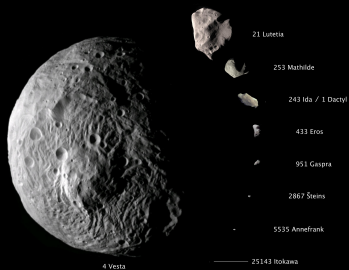


L'histoire du système solaire vue par les petits corps



B. Carry

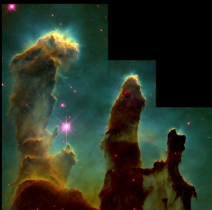
Lagrange, Observatoire de la Côte d'Azur

1. Formation planétaire
2. Système Solaire
3. Interrogations
4. Origine de l'eau
5. Masse et densité
6. Astéroïdes et Météorites

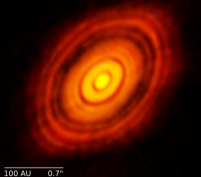
1. Formation planétaire
2. Système Solaire
3. Interrogations
4. Origine de l'eau
5. Masse et densité
6. Astéroïdes et Météorites



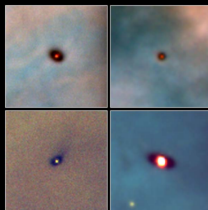
Formation planétaire: Résumé



HL Tau
ALMA



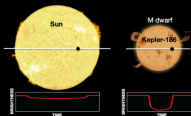
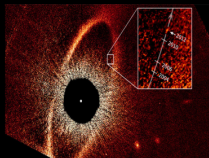
100 AU 0.7"



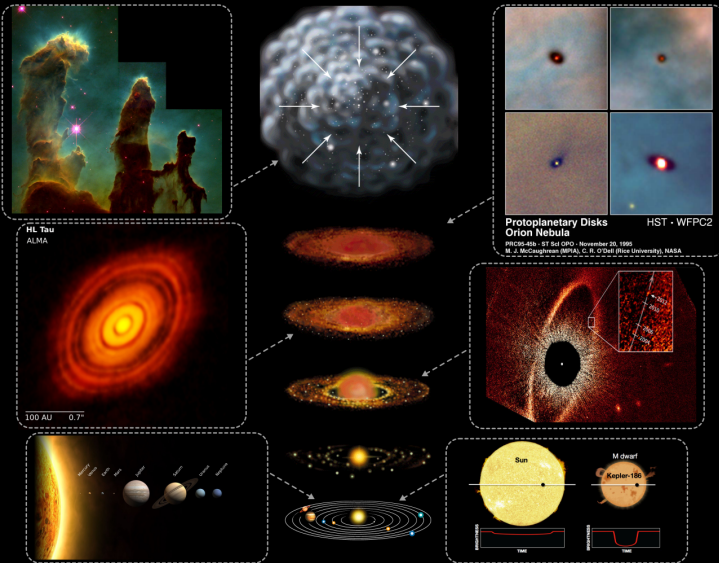
Protoplanetary Disks
Orion Nebula

HST - WFPC2

PRC95-45b - ST ScI OPD - November 20, 1995
M. J. McCaughrean (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA



Formation planétaire: Résumé



Formation planétaire: Petits corps

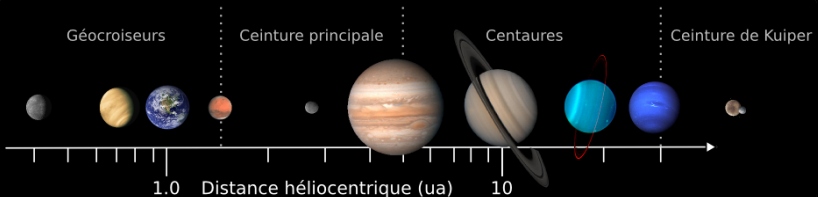
1. Population **importante**

- 759 410 objets (*plusieurs millions*)
- Large gamme de distances héliocentriques [$1 \rightarrow 10^{2-5}$ ua]
- Large gamme de compositions [roches \rightarrow glaces]

