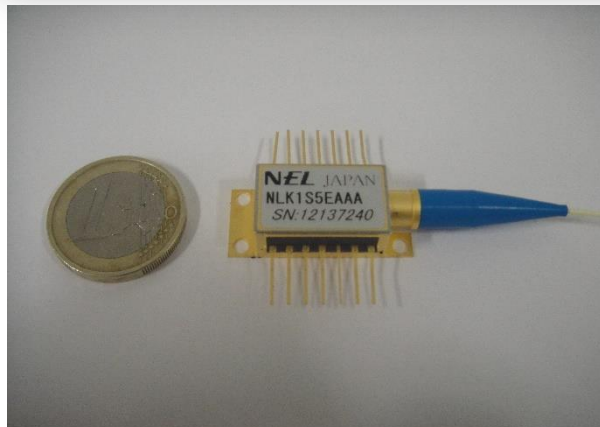
— Ar — He

Cavity Ring-Down Spectroscopy

Samir Kassi LIPhy Grenoble



$$\alpha_{\min} = 4 \times 10^{-11} \text{ cm}^{-1}$$



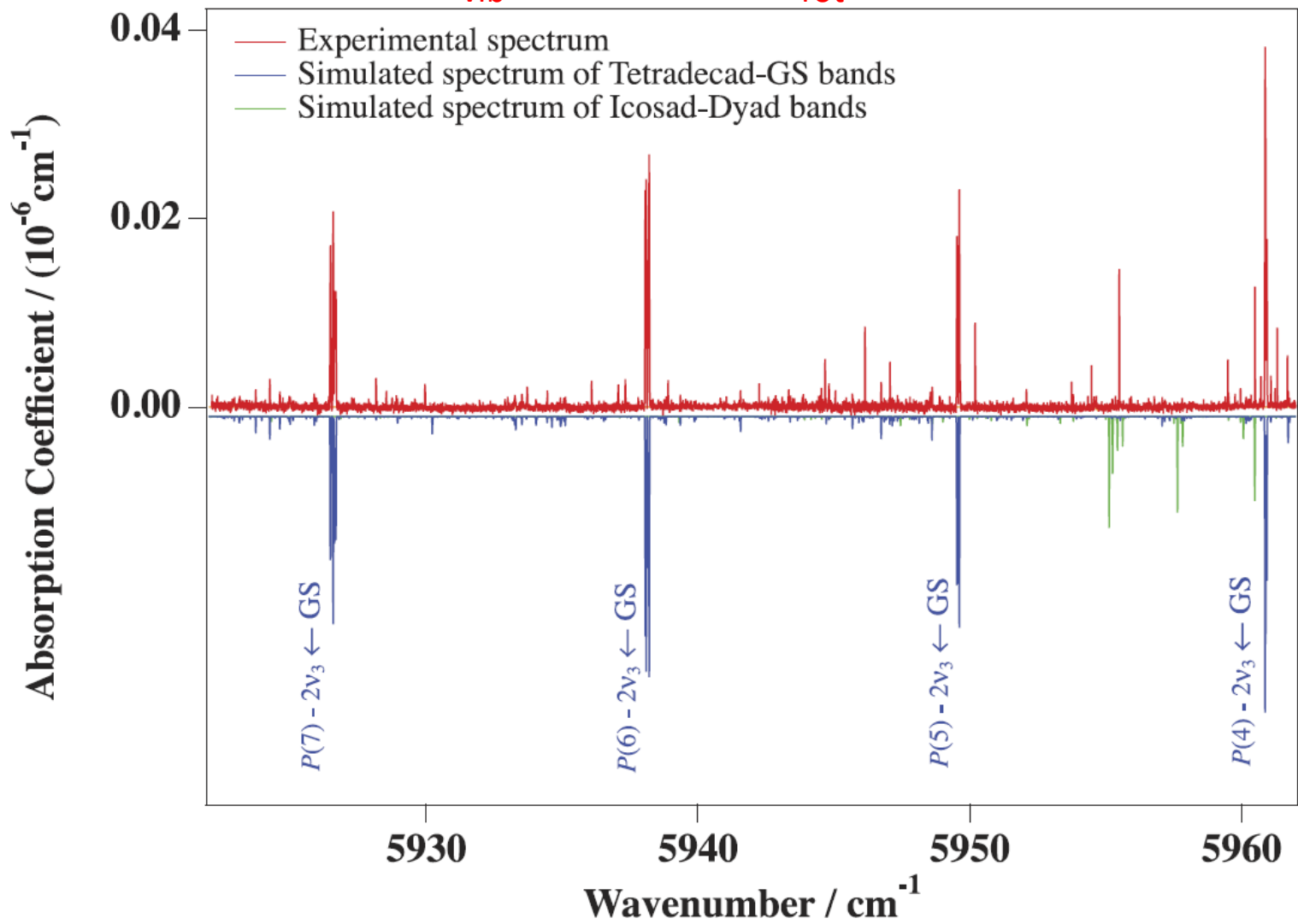
Application to methane

Louviot et al. JCP 2015

Ab initio model developed by M. Rey and V. Tyuterev, GSMA Reims

$T_{vib} = 750K$

$T_{rot} = 13K$

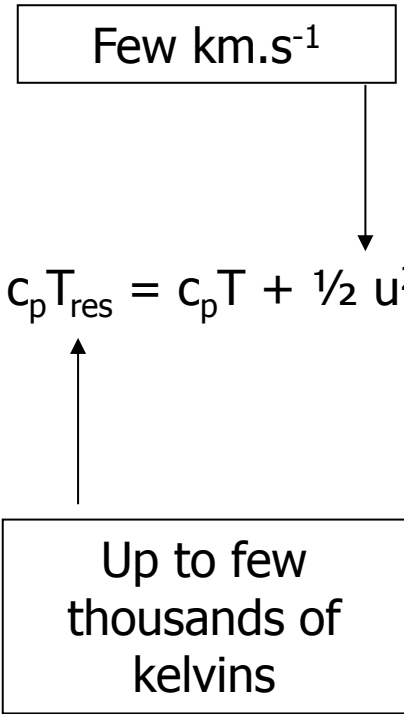


Hypersonic post-shock spectroscopy

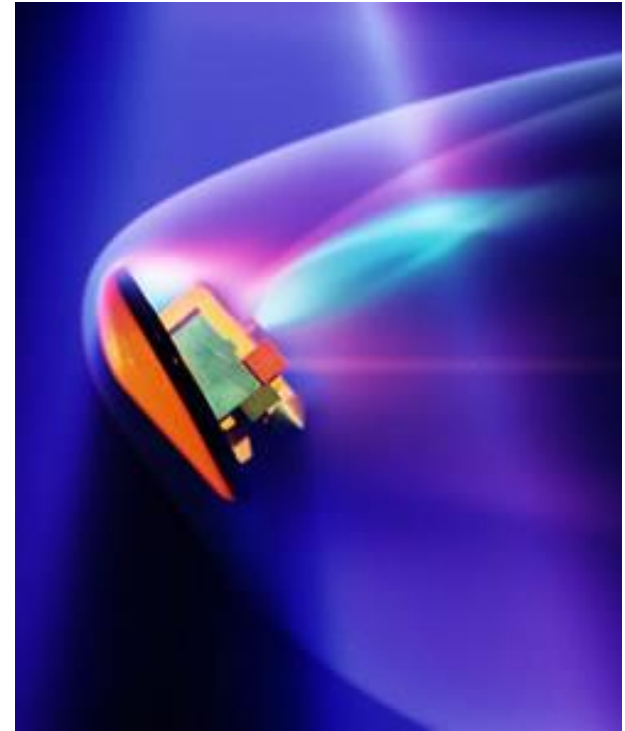
Shock wave (re)compression and (re)heating



