

L'astrophysique nucléaire à l'IRFU et à l'IN2P3 – 2^{ème} partie

V. Tatischeff (CSNSM/IN2P3) pour le groupe de travail :

M. Assié (IPNO), B. Bastin (GANIL), D. Bernard (LLR), J.-P. Chièze (Irfu/SAp), A. Coc (CSNSM), S. Courtin (IPHC), A. Decourchelle (Irfu/SAp), J. E. Ducret (Irfu/SAp), M. Dufour (IPHC), J. Duprat (CSNSM), T. Foglizzo (Irfu/SAp), D. Gilles (Irfu/SAp), F. Gulminelli (LPC Caen), F. Gunsing (Irfu/SPhN), F. Haas (IPHC), F. Hammache (IPNO), E. Khan (IPNO), J. Kiener (CSNSM), A. Lefebvre-Schuhl (CSNSM), J. Margueron (IPNO), D. Maurin (LPSC), A. Obertelli (Irfu/SPhN), F. de Oliveira Santos (GANIL), M. Ploszajczak (GANIL), M. Renaud (LUPM), S. Schanne (Irfu/SAp), N. de Séréville (IPNO), N. Smirnova (CENBG), O. Sorlin (GANIL), V. Tatischeff (CSNSM), S. Turck-Chièze (Irfu/SAp)

Des problématiques variées

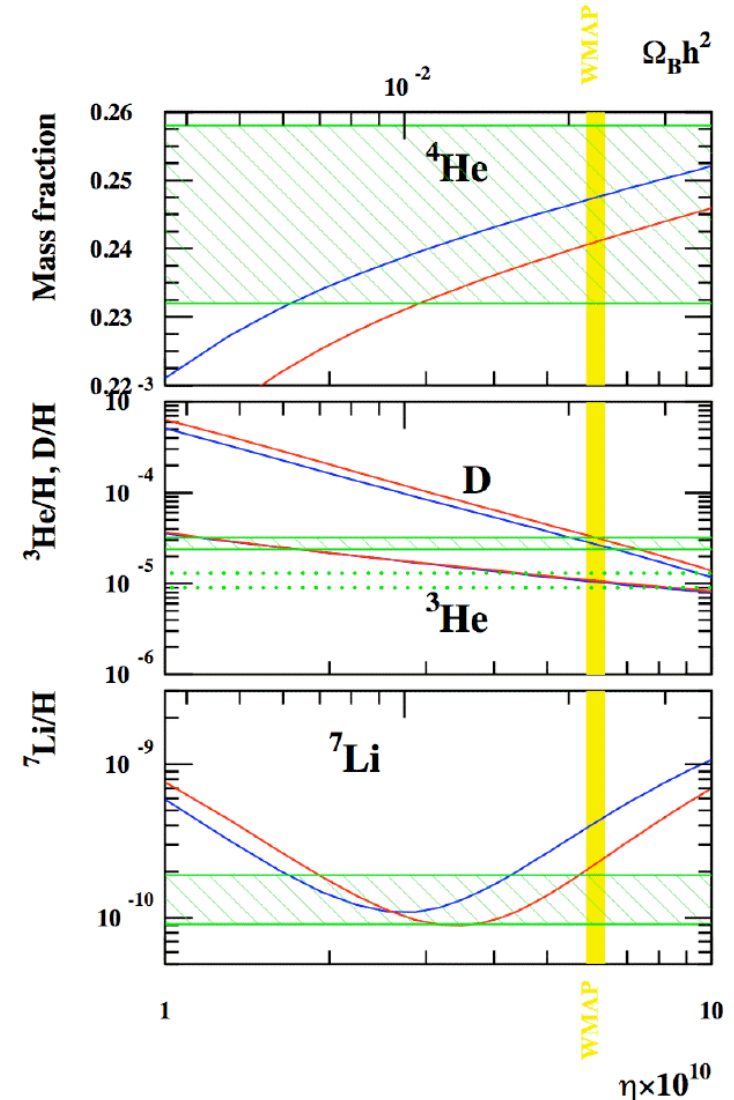


Outre la question de **l'origine des nucléides** dans l'Univers (cf. exposé de François de Oliveira) :

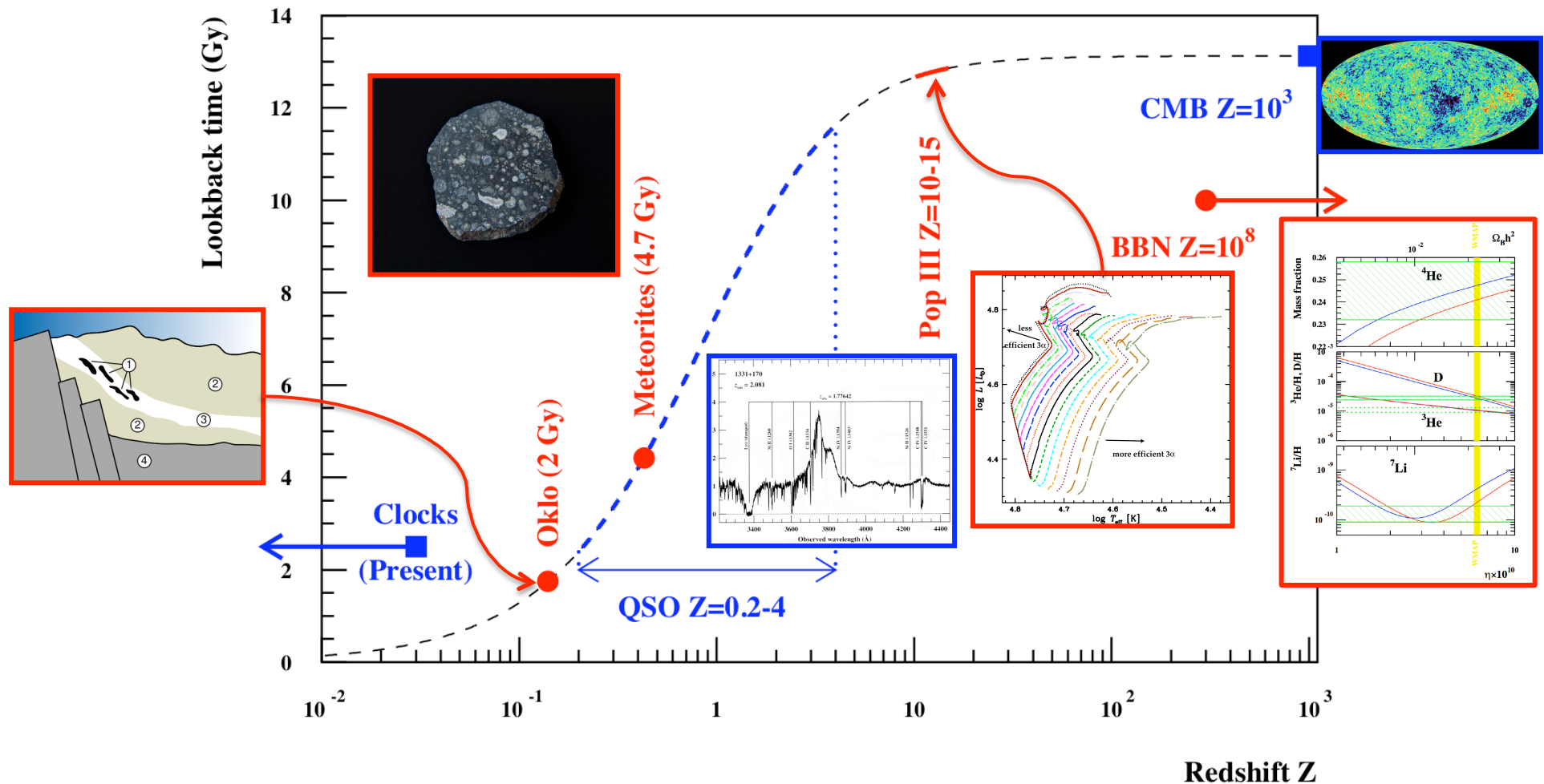
- Les **constantes de couplage** des interactions fondamentales ont-elles varié avec le temps depuis le **Big-Bang** ?
- Comment se forment les **étoiles à neutrons** et quelle est leur structure interne ?
- Où sont produits les **rayons cosmiques de basse énergie** dans la Voie lactée et quel rôle jouent-ils dans l'écosystème galactique ?
- Dans quel contexte astrophysique le **système solaire** s'est-il formé ?
- ...

