

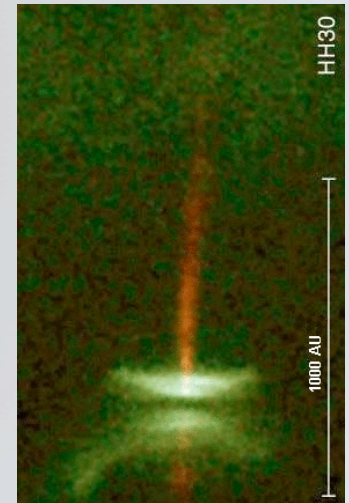
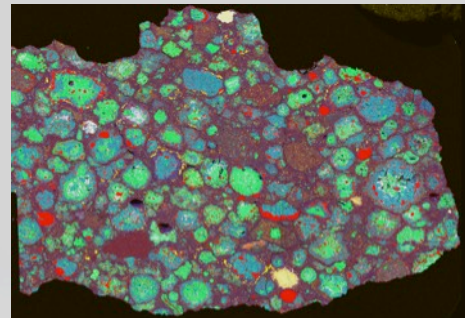
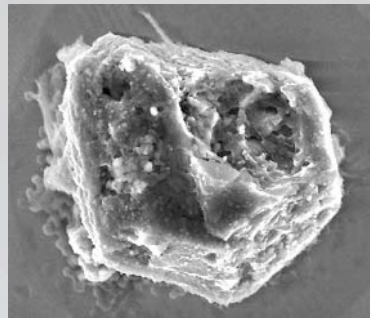
Comment se forment les étoiles et l'origine du système solaire ?

Quelles sont les contraintes et les questions ouvertes par les analyses de la matière extraterrestre (météorites/micrométéorites) ?

J. Duprat

CSNSM IN2P3-CNRS

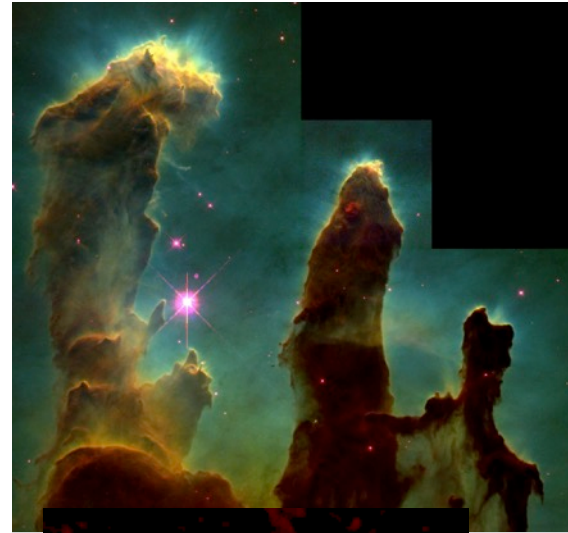
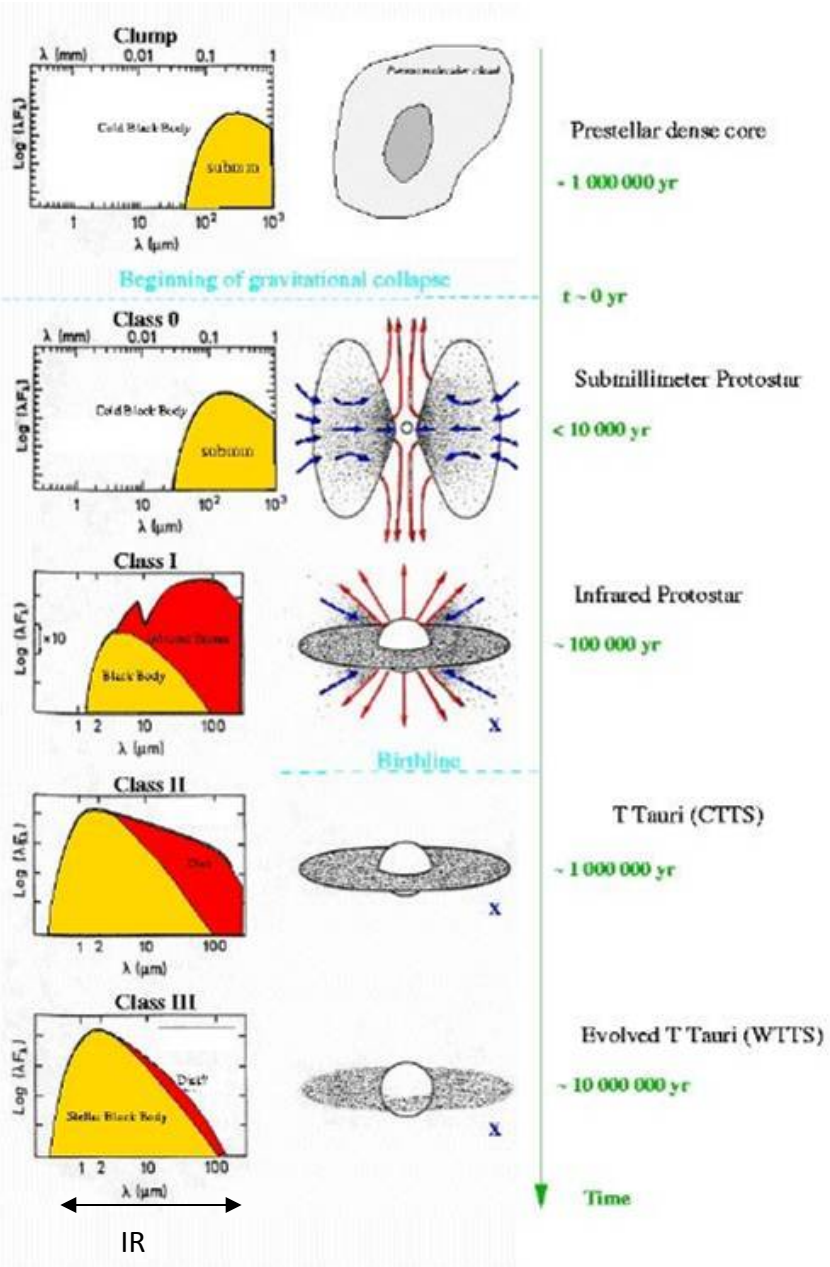
Univ. Paris-Sud / Univ. Paris-Saclay



Journées SFP-BTPN 21-22 Juin 2016

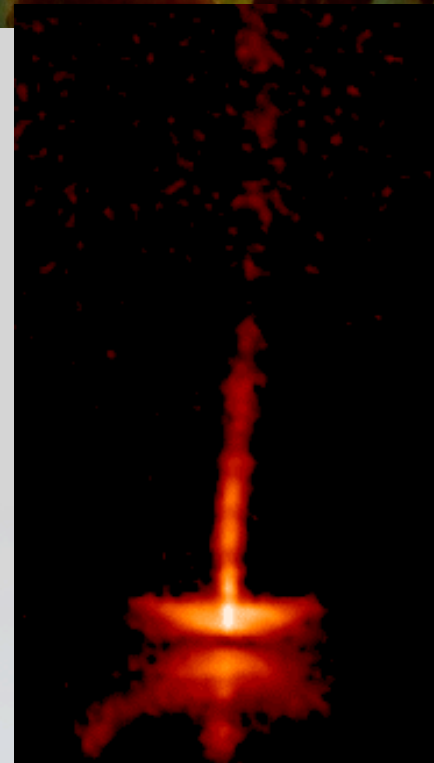
Les grandes questions en physique nucléaire fondamentale

Comment les systèmes de type solaire se forment-ils ?

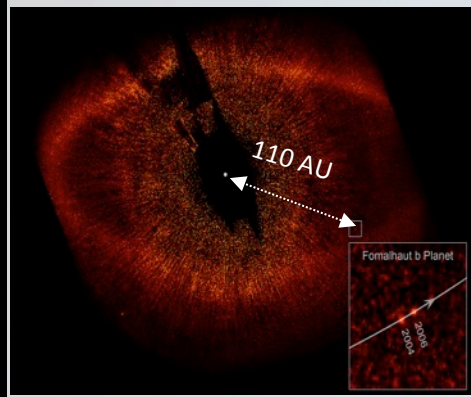


The Eagle nebula,
 Distance 6500 LY (2 kpc)