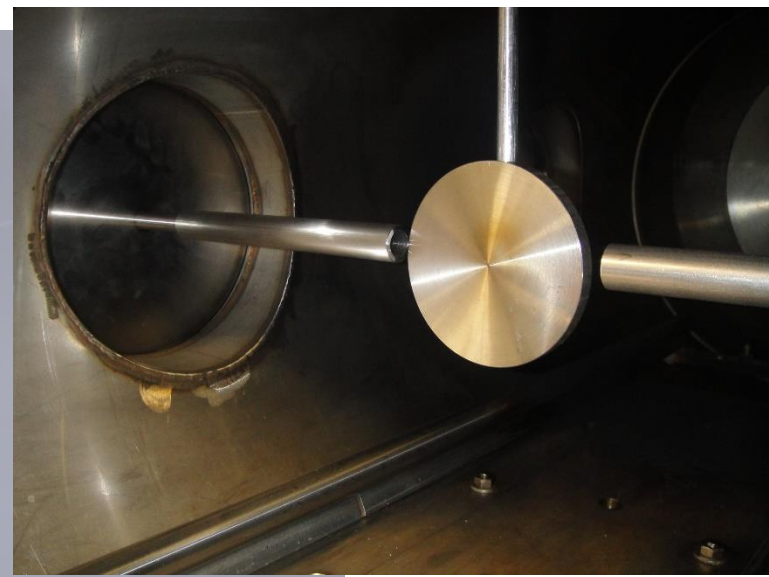
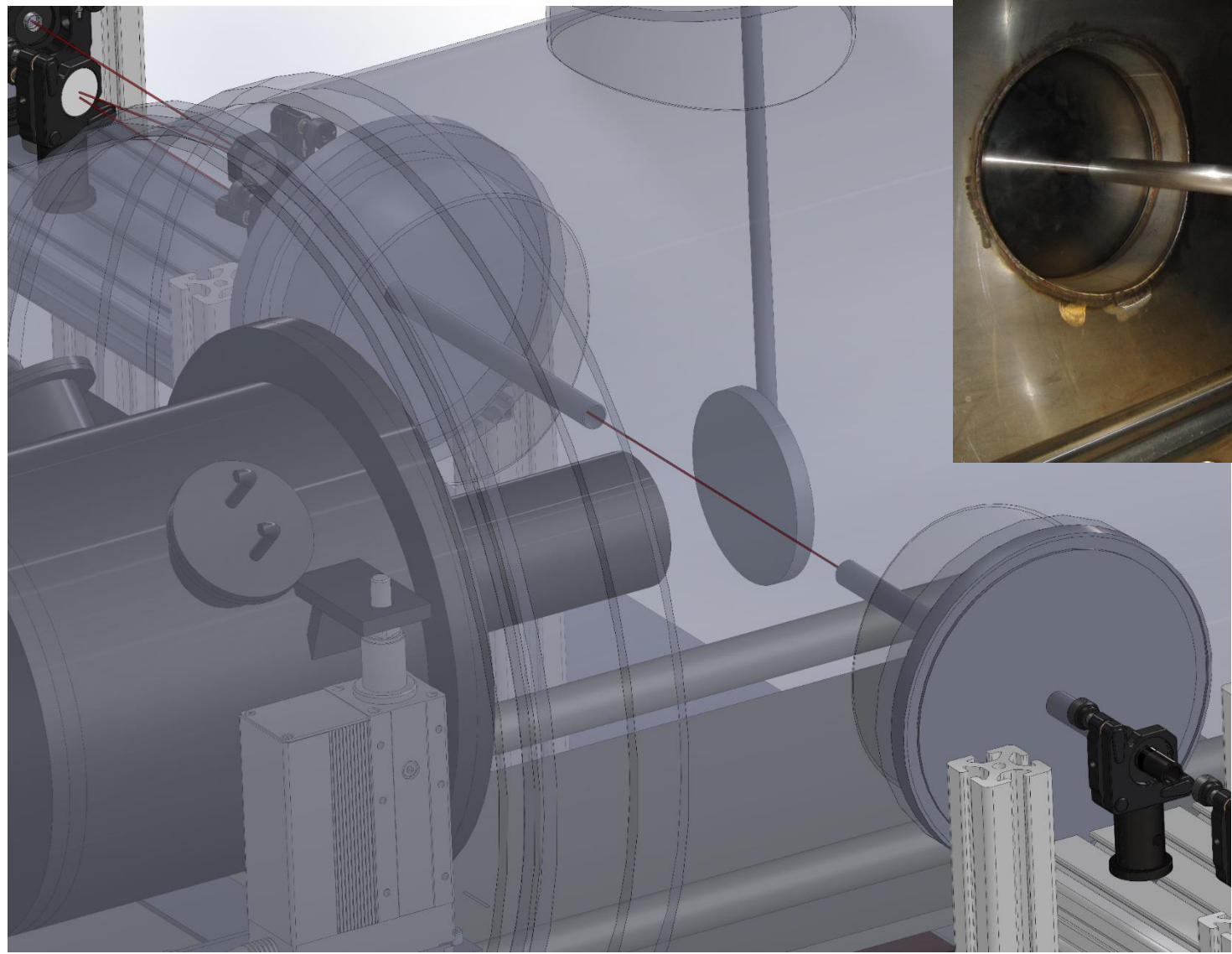
Copyright, 1988, by Gabriele Waeber



