



Leçon N. 3 – 4 Novembre 2025

Alessandro
MORBIDELLI

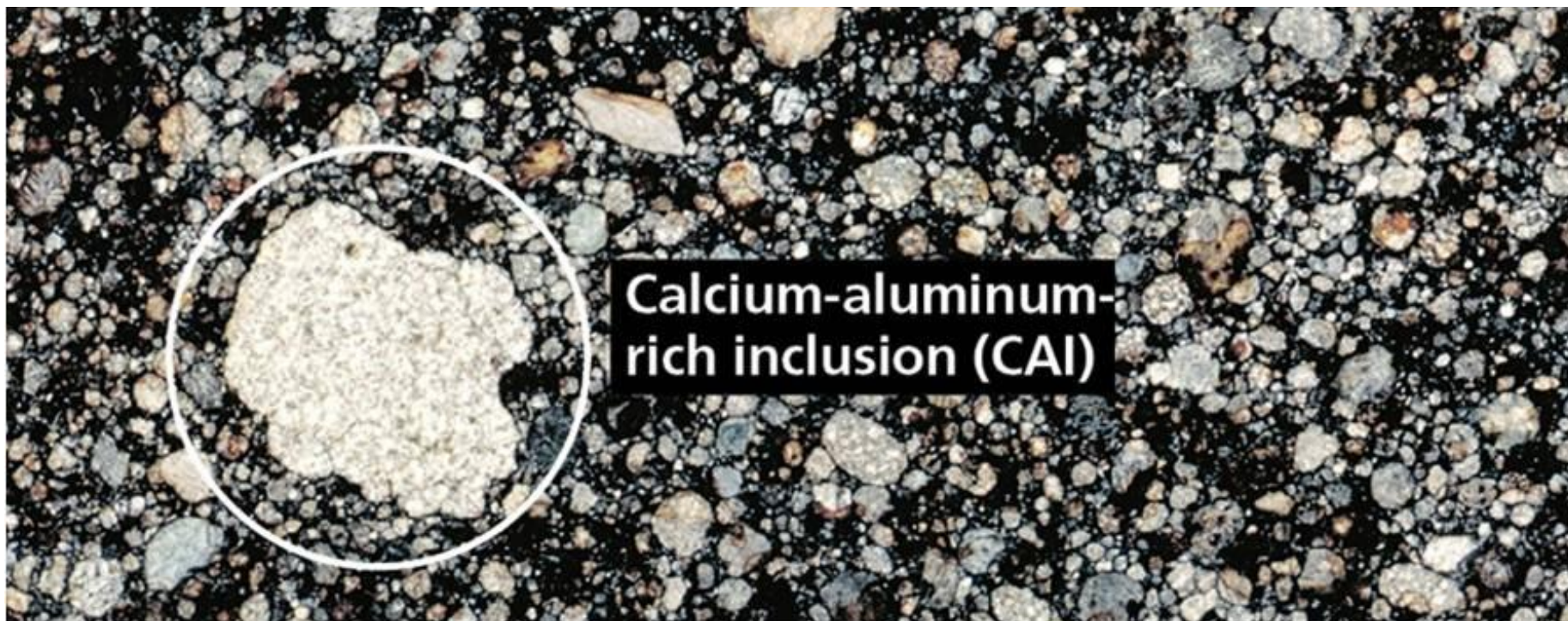
Chaire

Formation planétaire: de la Terre aux exoplanètes

Les inclusions refractaires



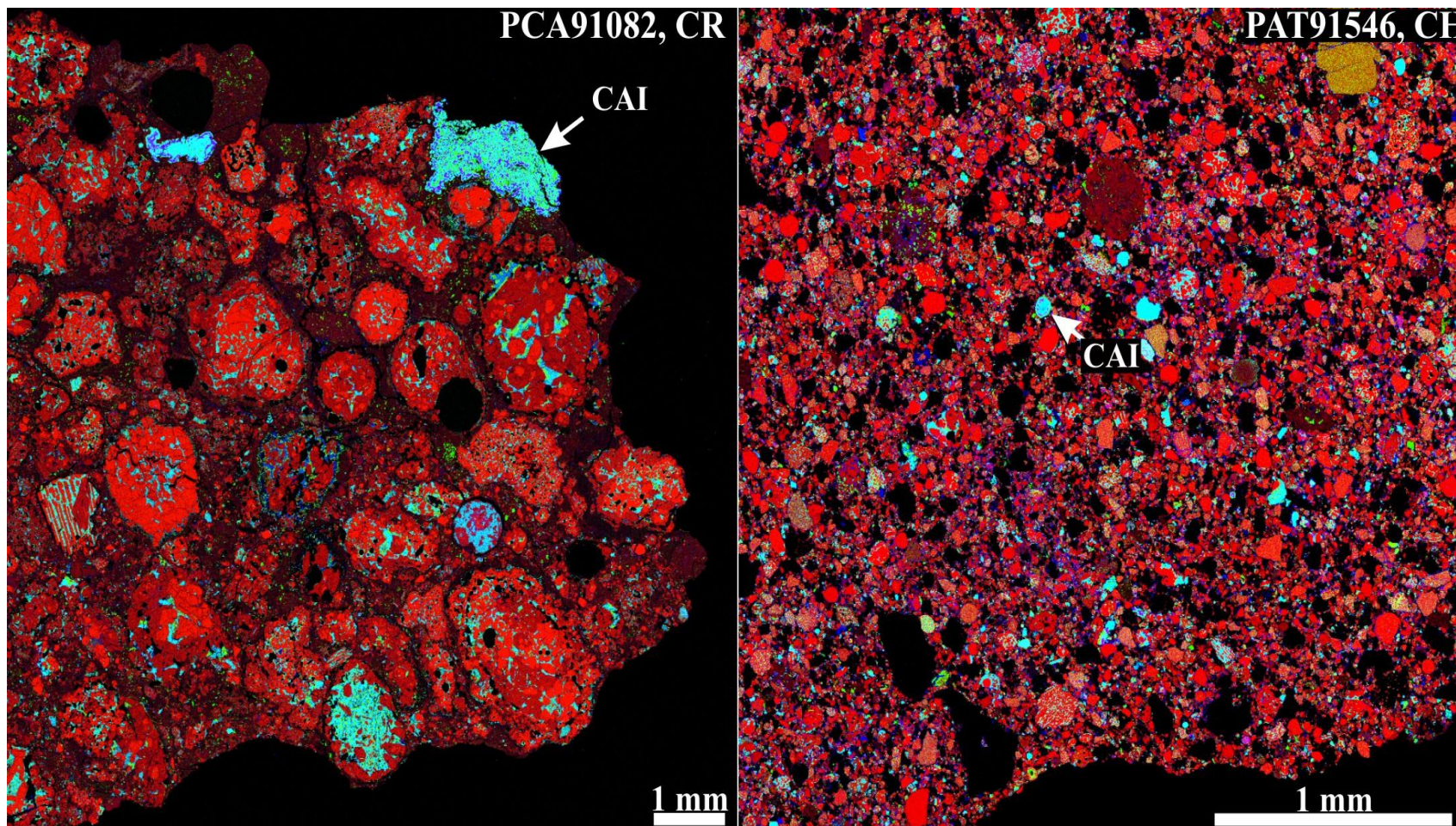
Les inclusions riches en Calcium et Aluminium (CAIs)





Les inclusions riches en Calcium et Aluminium (CAIs)

- Composante mineure des chondrites carbonées: 0.1-15 vol%
- Tailles diverses: 10 μm au cm selon les chondrites

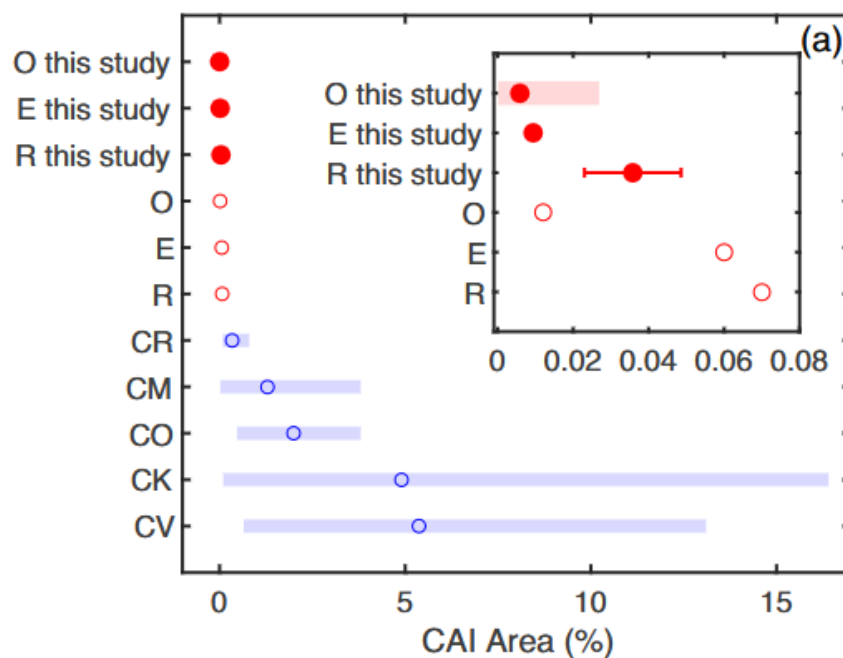




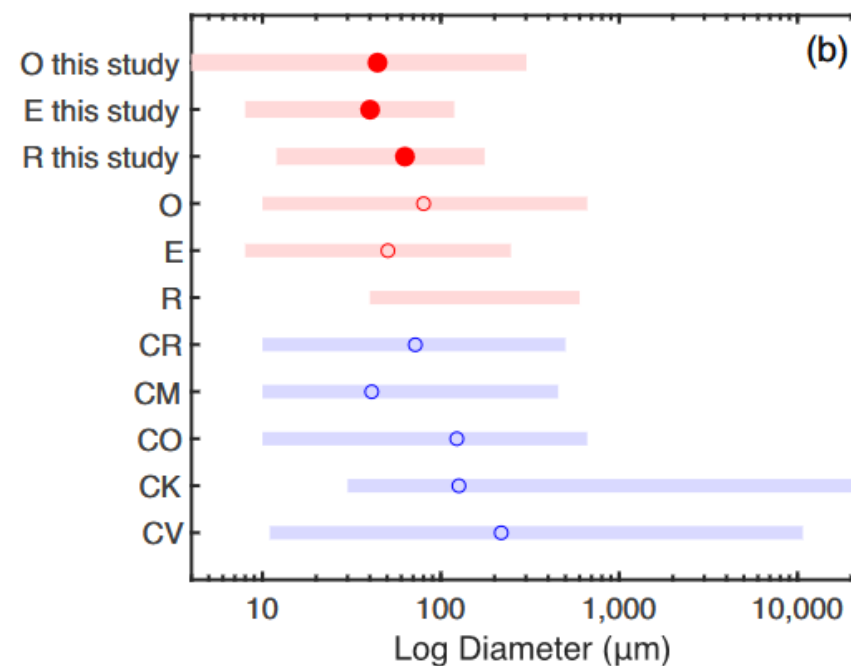
Les inclusions riches en Calcium et Aluminium (CAIs)

- Composante mineure des chondrites carbonées: 0.1-15 vol%
- Tailles diverses: 10 μm au cm selon les chondrites

