

G10 - Astrophysique Nucléaire

F. de Oliveira Santos (GANIL/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)

Astrophysique Nucléaire

Un siècle d'exploration

1921 – Jean Perrin (Sur l'origine nucléaire de l'énergie solaire)

AUGUST 15, 1938

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 54

The Formation of Deuterons by Proton Combination

H. A. BETHE, *Cornell University, Ithaca, N. Y.*

AND

C. L. CRITCHFIELD, *George Washington University, Washington, D. C.*

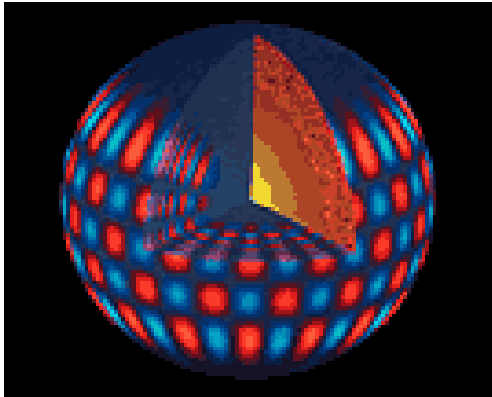
(Received June 23, 1938)



Section efficace $p + p \Rightarrow d + e^+ + \nu$ $\sim 10^{-24}$ barns à 15 keV

L'héliosismologie

Voir à l'intérieur du Soleil

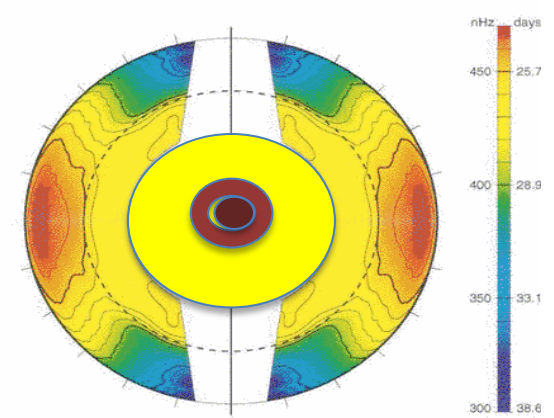


Mesure des oscillations solaires



Satellite SoHO (MDI + GOLF)

- Profil de la vitesse du son est très sensible à la réaction $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$ déterminée à 1 % près
- Contraintes sur les neutrinos émis (très sensibles à la température centrale)



1995-2010: Extraction du profil de rotation interne du Soleil - Cœur nucléaire solaire 6 à 8 fois plus rapide

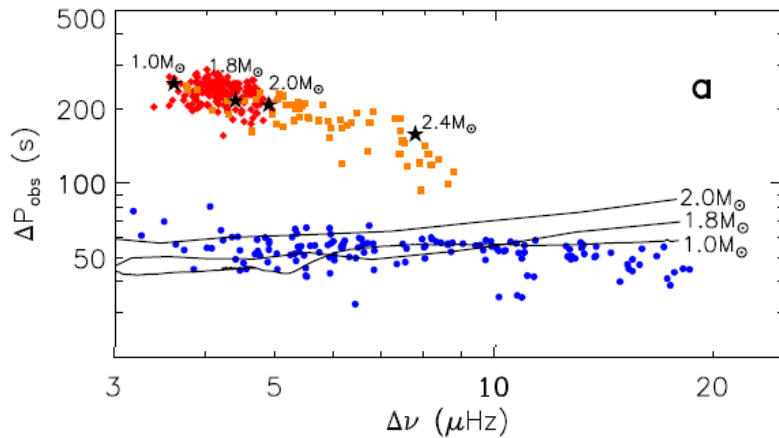
Relique de la rotation du Soleil jeune, autour de l'époque du découplage du disque.

Dans quel contexte astrophysique le système solaire s'est-il formé ?

L'astérosismologie

Plusieurs milliers sont maintenant observées en sismologie depuis 2008 COROT-KEPLER.