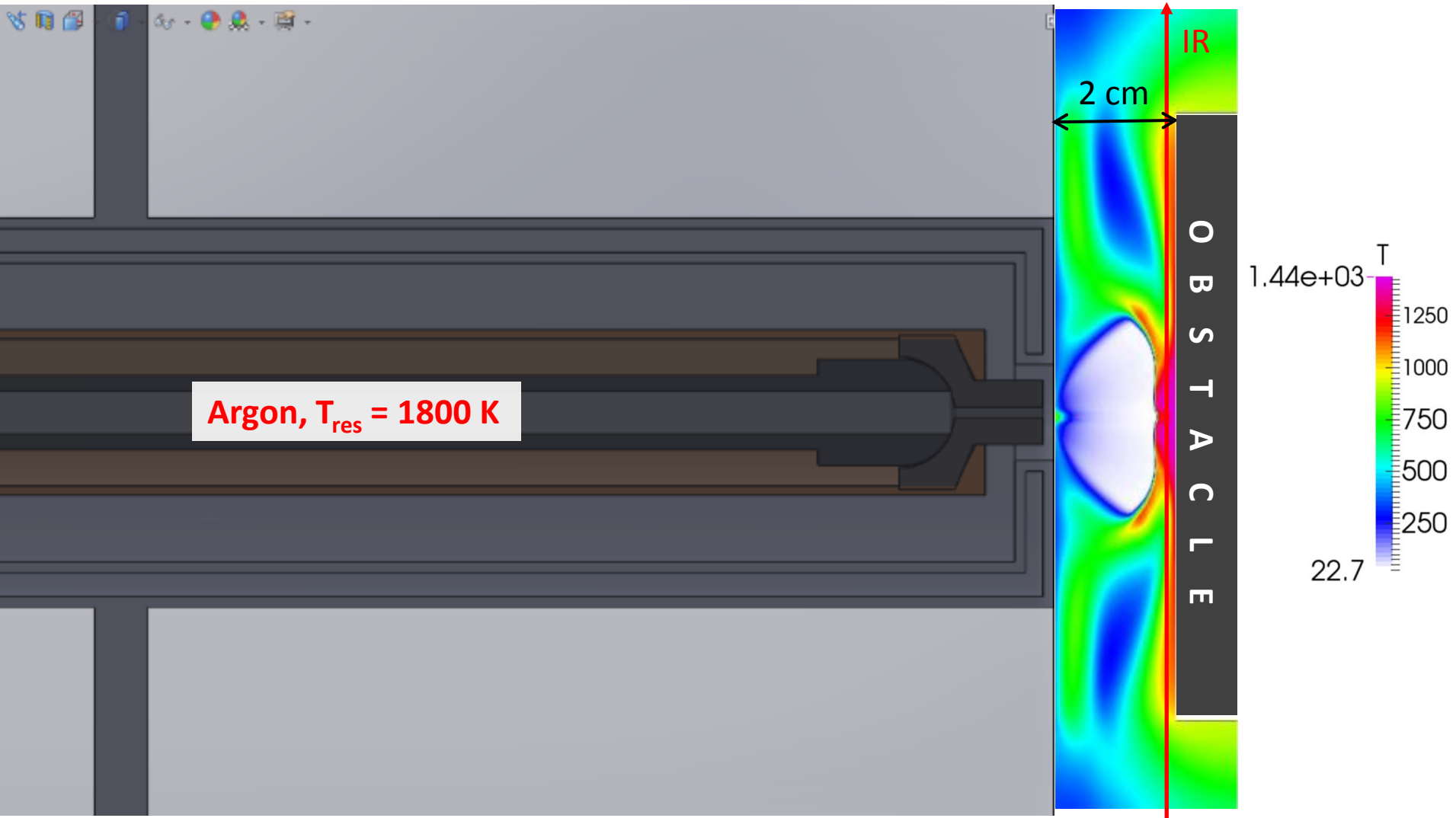
Martian probe, Mach 10, 1.5 km.s^{-1}
(ONERA)



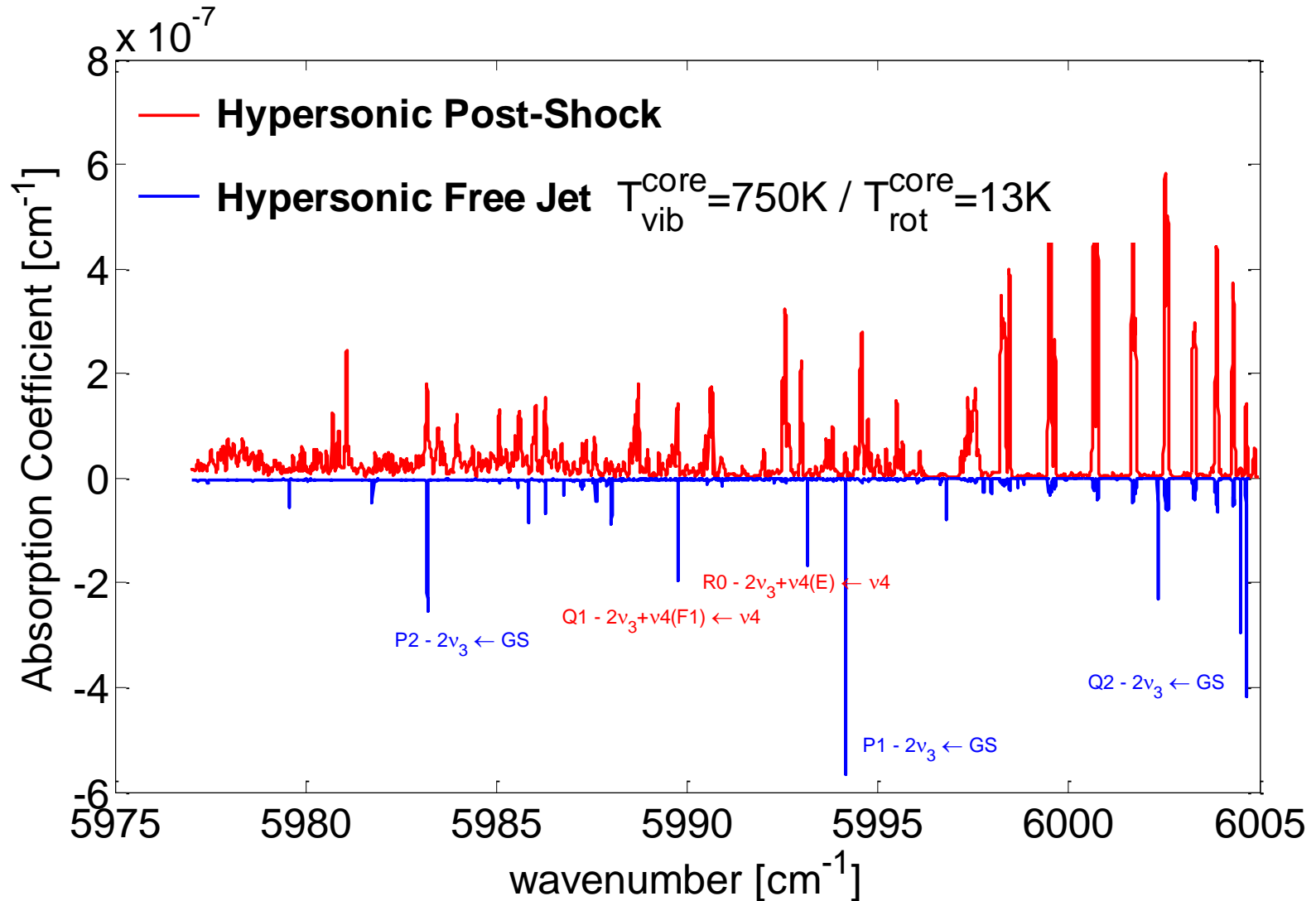
Post-shock Spectroscopy: experimental set-up




Post-Shock Spectroscopy: CFD simulation



CH₄: Free Jet vs Post-Shock



Conclusion : base de données spectrosc.