Abondance des CAIs dans les météorites



Tailles des CAIs dans les météorites

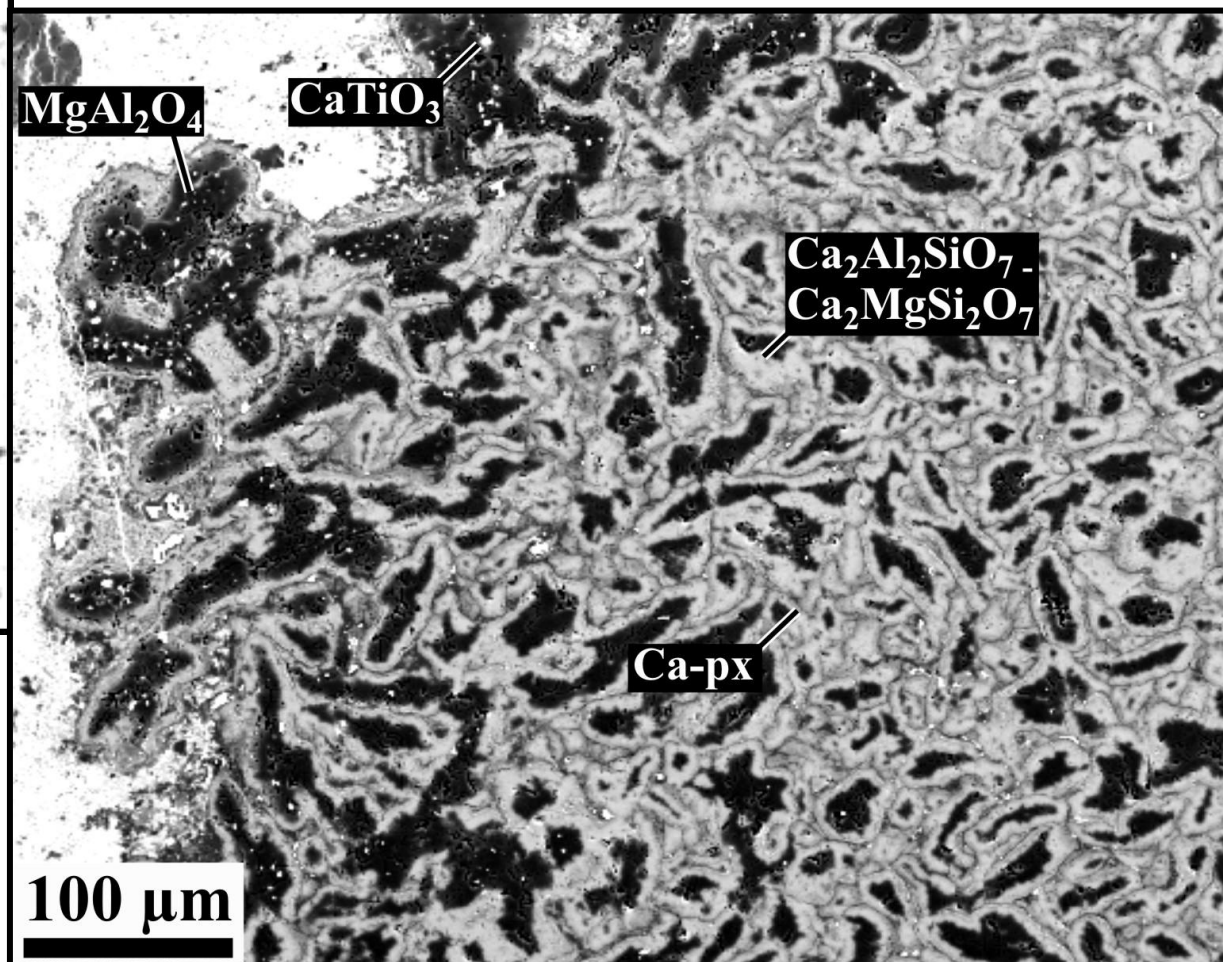
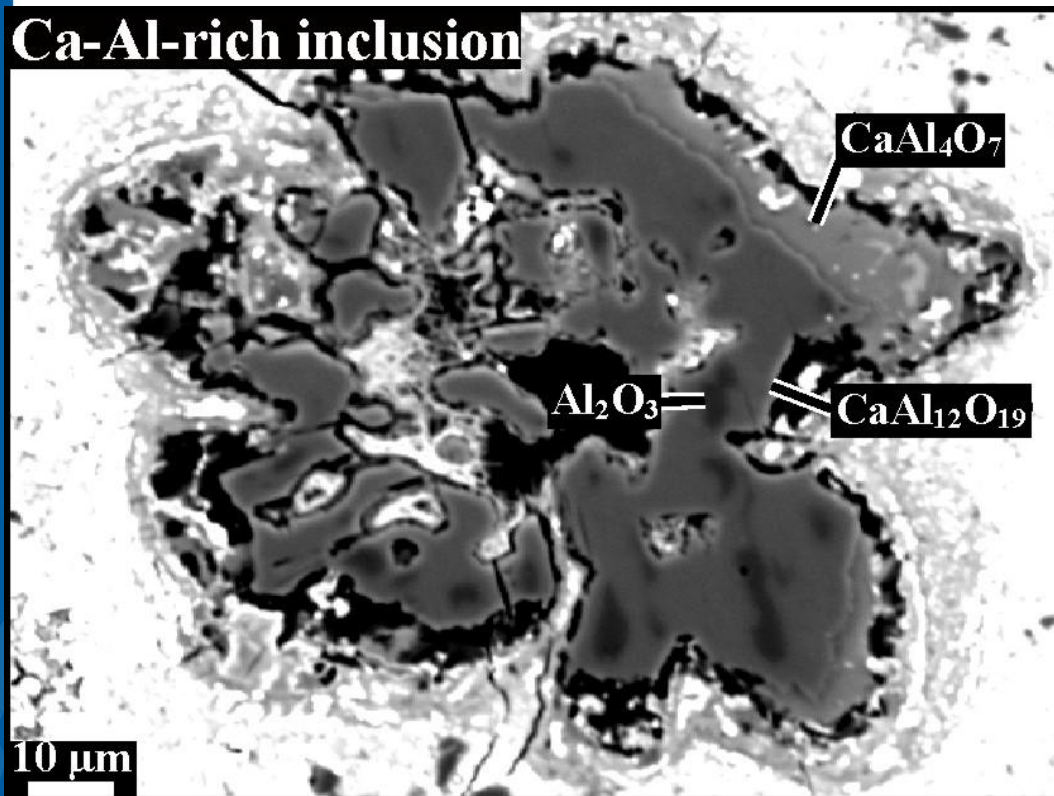


Dunham et al., 2023



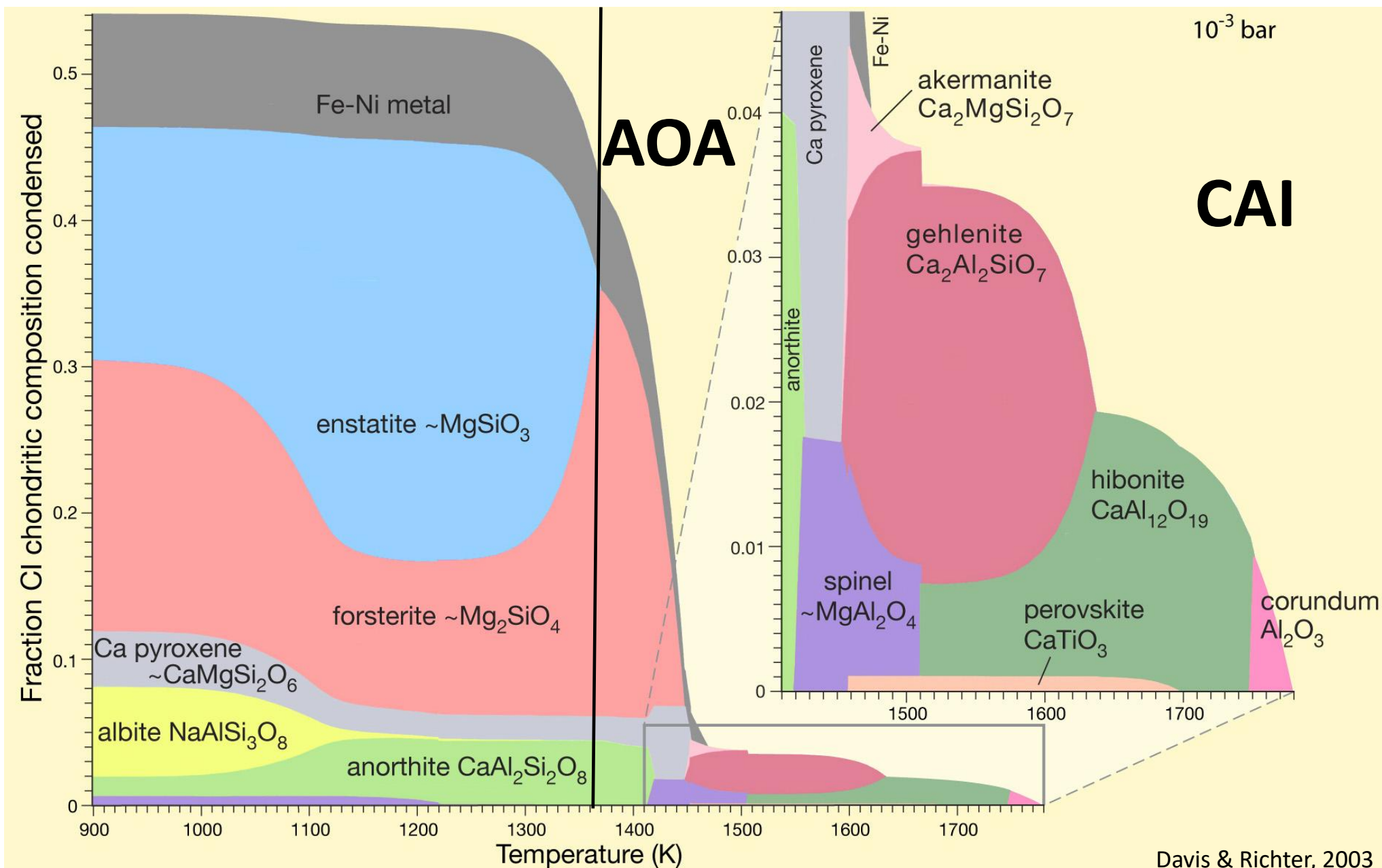
Minéralogie des CAIs

Ca-Al-rich inclusion



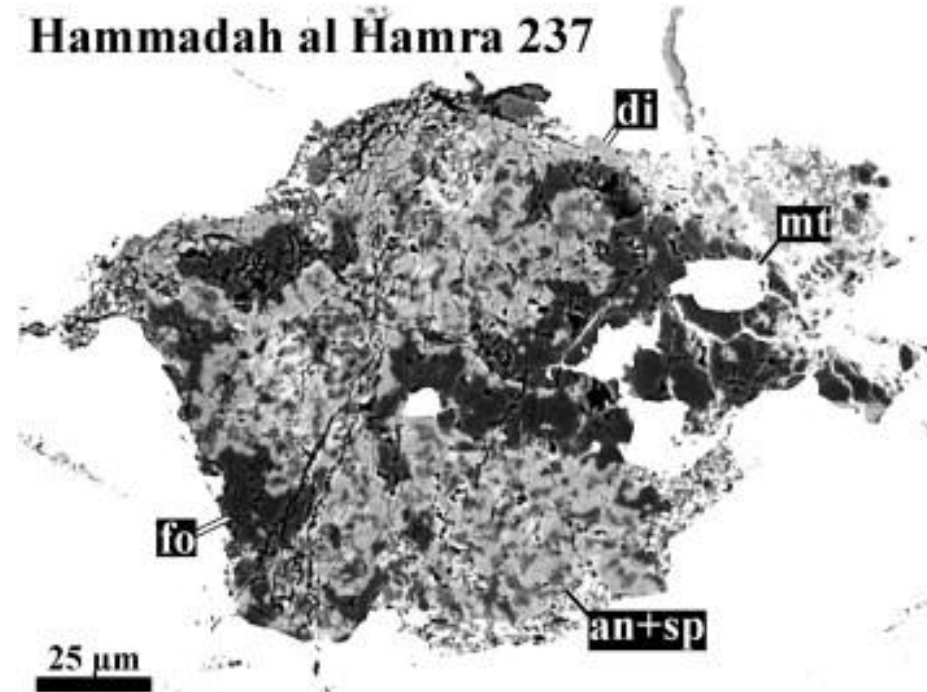
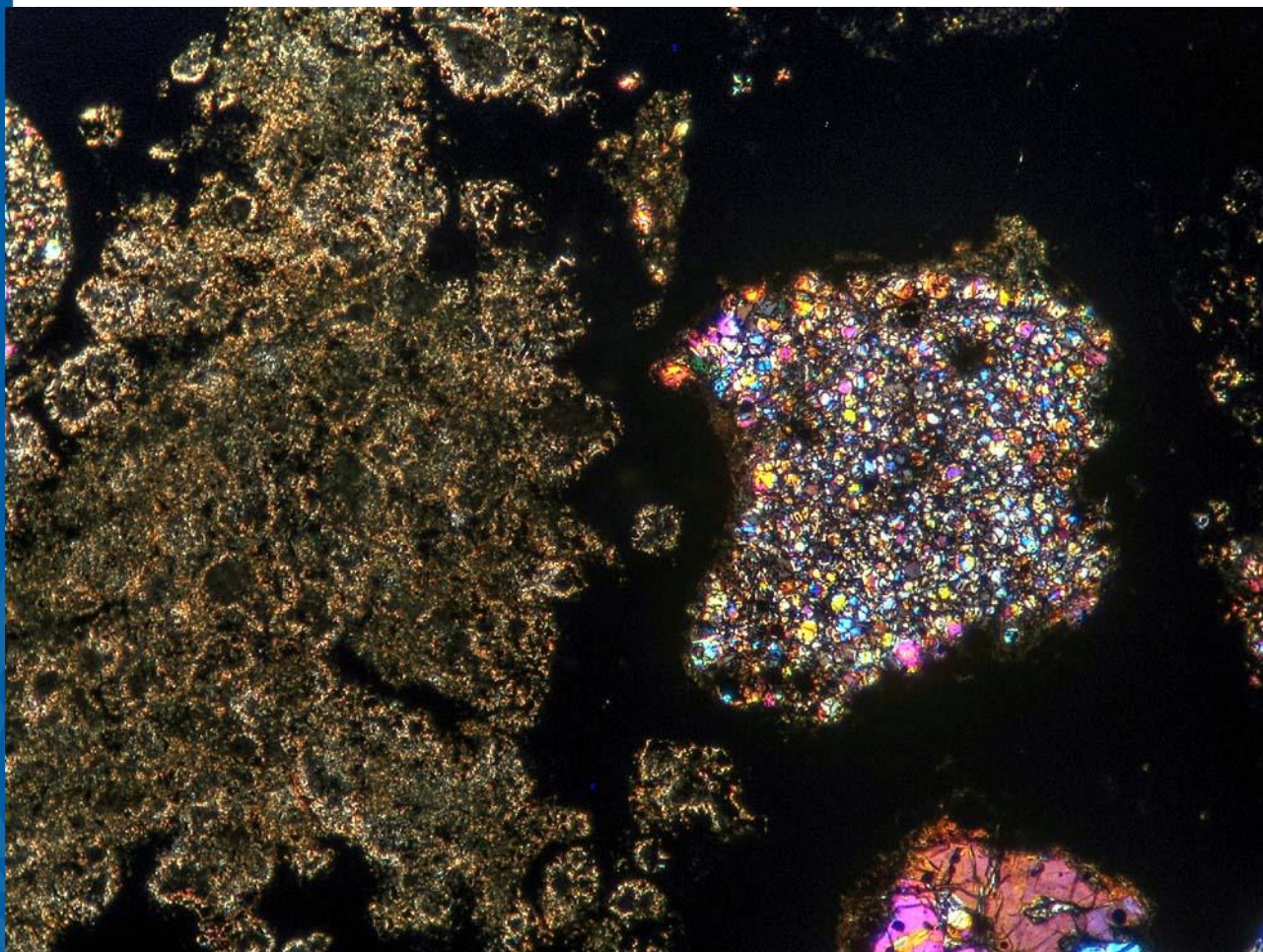