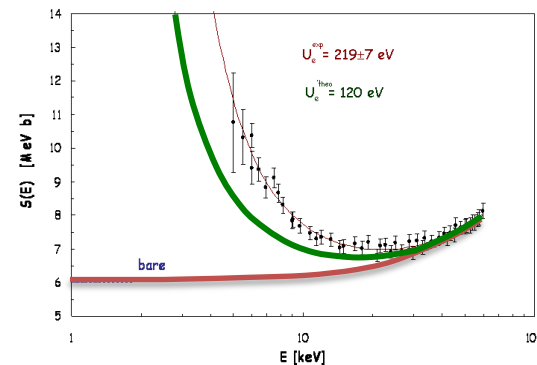
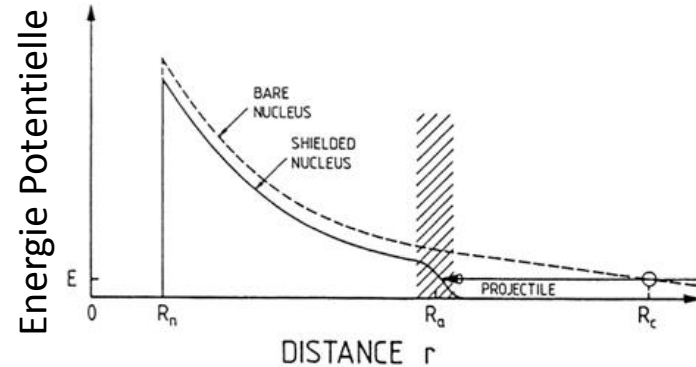
Résultats récents



La période des modes « de gravité » permet de séparer la combustion de l'**hydrogène** de celle de l'**hélium** au cœur des géantes rouges (Bedding et al. Nature 2011)

Objectifs attendus

- Connaissance des processus dynamiques internes
- Importance des opacités
- Diffusion microscopique
- Effet d'écrantage des réactions nucléaires ?



nue
écrantée

Nucléosynthèses hydrostatiques et évolution stellaire

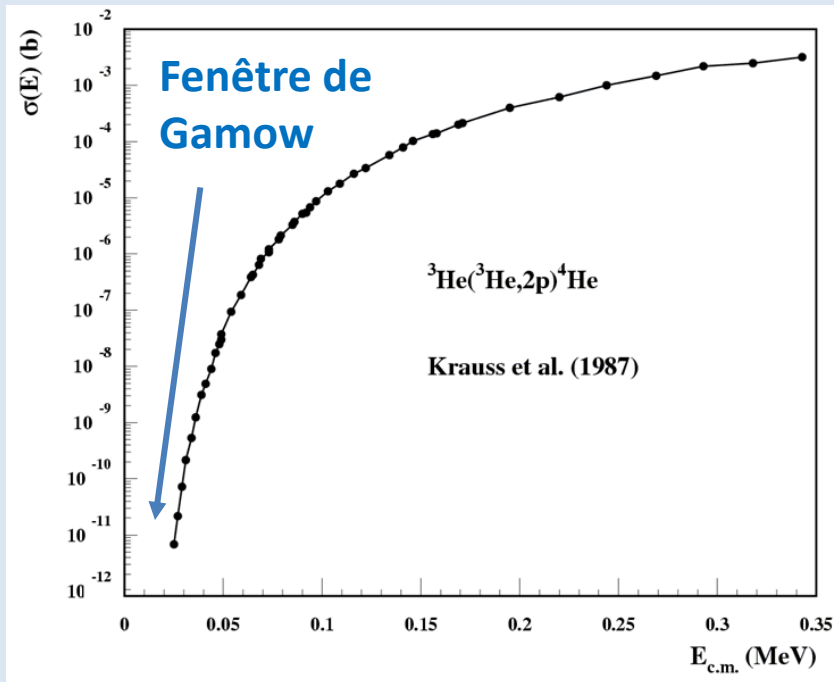
Combustion hydrogène ~ bien maîtrisée

Combustion hélium moins bien maîtrisée

NUPPEC Long Range Plan
Réactions les plus importantes

$^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$, $^{14}\text{C}(\alpha,\gamma)^{18}\text{O}$, $^{18}\text{O}(\alpha,\gamma)^{22}\text{Ne}$ et $^{22}\text{Ne}(\alpha,\gamma)^{26}\text{Mg}$
Précision requise 10 %

Mesure directe



Extrêmement difficile

Mesure indirecte

Dépendant d'un modèle

$$\sigma(E) = \pi \tilde{\lambda}^2 \omega \frac{\Gamma_p \Gamma_\gamma}{(E - E_r)^2 + (\Gamma_{tot} / 2)^2}$$

