

10A001 - ASTRONOMIE GÉNÉRALE

La Terre, une planète vivante dans le cosmos

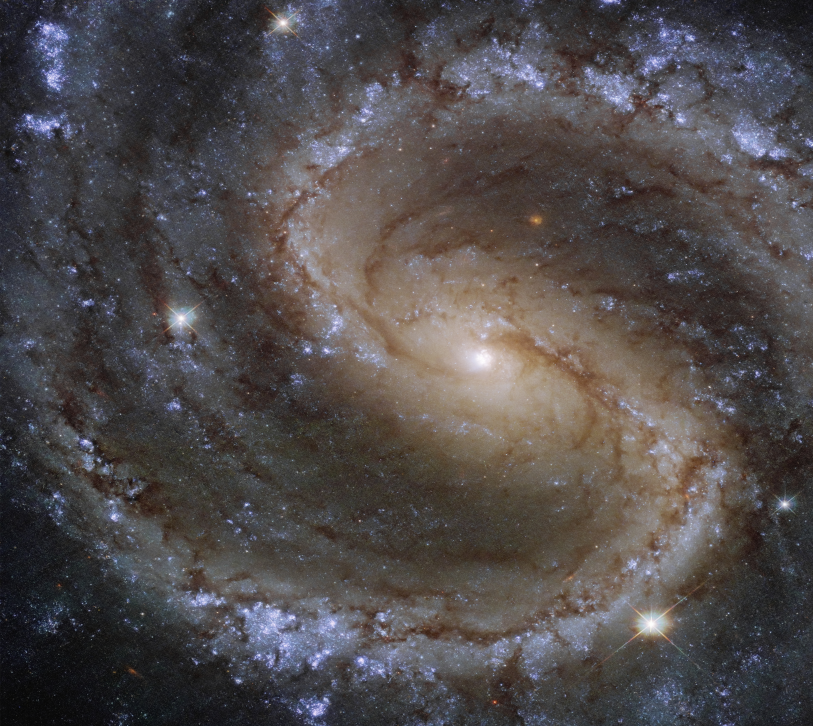
2. Formation du Système solaire

23 septembre 2025

<https://mediaserver.unige.ch/play/279424>



Sylvia Ekström
Département d'Astronomie
Université de Genève



La Terre, une planète
vivante dans le
cosmos



2. Formation du Système solaire

Nuages moléculaires

Effondrement du
nuage

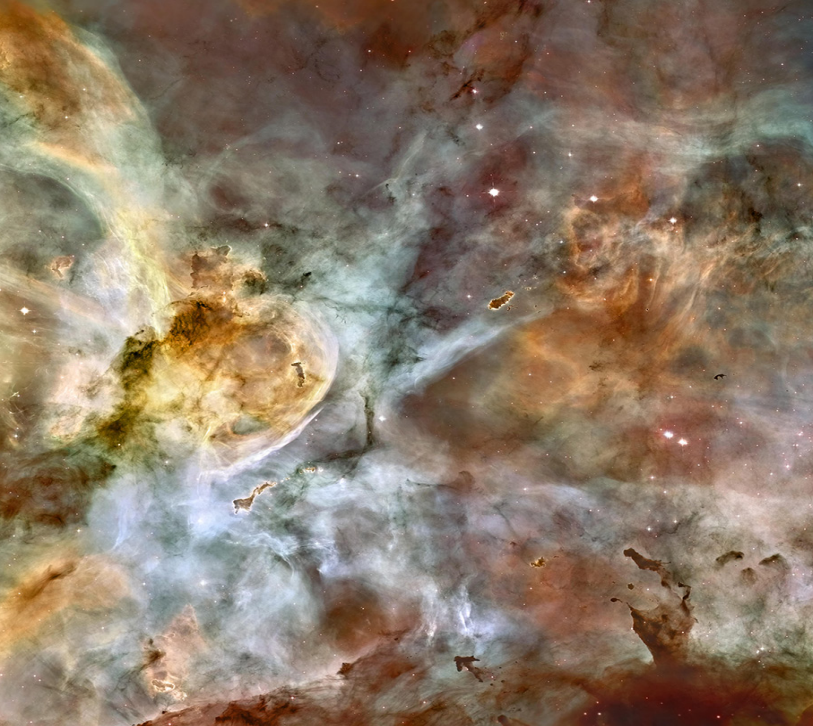
Formation de l'étoile

Formation des
planètes

Le Système solaire

La jeune Terre

Références



2. Formation du Système solaire

Nuages moléculaires

Effondrement du
nuage

Formation de l'étoile

Formation des
planètes

Le Système solaire

La jeune Terre

Références

Les nuages moléculaires

Naissance dans les zones les plus froides et obscures de la Galaxie

Nuages massifs, denses et froids

Caractéristiques :