Cosmologie et physique nucléaire

- Une fois fixée la densité baryonique de l'Univers (anisotropies du CMB), **le modèle standard de la nucléosynthèse primordiale n'a plus de paramètres libres**
 - Les abondances primordiales de D, ^3He et ^4He sont bien reproduites mais **pas celle de ^7Li** (problème nucléaire ?)
- ➔ Test de nouvelles lois de la physique
- **Nouvelles particules** (SUSY, axions...)
 - Modèles alternatifs de la **gravitation** (théories de type tenseur-scalaire)
 - **Variation des constantes fondamentales** (α_{EM} , Λ_{QCD} ...) au cours du temps



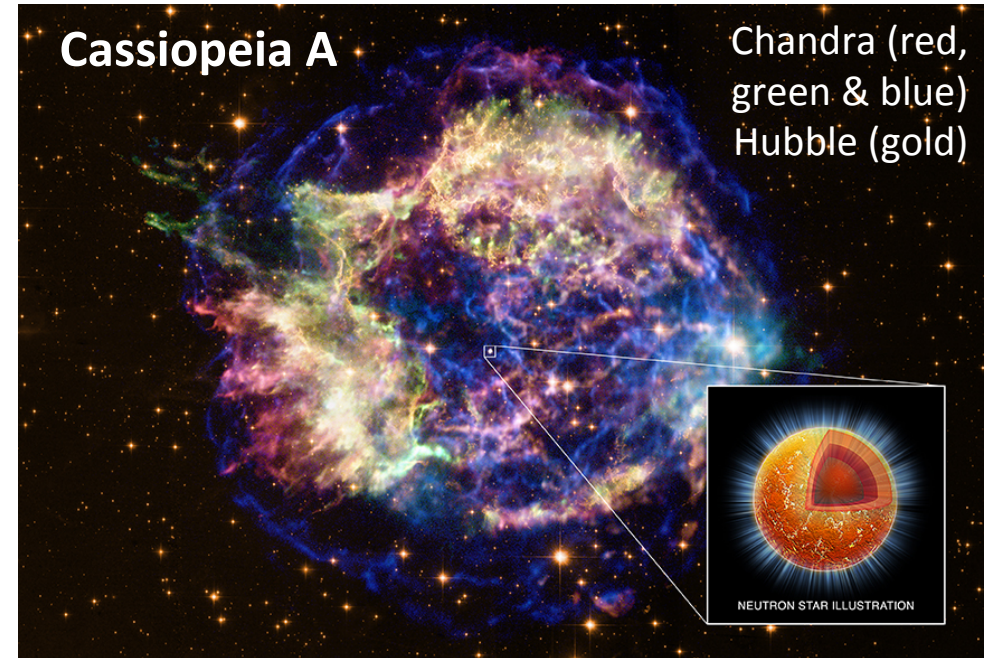
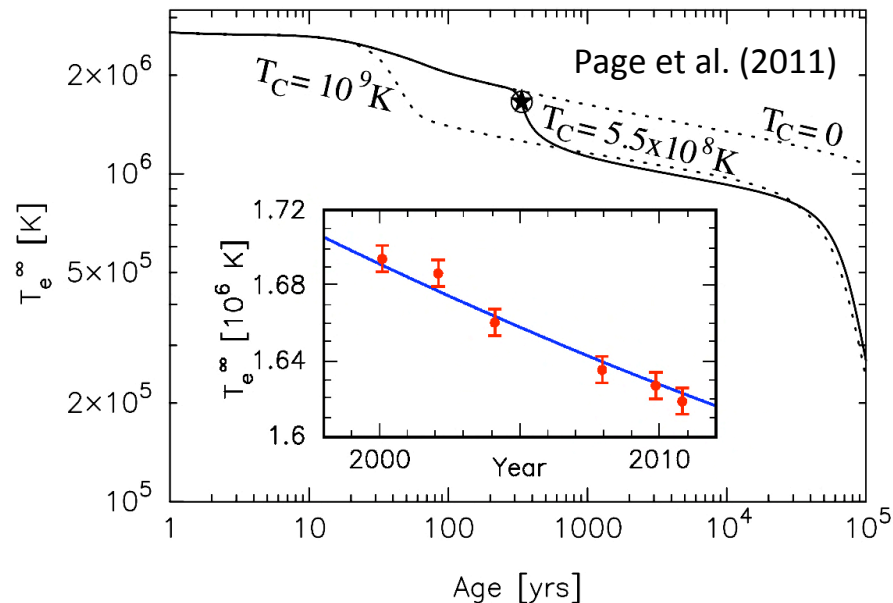
Tests de la variation des constantes fondamentales



- ANR VACOUL (2011–2015, INSU/IAP, INSU/LERMA, IN2P3/CSNSM)

Les étoiles et protoétoiles à neutrons

- De très nombreuses données en ondes radio et en rayons X et γ
- Rôle de l'équation d'état dans le processus de formation des étoiles à neutrons (dureté, excitations nucléaires...)