- Réaction de transfert
 $^{12}\text{C}(^7\text{Li},t)^{16}\text{O}$
- Diffusion élastique résonante
 $^{12}\text{C}(\alpha,\alpha)^{12}\text{C}$
- Dissociation Coulombienne
 $^{16}\text{O}(\gamma,\alpha)^{12}\text{C}$
- Cheval de Troie
 $^6\text{Li}(^{12}\text{C},\alpha\ ^{12}\text{C})^2\text{H}$

Phases de **combustion ultérieures**

$^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$

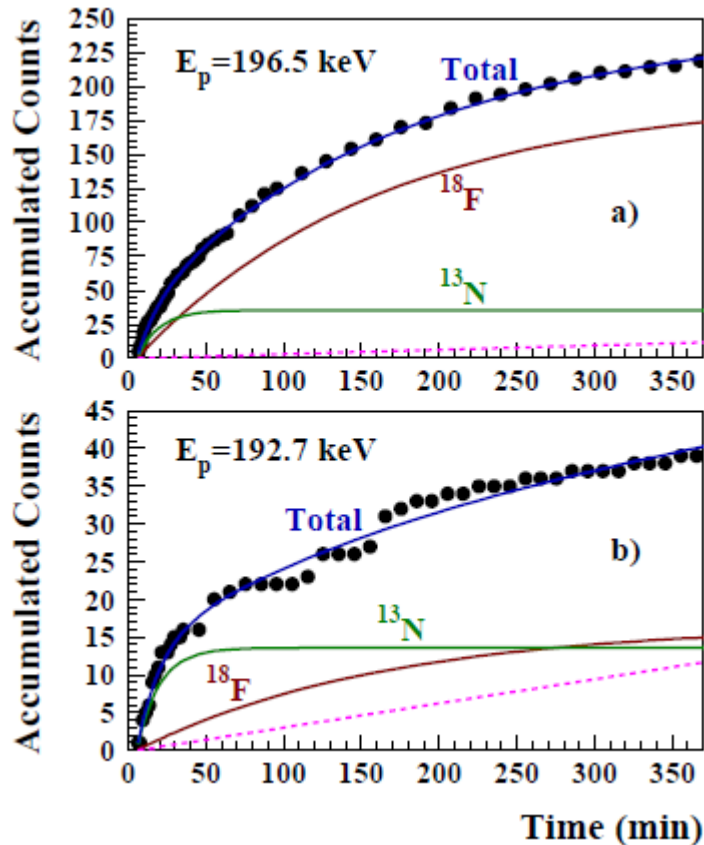
$^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$

$^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$

Deux exemples parmi d'autres

La réaction $^{17}\text{O}(p,\alpha)^{14}\text{N}$

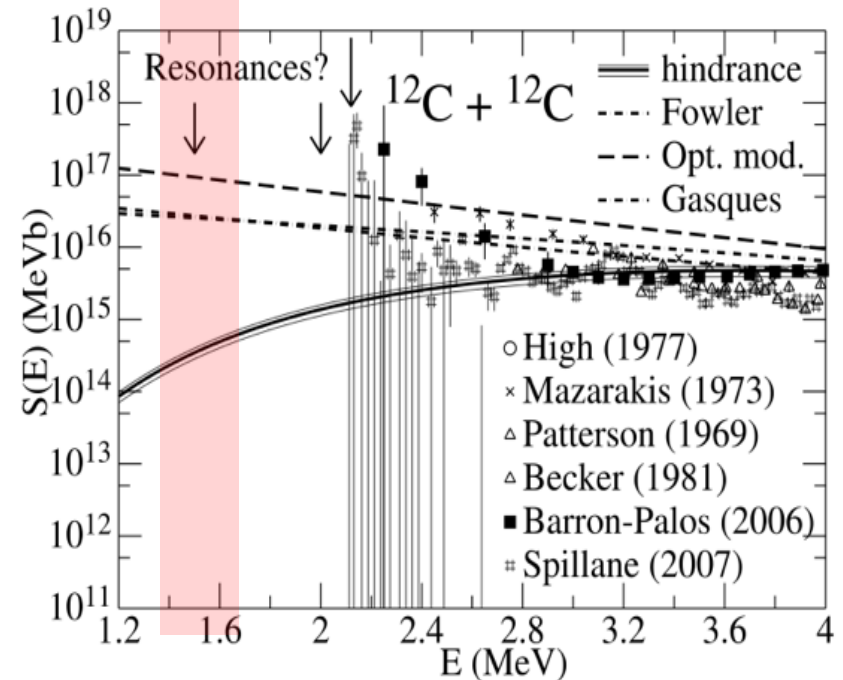
Observation d'une nouvelle résonance



$^{17}\text{O}(p,\gamma)^{18}\text{F}$ on / off résonance
PAPAP au CSNSM à Orsay

La réaction $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$

Pic de Gamow



Les accélérateurs de faisceaux stables



Mesures directes : expériences de longue durée, utilisant des faisceaux intenses, des cibles aux propriétés remarquables, en termes d'homogénéité, de pureté et de résistance, et des dispositifs de détection performants et très efficaces.