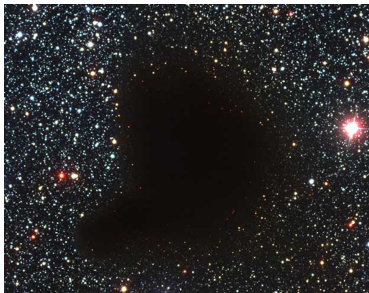
$50'000 M_{\odot}$,

40 al de diamètre

100 – 1000 mol./cm³

20-30 K

Quantités de molécules différentes, des plus simples aux plus complexes



H₂ : hydrogène moléculaire
CO : monoxyde de carbone
HCN : acide cyanhydrique
H₂O : eau
CH₄ : méthane
C₂H₆O : éthanol
C₂₄H₁₁CN : cyano-coronène

Wenzel+ 2025

La Terre, une planète vivante dans le cosmos



2. Formation du Système solaire

Nuages moléculaires

Effondrement du nuage

Formation de l'étoile

Formation des planètes

Le Système solaire

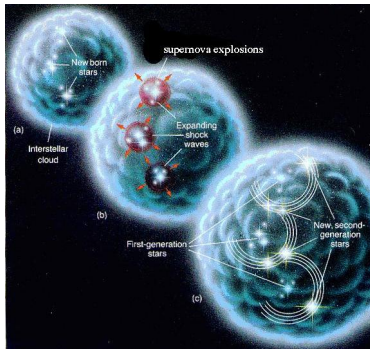
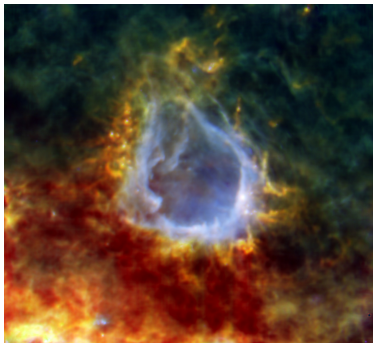
La jeune Terre

Références

L'effondrement du nuage

L'effondrement peut être initié par différents mécanismes :

- l'explosion d'une supernova à proximité
- le passage dans un bras spiral plus dense
- la fusion de la galaxie avec une autre



Naissance dans la bulle
entourant une étoile massive
(vu par Herschel)

Zavagno+ 2010

La Terre, une planète
vivante dans le
cosmos



2. Formation du Système solaire

Nuages moléculaires

Effondrement du
nuage

Formation de l'étoile

Formation des
planètes

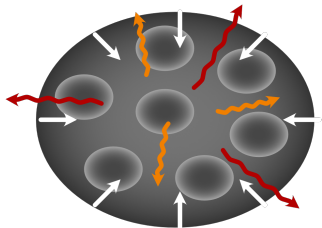
Le Système solaire

La jeune Terre

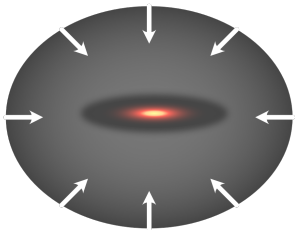
Références

La contraction

La contraction du nuage se fait en deux temps



- 1 la phase **isotherme** :
le nuage arrive à évacuer sa chaleur au fur et à mesure, il se densifie en gardant sa température constante
→ **FRAGMENTATION**



- 2 la phase **adiabatique** :
le nuage est trop opaque pour évacuer la chaleur, il se densifie en conservant l'énergie, donc il s'échauffe
→ **proto-étoile**



Fragmentation

Un nuage va être instable si le soutien par pression du gaz n'est plus suffisant.

Une fluctuation de densité va revenir à l'équilibre sur un temps caractéristique qui dépend de la vitesse du son $t_s = \frac{R}{c_s} \propto \frac{R}{\sqrt{T}}$.