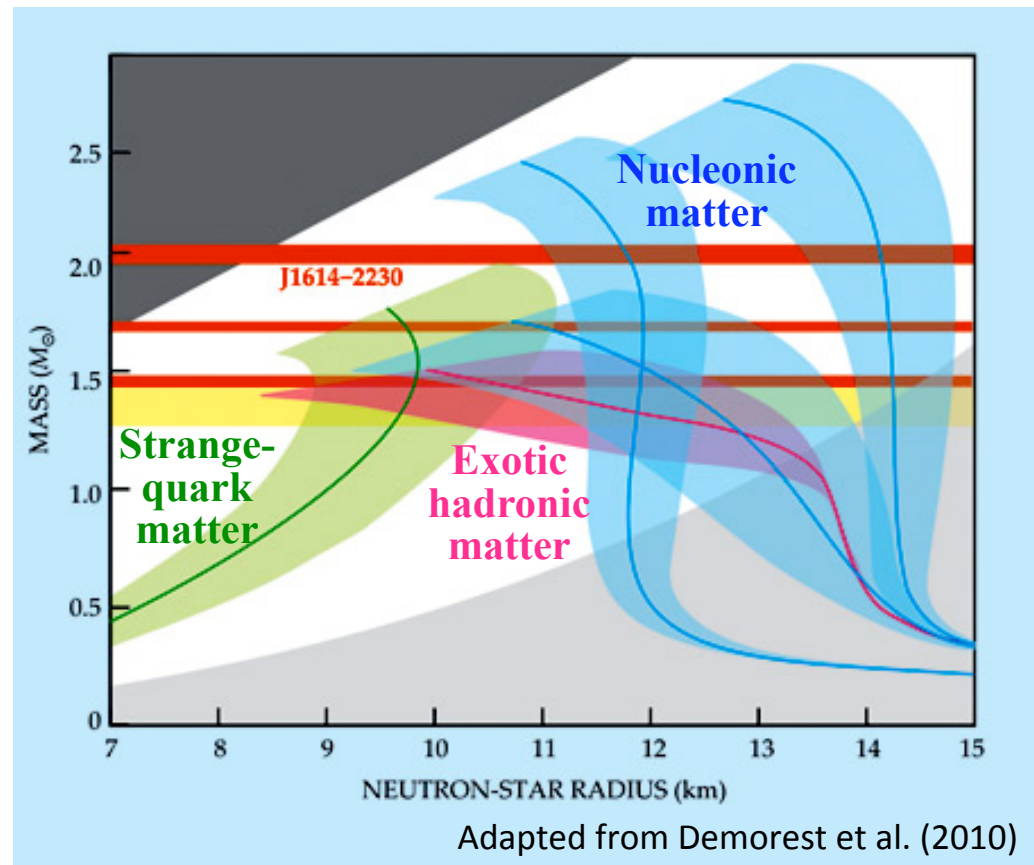


- Effets nucléaires sur le refroidissement des étoiles à neutrons (processus d'émission et d'interaction des neutrinos, chaleur spécifique, conductivité thermique...)

Données nucléaires en milieu dense

Description théorique **d'états de la matière non reproductibles en laboratoire**.
Conditions extrêmes de densité, de température et d'asymétrie d'isospin.

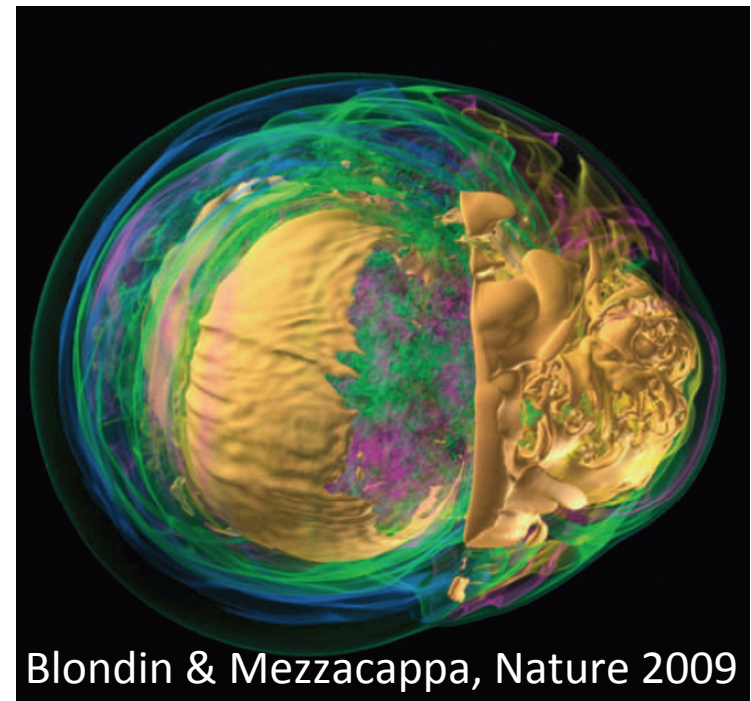
- **Equation d'état** de la matière dense et chaude (modèles statistiques pour le mélange de noyaux à température finie, matière hadronique exotique...)
- Propriétés **superfluides** de la matière dense et froide (=> refroidissement des étoiles à neutrons, propriétés des "glitches")
- Processus électro-faibles (CE, ν)
- Réactions pycnonucléaires



Modélisation de l'effondrement stellaire

ANR SN2NS (2010–2014, Irfu/SAp, IN2P3/IPNO, INSU/LUTH) : développement du 1^{er} code français d'effondrement gravitationnel (3D, relativité générale) incluant une modélisation très avancée de l'équation d'état nucléaire

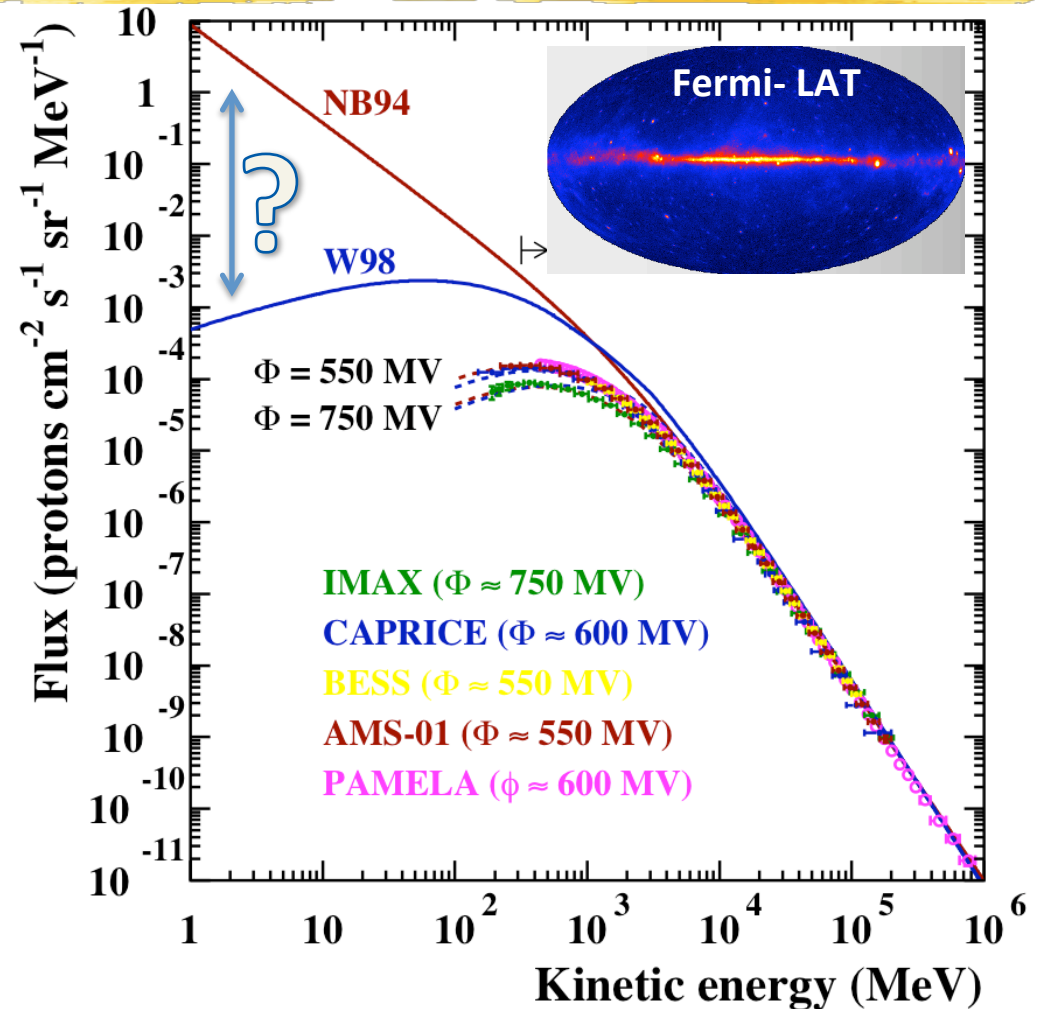
- **Objectifs:** Caractérisation théorique de la **masse critique supérieure** de formation d'étoiles à neutrons, de leur **vitesse d'expulsion** et du **moment cinétique** des étoiles à neutrons et des trous noirs
- Propriétés géométriques et asphéricité, comparaison aux observations de supernovae extragalactiques, prédictions de la détection d'ondes gravitationnelles et de neutrinos...
- 2014 – 2022 : traitement amélioré du **transport des neutrinos**, effets des **champs magnétiques** et de la **rotation**