Mesures indirectes : équipements et détecteurs adaptés (spectromètre...)

France :

Tandem Orsay

Futur :

Andromède (Orsay)

ECOS ?

Ailleurs :

LNL (I), LNS (I), Stuttgart (D),

ISAC (CA), ATLAS (USA),

Caserta (I), Demokritos (GR),

LUNA (I), Rez (CZ) ...

➤ **Maintien de la diversité des accélérateurs**

Le processus s

Production de neutrons dans les étoiles AGB

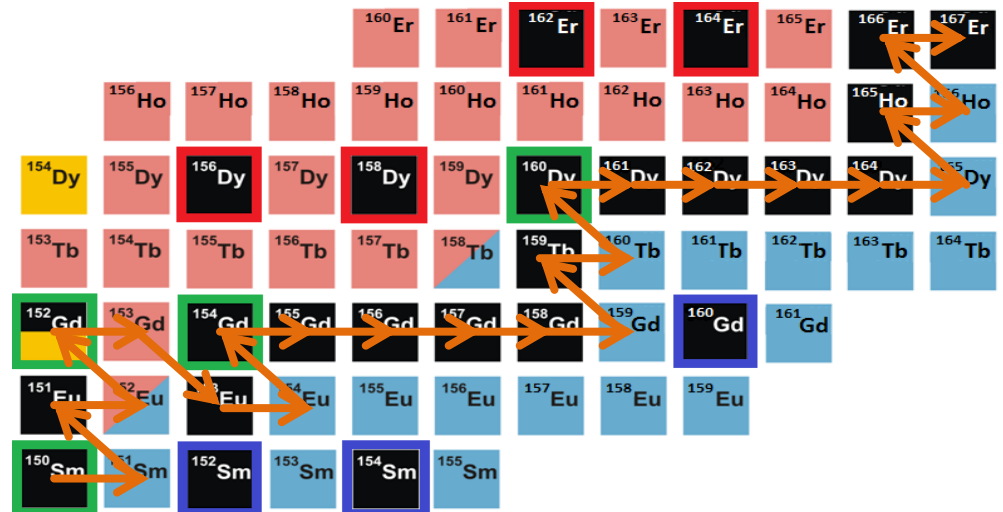
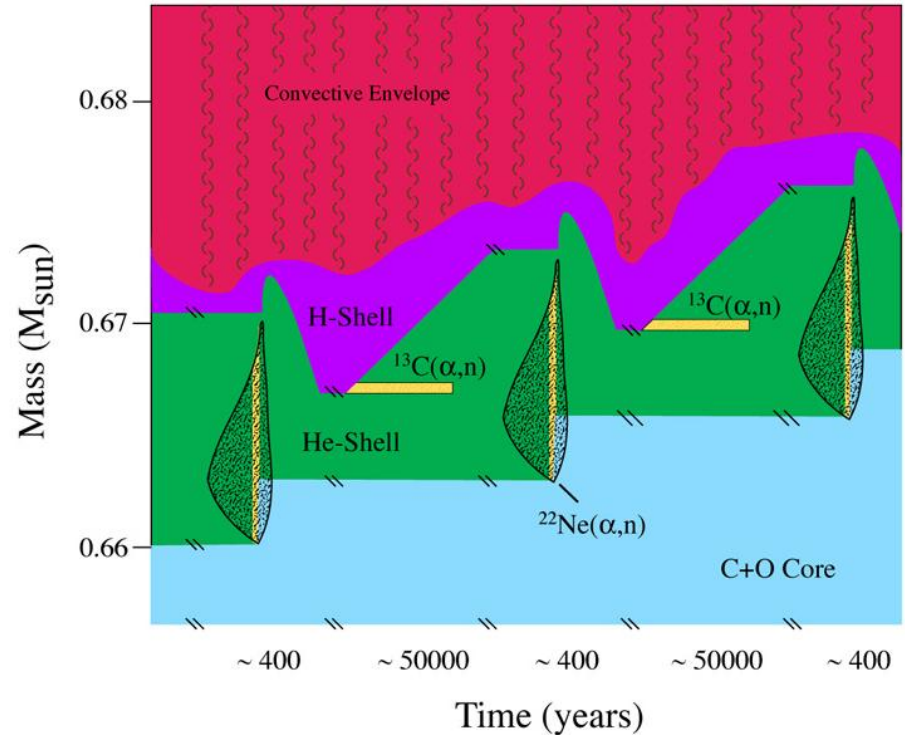
Deux réactions clés ont été identifiées :