La séquence de condensation – condensation fractionnée





Les agrégats d'olivine en forme d'amiboïde (AOA)



Krot et al., 2004

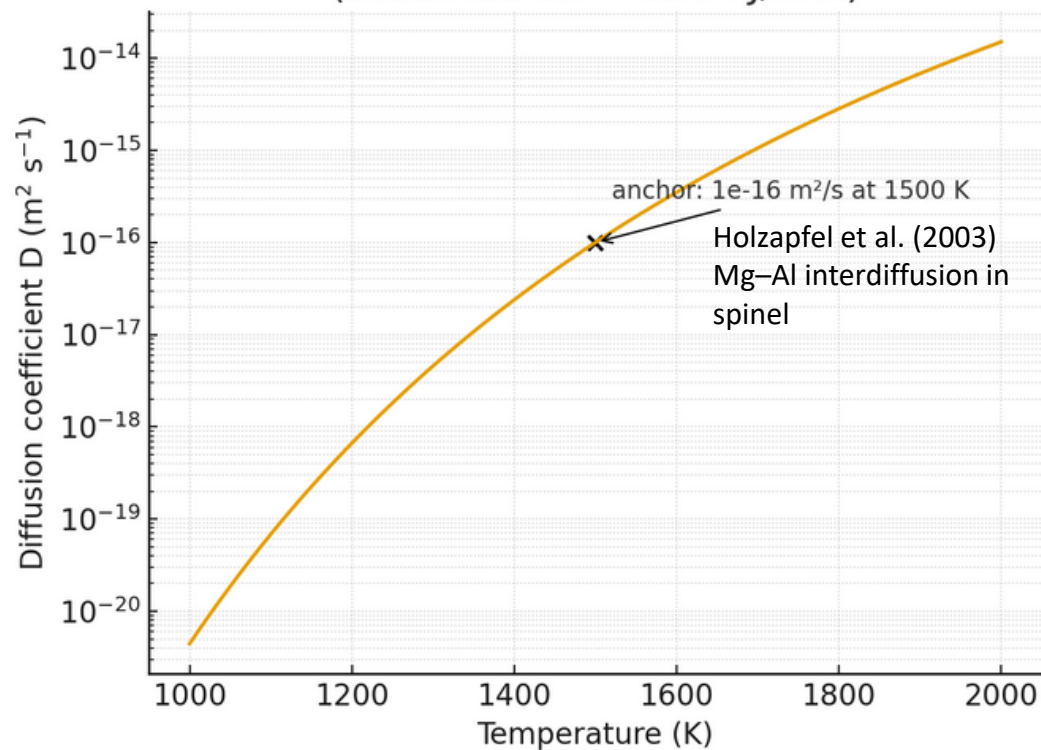


Sortie de la séquence de condensation (fractionnement)

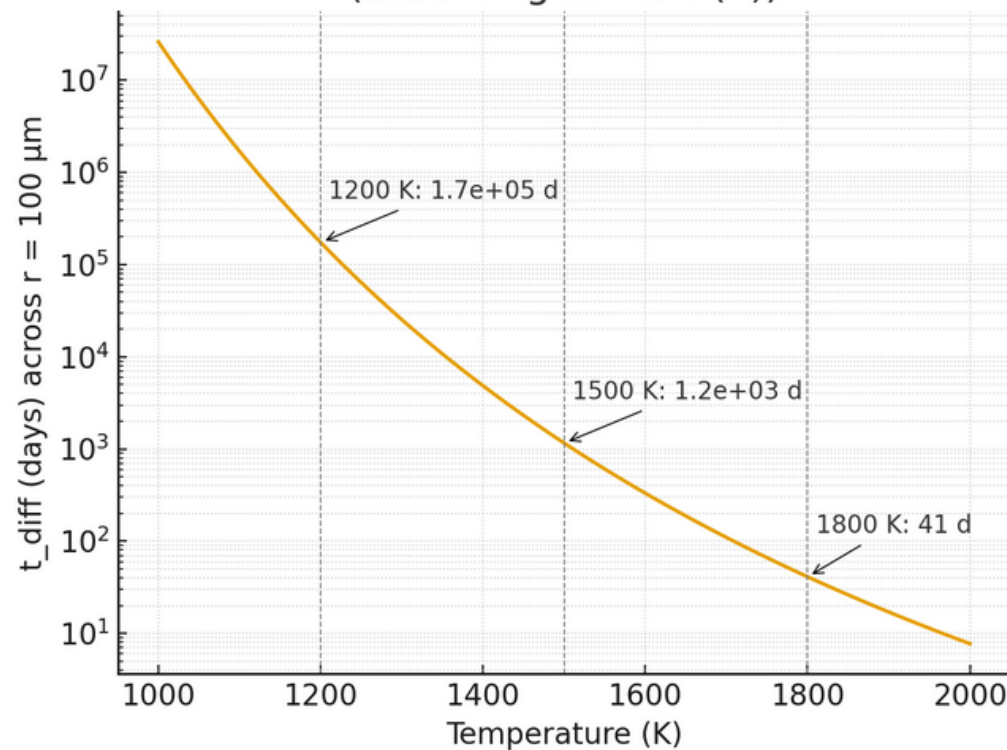
Pour qu'un grain reste en équilibre avec le gaz, le temps de diffusion à l'intérieur du solide (nécessaire pour homogénéiser la composition) doit être plus rapide que le temps de refroidissement

$$t_{diff} \sim \frac{r^2}{D} \quad D(T) = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (\text{Loi d'Arrhenius})$$

Arrhenius $D(T)$ — anchored to $D(1500\text{K})=1\text{e-}16 \text{ m}^2/\text{s}$
(assumed $E_a = 250 \text{ kJ/mol}$)

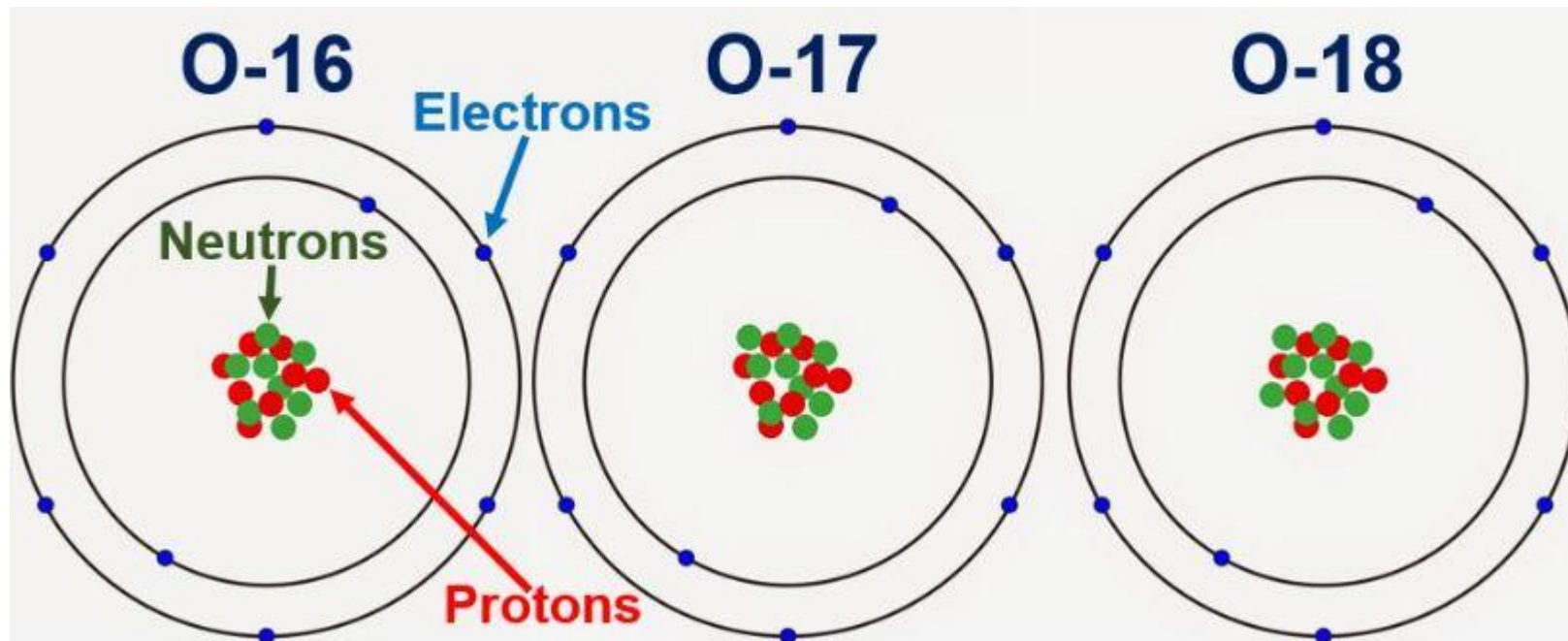


Characteristic diffusion times across $100 \mu\text{m}$
(assuming same $D(T)$)





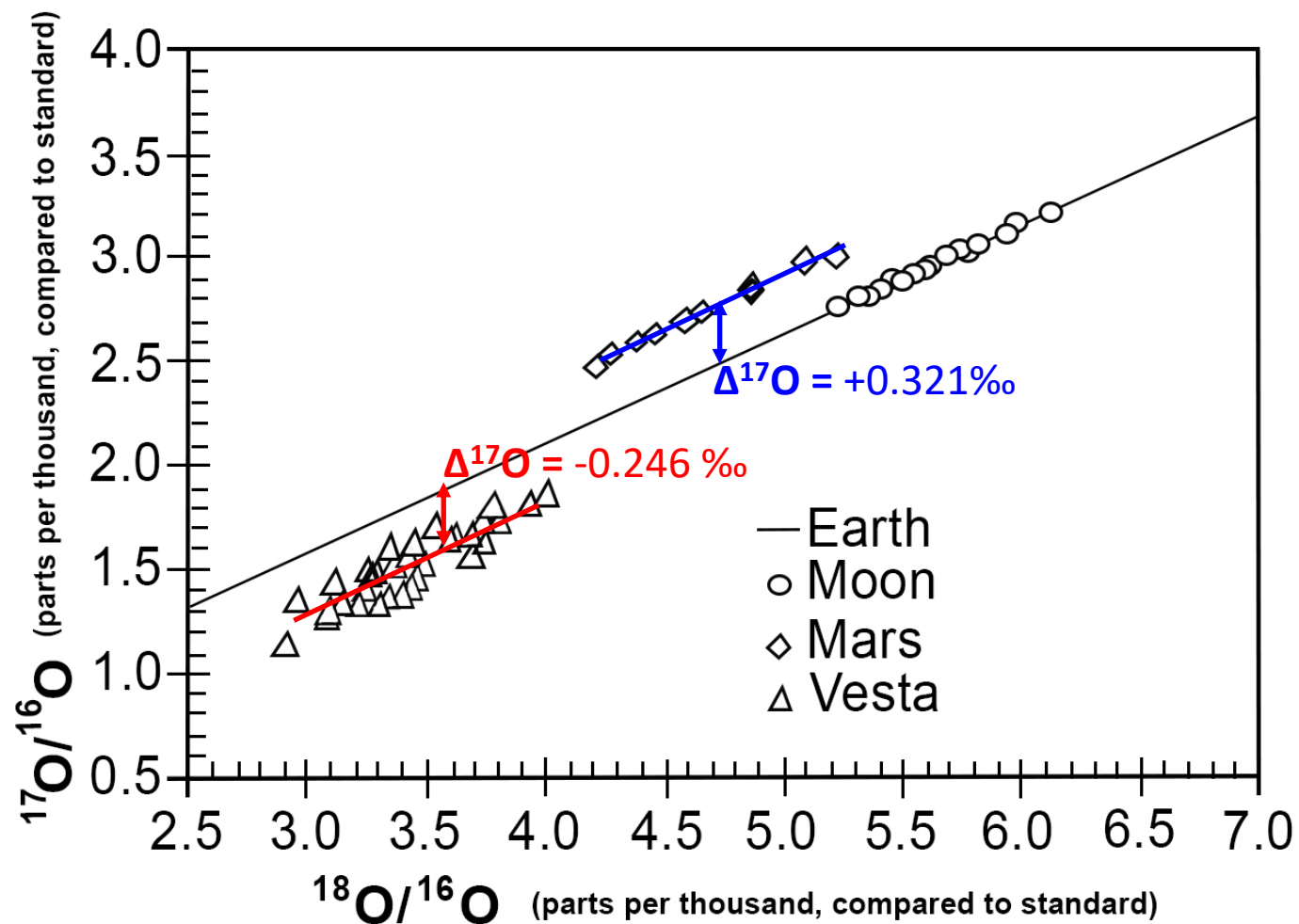
Condensation des CAIs à partir d'un gaz solaire: Contrainte par les isotopes de l'oxygène