Blondin & Mezzacappa, Nature 2009

Rayons cosmiques et astrophysique nucléaire

- Propriétés des RCs galactiques (spectre source, transport...) : astrophysique et matière noire => **sections efficaces de fragmentation** sur H et He pour $E < 10$ GeV/n (=> **AMS-02**)
- **Rayons cosmiques de basse énergie** (< 1 GeV/nucléon) : **nucléosynthèse** du Li, Be et B, ionisation et chauffage des nuages interstellaires denses => formation stellaire, astrochimie

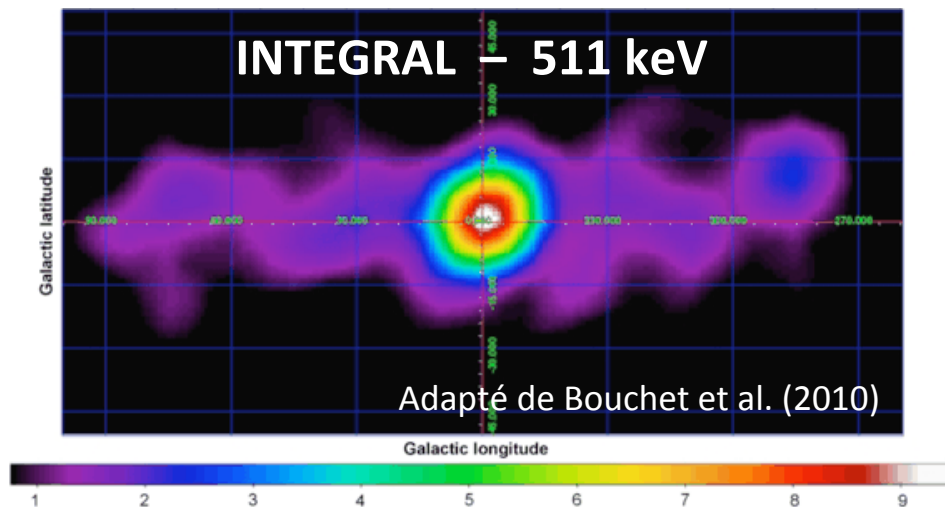
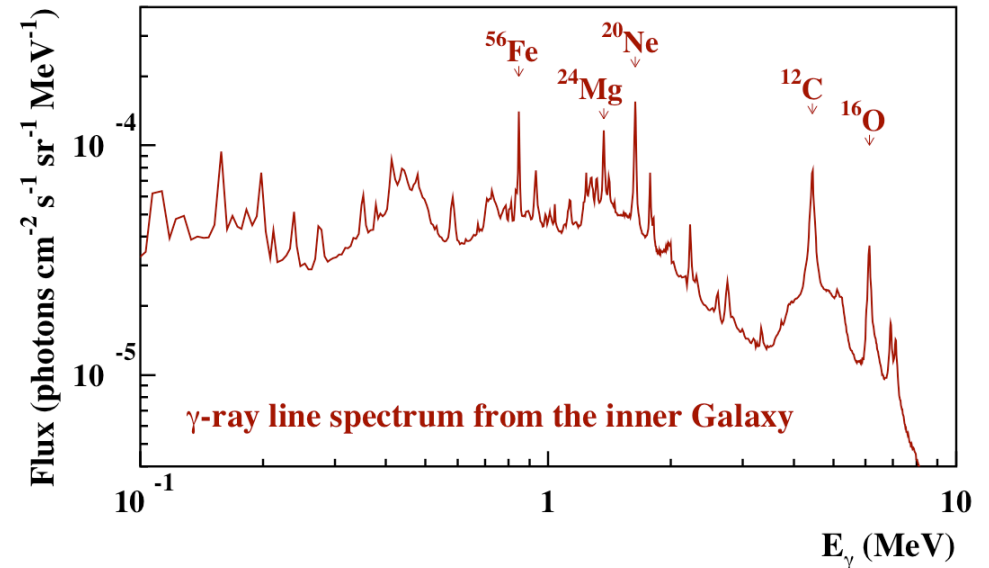


ANR COSMIS (2011–2015, INSU/LERMA, Irfu/SAp, IN2P3/LUPM, IN2P3/CSNSM)

Journées de prospective IN2P3-IRFU, Presqu'île de Giens, 2 – 5 avril 2012

L'astronomie gamma nucléaire

- **Nucléosynthèse en cours** dans la Galaxie (^{26}Al , ^{44}Ti , ^{56}Co , ^{57}Co , ^{60}Fe)
=> modèles stellaires
- Origine des **positrons galactiques** (radioactivités β^+ , binaires X, trou noir supermassif, matière noire...)
- **Accélération de particules** au voisinage d'objets compacts