2. Population **primitive**

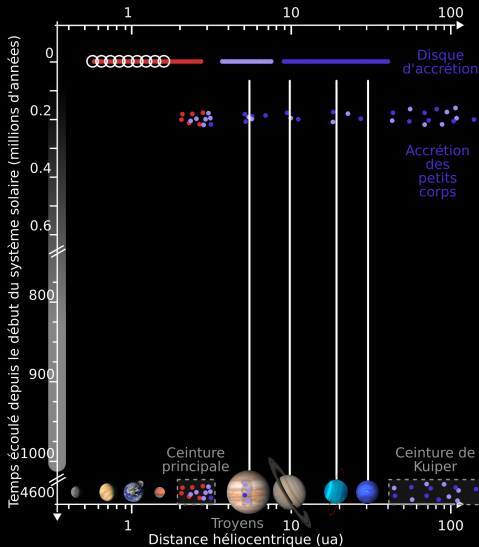
- **Petits** objets [m \rightarrow 1000 km]
- Énergie interne \approx nulle
- Pas d'activité endogène

▷ Témoins *directs* du jeune Système Solaire

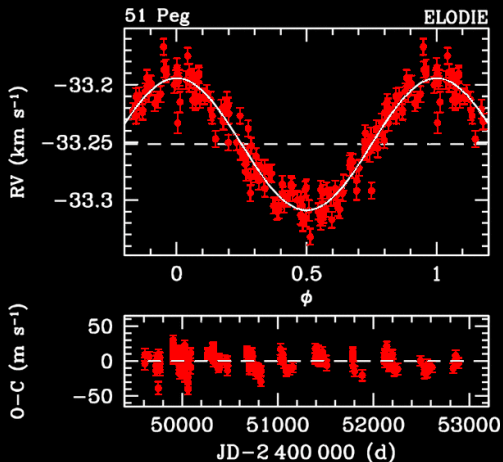


1. Formation planétaire
2. Système Solaire
3. Interrogations
4. Origine de l'eau
5. Masse et densité
6. Astéroïdes et Météorites

Histoire: La vue classique

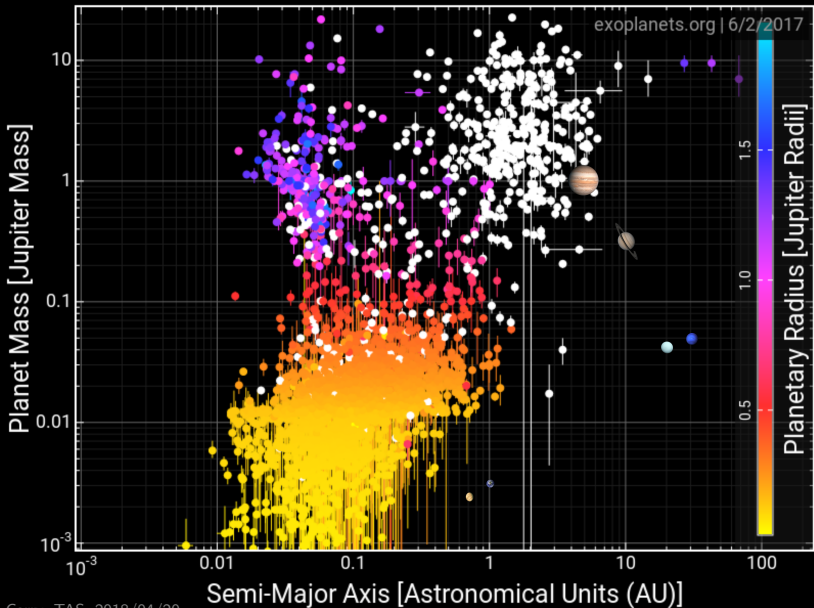


Histoire: Le feu aux poudres



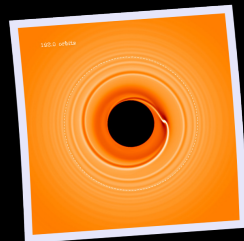
Mayor & Queloz, 1995

Histoire: Le feu aux poudres



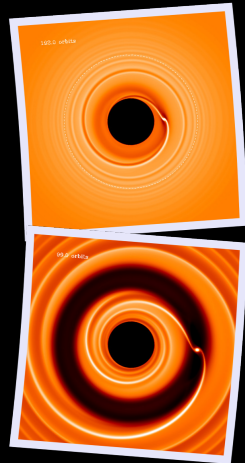
Histoire: Ingrédients

- Migration de type I
 - Déplacement dans le disque
 - Vers l'intérieur
 - Très rapide