Fractionnement dépendant de la masse

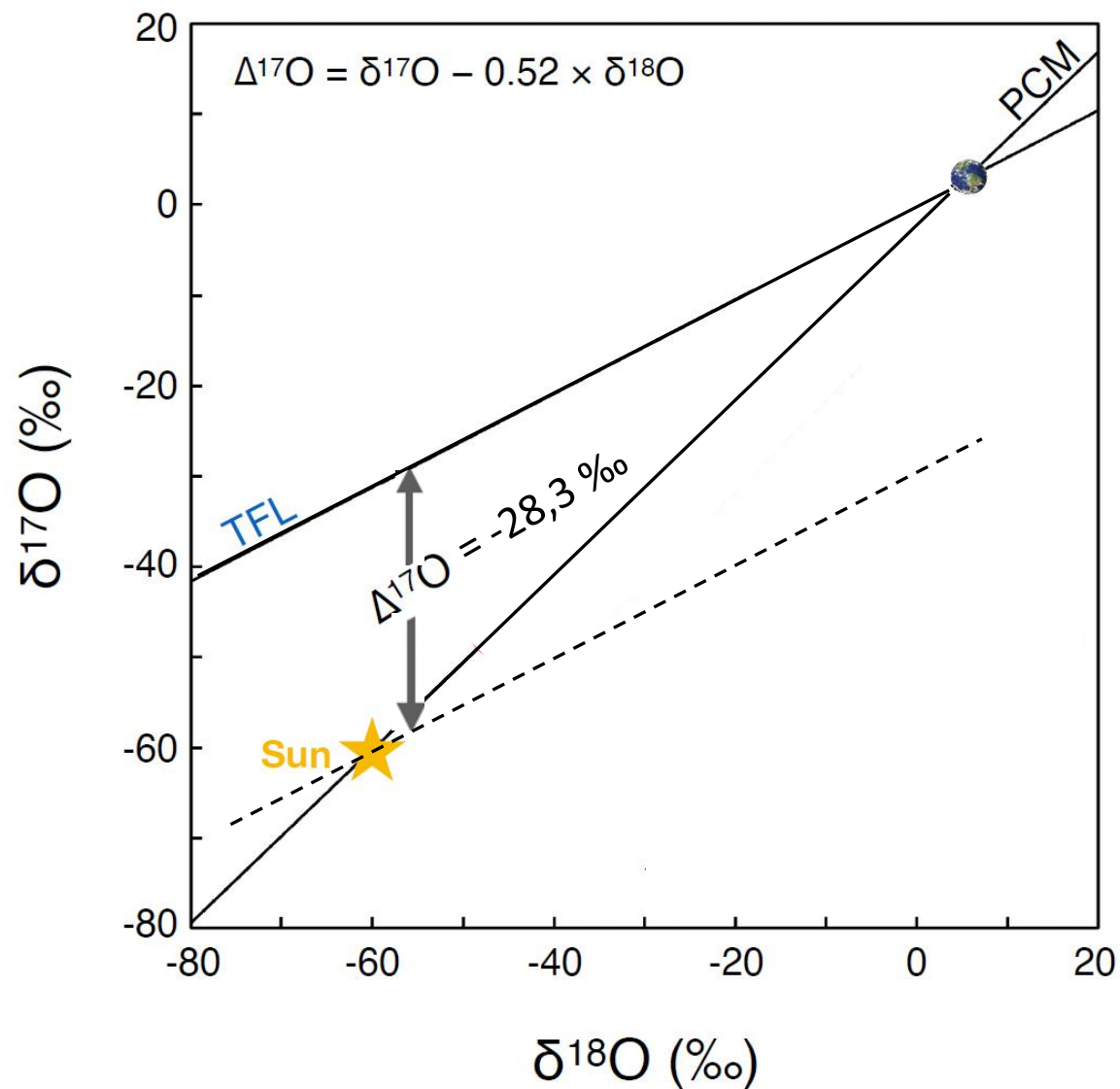
Oxygen Isotope Ratios in Rocks from Earth, Moon, Mars, and Vesta





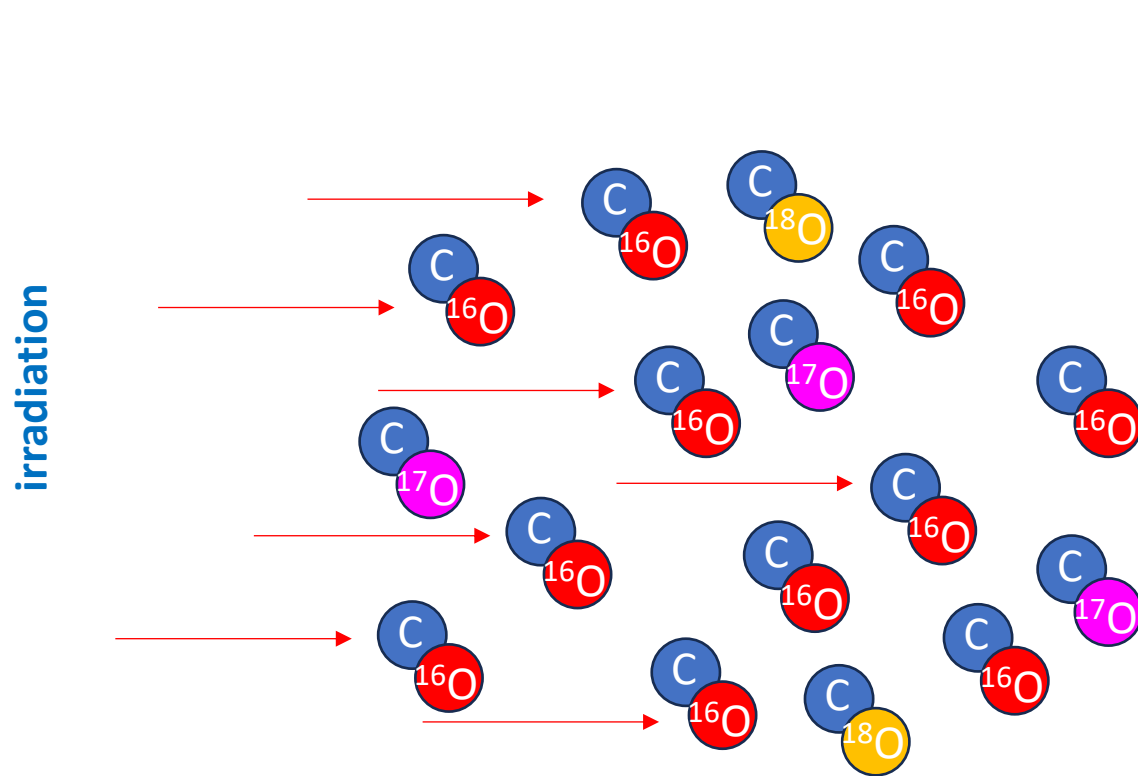
Fractionnement indépendant de la masse

$$\delta^{17,18}\text{O} = \left[\frac{\left(\frac{^{17,18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{Sample}}}{\left(\frac{^{17,18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{SMOW}}} - 1 \right] \times 10^3$$