- Plusieurs approches expérimentales sont utilisées pour produire des données IR de molécules polyatomiques : CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 et bientôt C_2H_6 (et peut-être H_2S ? )
- Ces données sont
 - injectées dans des modèles moléculaires globaux effectifs
 - ou utilisées pour vérifier les prédictions de modèles moléculaires 100% *ab initio*
- La finalité étant d'utiliser ces modèles pour constituer des bases de données spectroscopiques fiables jusqu'à 3000 K pour une série de molécules « astrophysiques » pertinentes.
- Données utilisées pour modéliser l'opacité des enveloppes d'AGBs, Jupiters chauds, naines brunes....

Limites expérimentales

- Température actuellement limitée à 2000 K.
- Pas de composés oxygénés

Formation des grains : perspectives

Expériences passées (<2012)

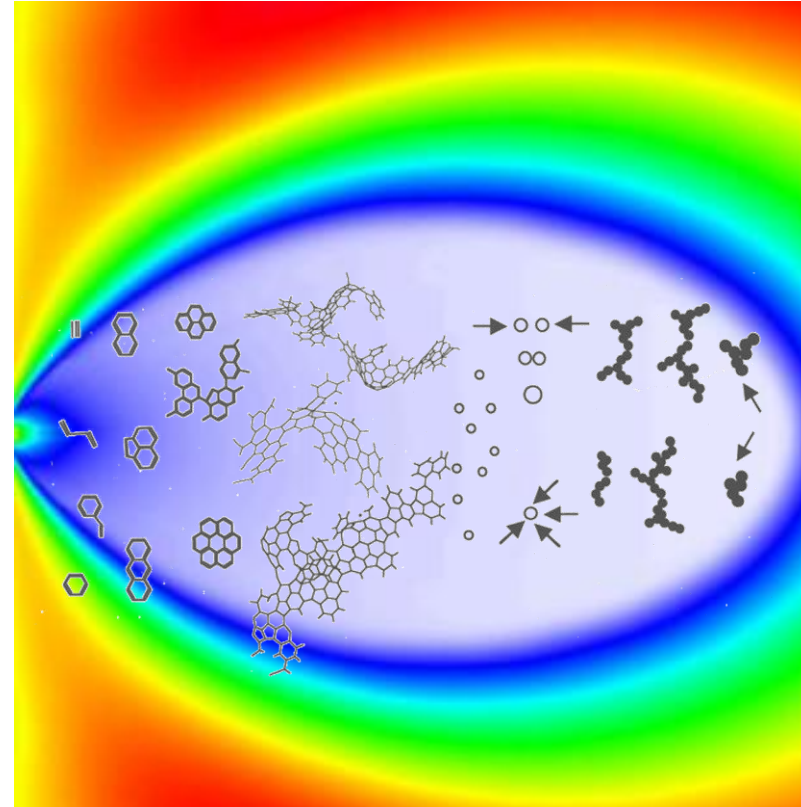
- Cinétique de condensation de PAHs (Ecoulements supersoniques uniformes)
- Cinétique de réaction radical-neutre à HT d'hydrocarbures (Source haute enthalpie)

Perspectives (2016+)

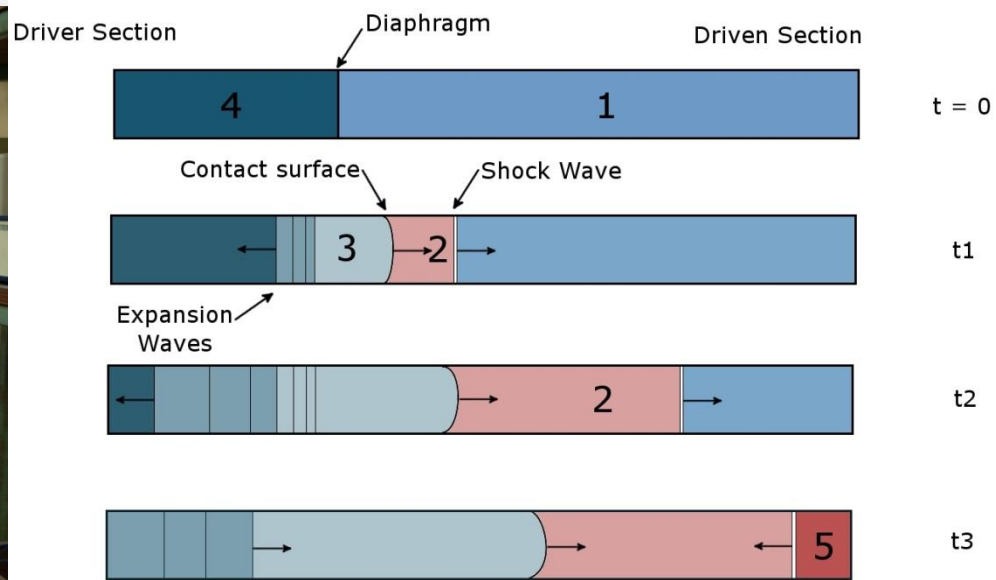
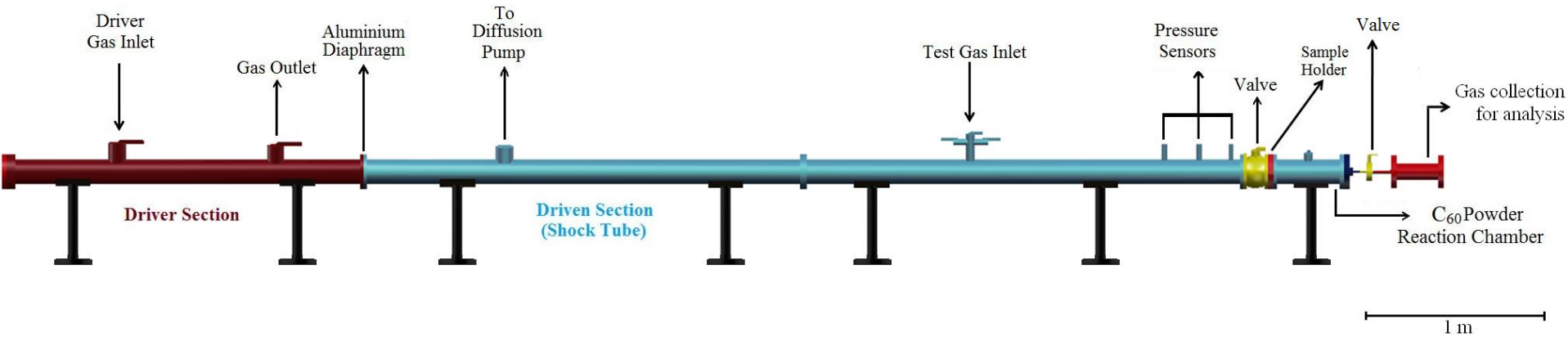
- Suivi par spectroscopie CRDS de l'évolution des grains carbonés formés dans un mélange HT d'acétylène et d'hydrogène.
- En abaissant la température rotationnelle à quelques kelvins, nous espérons que la détente hypersonique révélera la structure rovibrationnelle des espèces moléculaires en présence (espèces radicalaires ? PAHs ?)