La gravitation agit sur le temps caractéristique de la chute libre

$$t_{\text{ff}} = \sqrt{\frac{1}{G\rho}}$$

Le système restaure son équilibre si $t_s < t_{\text{ff}}$

On a une **instabilité** si $t_{\text{ff}} < t_s$

Jeans 1902



Le rayon de Jeans R_J est la longueur maximale qui permet $t_s < t_{\text{ff}}$

La **masse de Jeans** est la masse incluse dans une sphère de rayon R_J :

$$M_J \propto \sqrt{\frac{T^3}{\rho}}$$

Lors de la phase isotherme, T reste constant mais ρ augmente : M_J diminue

→ FRAGMENTATION



La formation de l'étoile centrale

images : HST (O'Dell+ 1993; Bally+ 1998)



La Terre, une planète
vivante dans le
cosmos



2. Formation du Système solaire

Nuages moléculaires

Effondrement du
nuage

Formation de l'étoile

Formation des
planètes

Le Système solaire

La jeune Terre

Références

La formation de l'étoile centrale

Toute la matière ne tombe pas sur l'étoile

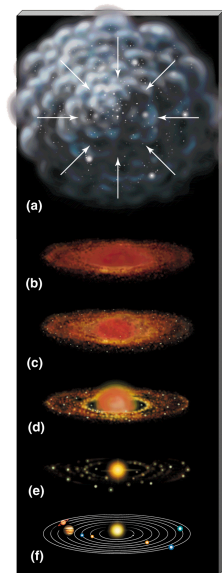
Une partie se dispose en disque autour d'elle

Disque massif → peut former plusieurs planètes

Evacuation du moment cinétique par le disque et redistribution dans les planètes :

Soleil → 99% masse

Planètes → 99% moment cinétique



La Terre, une planète vivante dans le cosmos



2. Formation du Système solaire

Nuages moléculaires

Effondrement du nuage

Formation de l'étoile

Formation des planètes

Le Système solaire

La jeune Terre

Références

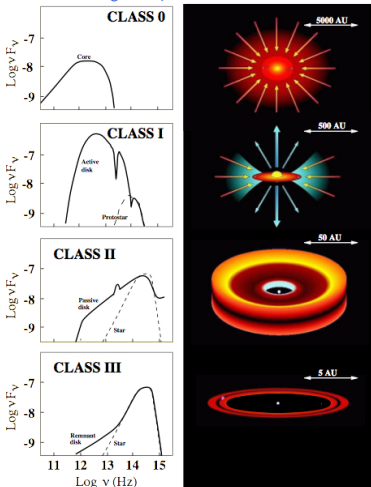
L'étoile et son disque

Disque visible dans la lumière de l'étoile comme un excès infra-rouge

Valeurs typiques :

- rayon : $r = 50 - 100$ UA
- épaisseur : $h \simeq 0.1r$
- masse : $m \simeq 0.1 - 1 M_{\odot}$
- température : $T \simeq r^{-2/3}$
(2000 - 40 K)

Figure by R. van Boekel in Acke 2005



La Terre, une planète vivante dans le cosmos



2. Formation du Système solaire

Nuages moléculaires

Effondrement du nuage

Formation de l'étoile

Formation des planètes

Le Système solaire

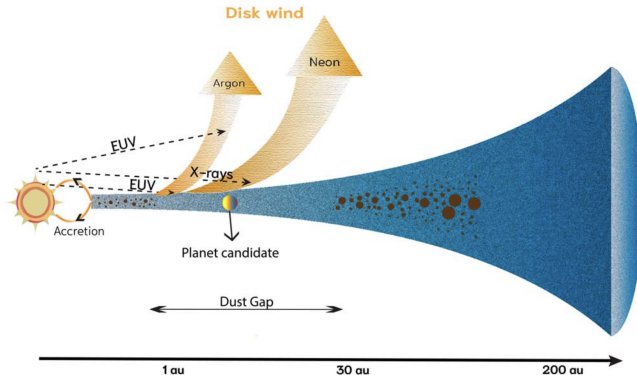
La jeune Terre

Références

Evaporation du disque

La luminosité croissante de l'étoile disperse le disque

Bajaj+ 2024



étoile T Cha (2-10 Ma) : étape finale de l'évaporation observée par JWST

La Terre, une planète vivante dans le cosmos



2. Formation du Système solaire

Nuages moléculaires

Effondrement du nuage

Formation de l'étoile

Formation des planètes

Le Système solaire

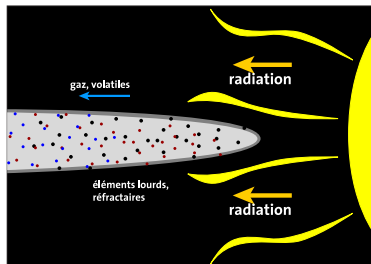
La jeune Terre

Références

Le disque protoplanétaire

Tri chimique :