Size of the clouds :
 1 LY, ~ 50 kAU, ~ 0.3 pc



HH 30
 Dynamic Disk and Jets,
 (450 LY) HST

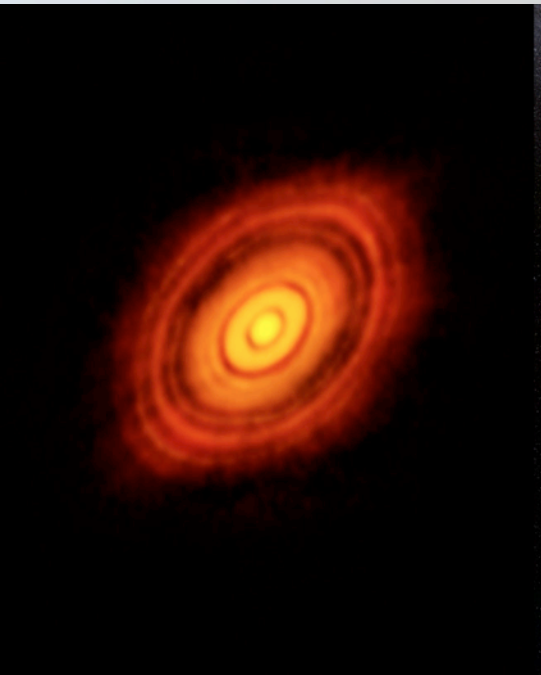


HST Fomalhaut, 25 LY
 Fomalhaut b < 3 Mjup
 Kalas et al. Science 2008

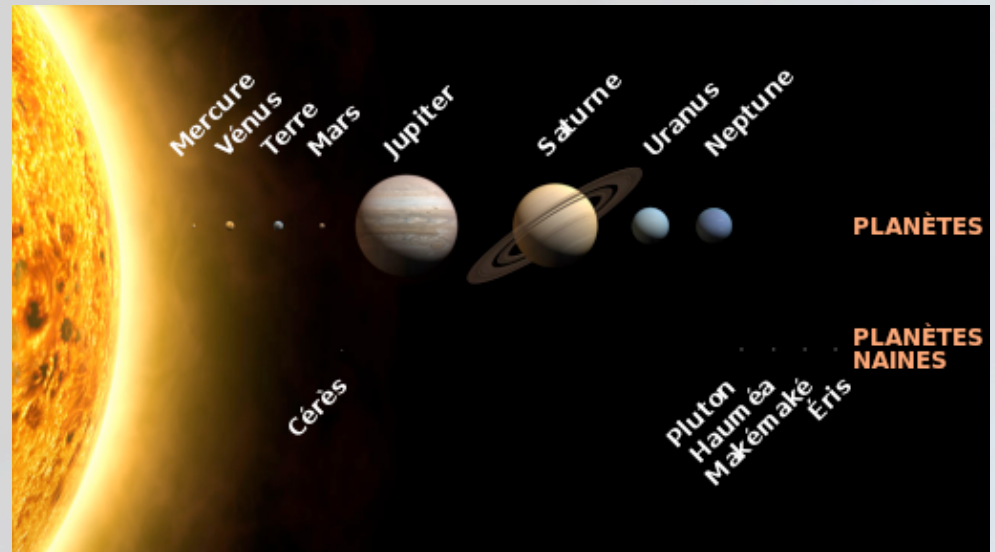
CEA/DAPNIA/SA/PCG/Grasse N.

Du disque protoplanétaire aux planètes

- Est-il possible de tracer une frontière entre le système solaire et l'héritage du milieu interstellaire ?
- Quel était le contexte astrophysique de formation du système solaire ?
- La formation du système solaire est-elle générique ?

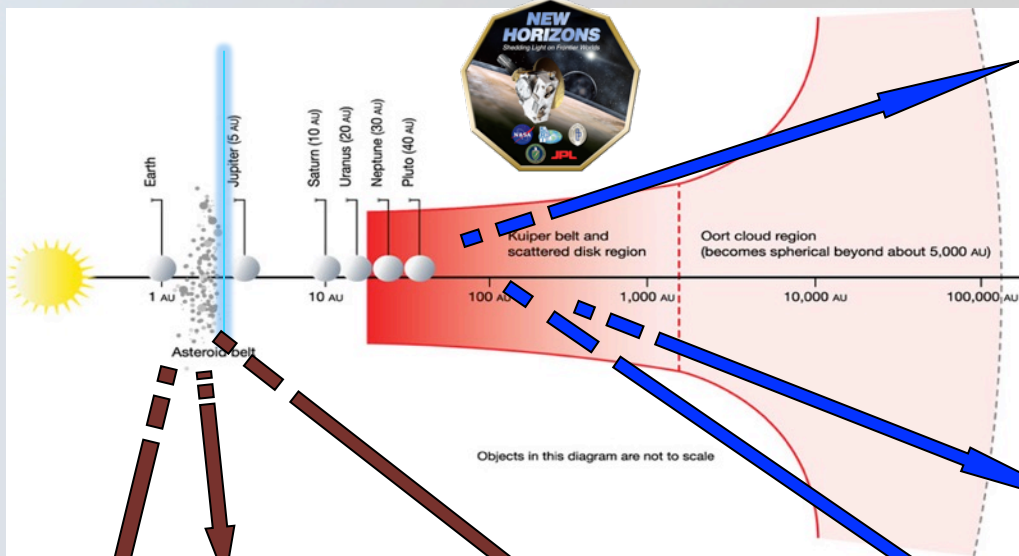


ALMA, Image of
protoplanetary disk
HL-Tauri (450 LY)
Size 100 UA



Les petits corps du système solaire (Astéroïdes et Comètes) sont les archives du système solaire primitif

Un majeur majeur des missions spatiales



STARDUST



ROSETTA



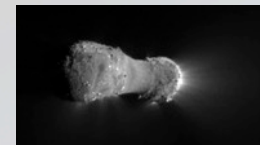
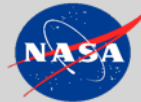
1999 JU₃ (



Hayabusa



OSIRIS-Rex

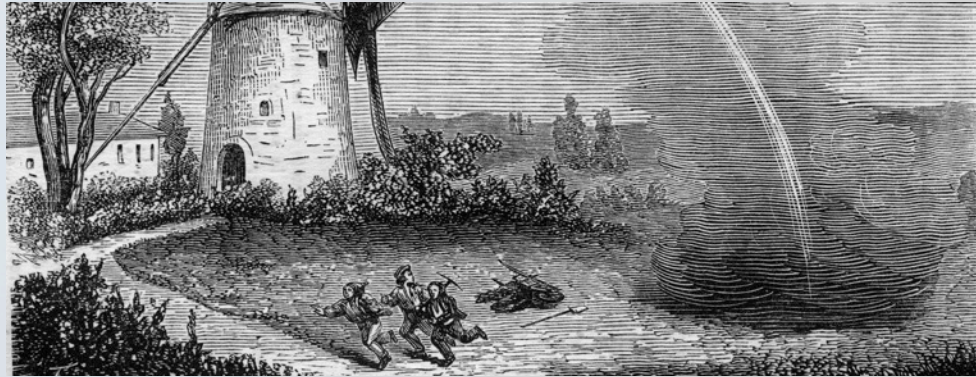


Deep Impact

La composition des petits corps primitifs nous renseigne sur le contexte de formation du système solaire



Météorites et micrométéorites, les archives de la formation du système solaire



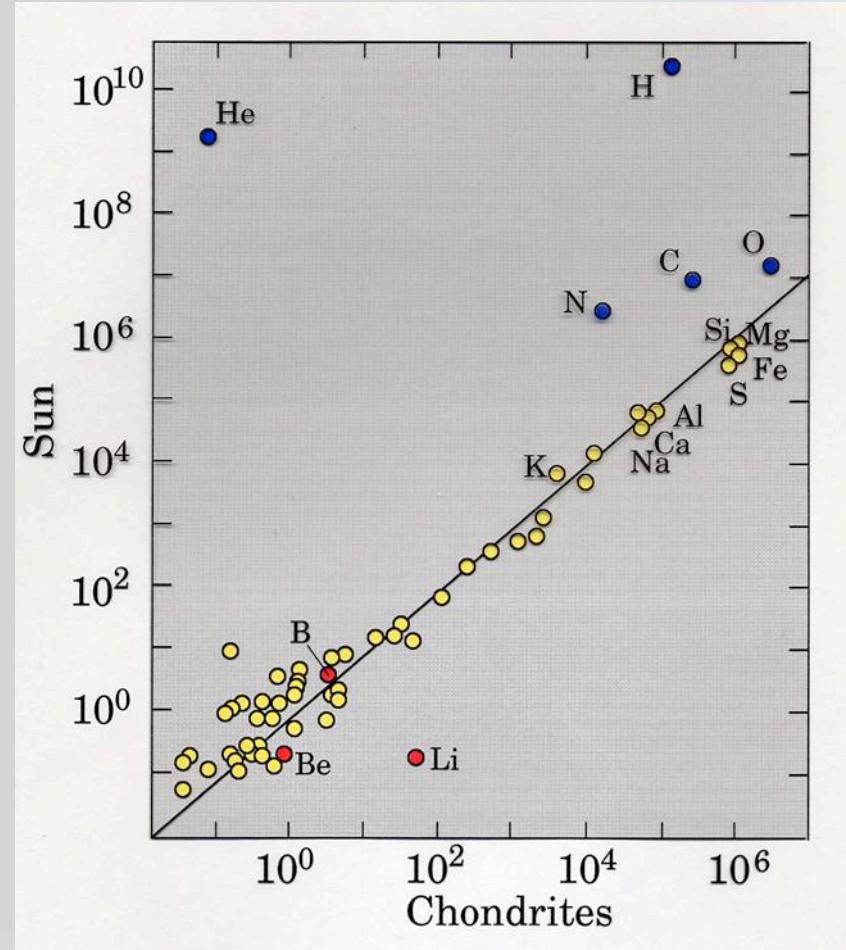
Chute de la météorite d'Orgueil, 1864.