Limites

- Temps de résidence/croissance court dans le réacteur.



Destruction / évolution des grains



Installation tube à choc IISc Bangalore ($T_{max} \sim 8000$ K pendant 3 ms)

Exposition de C_{60} au passage d'une onde de choc

Première étape: système modèle.

Stabilité thermique de C_{60} en présence de H_2

162

LETTERS TO NATURE

NATURE VOL. 318 14 NOVEMBER 1985

C_{60} : Buckminsterfullerene

H. W. Kroto^{*}, J. R. Heath, S. C. O'Brien, R. F. Curl
& R. E. Smalley

Rice Quantum Institute and Departments of Chemistry and Electrical
Engineering, Rice University, Houston, Texas 77251, USA

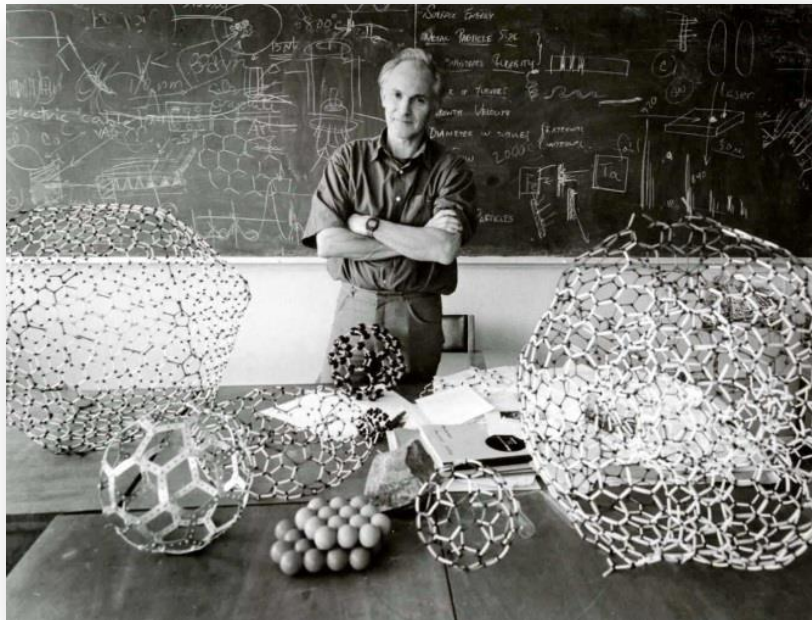
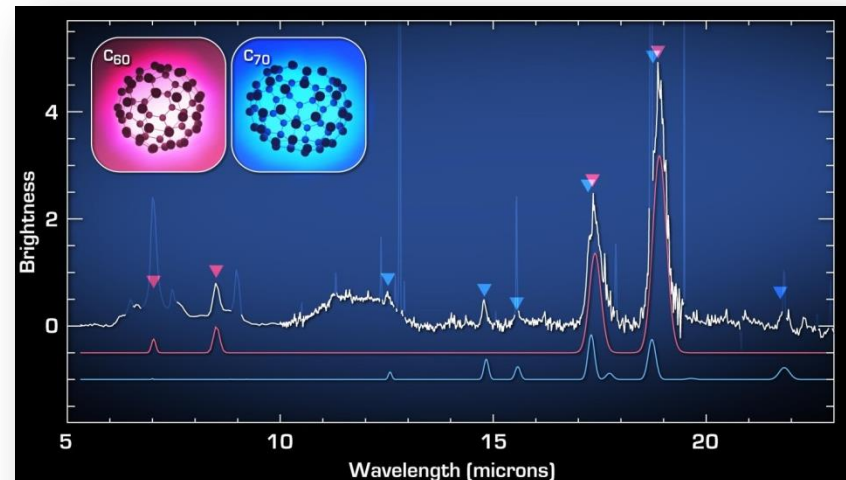


Fig. 1 A football (in the United States, a soccerball) on Texas grass. The C_{60} molecule featured in this letter is suggested to have the truncated icosahedral structure formed by replacing each vertex on the seams of such a ball by a carbon atom.



Buckyballs In A Young Planetary Nebula

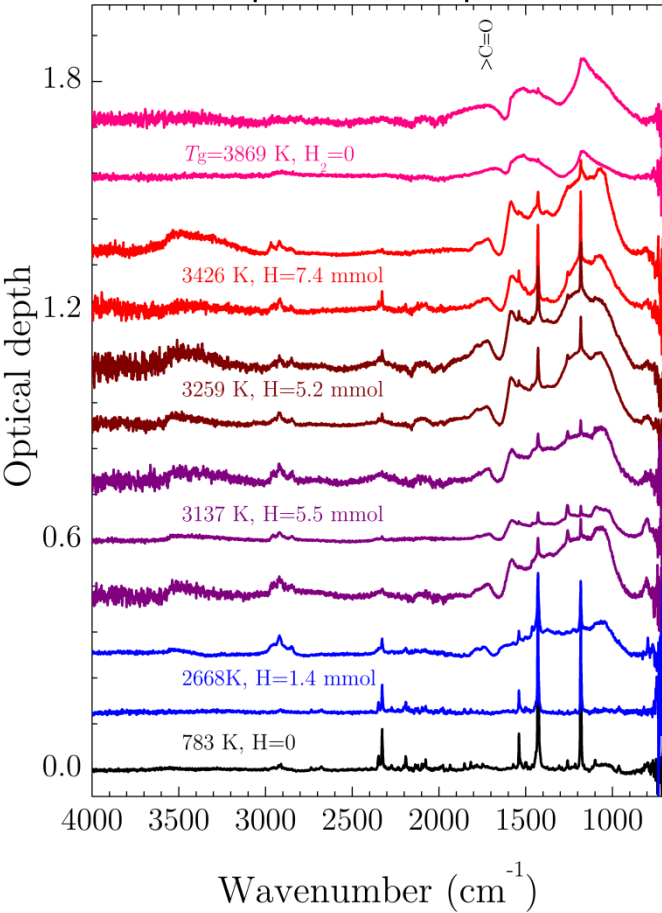
NASA / JPL-Caltech / J. Cami (Univ. of Western Ontario/SETI Institute)