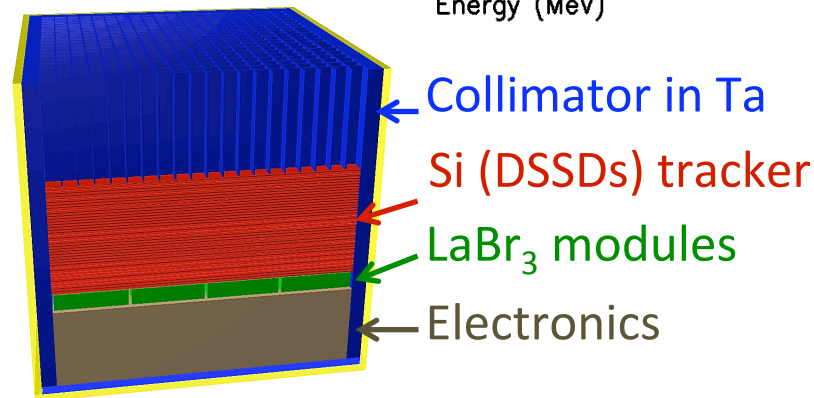
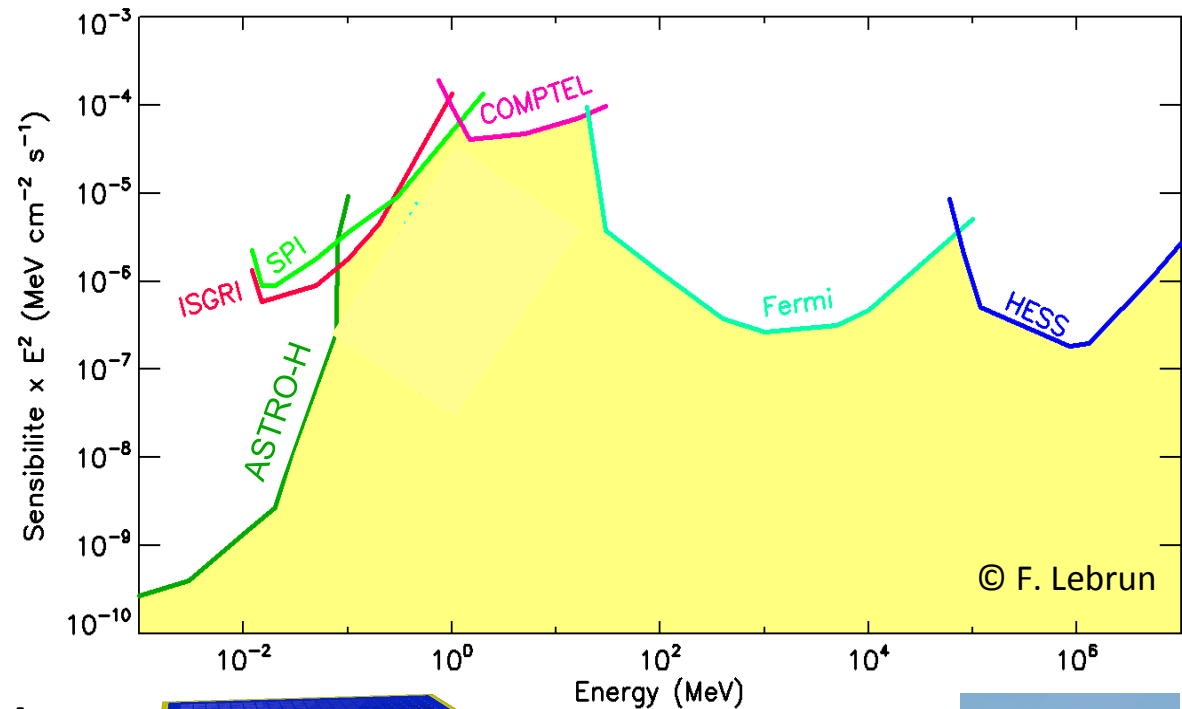


Enjeux pour le futur :

- Emissions de raies γ des **rayons cosmiques de basse énergie**
- Radioactivités des **SNe de type Ia** et des **novae** classiques
- Cartographie de la Voie lactée à 1157 keV (^{44}Ti) => **jeunes SNe**

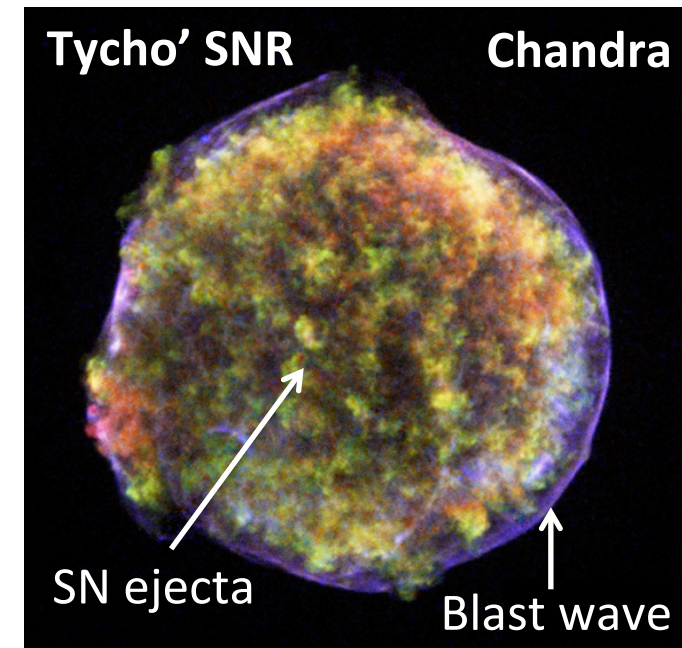
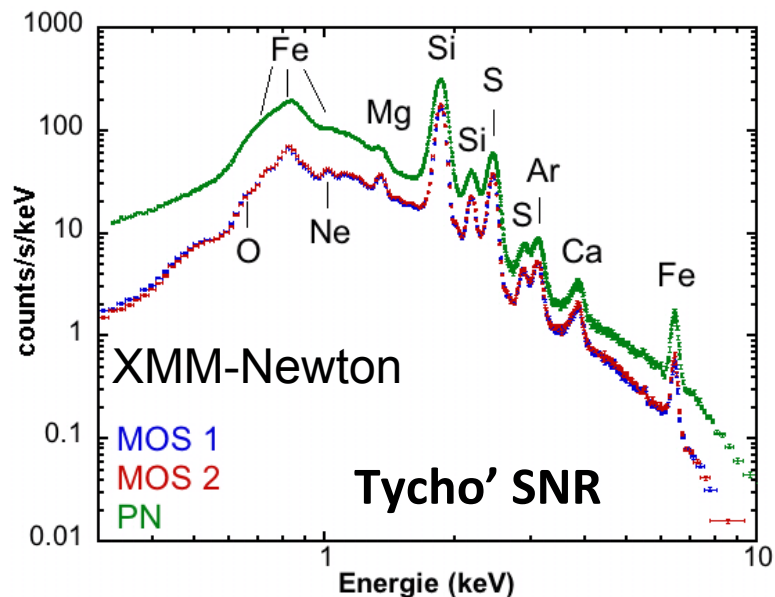
Le futur de l'astronomie gamma nucléaire

- Plusieurs concepts de mission ont été proposés pour assurer la **succession d'INTEGRAL** (2002 – \geq 2014)
- Futur de la mission franco-chinoise SVOM et de son télescope X/ γ ($\Delta E = 4 - 250$ keV) **ECLAIRs** (Irfu/SAp, INSU/IRAP, APC) ?
- **Projet Télescope Compton** (2011 – 2016, APC, CSNSM, Irfu/SAp, IPNO, LAL) : développement d'un prototype pour vol ballon (échéance satellite > 2025)