Collecte moderne en Antarctique

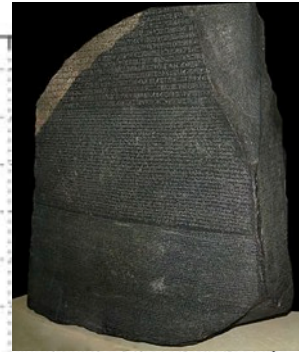
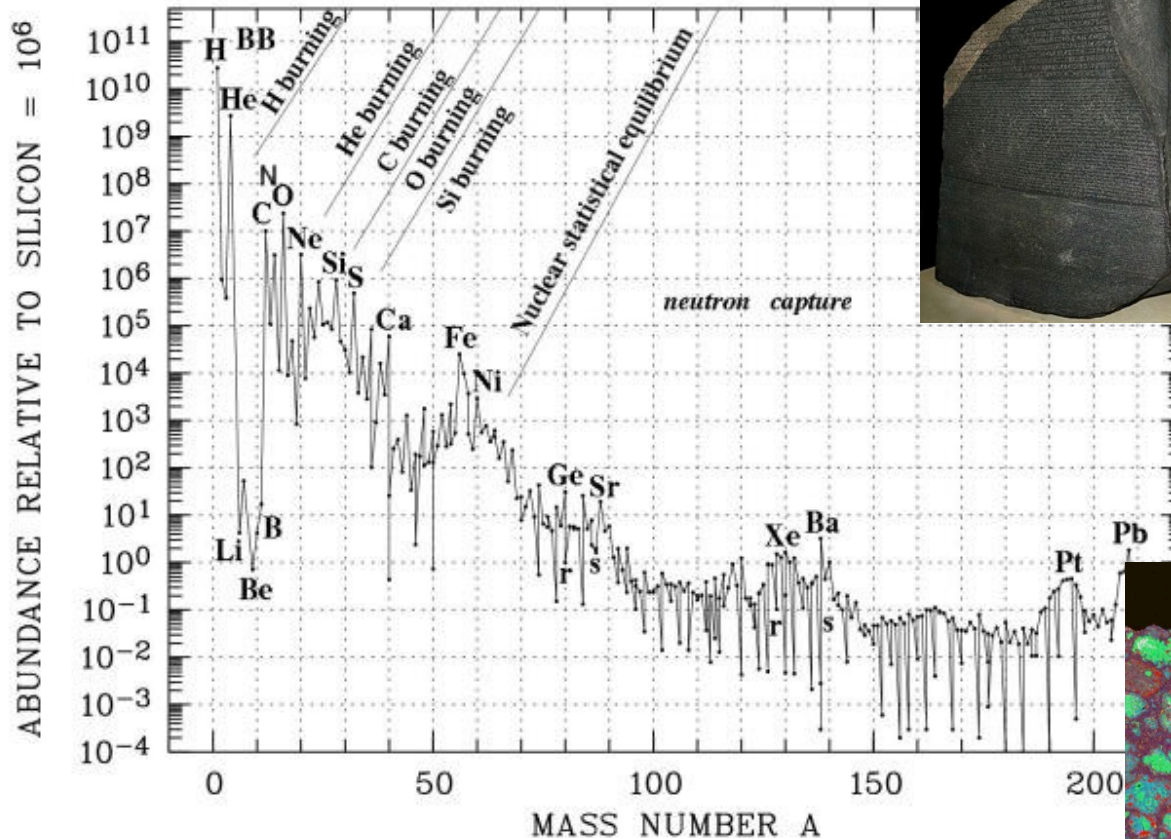


Météorite de type
Chondrite (Orgueil)



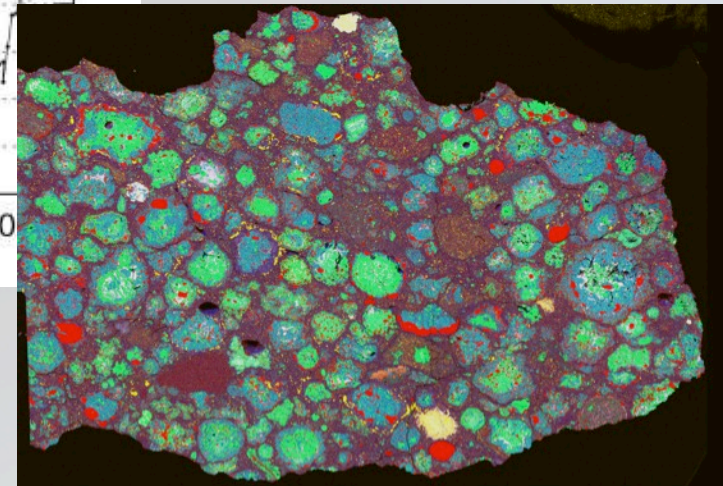
La composition des météorites de type CI nous renseigne sur l'abondance relative des éléments non-volatiles dans le nuage parent du système solaire

La composition moyenne du milieu interstellaire local, il y a 4,6 Gyrs.



B²FH

Est-il possible d'identifier dans les chondrites un héritage direct des poussières du milieu interstellaire ?

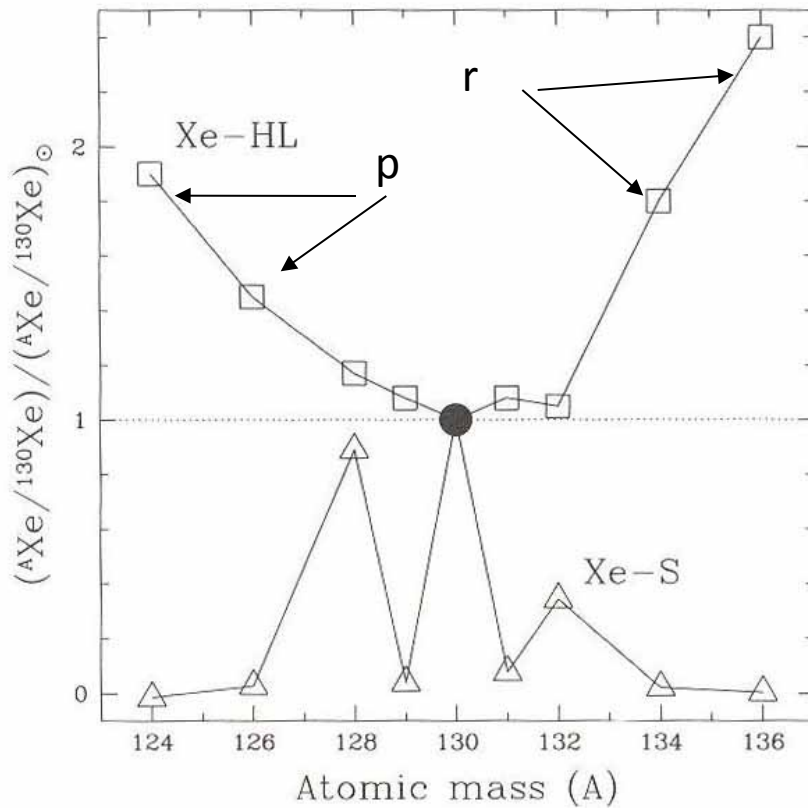


Météorite chondritique

la composition isotopique des gaz rares (Xe) dans les chondrites

une première indication de la présence des phases pré-solaires

Reynolds & Turner 1964



^{131}Ce	^{132}Ce	^{133}Ce	^{134}Ce	^{135}Ce	^{136}Ce	^{137}Ce	^{138}Ce	^{139}Ce	^{140}Ce	^{141}Ce	^{142}Ce
^{130}La	^{131}La	^{132}La	^{133}La	^{134}La	^{135}La	^{136}La	^{137}La	^{138}La	^{139}La	^{140}La	^{141}La
^{129}Ba	^{130}Ba	^{131}Ba	^{132}Ba	^{133}Ba	^{134}Ba	^{135}Ba	^{136}Ba	^{137}Ba	^{138}Ba	^{139}Ba	^{140}Ba

$^{124,126}\text{Xe}$:
p nuclei

$^{128,130}\text{Xe}$:
pure s nuclei

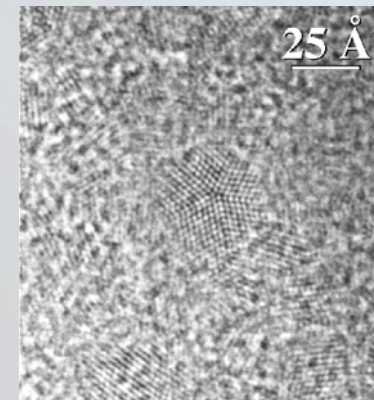
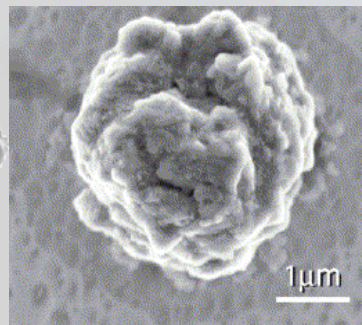
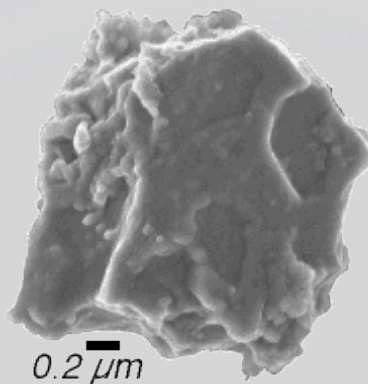
$^{134,136}\text{Xe}$:
r nuclei