Spitzer Space Telescope • IRS

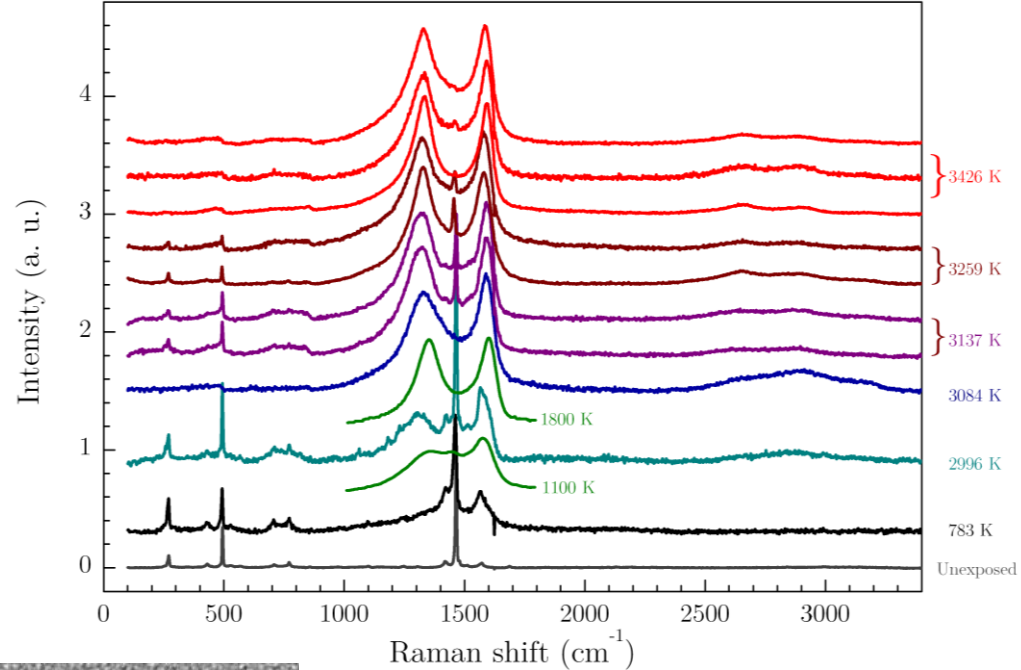
ssc2010-06a

Analyse ex-situ des résidus solides post-choc

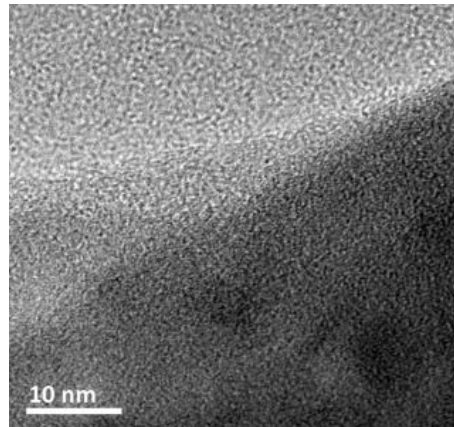
Micro-spectroscopie IR



Micro-spectroscopie Raman



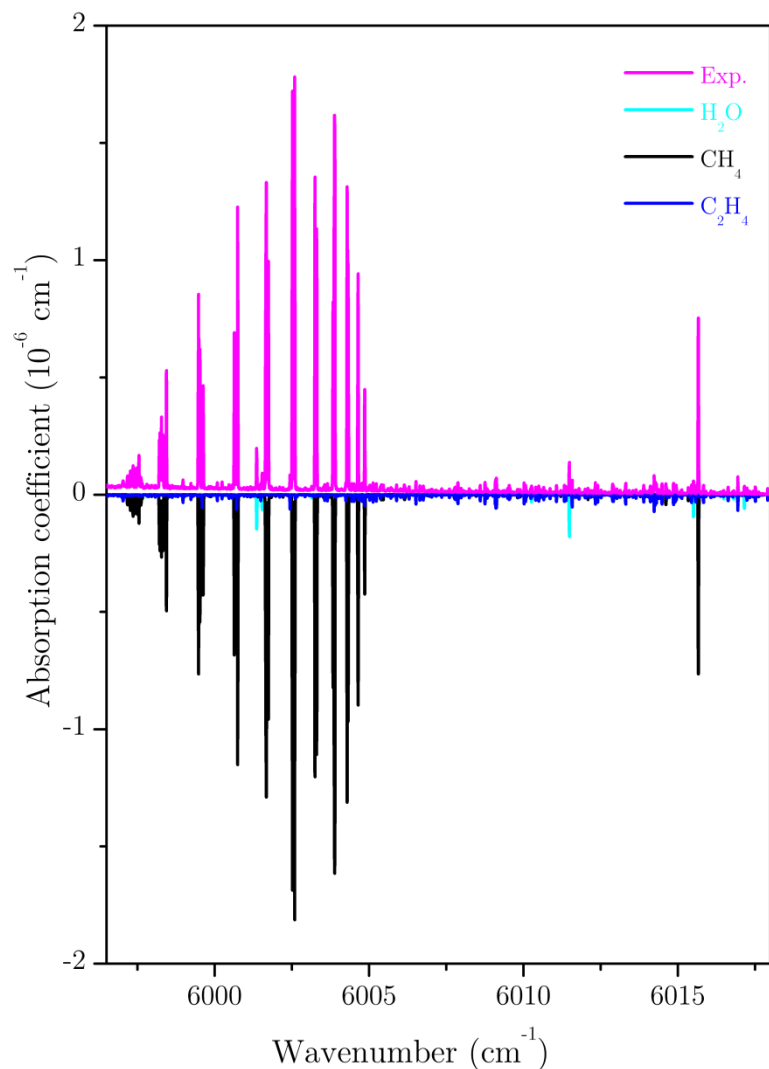
TEM



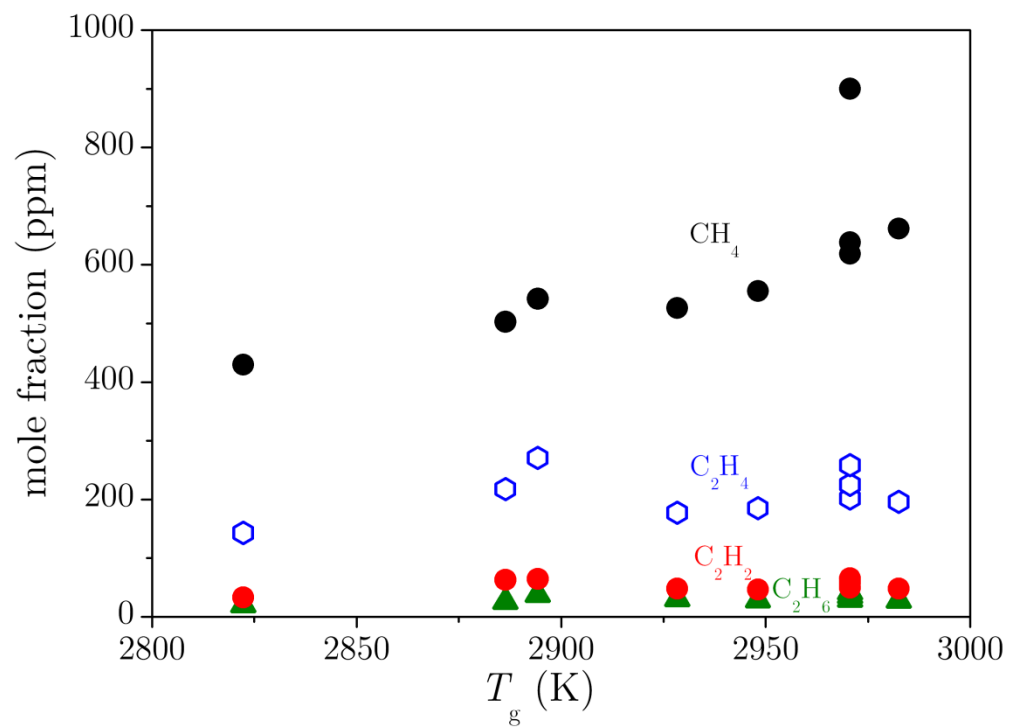