Origine du fractionnement indépendant de la masse: Auto-écranage du CO



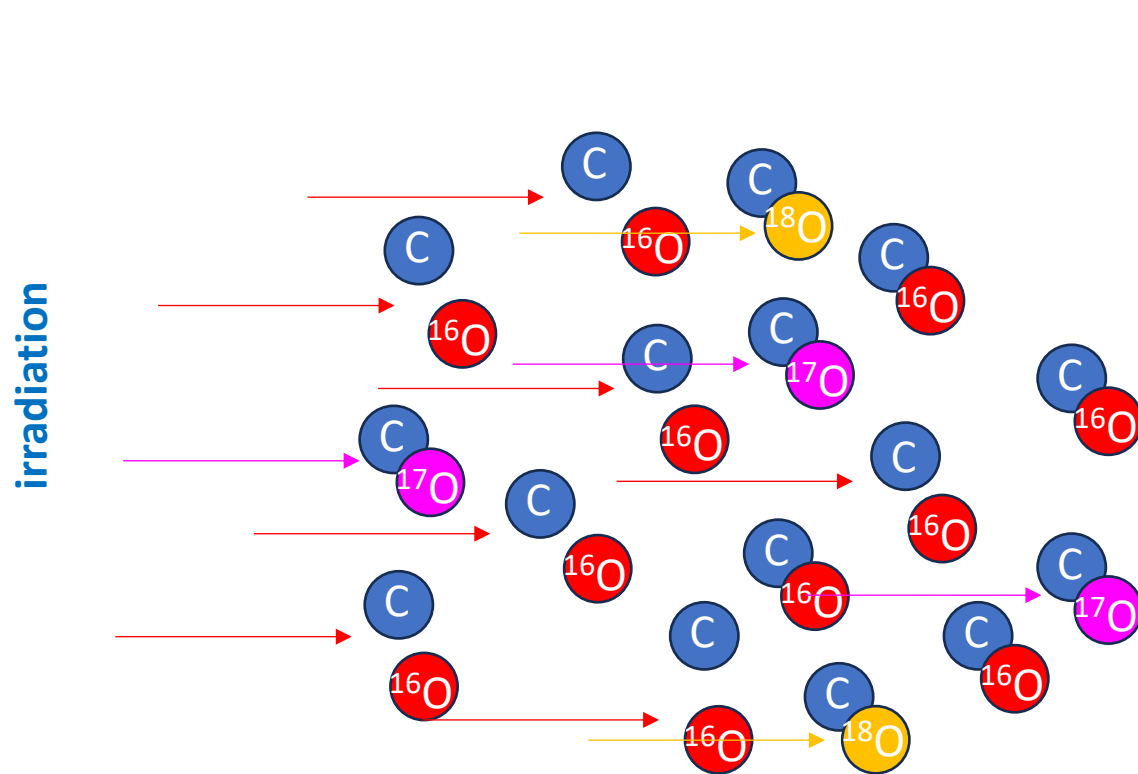
$$^{17}\text{O}/^{16}\text{O}=3/11$$

$$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}=2/11$$

$$^{17}\text{O}/^{18}\text{O}=3/2$$



Origine du fractionnement indépendant de la masse: Auto-écranage du CO



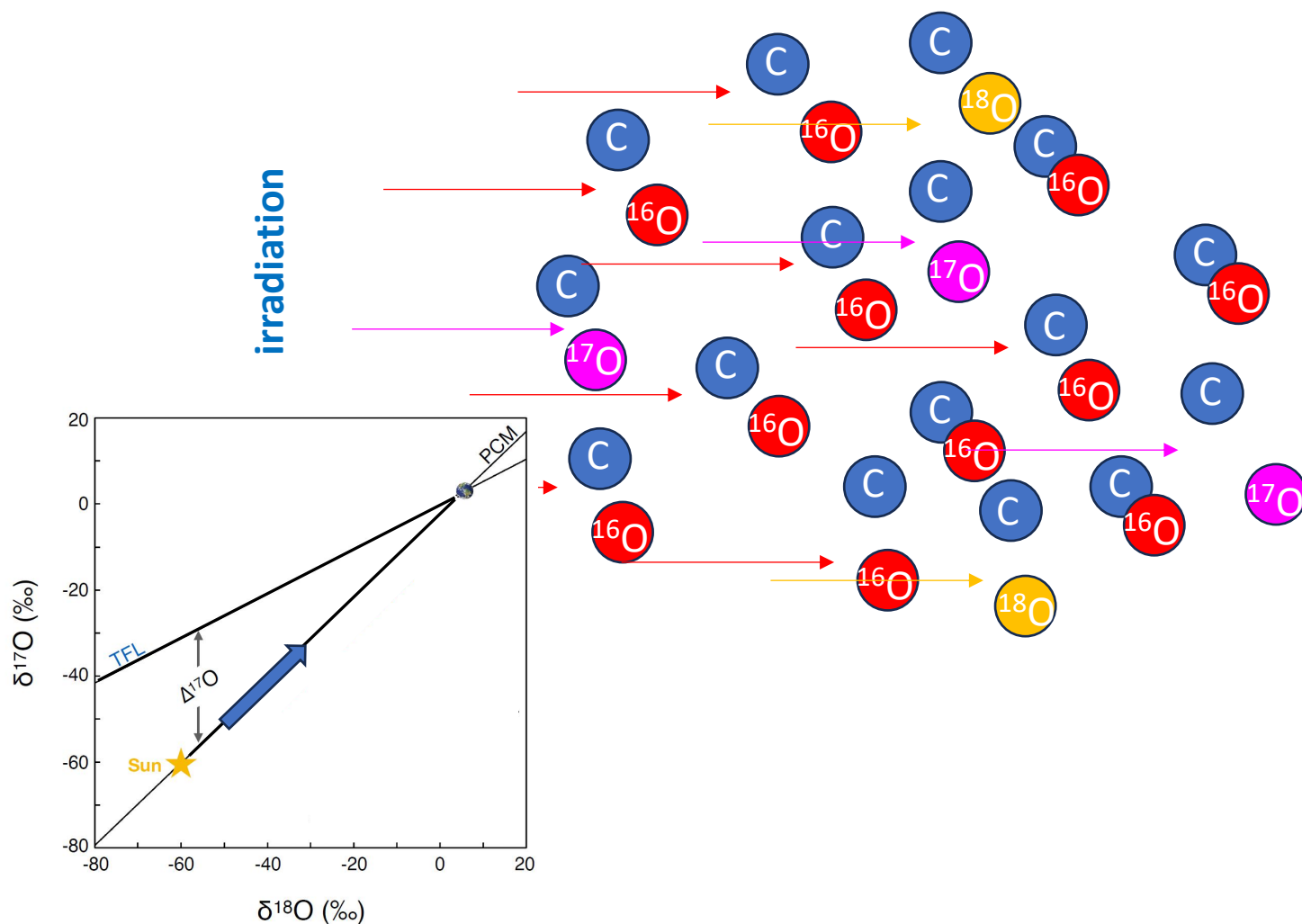
$$^{17}\text{O}/^{16}\text{O}=3/11$$

$$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}=2/11$$

$$^{17}\text{O}/^{18}\text{O}=3/2$$



Origine du fractionnement indépendant de la masse: Auto-écranage du CO



$$^{17}\text{O}/^{16}\text{O}=3/11$$

$$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}=2/11$$

$$^{17}\text{O}/^{18}\text{O}=3/2$$

Dissociated:

$$^{17}\text{O}/^{16}\text{O}=3/7$$

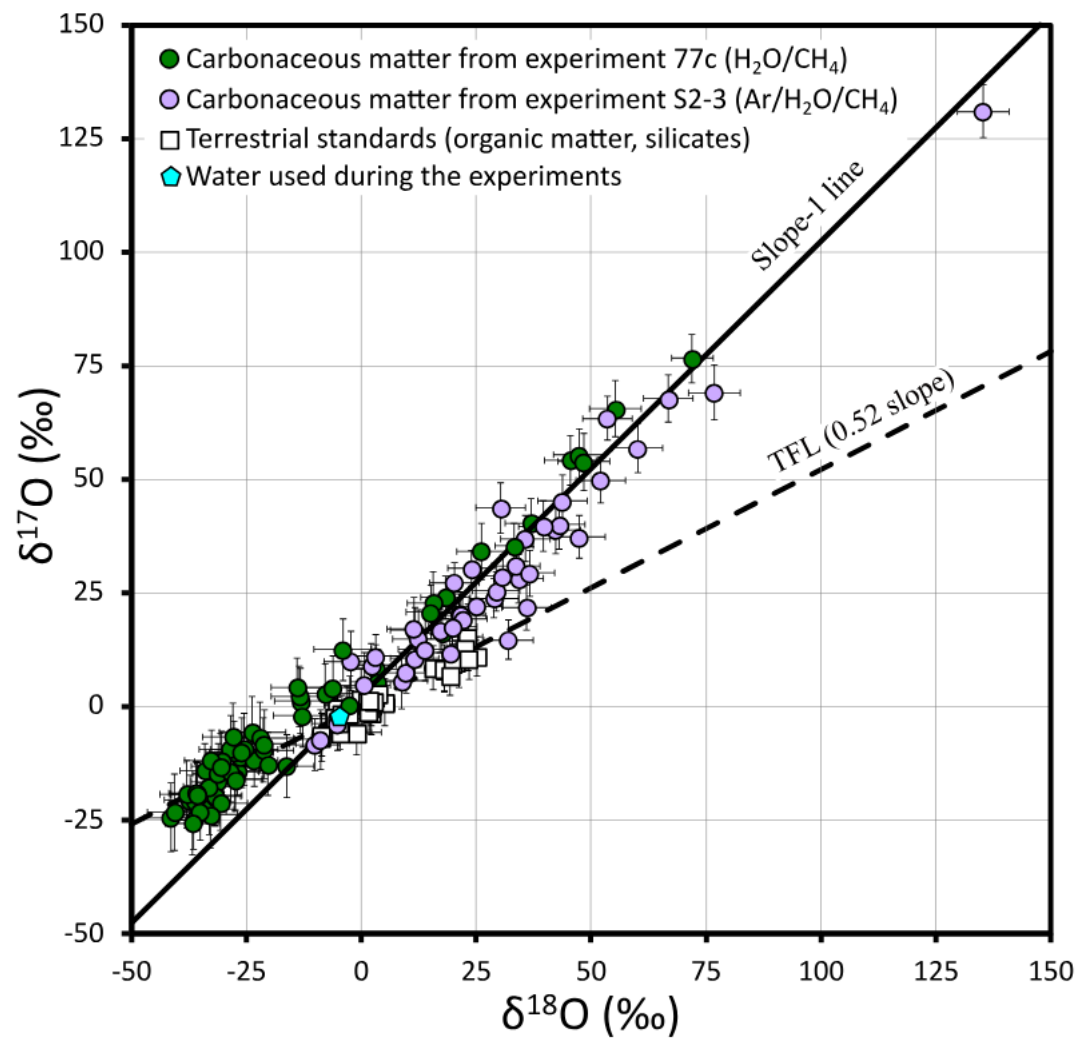
$$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}=2/7$$

$$^{17}\text{O}/^{18}\text{O}=3/2$$

Lyons et Young, 2005



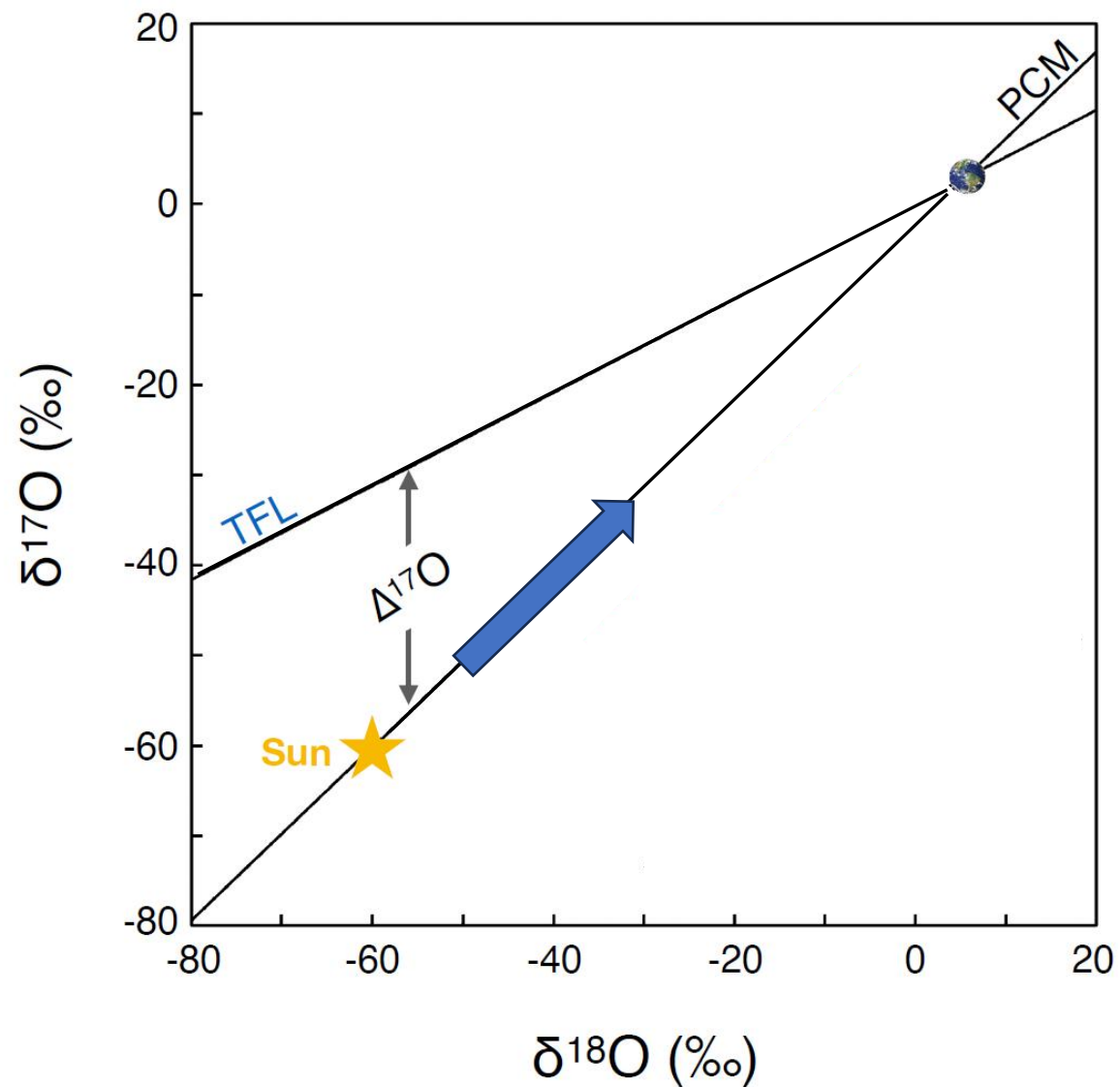
Origine du fractionnement indépendant de la masse: Condensation à partir d'un plasma