Capture lente de neutrons. A l'origine de la synthèse de 50 % des noyaux plus lourds que le Fe

Comment se fait le mélange des couches ?

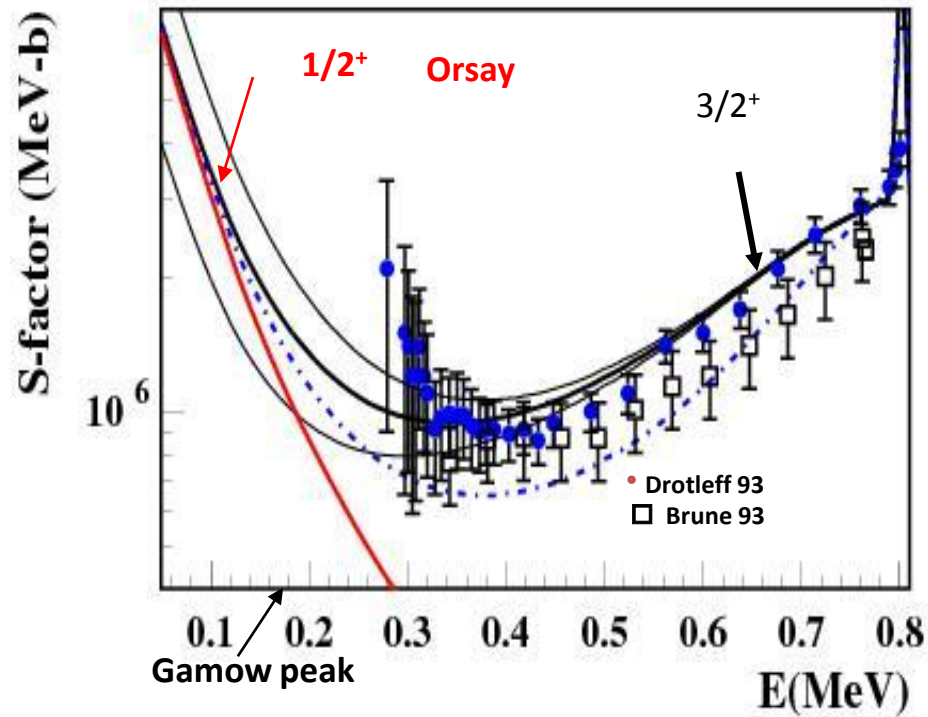
Processus r = les 50 % manquants



Un exemple parmi d'autres

La réaction $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$

Mesurée indirectement à Orsay
via la réaction $^{13}\text{C}(^7\text{Li},t)^{17}\text{O}$



Les faisceaux de neutrons

La plupart des réactions de capture de neutron impliquant des noyaux stables dans le processus s et ayant des sections efficaces relativement élevées (\sim mbarn) ont été mesurées

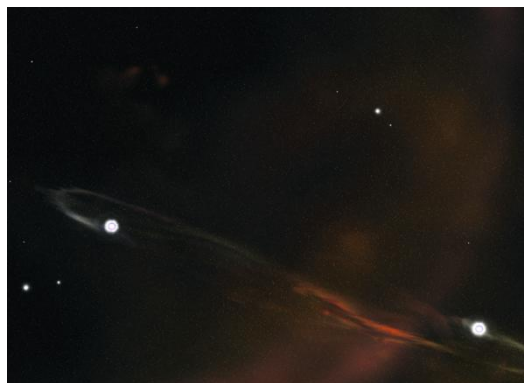
Mesures de temps de vol de neutrons (n_TOF, GELINA, FRANZ, SARAF...)