^{123}Cs	^{124}Cs	^{125}Cs	^{126}Cs	^{127}Cs	^{128}Cs	^{129}Cs	^{130}Cs	^{131}Cs	^{132}Cs	^{133}Cs	^{134}Cs	^{135}Cs	^{136}Cs	^{137}Cs	^{138}Cs	^{139}Cs
^{122}Xe	^{123}Xe	^{124}Xe	^{125}Xe	^{126}Xe	^{127}Xe	^{128}Xe	^{129}Xe	^{130}Xe	^{131}Xe	^{132}Xe	^{133}Xe	^{134}Xe	^{135}Xe	^{136}Xe	^{137}Xe	^{138}Xe
^{121}I	^{122}I	^{123}I	^{124}I	^{125}I	^{126}I	^{127}I	^{128}I	^{129}I	^{130}I	^{131}I	^{132}I	^{133}I	^{134}I	^{135}I	^{136}I	^{137}I
^{120}Te	^{121}Te	^{122}Te	^{123}Te	^{124}Te	^{125}Te	^{126}Te	^{127}Te	^{128}Te	^{129}Te	^{130}Te	^{131}Te	^{132}Te	^{133}Te	^{134}Te	^{135}Te	^{136}Te
^{119}Sb	^{120}Sb	^{121}Sb	^{122}Sb	^{123}Sb	^{124}Sb	^{125}Sb	^{126}Sb	^{127}Sb	^{128}Sb	^{129}Sb	^{130}Sb	^{131}Sb	^{132}Sb	^{133}Sb	^{134}Sb	^{135}Sb
^{118}Sn	^{119}Sn	^{120}Sn	^{121}Sn	^{122}Sn	^{123}Sn	^{124}Sn	^{125}Sn	^{126}Sn	^{127}Sn	^{128}Sn	^{129}Sn	^{130}Sn	^{131}Sn	^{132}Sn	^{133}Sn	^{134}Sn
68	70	72	74	76	78	80	82	N								

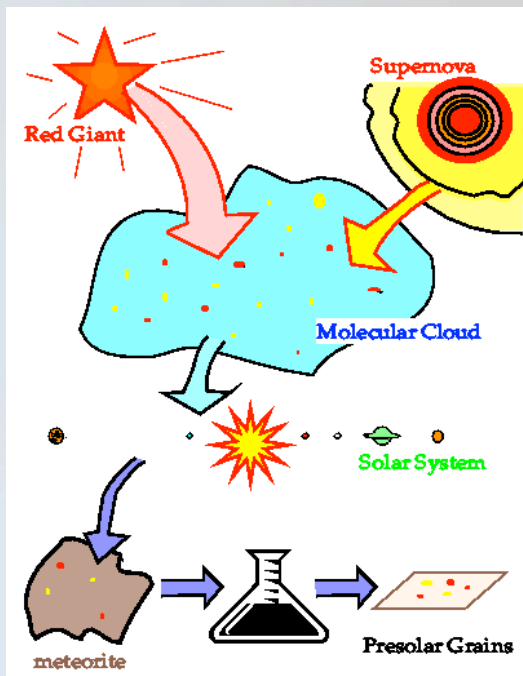
La découverte des grains pré-solaires



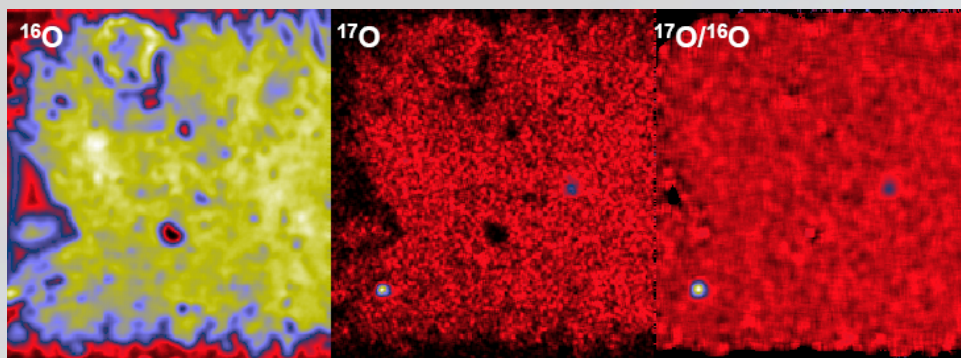
Météorite d'Allende



La matrice des chondrites contient **des phases minérales (SiC, Graphites, nano-diamants ... < 10 μm) directement héritées d'enveloppes stellaires de génération antérieure au Soleil.**



Larry Nittler,
Carnegie Institution of Washington

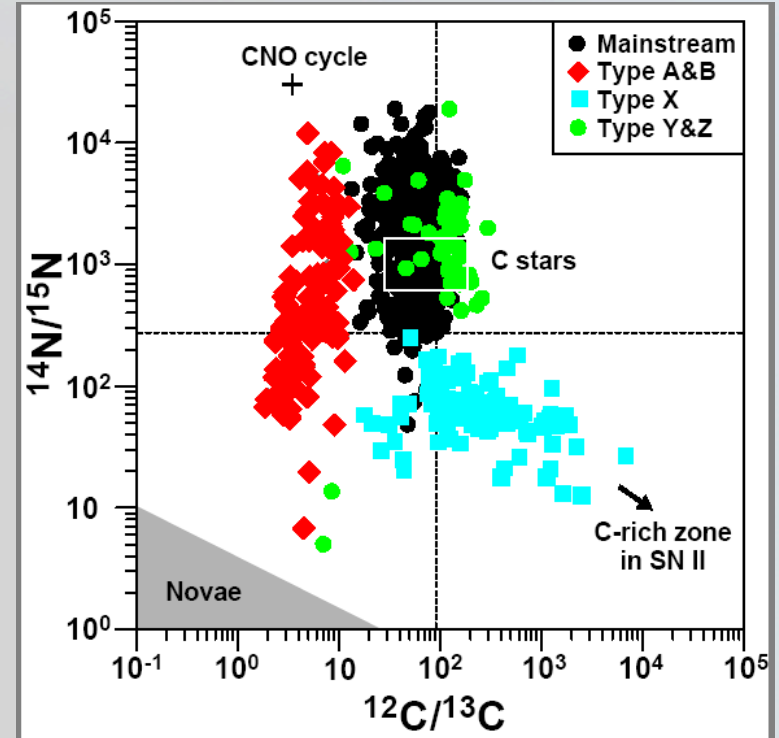


In-situ secondary ion mass image (P. Hoppe et al)

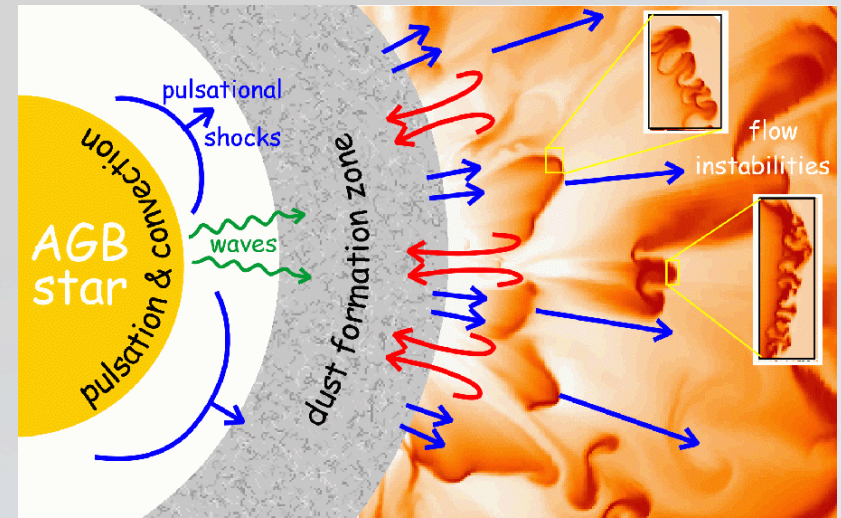
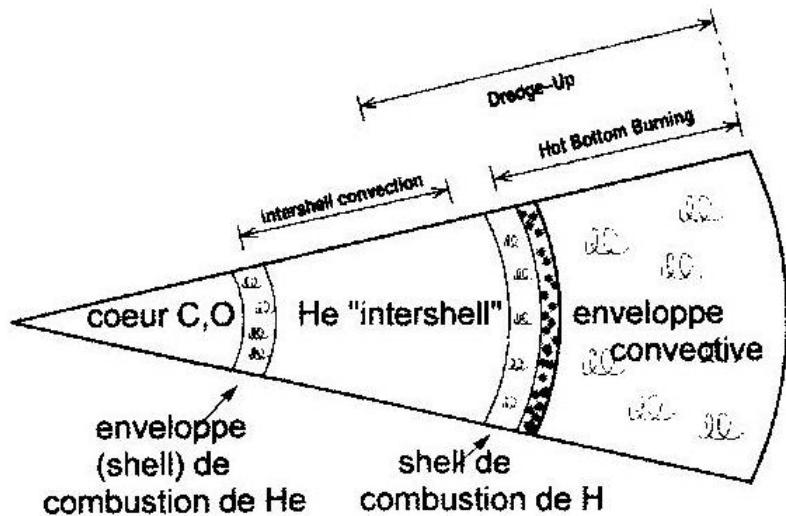
Est-il possible d'identifier les étoiles parentes des grains pré-solaires ?