Asset et al., 2025

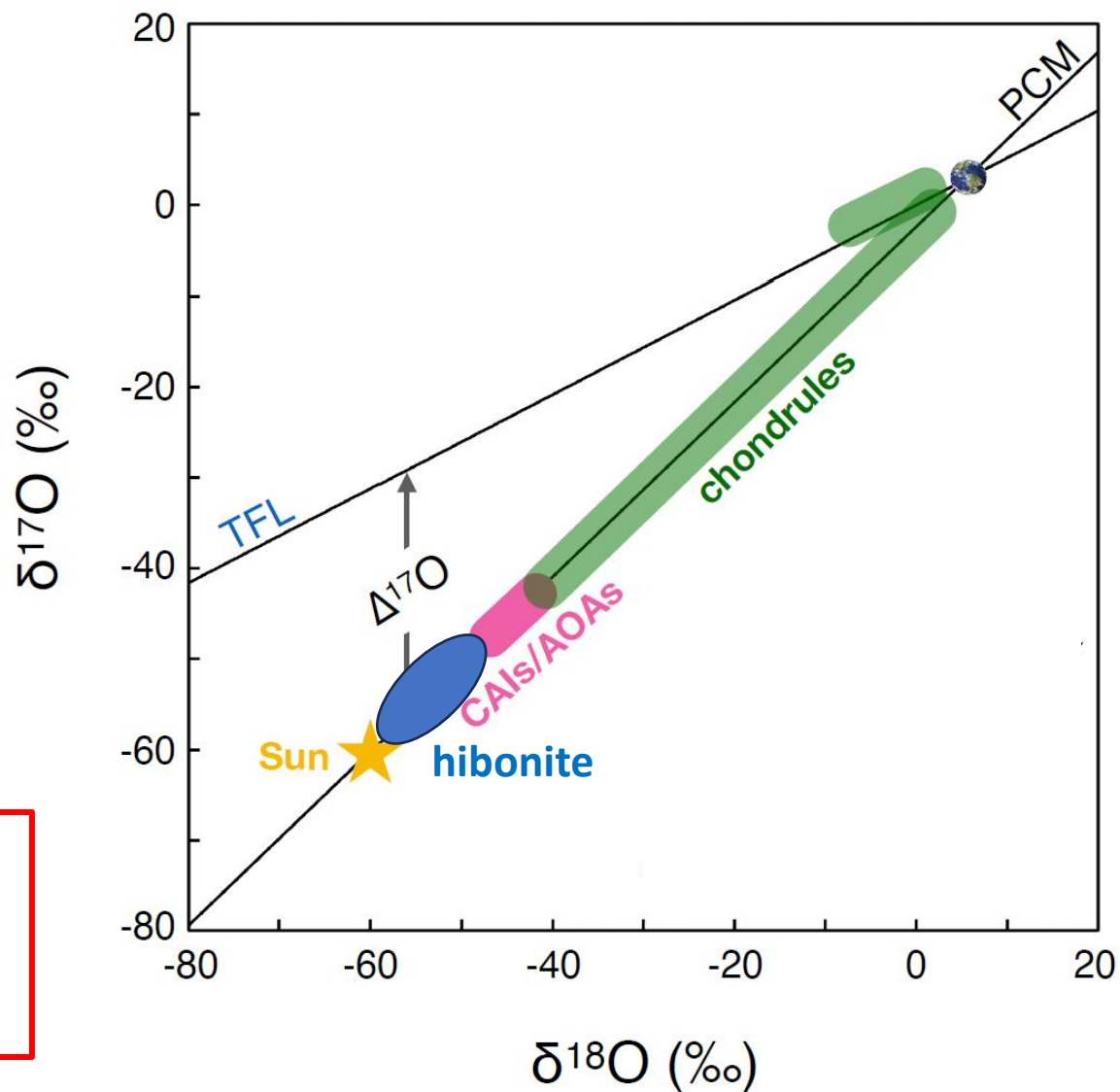


Evolution du $\Delta^{17}\text{O}$

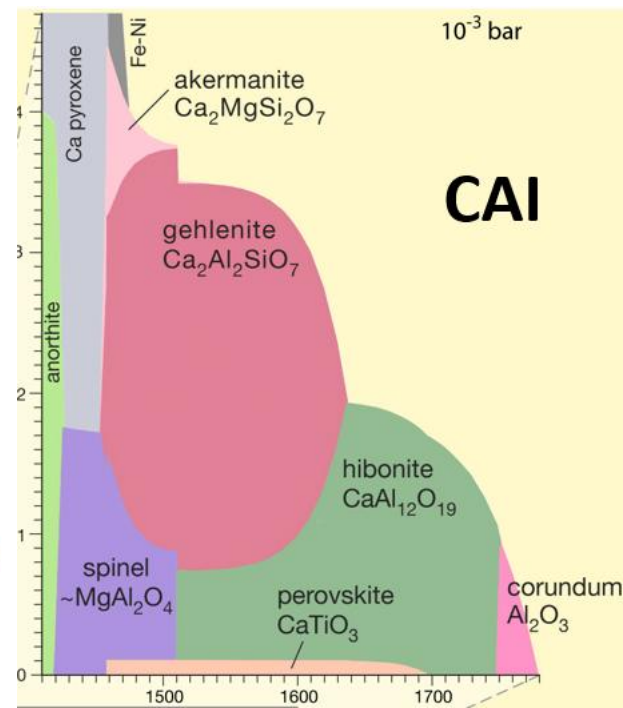




CAIs et AOAs témoins du gaz primordial



Condensation à partir
du gaz "solaire"
Très tôt par rapport à
l'évolution du disque

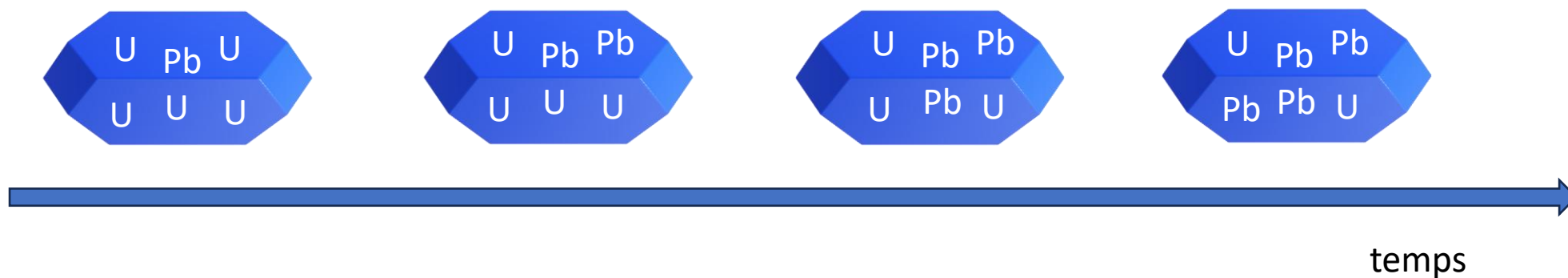




Les âges des CAIs: datation Pb-Pb

^{238}U décroît en ^{206}Pb avec une demi-vie de 4,468 milliards d'années

^{235}U décroît en ^{207}Pb avec une demi-vie de 703,8 millions d'années



$$\left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_P = \left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_I + \left(\frac{^{235}\text{U}}{^{204}\text{Pb}}\right)_P (e^{\lambda_{235}t} - 1)$$

$$\left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_P = \left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_I + \left(\frac{^{238}\text{U}}{^{204}\text{Pb}}\right)_P (e^{\lambda_{238}t} - 1)$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$$

Note: ^{204}Pb n'est pas radiogénique



Les ages des CAIs: datation Pb-Pb

$$\left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_P = \left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_I + \left(\frac{^{235}\text{U}}{^{204}\text{Pb}}\right)_P (e^{\lambda_{235}t} - 1)$$

$$\left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_P = \left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_I + \left(\frac{^{238}\text{U}}{^{204}\text{Pb}}\right)_P (e^{\lambda_{238}t} - 1)$$

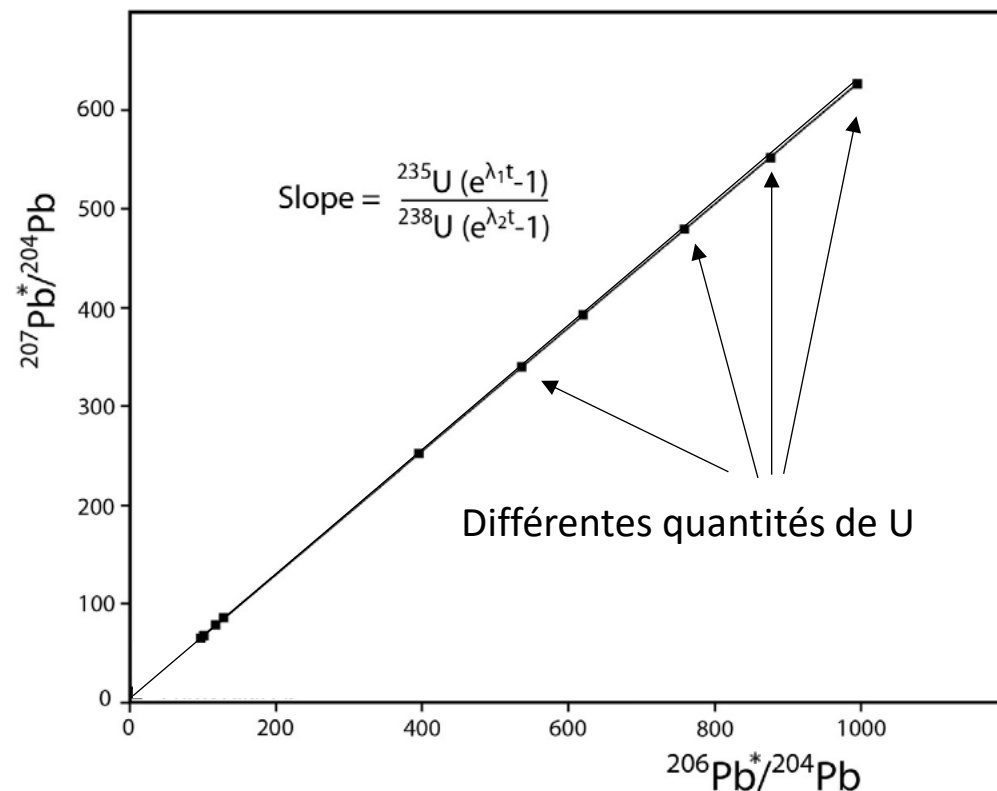
Peut être réécrite comme:

$$\left[\frac{\left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_P - \left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_I}{\left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_P - \left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}\right)_I} \right] = \left(\frac{1}{137.88} \right) \left(\frac{e^{\lambda_{235}t} - 1}{e^{\lambda_{238}t} - 1} \right)$$

radiogénique

où $(^{235}\text{U}/^{238}\text{U})_P = 1/137.88$

Si valeurs radiogéniques connues



Connelly et al., 2017



Les ages des CAIs: datation Pb-Pb

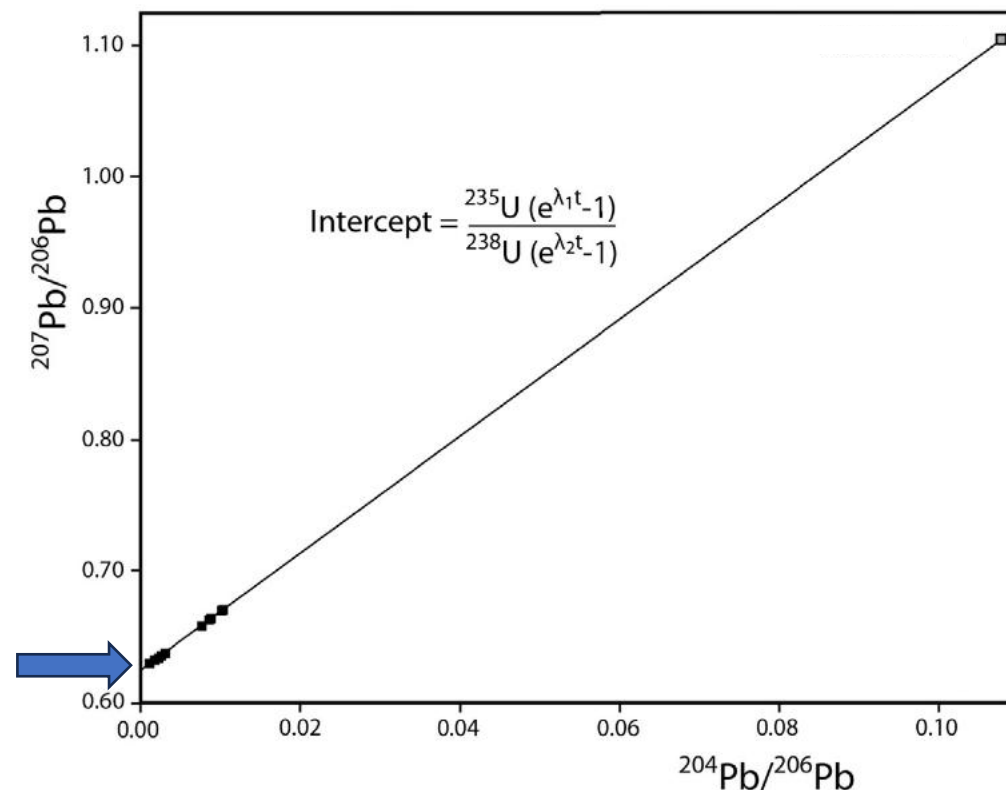
$$\left(\frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}}\right)_P = \left(\frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}}\right)_I + \left(\frac{{}^{235}\text{U}}{{}^{204}\text{Pb}}\right)_P (e^{\lambda_{235}t} - 1)$$

$$\left(\frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}}\right)_P = \left(\frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}}\right)_I + \left(\frac{{}^{238}\text{U}}{{}^{204}\text{Pb}}\right)_P (e^{\lambda_{238}t} - 1)$$

Si $({}^{204}\text{Pb})_P = ({}^{204}\text{Pb})_I = 0$ alors $({}^{206}\text{Pb})_I = 0$ et $({}^{207}\text{Pb})_I = 0$

Par conséquent:

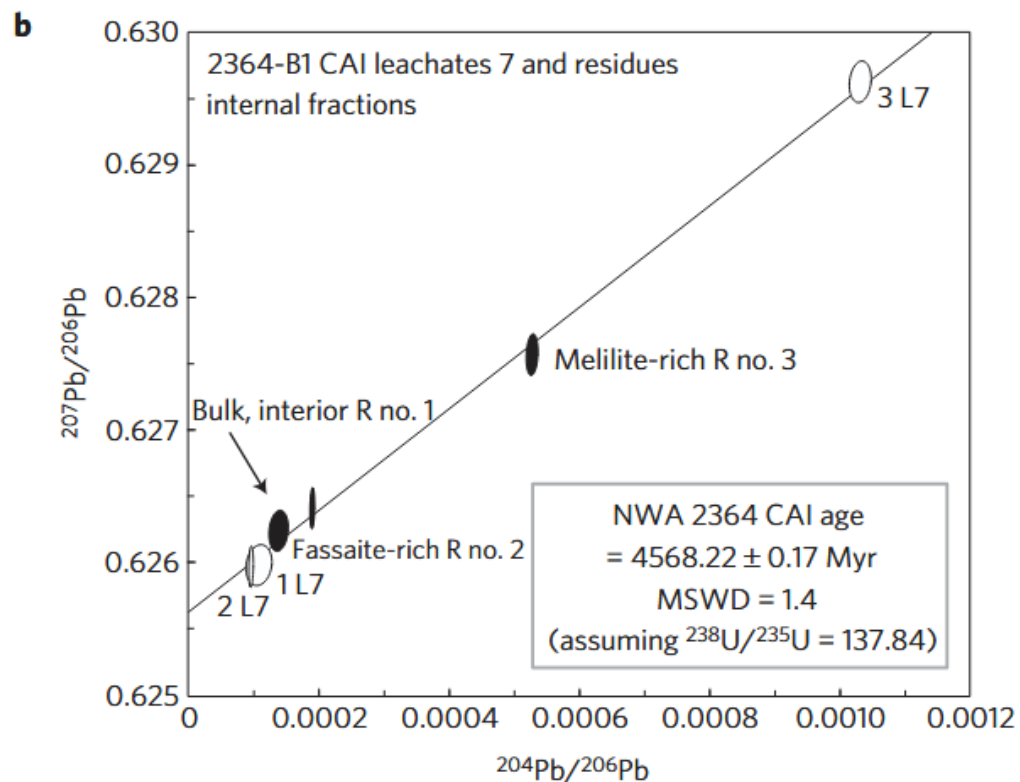
$$\left(\frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{206}\text{Pb}}\right)_P = \left(\frac{{}^{207}\text{Pb}^*}{{}^{206}\text{Pb}^*}\right) = \left(\frac{{}^{235}\text{U}}{{}^{238}\text{U}}\right)_P \left(\frac{e^{\lambda_{235}t} - 1}{e^{\lambda_{238}t} - 1}\right)$$