→ Matériau amorphe ;
arrangement aléatoire de plans
hexagonaux ; faible incorporation
de H

Analyse des produits volatils

Spectroscopie CRDS



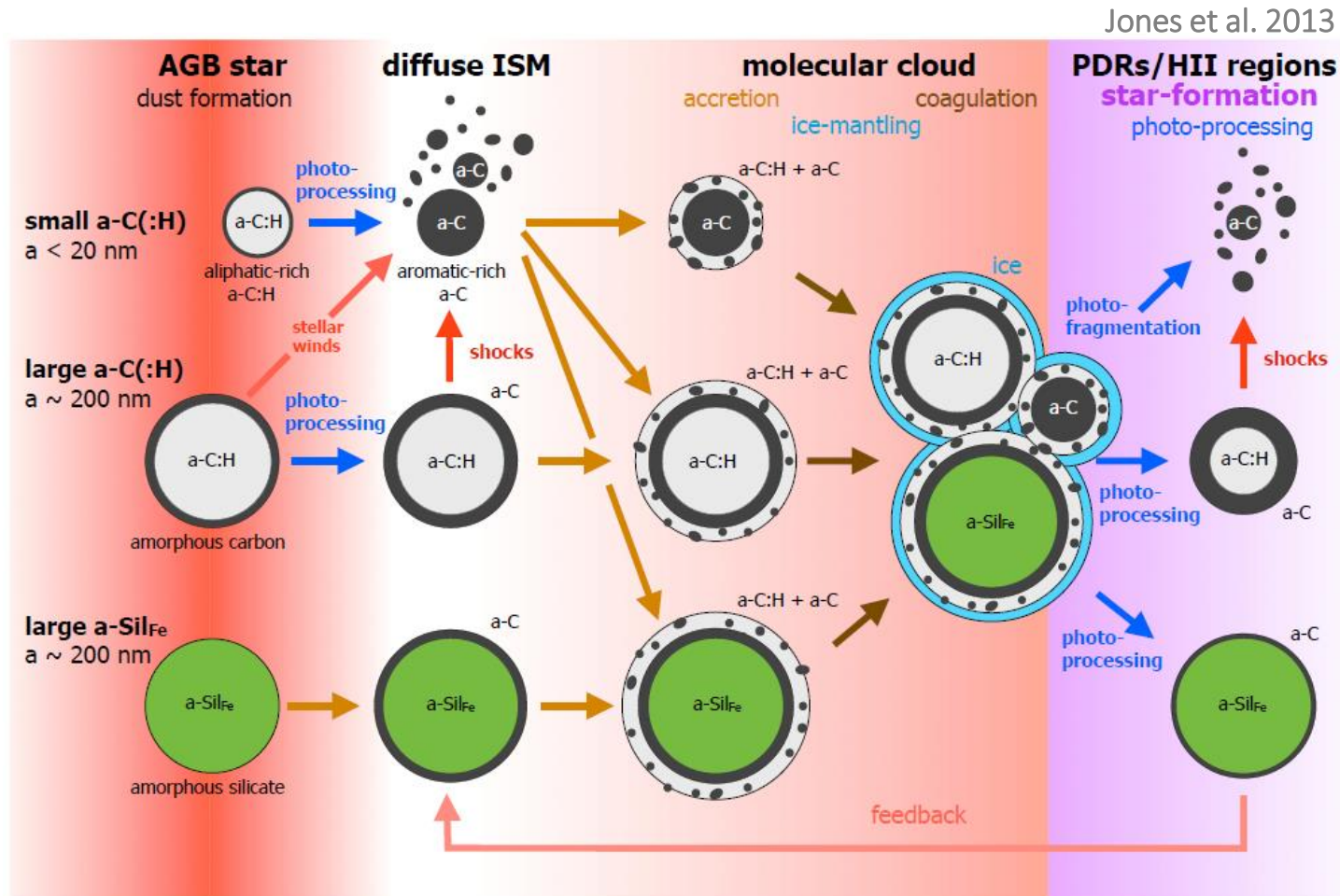
Chromatographie phase gaz



→ Absence de composés C_3 et +
 → mise en évidence d'une voie de décomposition vers le carbone atomique C