L'exemple des grains de carbure de Silicium (SiC mainstream)

- Les étoiles de faible masses produisent des poussières carbonées dans leur phase AGB
- Riches en C (combustion en couche de He)
- Riches en ^{14}N (cycle CNO)
- Riches en ^{22}Ne , $^{14}\text{N}(\alpha,\gamma)^{18}\text{O}(\alpha,\gamma)^{22}\text{Ne}$



P. Hoppe 2007

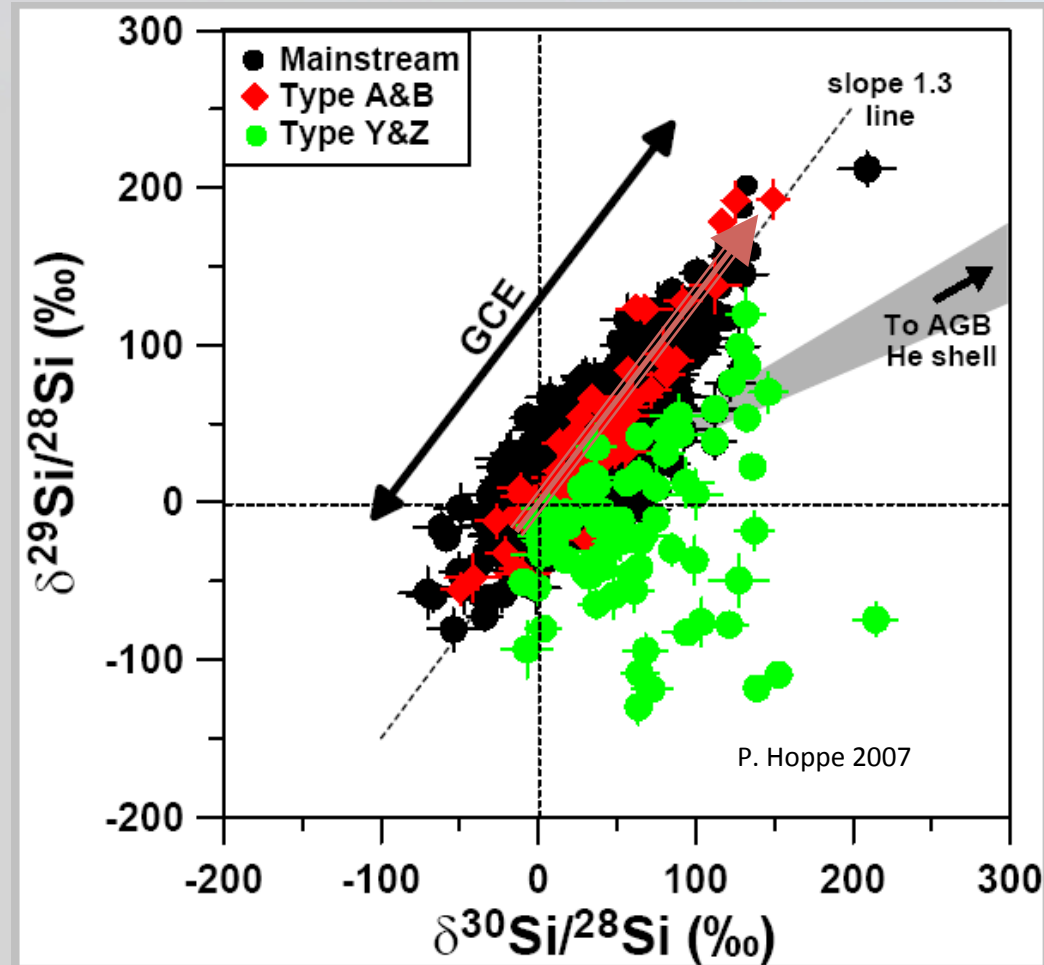


Quelles contraintes sur l'évolution chimique de la Galaxie ?

La composition isotopique du Si dans les SiC Mainsteam.

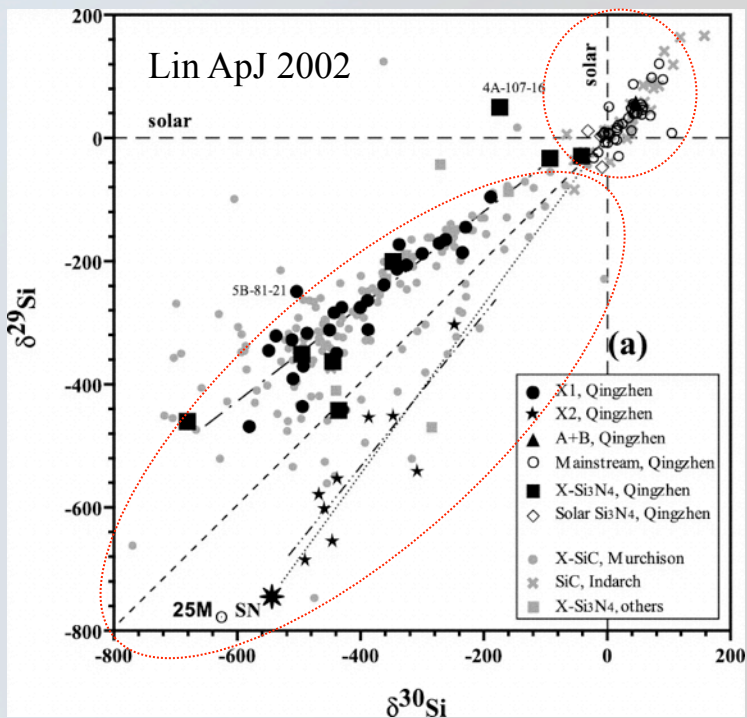
- ^{28}Si est un noyau primaire
- $^{29,30}\text{Si}$ sont des noyaux secondaires, leur abondance dépend de la métallicité de l'étoile

-> L'évolution chimique de la Galaxie (CEG) prévoit un enrichissement progressif en isotopes lourds ($^{29,30}\text{Si}$)



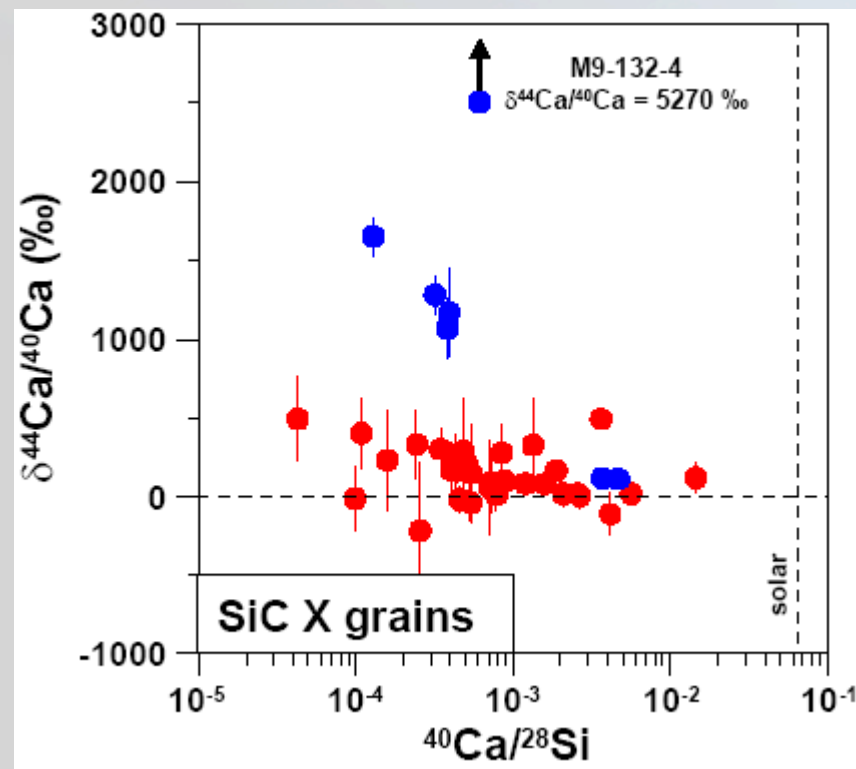
Question ouverte : les SiC qui étaient présents dans la nébuleuse proto-solaire apparaissent « plus jeunes » que le Soleil lui-même, ce qui est impossible...