Histoire: Ingrédients

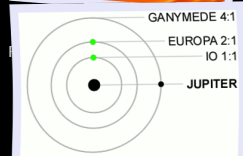
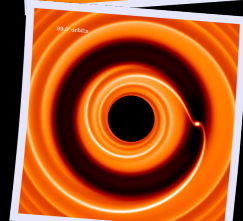
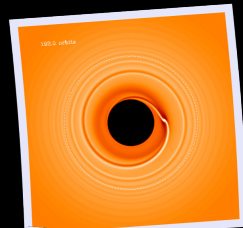
- Migration de type I
 - Déplacement dans le disque
 - Vers l'intérieur
 - Très rapide
- Migration de type II
 - Ouverture d'un gap
 - Vers l'intérieur ou extérieur
 - Beaucoup plus lent



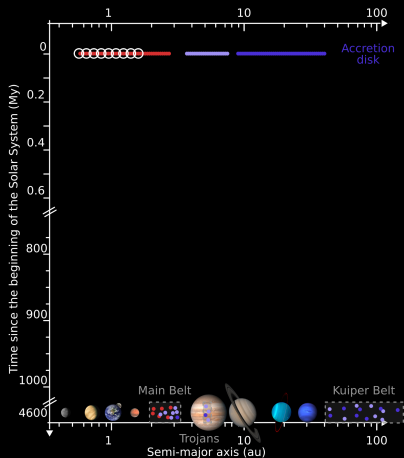
F. Masset

Histoire: Ingrédients

- Migration de type I
 - Déplacement dans le disque
 - Vers l'intérieur
 - Très rapide
- Migration de type II
 - Ouverture d'un gap
 - Vers l'intérieur ou extérieur
 - Beaucoup plus lent
- Résonance orbitale
 - Rapport entier de périodes
 - Configurations répétées
 - Perturbe ou bloque le système



Histoire: Observables



DeMeo & Carry 2014

A. Disque d'accrétion

- Gaz & Poussière
- Gradient de composition

B. Planètes

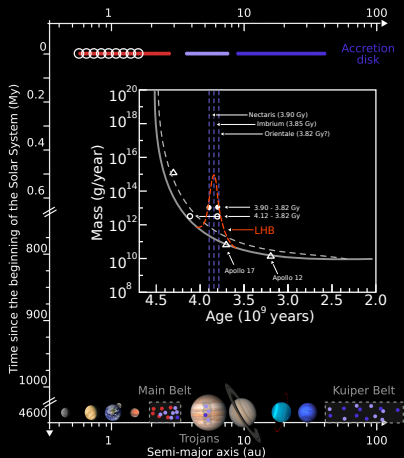
- Masses relatives
- Excentricités

C. Petits corps

- Masse des ceintures
- Inclinaison des TNOs
- Mixité des astéroïdes
- Homogénéité des troyens

D. Bombardement tardif

Histoire: Observables



DeMeo & Carry 2014

A. Disque d'accrétion

- Gaz & Poussière
- Gradient de composition

B. Planètes

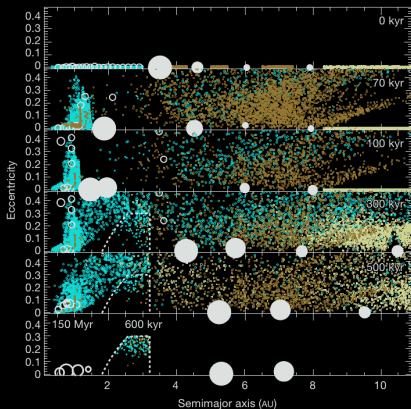
- Masses relatives
- Excentricités

C. Petits corps

- Masse des ceintures
- Inclinaison des TNOs
- Mixité des astéroïdes
- Homogénéité des troyens

D. Bombardement tardif

Histoire: le "Grand Tack"