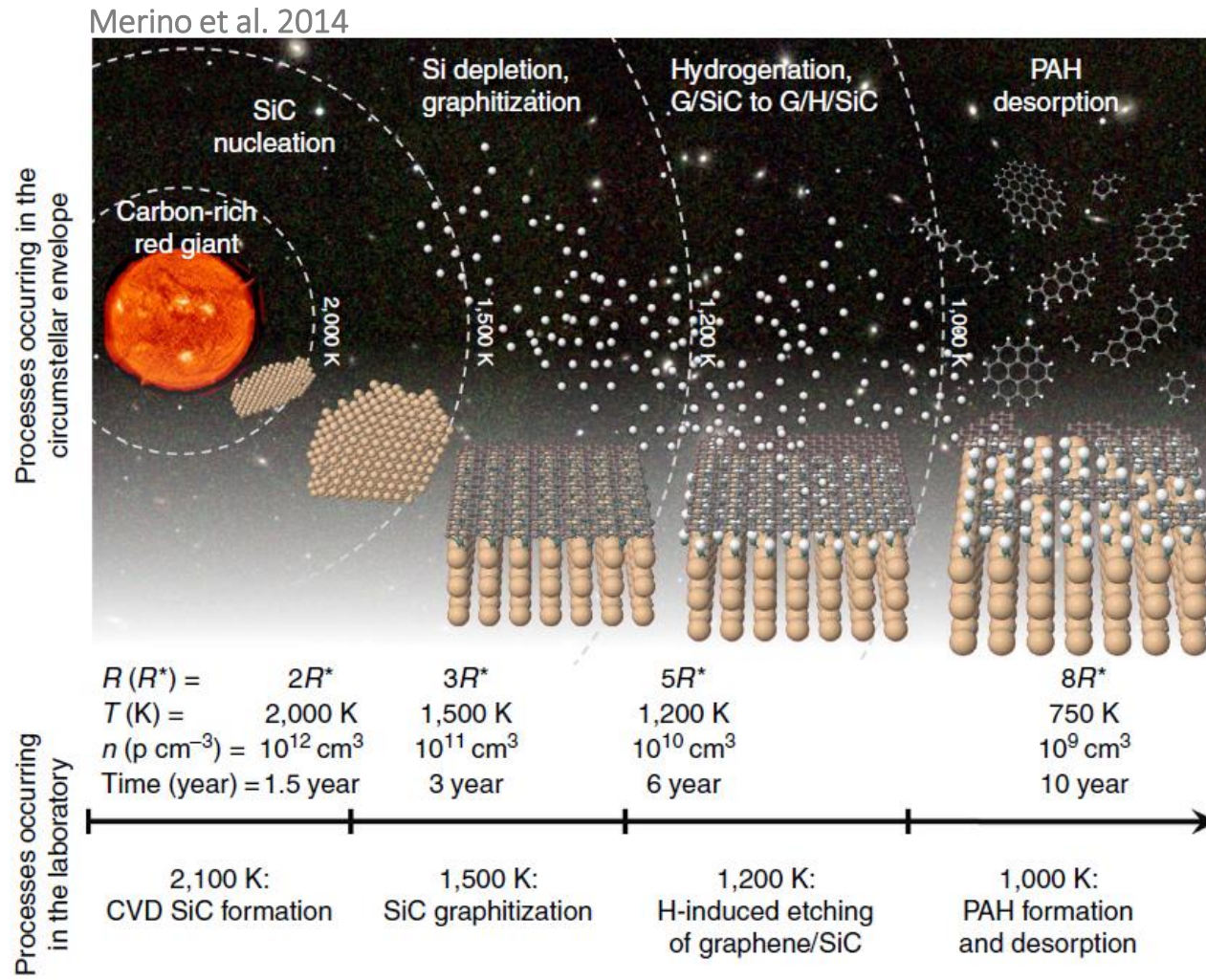
Tester les scénarios d'évolution de la matière carbonée

- Premières expériences en tube à choc : C_{60} , système modèle
- Poursuite de l'étude de la matière carbonée : a-C:H



Autres types de grains : SiC

- SiC observé dans les étoiles enrichies en C mais pas dans le MIS
- Formation de PAHs sur les grains de SiC à haute température (et autres types de carbone ?)



Conclusions

Résumé et perspectives :

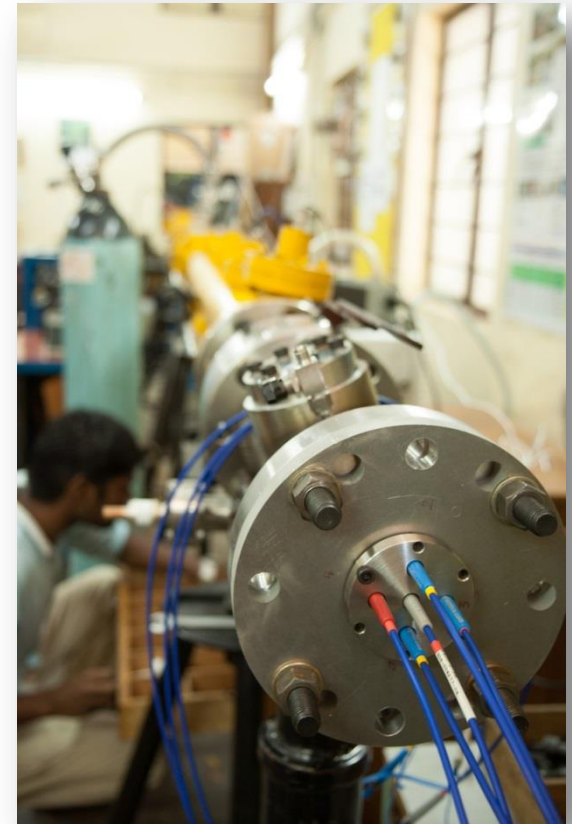
- Démonstration de l'utilisation des tubes à choc pour étudier l'évolution des grains à HT.
- Après C_{60} , analogues plus réalistes
- Mesures in situ

Tube à choc : limites

- Temps courts (\sim ms)
- Pressions élevées
- Vitesses faibles (\sim km/s)
- Expériences lourdes (4-5 tirs / jour)

Poursuite des études : moyens à disposition

- Tube à choc
- Source haute enthalpie
- Spectromètre ultrasensible IR



Collaborateurs et soutiens financiers



[Ludovic Biennier – IPR Rennes](#)



Robert Georges – IPR Rennes

Nicolas Suas-David

Samir Kassi – LIPhy Grenoble

Emmanuel Dartois – IAS Orsay

K.P.J. Reddy – IISc Bangalore

E. Arunan – IISc Bangalore

V. Jayaram – IISc Bangalore

V. Chandrasekaran – IISc Bangalore



[Robert Georges – IPR Rennes](#)

Nicolas Suas-David -Univ. of Missouri

Samir Kassi – LIPhy Grenoble

Abdessamad Benidar – IPR Rennes

Vinayak Kulkarni – IIT Guwahati, India

Vincent Boudon – ICB Dijon

Badr Amyay – ICB Dijon

Jean Vander Auwera – ULB Bruxelles

Mickaël Rey – GSMA Reims

Bertrand Plez – GRAAL Montpellier

Financement

PNPS - INSU

GDRi HiResMir (Summer school)

GDR Specmo (Missions)

CEFIPRA (Centre Franco-Indien
Pour la Recherche Avancée)