Grains présolaires & étoiles massives



Les SiC de type X sont riches en ²⁸Si

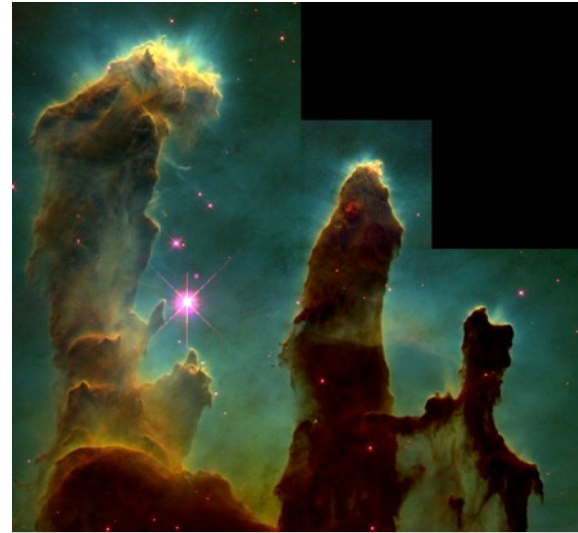
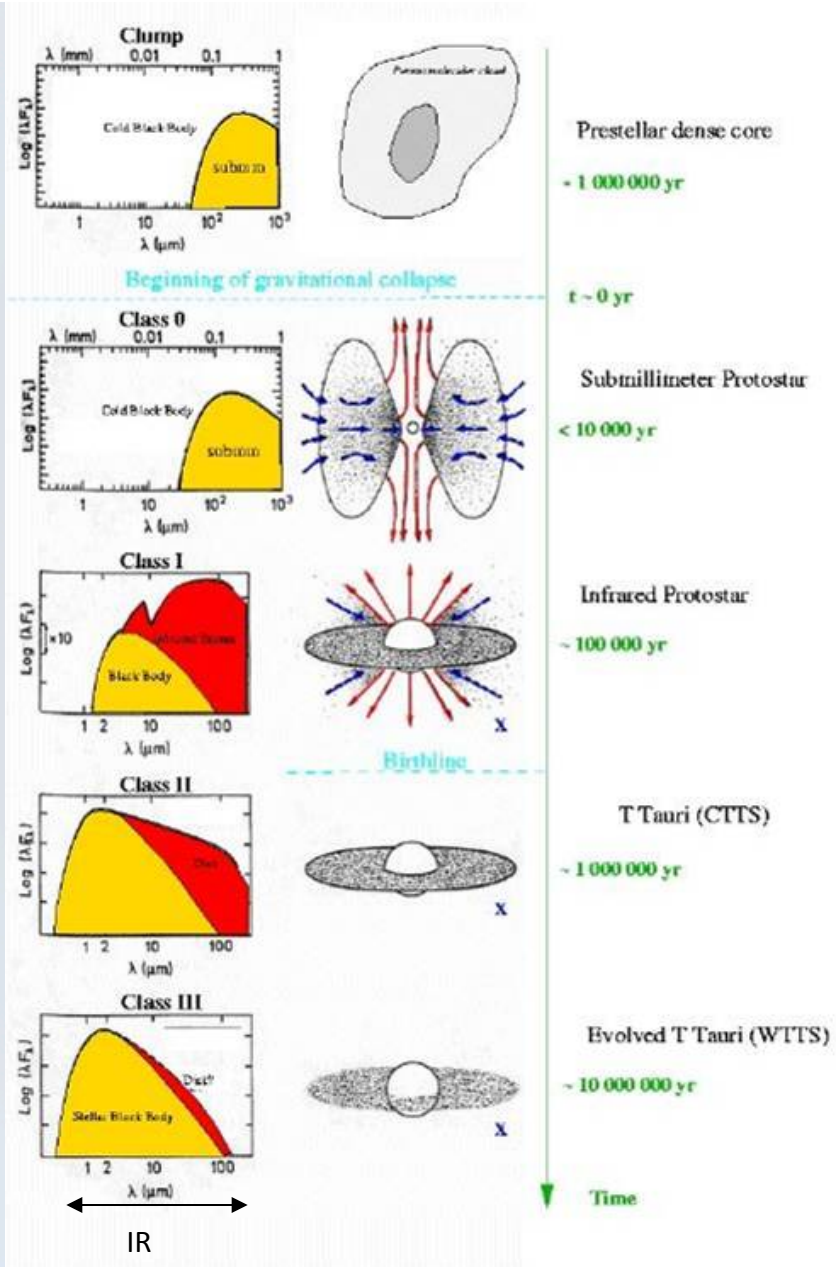
$$\delta \left(\frac{^{29}\text{Si}}{^{30}\text{Si}} \right) = \left(\frac{\left(\frac{^{29}\text{Si}}{^{30}\text{Si}} \right)_{\text{sample}}}{\left(\frac{^{29}\text{Si}}{^{30}\text{Si}} \right)_{\oplus}} - 1 \right) \times 1000$$



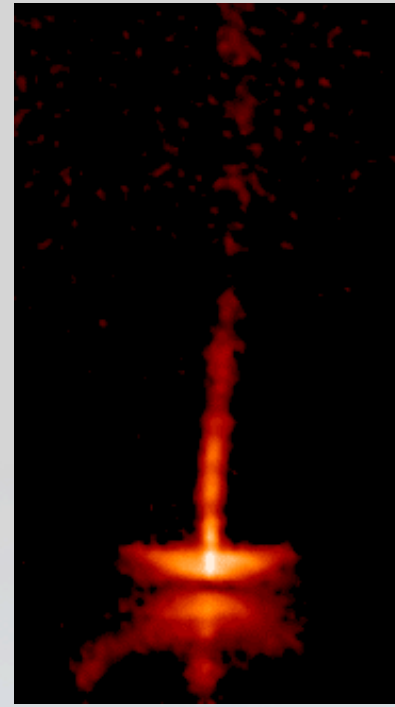
Des excès en ⁴⁴Ca liés à la décroissance in-situ du ⁴⁴Ti (dans les Type X SiC et les graphites)

- ⁴⁴Ti (N=Z) → ⁴⁴Sc → ⁴⁴Ca
- ⁴⁴Ti (t_{1/2}=60 years)

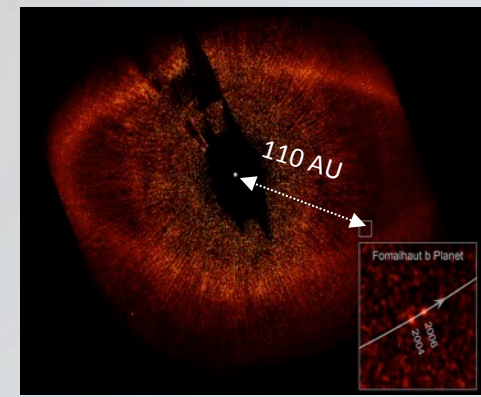
La problématique des radioactivités éteintes dans le jeune système solaire, à la frontière entre milieu interstellaire et étoile en formation...



The Eagle nebula,
 Distance 6500 LY (2 kpc)
 Size of the clouds :
 1 LY, ~50 kAU, ~ 0.3 pc

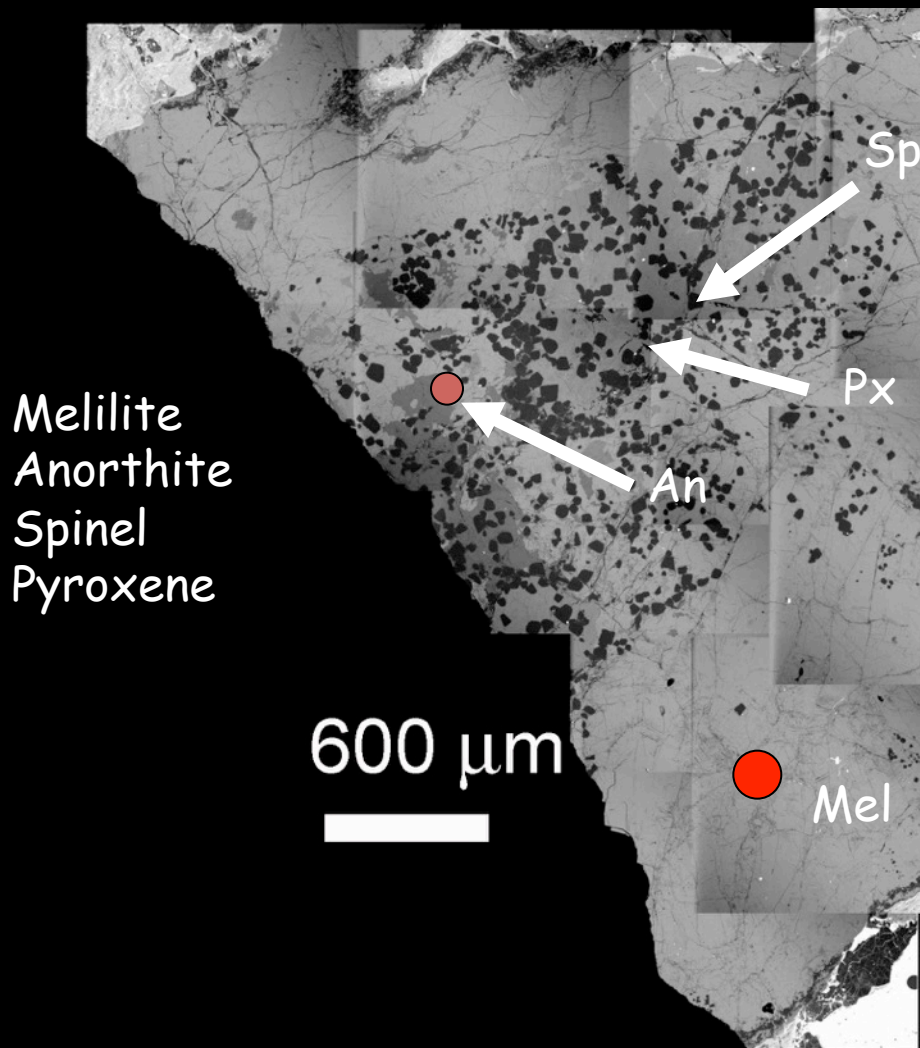


HH 30
 Dynamic Disk and Jets,
 (450 LY) HST



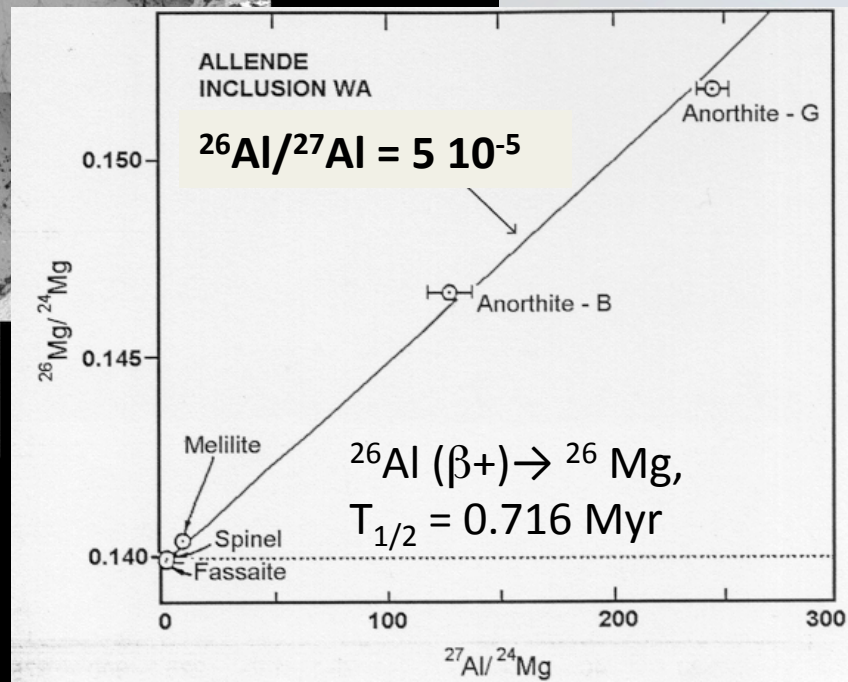
HST Fomalhaut, 25 LY
 Fomalhaut b < 3 Mjup
 Kalas et al. Science 2008