L'astronomie X

- Supernovae et **restes de supernovae**
 - Composition et dynamique des éjecta issus de la **nucléosynthèse explosive**
 - Accélération diffusive par onde de choc des **rayons cosmiques**
- Processus d'explosion des **sursauts X** (étoiles à neutrons) et des **novae** (naines blanches)



- Mécanismes de refroidissement et équation d'état des **étoiles à neutrons** (détermination de la masse et du rayon)
- Collisions atomiques des **rayons cosmiques de basse énergie** dans le MIS

Le futur de l'astronomie X

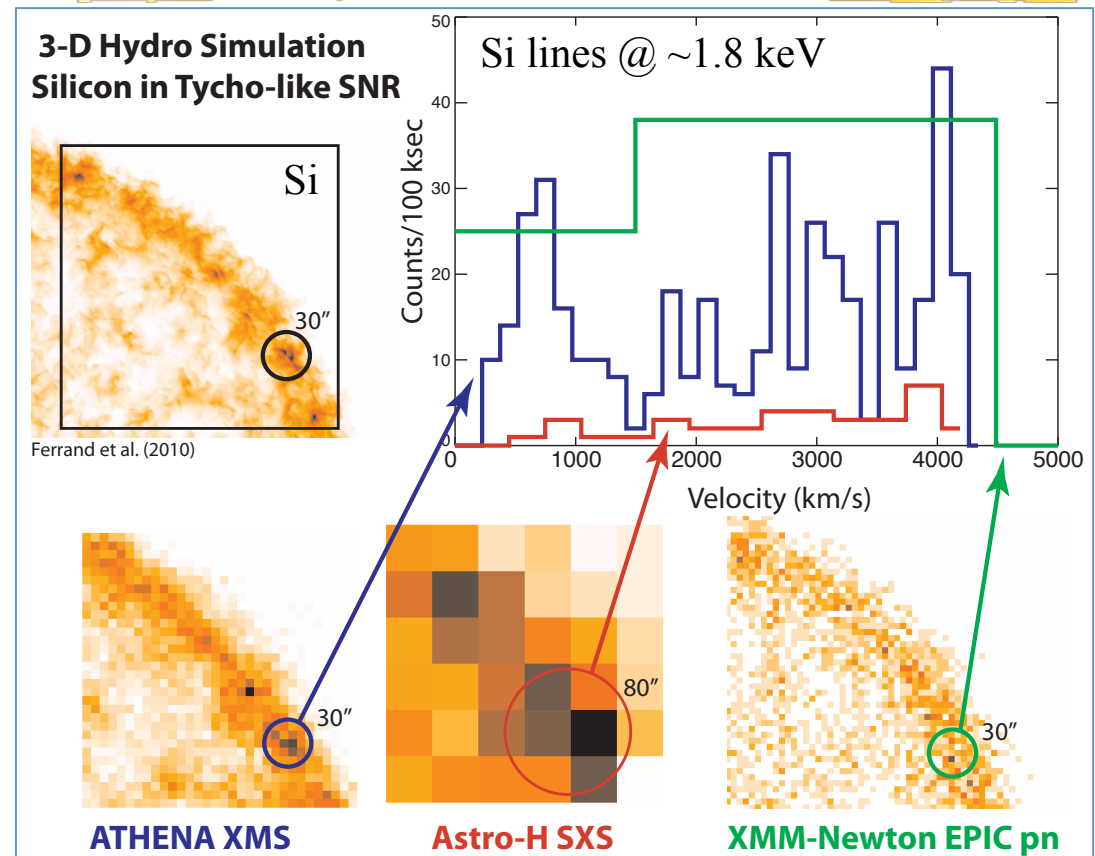
Deux projets étudiés à l'ESA :

- **LOFT** (mission de classe M), satellite dédié aux études temporelles de sources variables, successeur de RXTE.
Participation APC et Irfu

- **Athena** (mission L), observatoire X généraliste, successeur de XMM-Newton

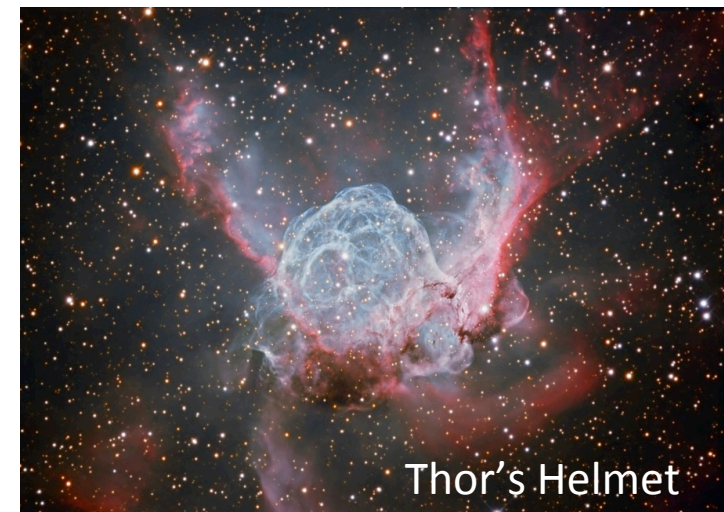
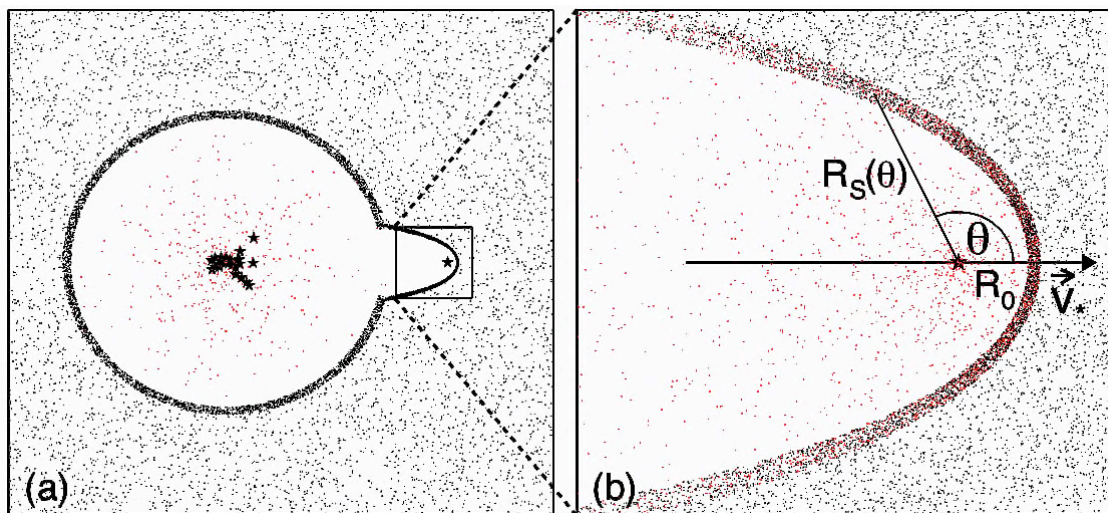
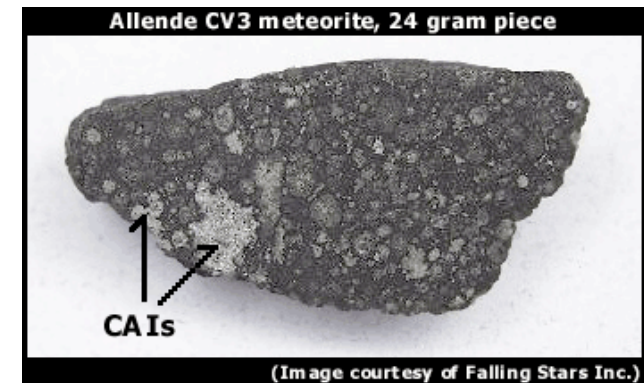
Participation Irfu :