- régions centrales (< 2,5 UA) : composés réfractaires
Fe, Ni, MgO, SiO₂, Al₂O₃, CaO, TiO₂, Fe₂O₃
H₂O dissocié → oxydation des métaux
- 2,5-4,5 UA : carbonates, composées organiques, sulfures
H₂O s'incorpore aux minéraux → roches hydratées (serpentine)
- > 4,5 UA : glace de H₂O



La Terre, une planète vivante dans le cosmos



2. Formation du Système solaire

Nuages moléculaires

Effondrement du nuage

Formation de l'étoile

Formation des planètes

Le Système solaire

La jeune Terre

Références

Le disque protoplanétaire

Tri chimique :

- régions centrales ($< 2,5$ UA) : composés réfractaires
 Fe , Ni , MgO , SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , TiO_2 , Fe_2O_3
 H_2O dissocié \rightarrow oxydation des métaux
- $2,5$ - $4,5$ UA : carbonates, composées organiques, sulfures
 H_2O s'incorpore aux minéraux \rightarrow roches hydratées (serpentine)
- $> 4,5$ UA : glace de H_2O



La Terre, une planète
vivante dans le
cosmos



2. Formation du Système solaire

Nuages moléculaires

Effondrement du
nuage

Formation de l'étoile

Formation des
planètes

Le Système solaire

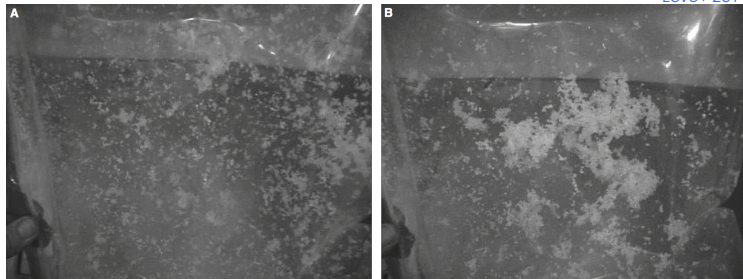
La jeune Terre

Références

Du nuage au caillou

Quatre étapes :

- flocculation : $10\text{ }\mu\text{m} \rightarrow 100\text{ }\mu\text{m}$
- compaction du disque : $100\text{ }\mu\text{m} \rightarrow 1\text{ cm}$
- coagulation : $1\text{ cm} \rightarrow 10\text{-}100\text{ m}$ (en 1'000 ans)
- collision/accrétion : $100\text{ m} \rightarrow 1'000\text{ km}$ (en 100'000 ans)



Expériences de Don Pettit menées sur l'ISS entre 2002 et 2012

La Terre, une planète
vivante dans le
cosmos



2. Formation du
Système solaire

Nuages moléculaires

Effondrement du
nuage

Formation de l'étoile

Formation des
planètes

Le Système solaire

La jeune Terre

Références

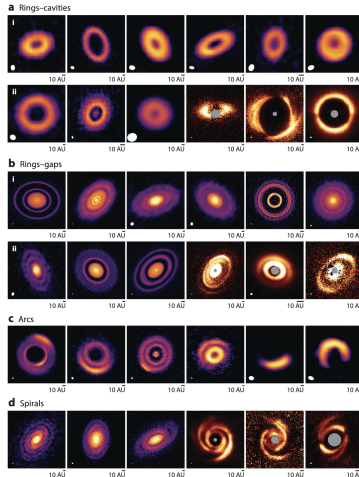
Gazeuse ou rocheuse ?

Deux types de planètes :

gazeuses :

- rapide accrétion de grains givrés
- accroissement rapide de la masse par collision
- accretion du gaz encore présent

Andrews 2020



La Terre, une planète vivante dans le cosmos



2. Formation du Système solaire

Nuages moléculaires

Effondrement du nuage

Formation de l'étoile

Formation des planètes

Le Système solaire

La jeune Terre

Références

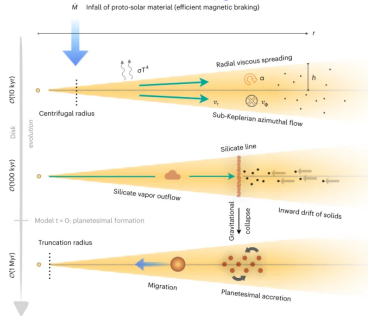
Gazeuse ou rocheuse ?