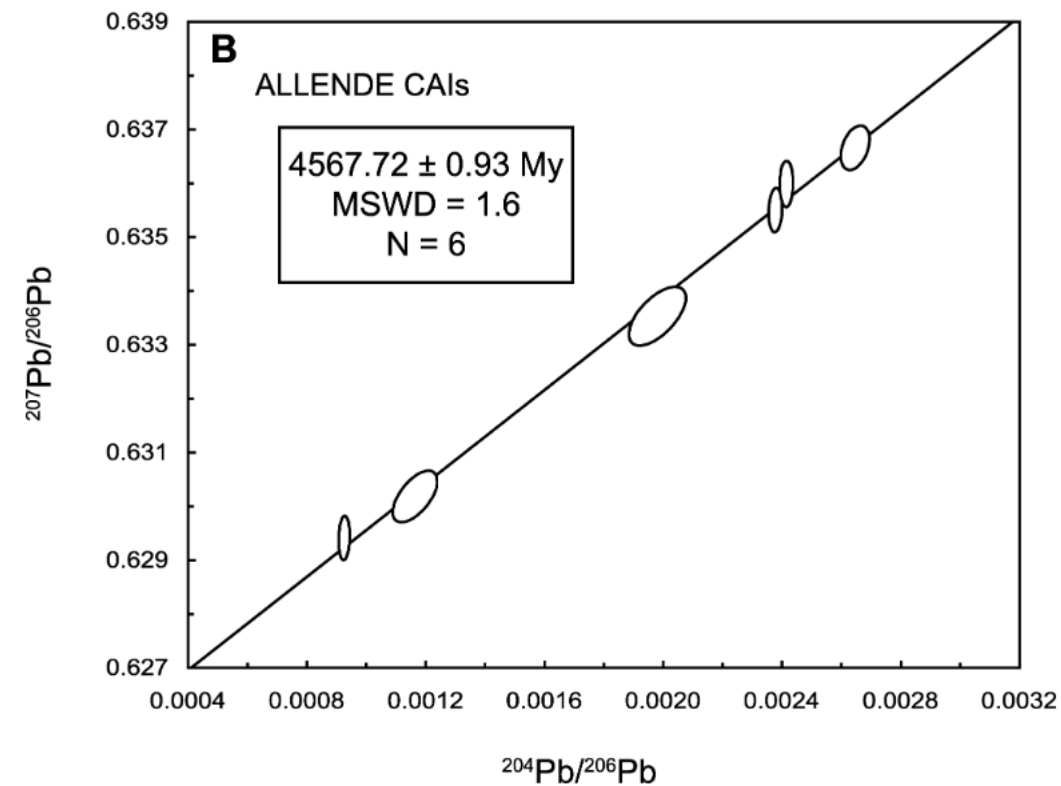


Les âges des CAIs: datation Pb-Pb

Les plus vieux solides du Système Solaire



Bouvier and Wadhwa, 2010



Connelly et al., 2012



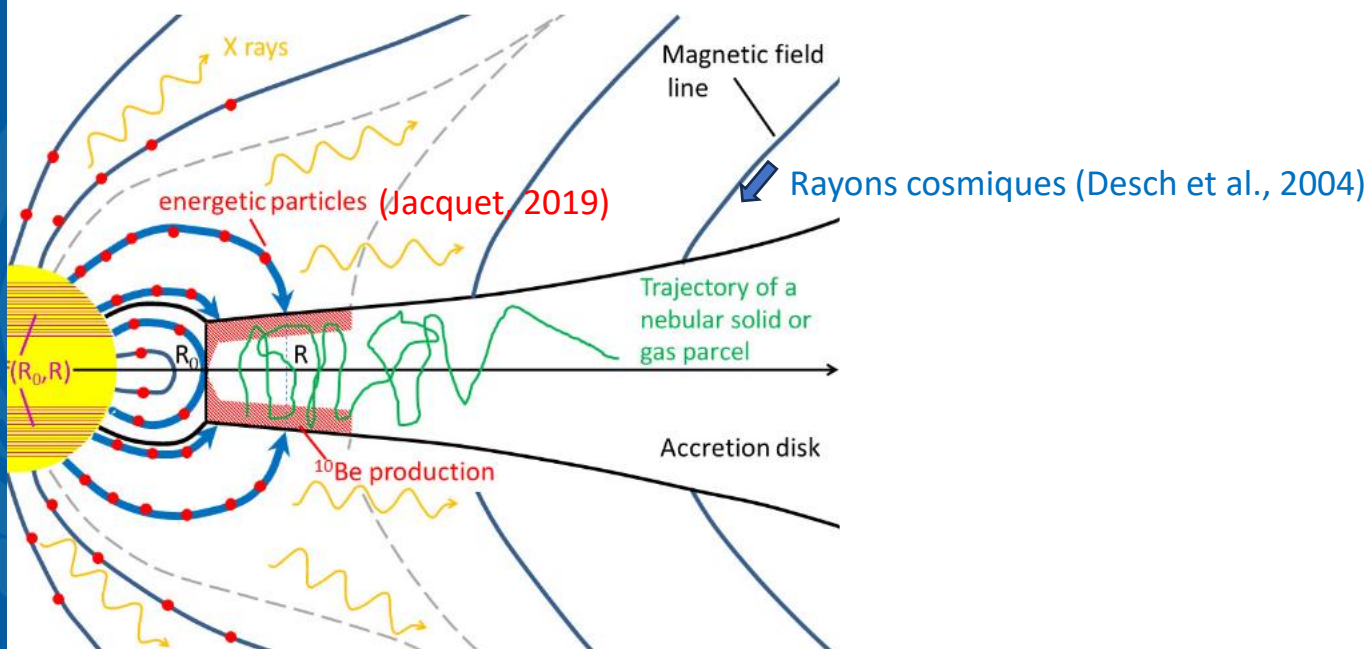
Lieu de formation des CAIs

La condensation depuis un gaz à très haute température suggère une formation près du Soleil

Autres indications en ce sens viennent de l'existence de ^{10}Be et ^7Be dans les CAIs

Le **béryllium 10**, noté ^{10}Be , est l'**isotope** du **béryllium** dont le **nombre de masse** est égal à 10 : son **noyau atomique** compte 4 **protons** et 6 **neutrons**. Il est **radioactif** avec une **demi-vie** 1,39 Ma et conduit par **désintégration β^-** au **bore 10**

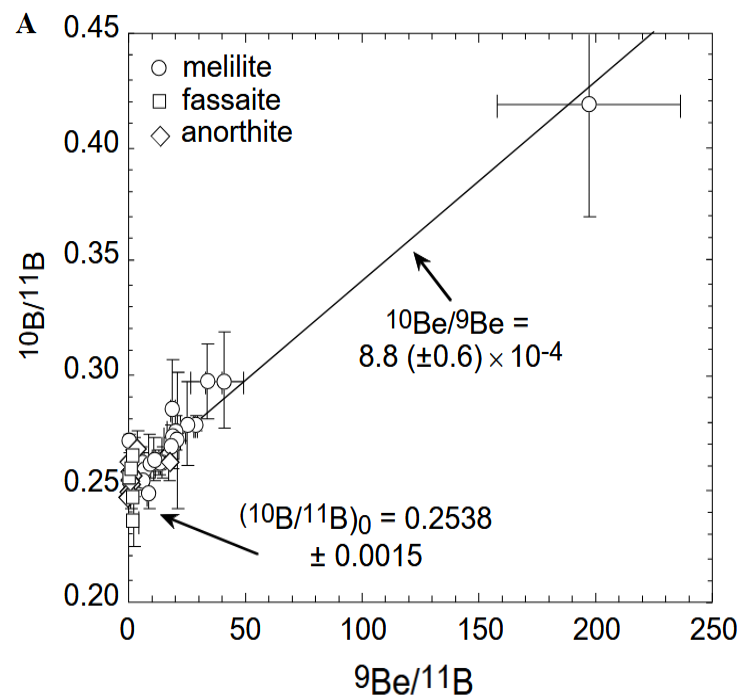
Il n'est **pas synthétisé par les étoiles** mais il est **produit par spallation** par des particules énergétiques (e.g. protons) sur d'autres atomes (e.g. N)



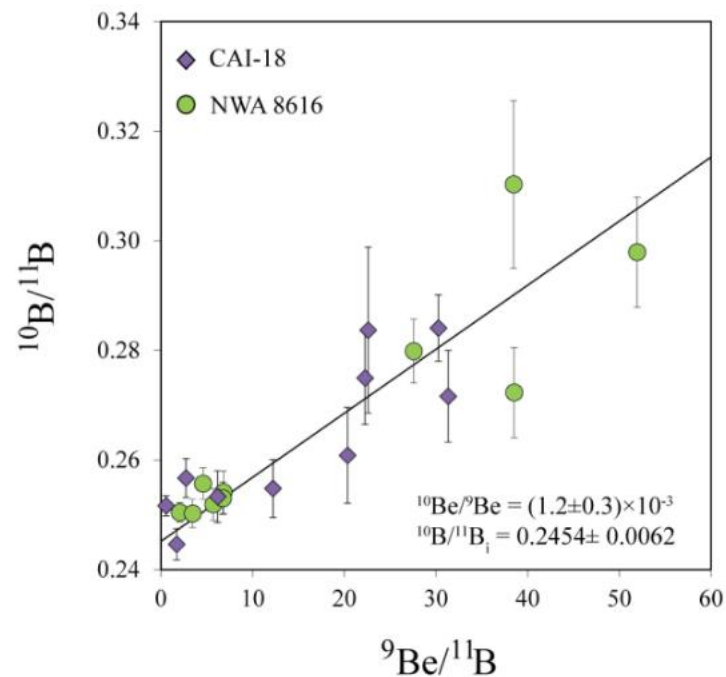
La production de ^{10}Be par les rayons cosmiques devrait être plus uniforme que celle produite par les éruptions du Soleil jeune, avec $^{10}\text{Be}/^9\text{Be} < 10^{-3}$



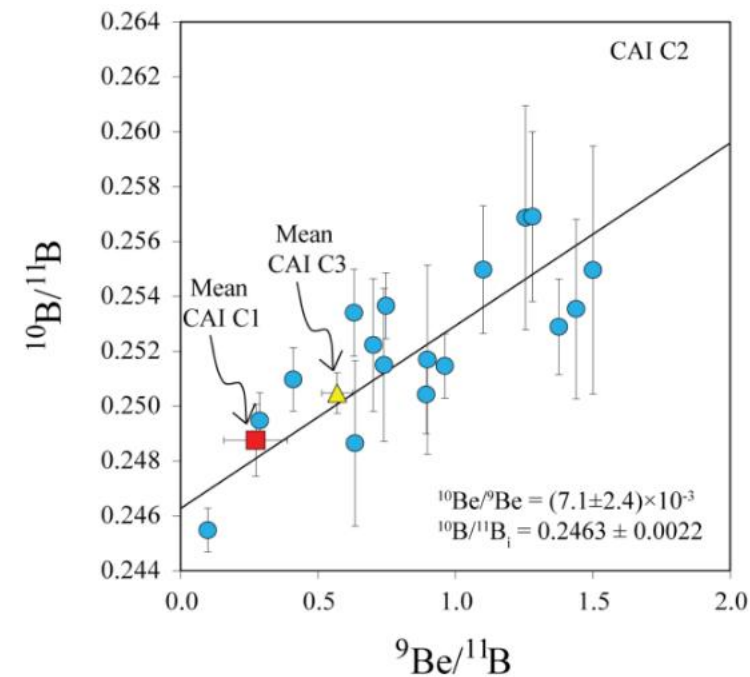
$^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ dans les CAIs