- Electronique de l'unité de détection des évènements
- Electronique de lecture du cooler
- Développement de détecteurs microcalorimètres de technologie MIS (Metal-Insulator Sensor) purement Si



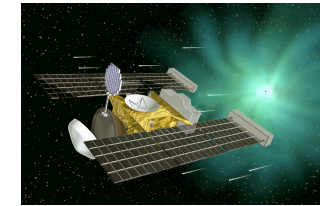
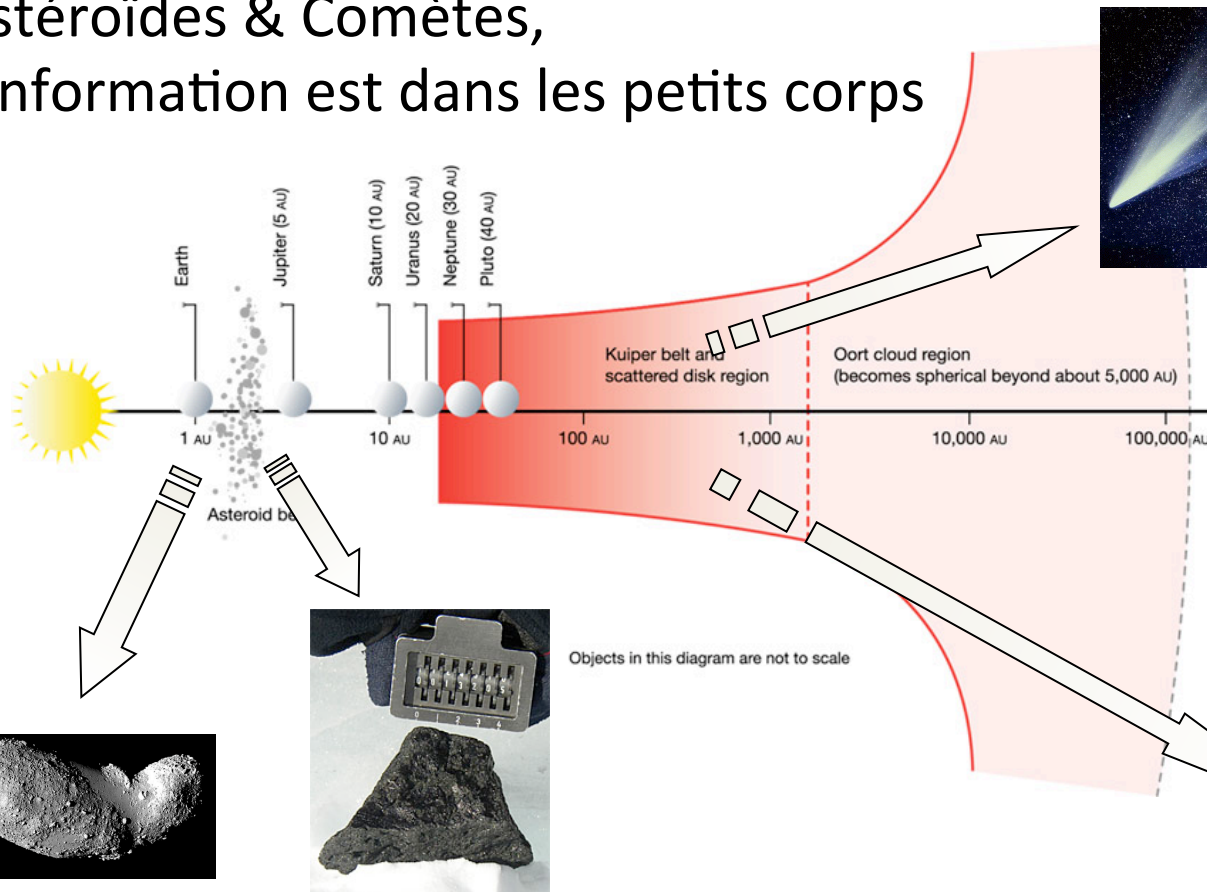
La formation du système solaire

- **Origine nucléosynthétique** des isotopes à courte durée de vie ($\sim 10^6$ ans ; ^{26}Al , ^{41}Ca , ^{10}Be , ^{60}Fe , ^{26}Al ...) présents dans le **disque protoplanétaire**
- ➔ **Contexte astrophysique de formation du système solaire**
- ➔ **Chronologie isotopique** des premiers solides à l'origine des planètes
- ➔ **Spécificité** de notre système planétaire

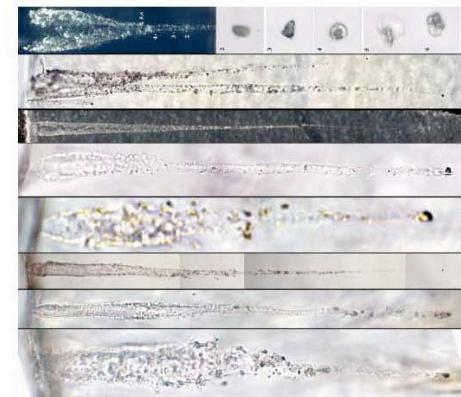


Les météorites et micrométéorites

Astéroïdes & Comètes,
l'information est dans les petits corps



STARDUST mission (2006)



r and mineralogically linked CAIs, exotic refractory components in formed very close to the young Sun.



Astéroïde Itokawa
Mission Hayabusa (2010)

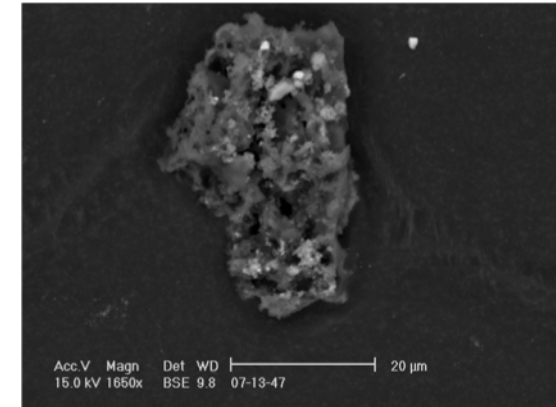
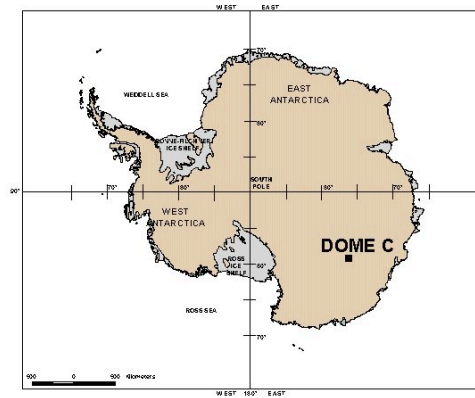