Deux types de planètes :

rocheuses :

- accretion des grains réfractaires dans certaines zones particulières du disque
- accroissement progressive de la masse par collision
- éventuelle migration
- pas de gaz à accréter (localisation, temps de formation)

Batygin & Morbidelli 2023



La Terre, une planète vivante dans le cosmos



2. Formation du Système solaire

Nuages moléculaires

Effondrement du nuage

Formation de l'étoile

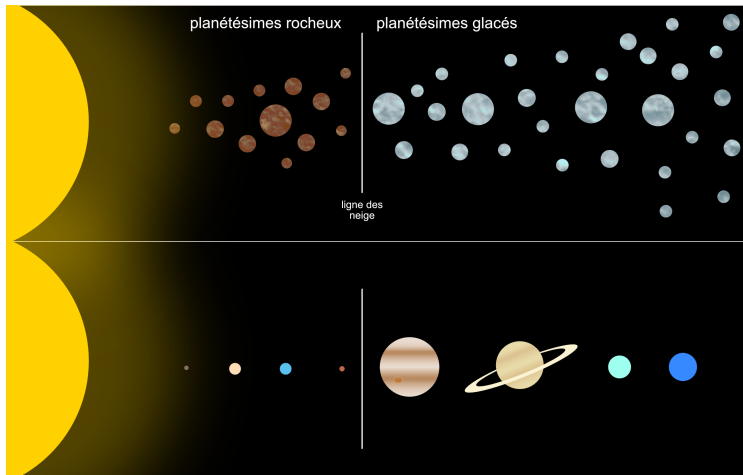
Formation des planètes

Le Système solaire

La jeune Terre

Références

Le Système solaire



Architecture finalement pas si courante (Cours 12)

La Terre, une planète
vivante dans le
cosmos



2. Formation du Système solaire

Nuages moléculaires

Effondrement du
nuage

Formation de l'étoile

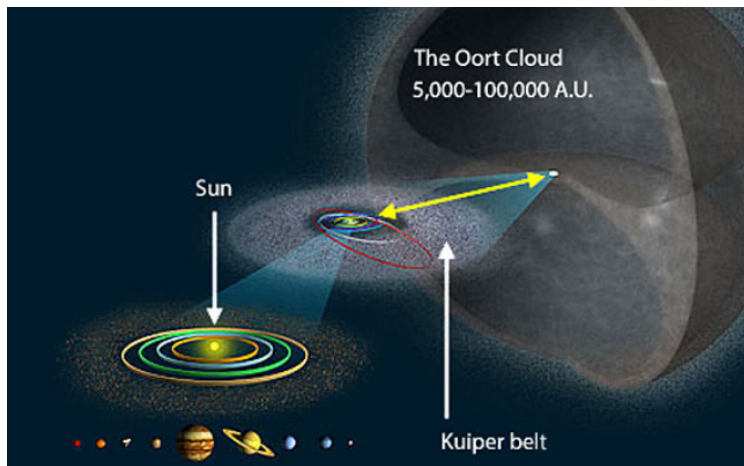
Formation des
planètes

Le Système solaire

La jeune Terre

Références

Structure du Système solaire



Système solaire formé il y a 4,56 Ga

Déjà ~20 tours de la Galaxie
(le Soleil a perdu ses "sœurs")