Production de cibles radioactives

Peu de données sont disponibles pour les réactions aux points de branchement qui impliquent des noyaux radioactifs proches de la stabilité (^{63}Ni , ^{79}Se , ^{95}Zr ,...) et les réactions responsables de la nucléosynthèse du ^{60}Fe

Une installation de production de cibles radioactives appelée CACAO (Orsay)

Nucléosynthèses explosives



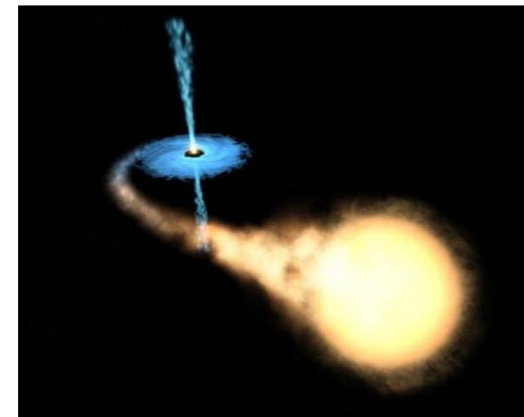
SN Ia

Une naine blanche seule
ou coalescence de deux ?



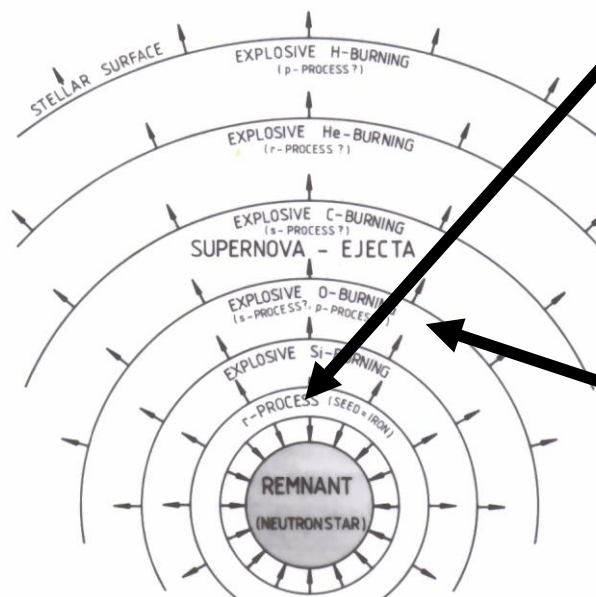
SN II

Fin d'étoiles massives



Novae
Sursauts X

- Quels processus expliquent les profils des courbes de lumière des sursauts X ?
- Quels sont les différents mécanismes d'explosion des étoiles en supernovae ?



Processus r

- Origine des éléments lourds (milieu interstellaire, rayonnement cosmique) ?
- Coalescence d'étoiles à neutrons ?

Processus p ?

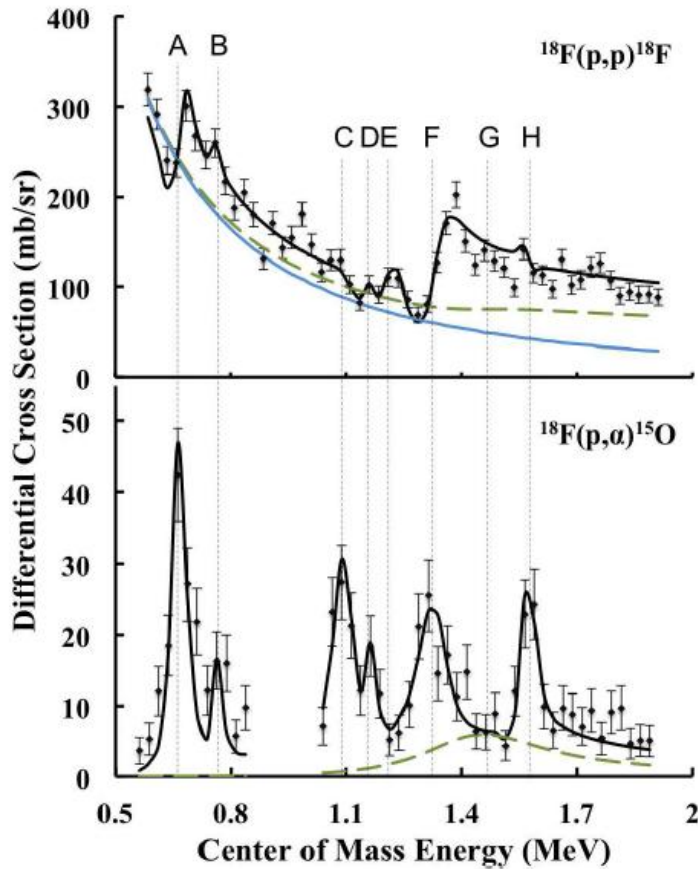
- Origine des éléments p ? ($^{74}\text{Se} \dots ^{196}\text{Hg}$)