Walsh et al. 2011

A. Jupiter migre vers l'intérieur

- Strike de bowling
- Perte de masse

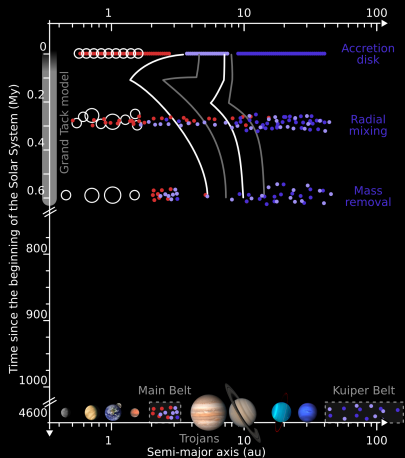
B. Saturne entraine Jupiter

- Excite les orbites
- Mélange les parties internes

C. Bilan

- Mélange complet
- Perte de 99% de la masse

Histoire: le "Grand Tack"



DeMeo & Carry 2014

A. Jupiter migre vers l'intérieur

- Strike de bowling
- Perte de masse

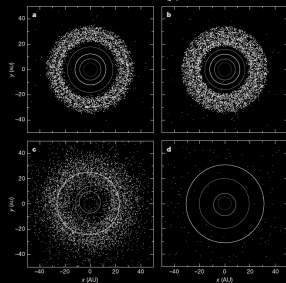
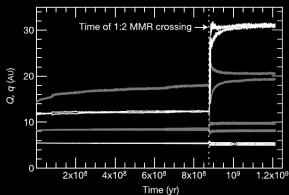
B. Saturne entraine Jupiter

- Excite les orbites
- Mélange les parties internes

C. Bilan

- Mélange complet
- Perte de 99% de la masse

Histoire: Modèle de Nice



Gomes/Tsiganis/Morbidelli 2005

Morbidelli et al. 2007/2010+

Nesvorny/Batygin 2011/2012

A. Système ordonné

- Planètes en résonances
- Meta-stable

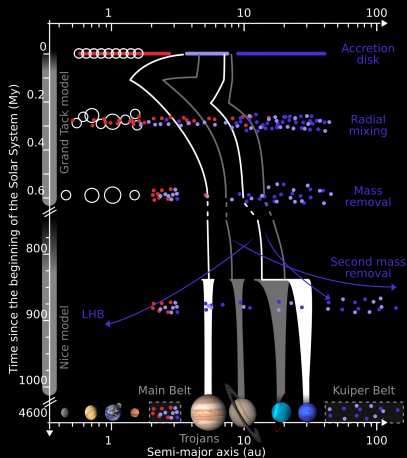
B. Instabilité tardive

- Neptune repoussée
- Destabilisation forte

C. Bilan

- Mélange complet
- Troyens remplacés
- TNOs déstabilisés
- ▶ 5 planètes géantes!?

Histoire: Modèle de Nice



DeMeo & Carry 2014

A. Système ordonné

- Planètes en résonances
- Meta-stable

B. Instabilité tardive

- Neptune repoussée
- Destabilisation forte

C. Bilan

- Mélange complet
- Troyens remplacés
- TNOs déstabilisés
- ▶ 5 planètes géantes!?

1. Formation planétaire
2. Système Solaire
3. Interrogations
4. Origine de l'eau
5. Masse et densité
6. Astéroïdes et Météorites

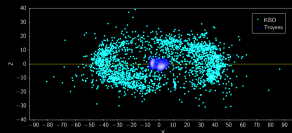
Grandes questions ouvertes

- Formation des planétésimaux dans le disque?
- Détails de la migration planétaire?
- Origine de l'eau et de la vie sur Terre?
- Lieu et moment de formation des astéroïdes et comètes?
- Masse et structure des petits corps?
- Composition des astéroïdes, comètes, et météores?
- Altération des surfaces?
- Sources des géocroiseurs et des météorites?
- ...

Comment y répondre?

1. Étude de la dynamique

- Distribution orbitale
- Orbites inclinées & excentriques
- ▶ Traces d'évènements dynamiques



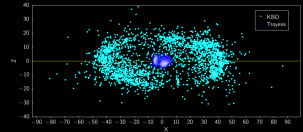
2. Étude de la composition

3. Études des propriétés physiques

Comment y répondre?

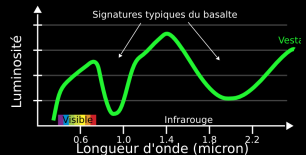
1. Étude de la dynamique

- Distribution orbitale
- Orbites inclinées & excentriques
- ▶ Traces d'évènements dynamiques



2. Étude de la composition

- Composition de surface
- Liens avec météorites
- ▶ Moment et lieu de formation

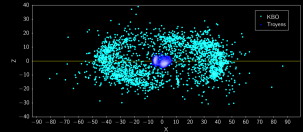


3. Études des propriétés physiques

Comment y répondre?