ROSETTA mission (2014)



Collecte et conservation des micrométéorites

La collection CONCORDIA, micrométéorites polaires



2010 : Découverte de particules cométaires dans la neige des régions centrales antarctiques

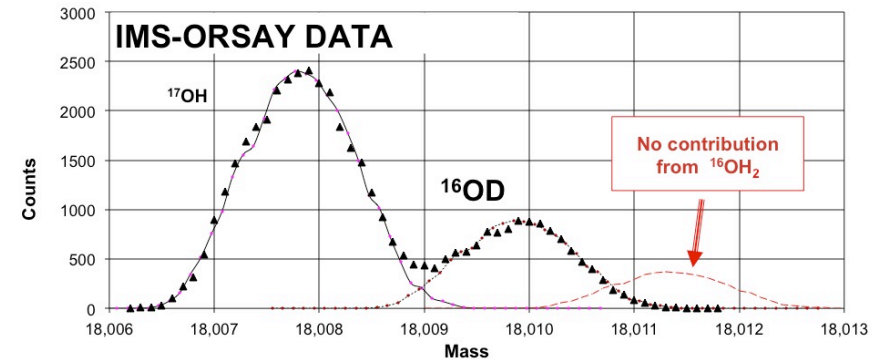
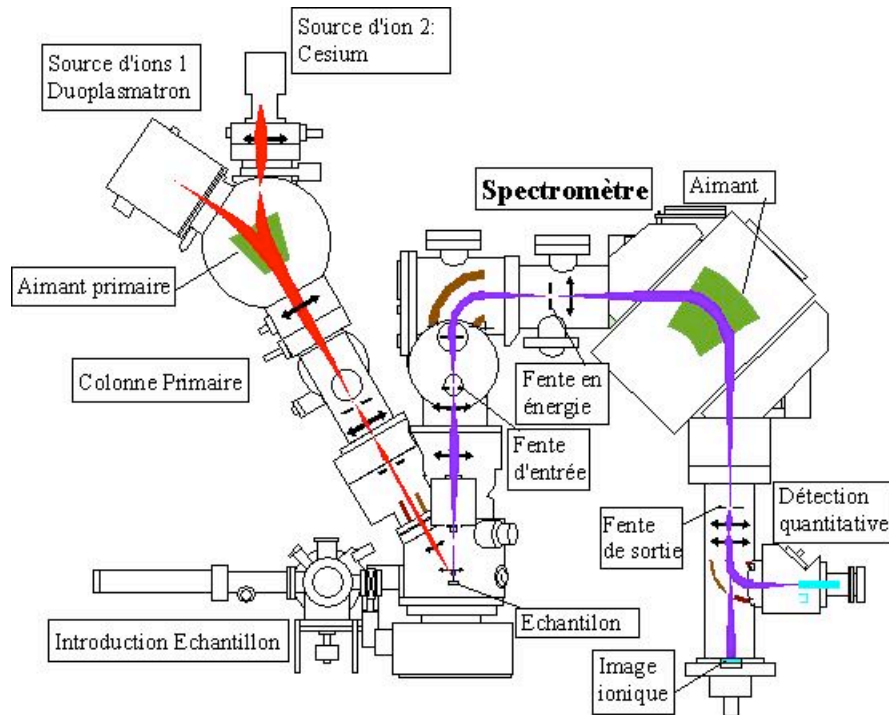
2012-2017 : Projet **MARVIN** (CSNSM, Aachen Univ., MPI, ...)

2012-2015 : **plateforme de conservation de la collection**

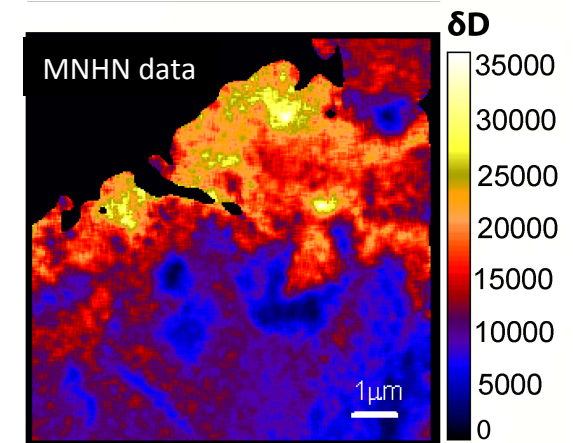
Journées de prospective IN2P3-IRFU, Presqu'île de Giens, 2 – 5 avril 2012

Analyse isotopique de matière extraterrestre

Spectrométrie de masse par émission ionique secondaire (SIMS)



$$\delta D = \left(\frac{\left(\frac{D}{H} \right)_{sample}}{\left(\frac{D}{H} \right)_{SMOW}} - 1 \right) \times 1000$$



ANR OGRESSE (2012-2015, CSNSM, IPNO, MNHN, IAS)

Utilisation des **ions polyatomiques** (OD/OH, ...) pour l'analyse des D/H des composants de la matière cométaire

Synthèse des projets

Nom du projet	Nombre de physiciens français	Nombre de techniciens et ingénieurs français	Coût total hors personnel (en M€)	Autres contributions Françaises (en M€)
Modélisation de l'effondrement stellaire	~12	IN2P3: ~3 h-an CEA: ~0,2 h-an	2,4 M€	ANR SN2NS (2010-2014): 0,6 M€ renouvellement ANR après 2014
Télescope Compton	~10	IN2P3: ~7 h-an CEA: ~2 h-an	2,25 M€	CNES: 1 M€ (+1/2 thèse) Labex UnivEarthS: 250 k€ LabeX P2IO: 40 k€
Athena	~10	~20 h-an	2,4 M€	CNES: 2,4 M€
Micrométéorites	~7	~1,5 h-an	0,55 M€	PNP: 10 k€/an CNES: 10 k€/an IPEV: 5-20 k€ par expé. Antarctique Infrast. CNRS: 200 k€, Univ Paris Sud: 50 k€
MICMET	~7	~1,5 h-an	0,58 M€	PNP: 5 k€/an CNES: 10 k€/an 2 projets ANR (2010-2015): 400 k€ Programme PICS: ~8 k€/an

- Contribution IN2P3+CEA (hors personnel) totale (10 projets) : 5,84 M€

Conclusions



- Diversification des grandes questions du domaine et enrichissement concomitant de disciplines connexes : "Univers haute énergie", "Structure et dynamique nucléaire", "Neutrino : masses, oscillations", "Matière noire, énergie noire, cosmologie"...
- Développement simultané d'outils concernant la théorie, les moyens d'observation et les mesures en laboratoire
- ➔ 10 projets pour ~50 chercheurs et ingénieurs (équivalent temps plein)
- Sources de financement multiples (IN2P3 et CEA pour un peu moins de la moitié – hors personnel)
- ✓ Nécessaire renouvellement du personnel d'ici 2022