La Terre, une planète
vivante dans le
cosmos



2. Formation du Système solaire

Nuages moléculaires

Effondrement du
nuage

Formation de l'étoile

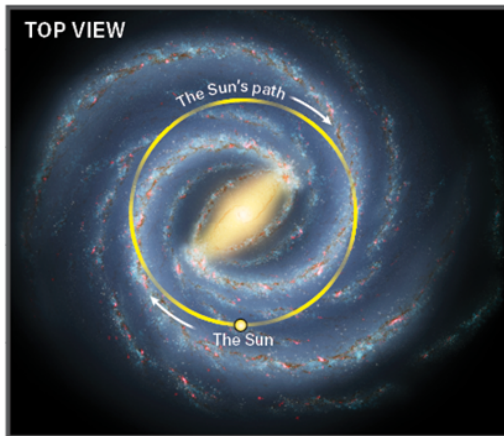
Formation des
planètes

Le Système solaire

La jeune Terre

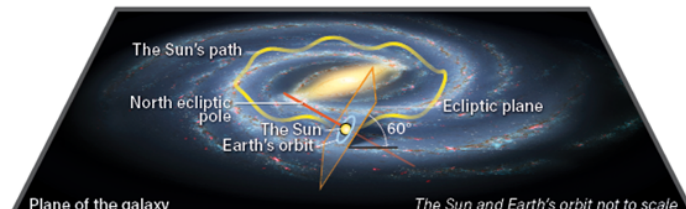
Références

Trajectoire du Système solaire



THE SUN'S GALACTIC MOTION

The Sun orbits the center of our galaxy tipped at an angle of 60° . Over the course of its orbit, our star also bobs up and down above and below the galactic plane.



La Terre, une planète vivante dans le cosmos



2. Formation du Système solaire

Nuages moléculaires

Effondrement du nuage

Formation de l'étoile

Formation des planètes

Le Système solaire

La jeune Terre

Références

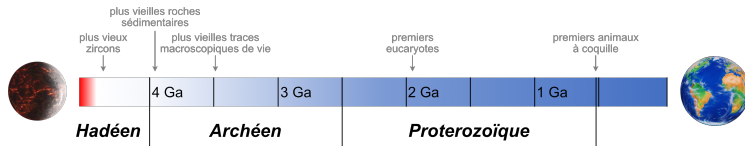
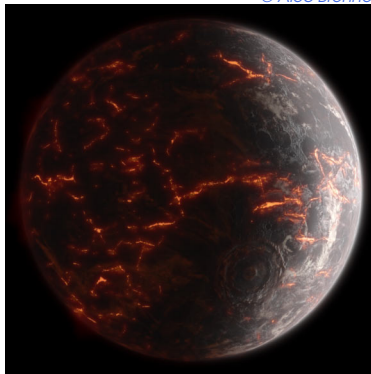
La jeune Terre

Formée dans une zone
dépourvue de gaz

Forte chaleur due à l'accrétion,
boule de lave en fusion

Ère géologique de l'Hadéen

© Alec Brenner



La Terre, une planète
vivante dans le
cosmos



2. Formation du Système solaire

Nuages moléculaires

Effondrement du
nuage

Formation de l'étoile

Formation des
planètes

Le Système solaire

La jeune Terre

Références

La jeune Terre

Etude de zircons datant de l'Hadéen :
dès 4,3 Ga, eau liquide, croûte partiellement émergée

Mojzsis+ 2001; Wilde+ 2001

© Don Dixon (cosmographica.com)



Inclusions de graphite : signes de vie déjà à 4,1 Ga ?

Bell+ 2015; Vogt+ 2023

La Terre, une planète
vivante dans le
cosmos



**2. Formation du
Système solaire**

Nuages moléculaires

Effondrement du
nuage

Formation de l'étoile

Formation des
planètes

Le Système solaire

La jeune Terre

Références

Références I

- Acke 2005, PhD thesis, Katholieke University of Leuven, Astronomical Institute (ADS)*
- Andrews 2020, ARA&A, 58, 483 (ADS)*
- Bajaj, Pascucci, Gorti et al. 2024, AJ, 167, 127 (ADS)*
- Bally, Sutherland, Devine, & Johnstone 1998, AJ, 116, 293 (ADS)*
- Batygin & Morbidelli 2023, Nature Astronomy, 330 (ADS)*
- Bell, Boehnke, Harrison, & Mao 2015, Proceedings of the National Academy of Science, 112, 14518 (ADS)*
- Jeans 1902, Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, 199, 1 (ADS)*
- Love, Pettit, & Messenger 2014, Meteoritics and Planetary Science, 49, 732 (ADS)*
- Mojzsis, Harrison, & Pidgeon 2001, Nature, 409, 178 (ADS)*
- O'Dell, Wen, & Hu 1993, ApJ, 410, 696 (ADS)*
- Vogt, Schwarz, Schmitt et al. 2023, Geochim. et Cosmochim. Acta, 349, 23 (ADS)*
- Wenzel, Gong, Xue et al. 2025, ApJL, 984, L36 (ADS)*
- Wilde, Valley, Peck, & Graham 2001, Nature, 409, 175 (ADS)*
- Zavagno, Russeil, Motte et al. 2010, A&A, 518, L81 (ADS)*