Des éléments radioactifs de courtes périodes étaient présents dans le disque protoplanétaire

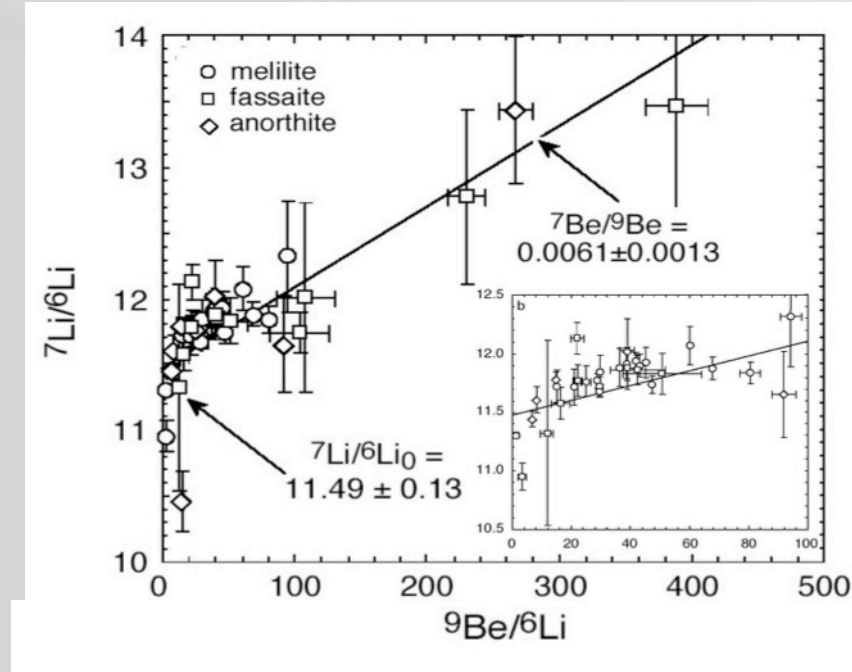
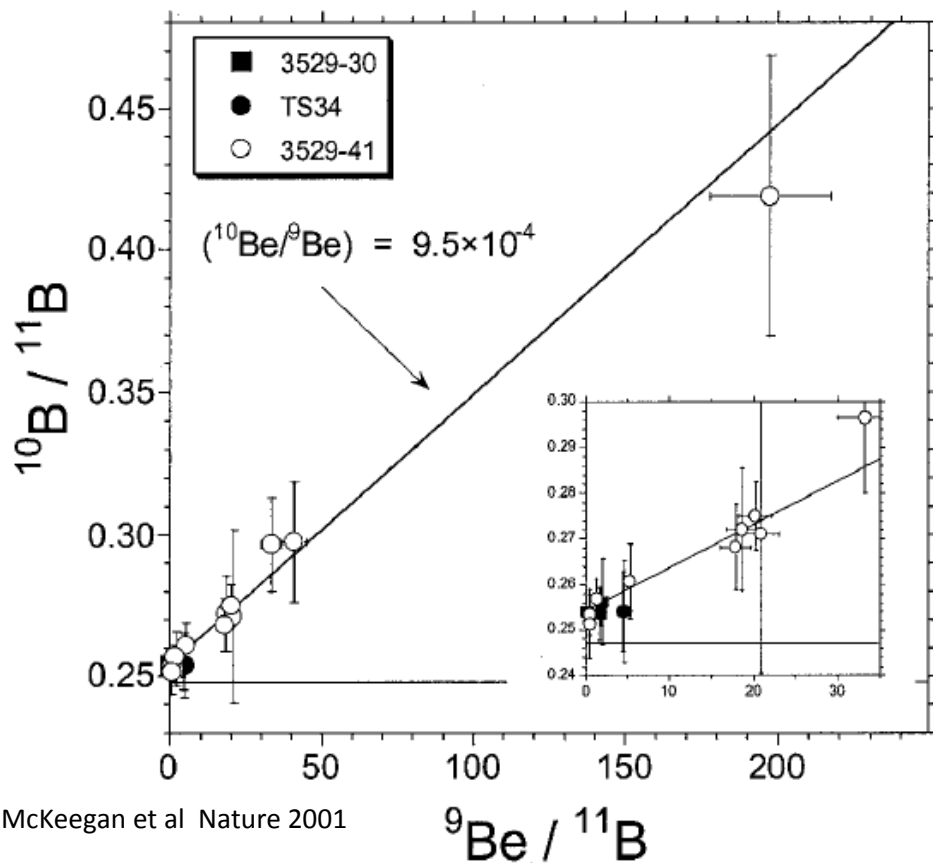


CAI MRS6 (Leoville, CV3)

Lee et al. (1976)



De la nucléosynthèse non-thermique



Still uncertain :

^7Be ($T_{1/2} = 53$ days) \rightarrow ^7Li , $^7\text{Be}/^9\text{Be} = 6 \cdot 10^{-3}$?

M. Chaussidon et al 2006

^{10}Be (β^-) \rightarrow ^{10}B , $T_{1/2} = 1.4$ Myr

^{10}Be est produit par spallation sur CNO,
 irradiation du disque proto-planétaire par
 des particules de haute énergie émises par le jeune soleil ?

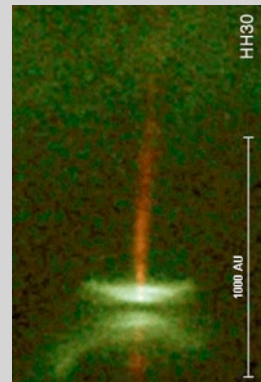
Les abondances de certains isotopes à courte durée de vie ne sont PAS compatibles avec l'évolution chimique de la galaxie

Table 1
Mean life times and abundances of short-lived nuclides, uniform production (UP) and early Solar System invento

Radioactive isotope (R)	Reference isotope (I)	Process	Mean life $\bar{\tau}_R$ (Myr)	$(N^R/N^I)_{ESS}$	$(N^R/N^I)_{UP}$ $\Delta_1 = 0$ Myr
²³⁸ U	²³² Th	<i>r; r</i>	$6.45 \times 10^3; 2.03 \times 10^4$	0.438	0.388
²³⁵ U	²³⁸ U	<i>r; r</i>	$1.02 \times 10^3; 6.45 \times 10^3$	0.312	0.289
²⁴⁴ Pu	²³² Th	<i>r; r</i>	$115; 2.03 \times 10^4$	3×10^{-3}	5.6×10^{-3}
	²³⁸ U	<i>r; r</i>	$115; 6.45 \times 10^3$	6×10^{-3}	1.4×10^{-2}
²⁴⁷ Cm	²³⁵ U	<i>r; r</i>	$22.5; 1.02 \times 10^3$	$(< 2 \times 10^{-3}; < 10^{-4})$	8.9×10^{-3}
¹⁸² Hf	¹⁸⁰ Hf	<i>r; r, s</i>	13; stable	2.0×10^{-4}	4.5×10^{-4}
¹⁴⁶ Sm	¹⁴⁴ Sm	<i>p; p</i>	148; stable	1.0×10^{-2}	1.5×10^{-2}
⁹² Nb	⁹³ Nb	<i>p; s</i>	52; stable	?	1.0×10^{-4}
¹³⁵ Cs	¹³³ Cs	<i>r, s; r, s</i>	2.9; stable	$1.6 \times 10^{-4}?$	2.1×10^{-4}
²⁰⁵ Pb	²⁰⁴ Pb	<i>s; s</i>	22; stable	?	-
¹²⁹ I	¹²⁷ I	<i>r; r, s</i>	23; stable	1.0×10^{-4}	$(2-5) \times 10^{-3}$
¹⁰⁷ Pd	¹⁰⁸ Pd	<i>s, r; r, s</i>	9.4; stable	2.0×10^{-5}	6.2×10^{-4}
⁶⁰ Fe	⁵⁶ Fe	<i>eq, exp, s</i>	2.2; stable	$(2 \times 10^{-7}; 2 \times 10^{-6})$	5×10^{-7}
⁵³ Mn	⁵⁵ Mn	<i>p, exp; exp</i>	5.3; stable	$(\sim 6 \times 10^{-5}; 5 \times 10^{-6})$	$\sim 1 \times 10^{-4}$
⁴¹ Ca	⁴⁰ Ca	<i>s, exp; exp</i>	0.15; stable	1.5×10^{-8}	2×10^{-8}
³⁶ Cl	³⁵ Cl	<i>s; exp</i>	0.43; stable	5×10^{-6}	3.8×10^{-7}
²⁶ Al	²⁷ Al	<i>p; exp</i>	1.03; stable	5×10^{-5}	$\sim 10^{-7}$
¹⁰ Be	⁹ Be	spallation	2.3; stable	1×10^{-3}	0