Chaussidon et al., 2006



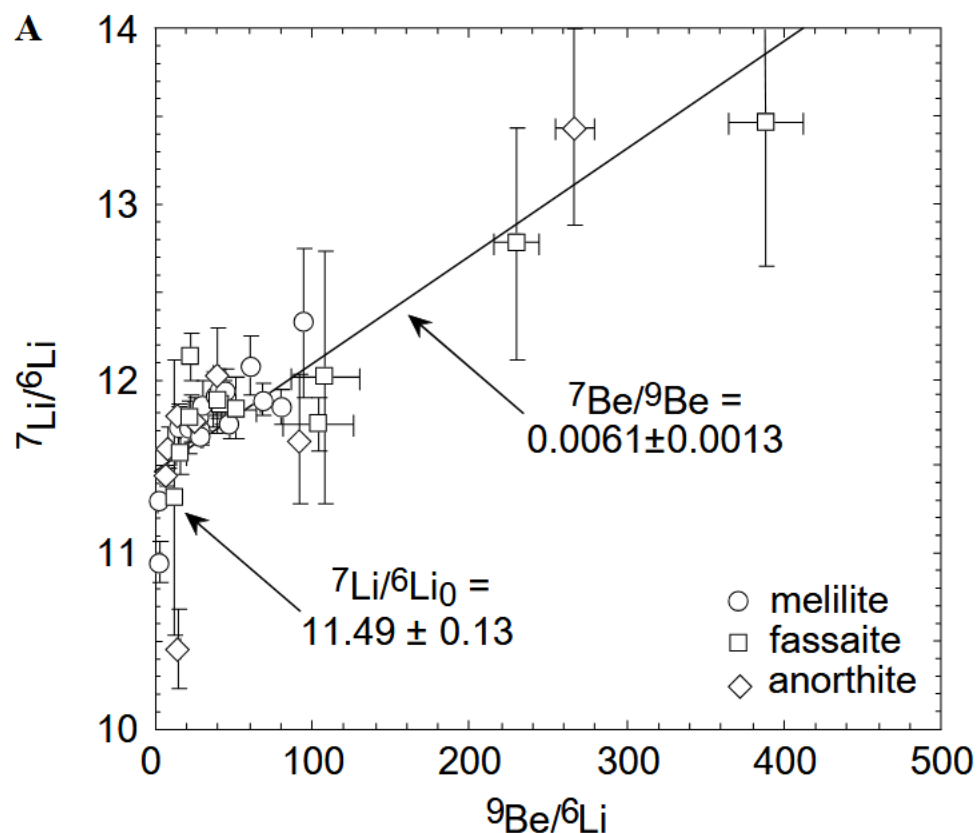
Sossi et al., 2017



Le $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ paraît différent de CAI à CAI. Il peut être $> 10^{-3}$. Suggère irradiation par le Soleil
Les rapports de $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ mesurés implique une irradiation des CAIs à 0.1-1 UA du Soleil (Jacquet, 2019)



$^7\text{Be}/^9\text{Be}$ dans les CAIs



Le ^7Be décroît en ^7Li avec une demi-vie de 53 jours
Son existence dans les CAIs démontre leur irradiation directe.
Les rayons cosmiques tendent à irradier le nuage proto-stellaire, pas le disque.
L'existence du ^7Be dans les CAIs est donc une indication forte d'une formation des CAIs près du Soleil

Chaussidon et al., 2006



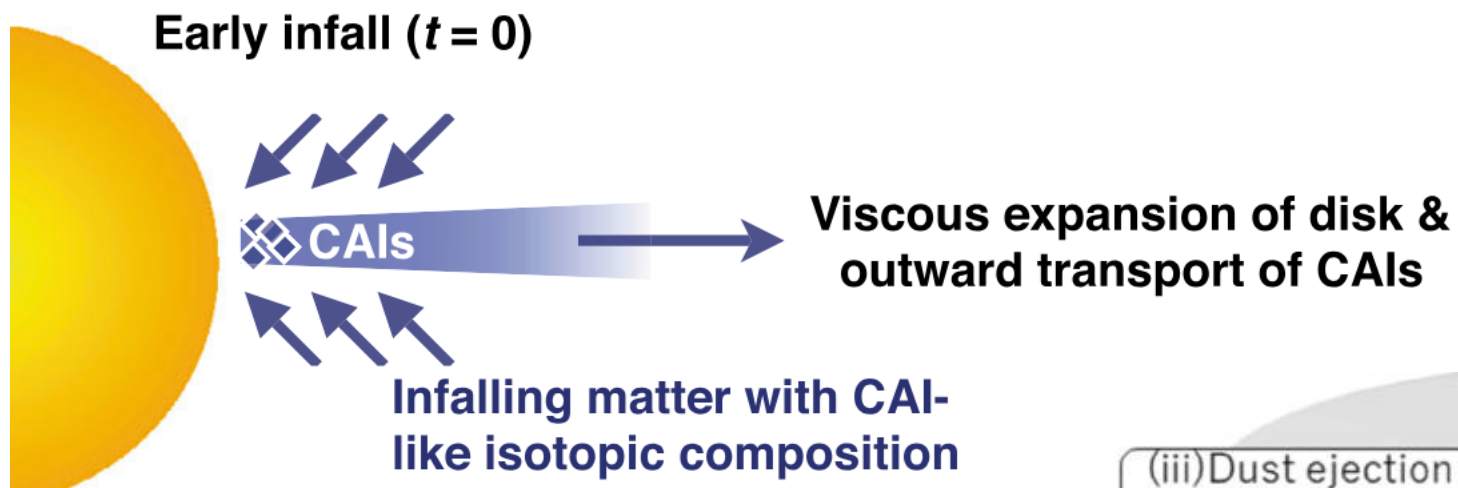
Le paradoxe des CAIs

Ils ont condensé près du Soleil (< 1 UA) mais se trouvent aujourd'hui presque exclusivement dans les chondrites carbonées, qui sont issues de corps parents formés dans la partie externe du disque, là où la glace d'eau était abondante (voir cours N. 2)



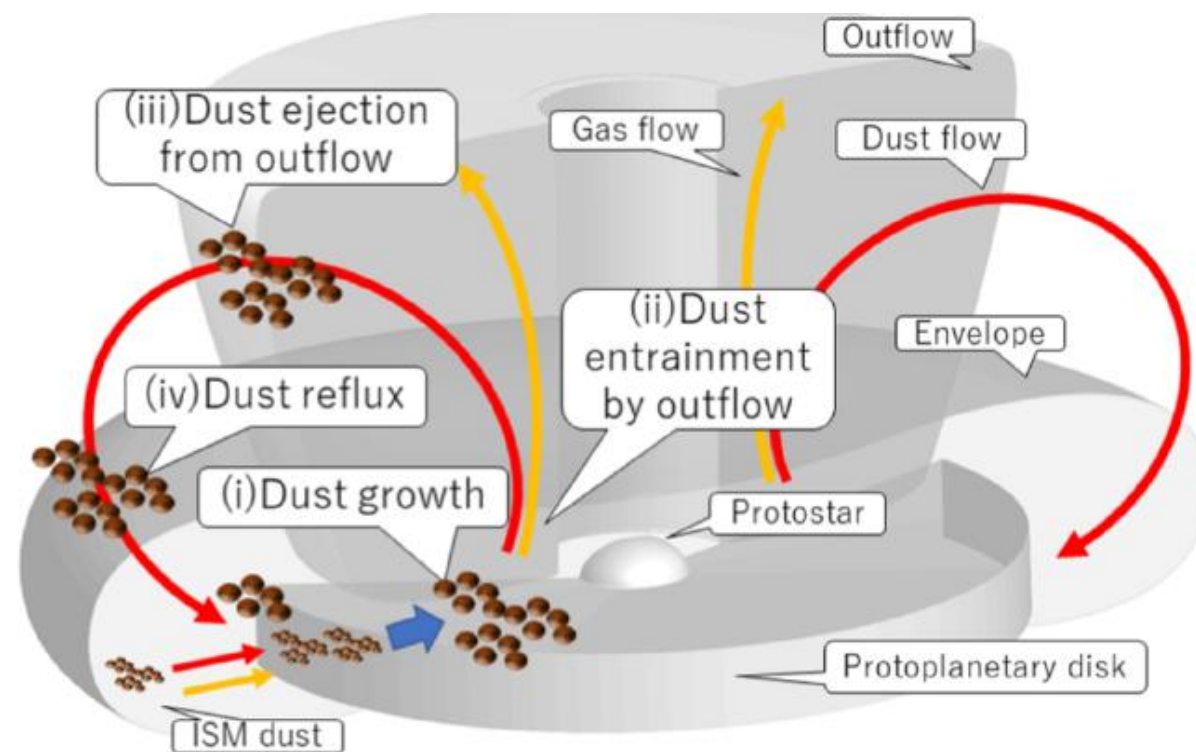
Le transport radial des CAIs

Soit par l'expansion radiale du disque (Nanne et al., 2019)



Soit par l'éjection dans le jet stellaire (Tsukamoto et al., 2021)

La modélisation de la formation stellaire et de son disque peut aider à comprendre ce paradoxe:
séminaire de Adnan Ahmad



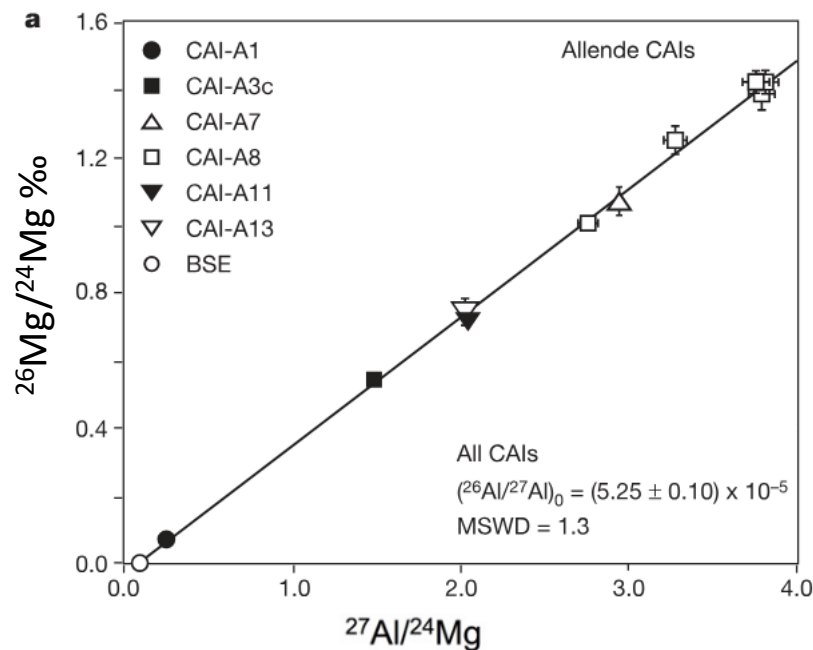


La concentration initiale du ^{26}Al dans le Système Solaire

^{26}Al décroît en ^{26}Mg avec une demi-vie de 0,717Ma

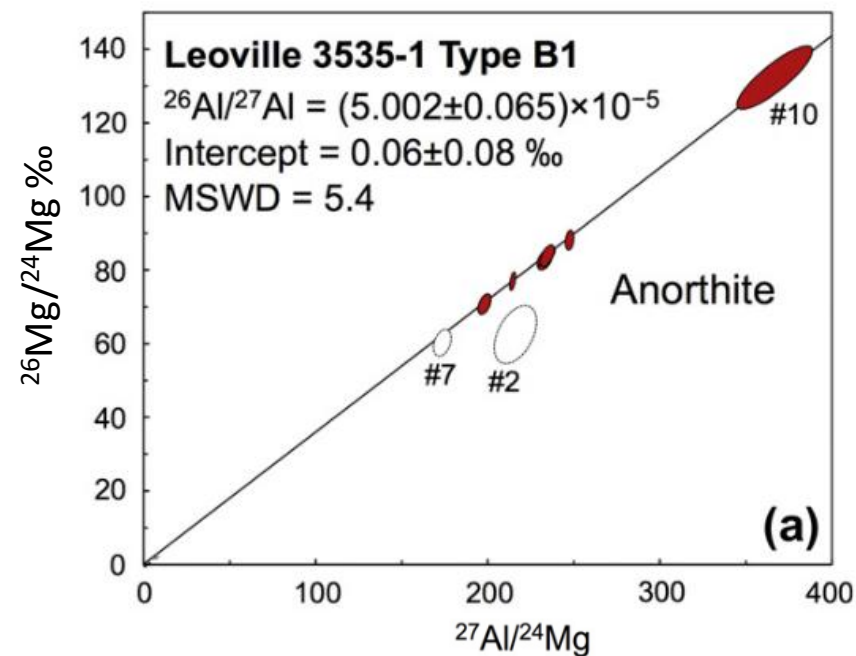
^{27}Al est stable

CAI entiers



Bizzarro et al., 2004

Minéraux d'un CAI individuel



Kita et al., 2012

L'existence de ^{26}Al au début du Système solaire est cruciale pour établir une chronologie fine de la formation des premiers minéraux (voir cours N. 4) et pour l'évolution thermique des planétésimaux (voir cours N. 5)



A retenir

- Les CAIs sont les plus vieux solides du Système solaire
- Ils se sont formés par condensation d'un gaz initialement très chaud ($T > 1800$ K) il y a 4,568 Ga
- Ils ont une composition isotopique de l'oxygène très proche de celle solaire. Ils ont donc condensé à partir du gaz qui nourrissait le Soleil en formation
- Ils se sont formés près du Soleil, mais se trouvent aujourd'hui dans les chondrites carbonées, qui se sont agrégées loin.
- Les CAIs démontrent l'existence d'un mécanisme de transport des solides depuis le voisinage solaire vers la périphérie du disque
- Lors de leur formation, les CAI contenaient une quantité considérable de ^{26}Al , avec $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} \sim 5 \times 10^{-5}$. Cette quantité initiale de cet élément radioactif a eu un effet fondamental sur l'évolution thermique des corps.