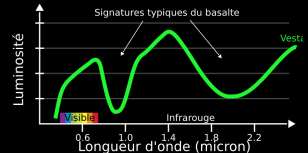
1. Étude de la dynamique

- Distribution orbitale
- Orbites inclinées & excentriques
- ▶ Traces d'évènements dynamiques



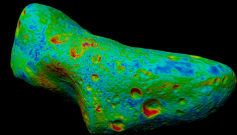
2. Étude de la composition

- Composition de surface
- Liens avec météorites
- ▶ Moment et lieu de formation



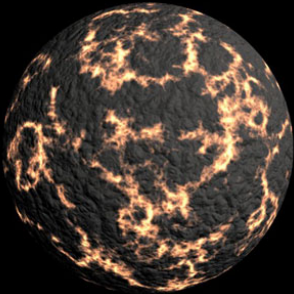
3. Études des propriétés physiques

- Distribution en taille, spin
- 1000x plus d'objets à l'origine
- ▶ Mécanismes d'évolution



1. Formation planétaire
2. Système Solaire
3. Interrogations
4. Origine de l'eau
5. Masse et densité
6. Astéroïdes et Météorites

Origine de l'eau des océans



Jeune Terre

1. Jeune Terre

- Par accrétion
- Dégazage de l'eau?

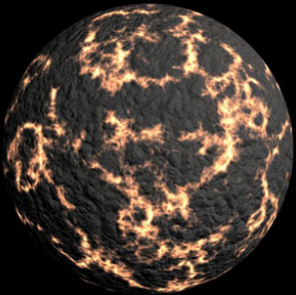
2. Implantation tardive

3. Composition de l'eau

4. Des astéroïdes?

5. Origine de l'eau?

Origine de l'eau des océans



Jeune Terre

1. Jeune Terre

- Par accrétion
- Dégazage de l'eau?

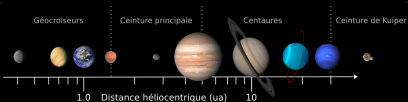
2. Implantation tardive

- Ségrégation héliocentrique
- Comètes!

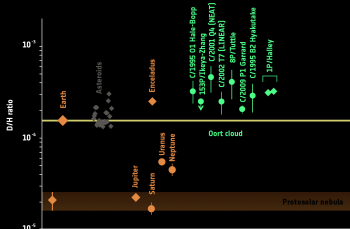
3. Composition de l'eau

4. Des astéroïdes?

5. Origine de l'eau?



Origine de l'eau des océans



Hartogh et al. 2011

Bockelee-Morvan et al. 2014

1. Jeune Terre

- Par accrétion
- Dégazage de l'eau?

2. Implantation tardive

- Ségrégation héliocentrique
- Comètes!

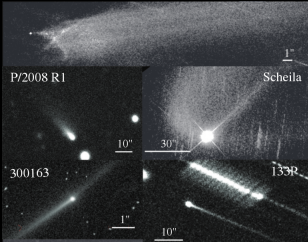
3. Composition de l'eau

- Isotopes O, D/H
- Comètes?

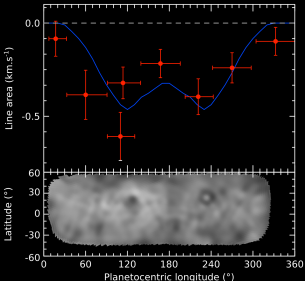
4. Des astéroïdes?

5. Origine de l'eau?

Origine de l'eau des océans



Hsieh & Jewitt, 2006; Jewitt 2012



Küppers et al. 2014

1. Jeune Terre

- Par accrétion
- Dégazage de l'eau?

2. Implantation tardive

- Ségrégation héliocentrique
- Comètes!

3. Composition de l'eau

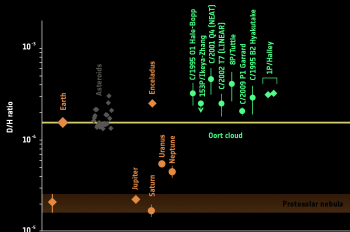
- Isotopes O, D/H
- Comètes?