Deux exemples parmi d'autres

Novae

La réaction $^{18}\text{F}(p,\alpha)^{15}\text{O}$

Mesurée directement au GANIL



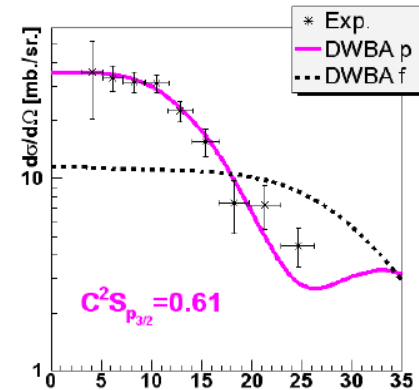
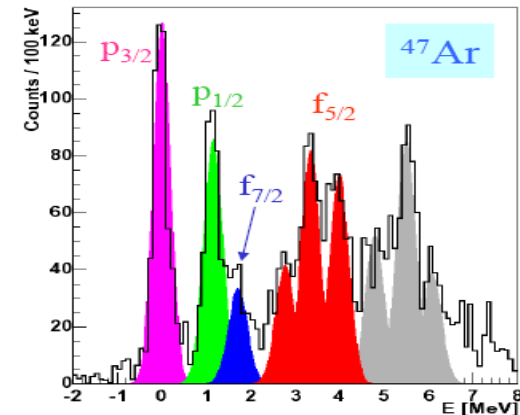
R-process

La réaction $^{46}\text{Ar}(n,\gamma)^{47}\text{Ar}$

$^{48}\text{Ca}/^{46}\text{Ca} \approx 250$ (solar = 53)

météorites

$^{46}\text{Ar}(d,p)^{47}\text{Ar}$



$\Rightarrow n \sim 3 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$

Les accélérateurs de faisceaux radioactifs

Les accélérateurs de faisceaux radioactifs sont particulièrement bien adaptés à l'étude des processus de nucléosynthèse explosive.

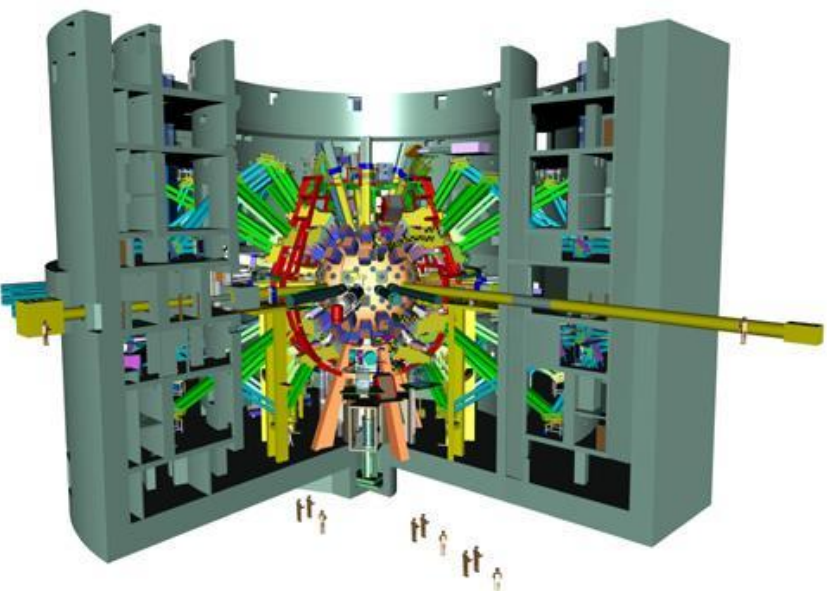


+ SPIRAL1 + ALTO+ RIBF à RIKEN (Japon) + FAIR (D) + HIE-ISOLDE + TRIUMF (CA) + S3 + AGATA, PARIS, GASPARD , ACTAR...