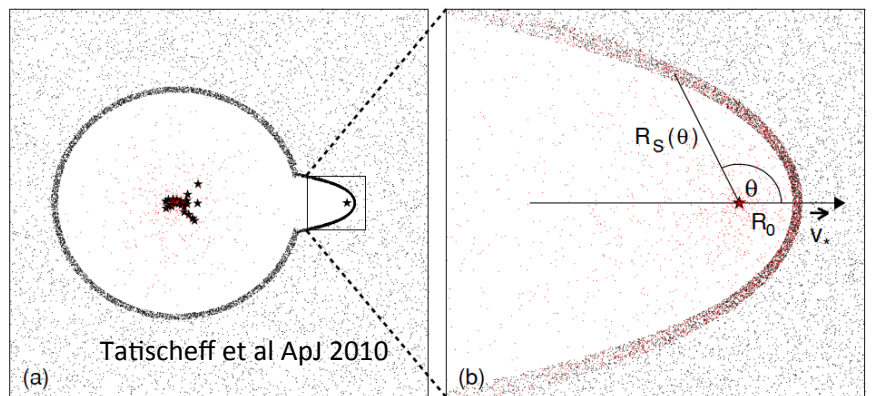
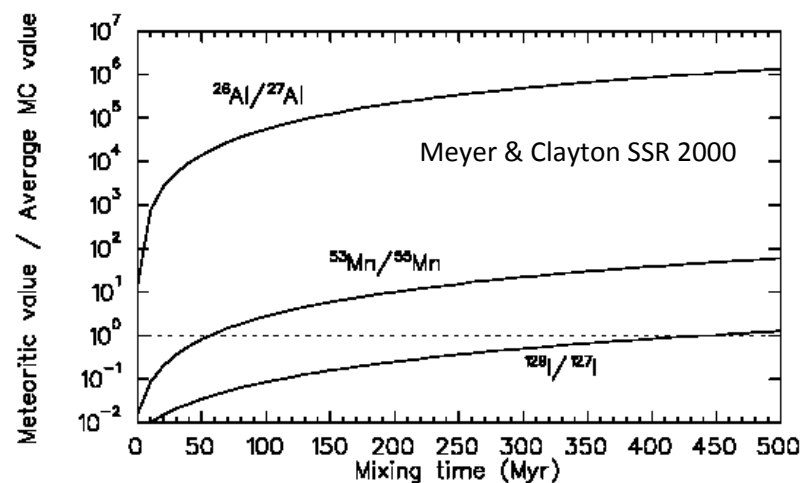
Wasserburg et al Nucl. Phys; A 2006

- Le contexte de naissance du système solaire est-il générique ou particulier ?
- Le système solaire s'est-il formé à proximité d'une étoile particulière en fin de vie ?
- Quel était le site de nucléosynthèse par irradiation ?



HH30, HST, (@Burrows, STSci/ESA, WFPC2, NASA)

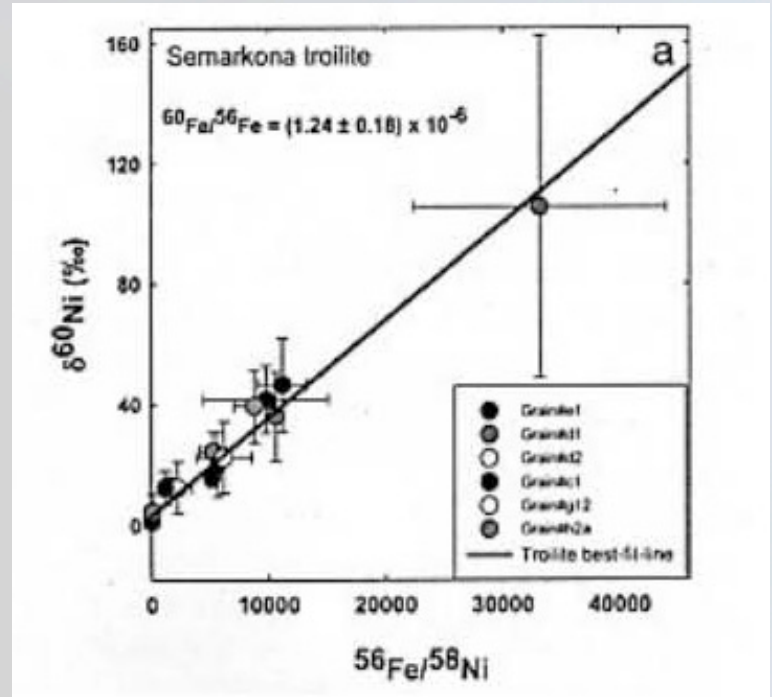
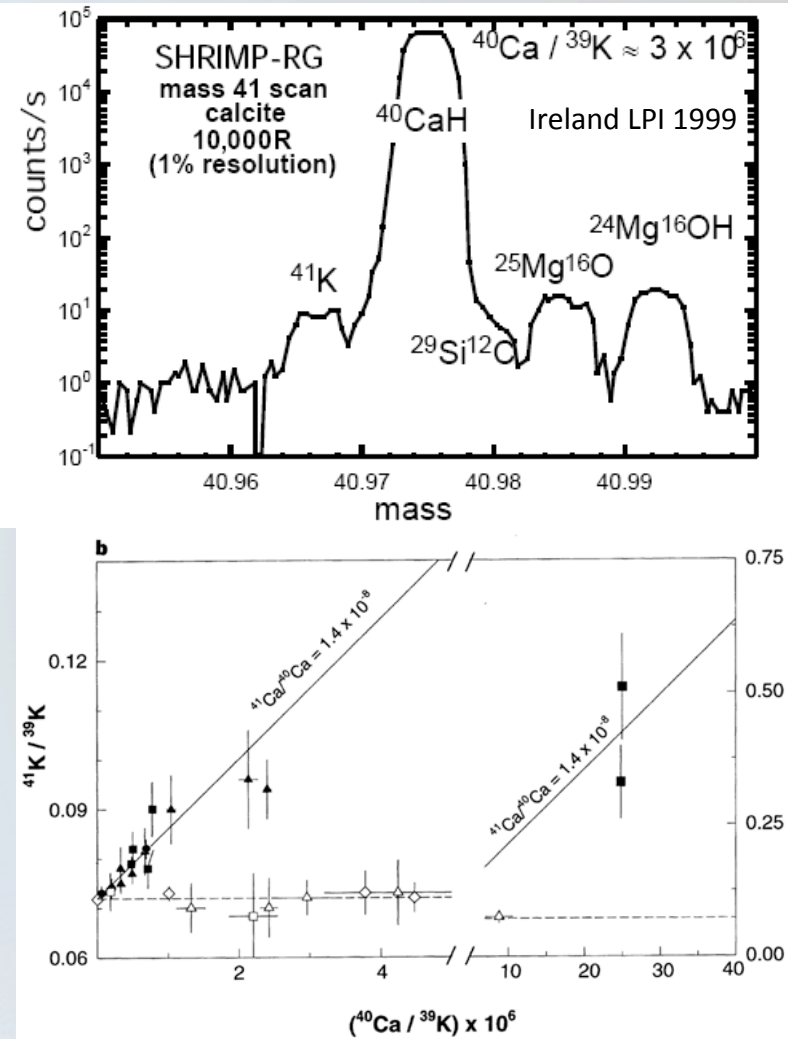
BRADLEY S. MEYER AND DONALD D. CLAYTON



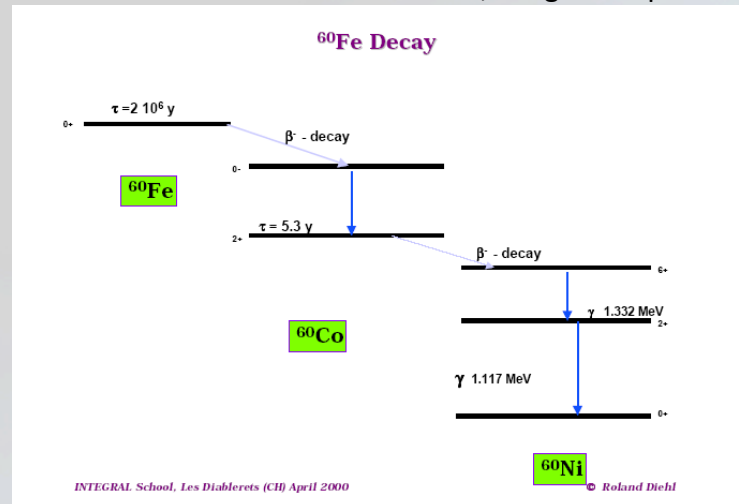
Tatischeff et al ApJ 2010

Le cas du ^{41}Ca , un challenge pour la spectrométrie de masse

^{60}Fe , the smoking gun



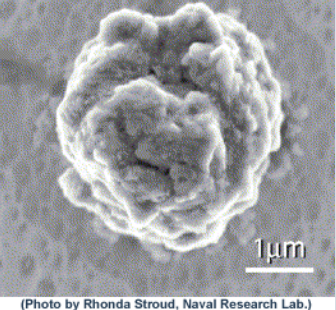
Mostefaoui et al 2004, Tang & Dauphas 2012, ...



$^{41}\text{Ca} \rightarrow ^{41}\text{K}$, $T_{1/2} = 0.1 \text{ Myr}$

^{41}K signal: 1-10 c/s Background ^{40}Ca (10^8 c/s), ^{40}CaH (10^5 c/s), $(^{40}\text{Ca}-^{42}\text{Ca})^{++}$

Take Home message



- Les grains pré-solaires apportent **des contraintes cruciales sur les processus de nucléosynthèse et l'évolution chimique de la galaxie.**
- L'origine des isotopes à courtes durée de vie dans le disque protoplanétaire est un enjeu majeur pour **comprendre le contexte de naissance de notre étoile et l'évolution primitive du disque protoplanétaire.**

Il est indispensable de développer des collaborations avec les équipes d'astrophysique et de cosmochimie travaillant sur ces questions :
IAS, IAP, Meudon, Toulouse, IPAG, MNHN, CRPG, IPGP, ...