- **Novae** : $^{25}\text{Al}(p,\gamma)^{26}\text{Si}$ $^{30}\text{P}(p,\gamma)^{31}\text{S}$ $^{18}\text{F}(p,\alpha)^{15}\text{O}$ indirectement sur **SPIRAL 1**
- **Sursauts X** : $^{14}\text{O}(\alpha,p)$, $^{18}\text{Ne}(\alpha,p)$ et $^{30}\text{S}(\alpha,p)$... mesures directes des sections efficaces sur **SPIRAL2**
- **Processus r** : Etudes de structure nucléaire. Deux types d'expériences sont prévus (i) spectroscopie, décroissance, masse, $t_{1/2}$, Pn **ALTO, DESIR** (ii) Après post-accélération en vue d'effectuer des réactions secondaires ex : $^{130}\text{Cd}(d,p)^{131}\text{Cd}$, et $^{134}\text{Sn}(d,p)^{135}\text{Sn}$ sur **SPIRAL 2**
- **Processus p** : Mesures directes en cinématique inverse sur **SPIRAL2 - LISE**

20 000 réactions sur 2000 noyaux il faut faire appel à la THEORIE

Les lasers de puissance



Laser Mégajoule (Bordeaux)

Couplage sur une même installation
Ex: PETAL/LMJ

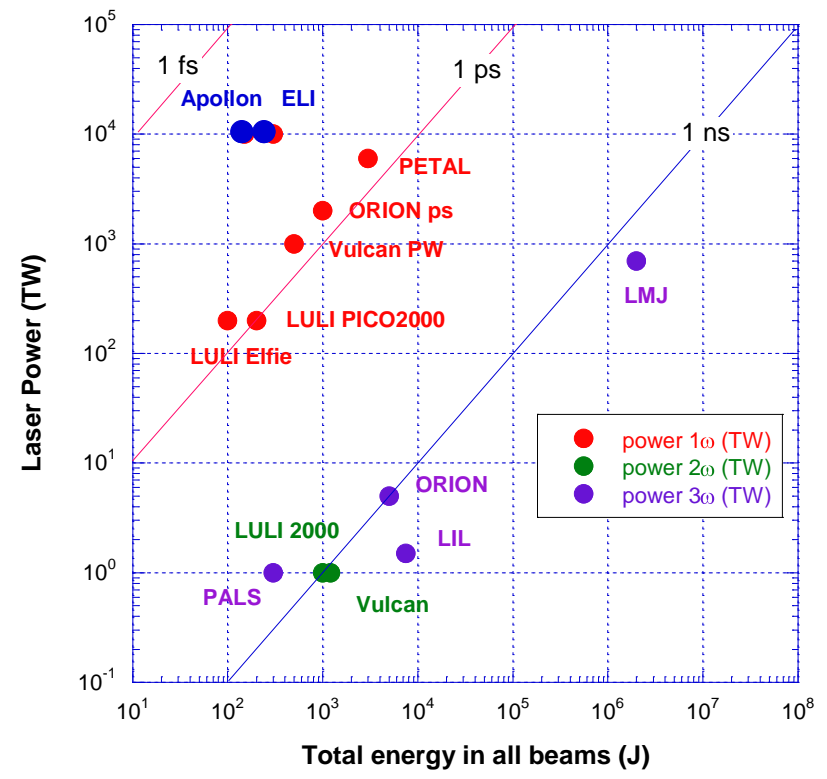
Lasers Haute
Densité d'Énergie

**Compression
Chauffage**

Lasers Ultra
Haute Intensité

Allumage rapide pour la fusion

**Diagnostic plasma dense
X / Faisceaux de particule**



Le continuum laser européen

Courtesy D. Batani

Objectifs attendus

- Effet d'écrantage
- Mesure du taux de la réaction $D(p,\gamma)^3\text{He}$
- ...

Recommandations

- **Bilan ressources humaines** : 50 ETP, faible nombre d'étudiants en thèse (10)
- **Formation** : Favoriser des bourses de thèse transverses entre écoles doctorales
- **Animation** : Encourager la synergie avec les équipes françaises d'astrophysique (financement de journées thématiques par exemple). Encourager les rencontres (ex: école internationale Russbach).
- **Faisceaux stables** : Maintenir une installation !
- **Faisceaux radioactifs** :
 - SPIRAL1 développement de nouveaux faisceaux,
 - SPIRAL2 (phase 2) indispensable (y compris « Autres Faisceaux »)
- **Théorie** : Il est aussi crucial de permettre à la théorie de se stabiliser dans ses différentes facettes (modélisation stellaire, simulation numérique, matière nucléaire, structure nucléaire, couplage au continuum et physique des objets compacts).

FUTUR ++ ECOS ++EURISOL