4. Des astéroïdes?

- Astéroïdes actifs!
- Cérès!

5. Origine de l'eau?

Origine de l'eau des océans



Hartogh et al. 2011

Bockelee-Morvan et al. 2014

1. Jeune Terre

- Par accrétion
- Dégazage de l'eau?

2. Implantation tardive

- Ségrégation héliocentrique
- Comètes!

3. Composition de l'eau

- Isotopes O, D/H
- Comètes?

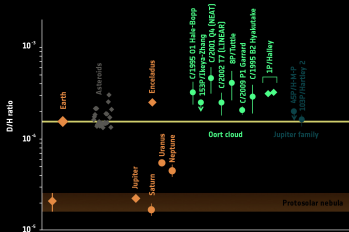
4. Des astéroïdes?

- Astéroïdes actifs!
- Cérès!

5. Origine de l'eau?

- Continuum de petits corps
- Nouveaux D/H

Origine de l'eau des océans



Hartogh et al. 2011

Bockelee-Morvan et al. 2014

1. Jeune Terre

- Par accrétion
- Dégazage de l'eau?

2. Implantation tardive

- Ségrégation héliocentrique
- Comètes!

3. Composition de l'eau

- Isotopes O, D/H
- Comètes?

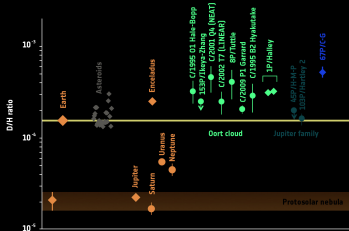
4. Des astéroïdes?

- Astéroïdes actifs!
- Cérès!

5. Origine de l'eau?

- Continuum de petits corps
- Nouveaux D/H

Origine de l'eau des océans



Hartogh et al. 2011
 Bockele-Morvan et al. 2014
 Altwegg et al. 2015

1. Jeune Terre

- Par accrétion
- Dégazage de l'eau?

2. Implantation tardive

- Ségrégation héliocentrique
- Comètes!

3. Composition de l'eau

- Isotopes O, D/H
- Comètes?

4. Des astéroïdes?

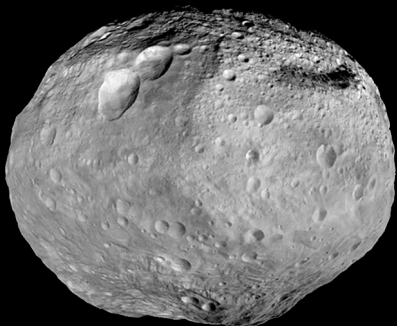
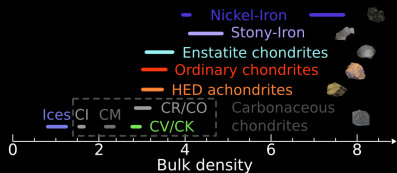
- Astéroïdes actifs!
- Cérès!

5. Origine de l'eau?

- Continuum de petits corps
- Nouveaux D/H

1. Formation planétaire
2. Système Solaire
3. Interrogations
4. Origine de l'eau
5. Masse et densité
6. Astéroïdes et Météorites

Propriétés physique: Densité

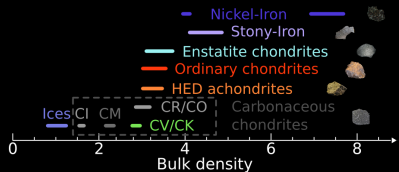


• Densité \Leftrightarrow composition

- Glaces: $\rho \approx 1 \text{ g.cm}^{-3}$
- Roches: $\rho \approx 2-3 \text{ g.cm}^{-3}$
- Métaux: $\rho \approx 5 \text{ g.cm}^{-3}$
- Terre: $\rho = 5.5 \text{ g.cm}^{-3}$

• Densité = Masse / Volume

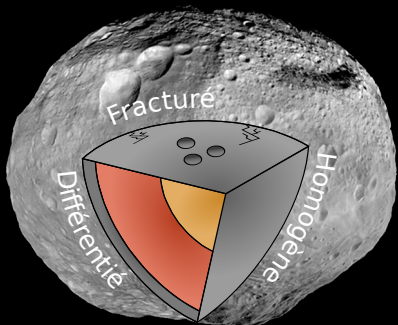
Propriétés physique: Densité



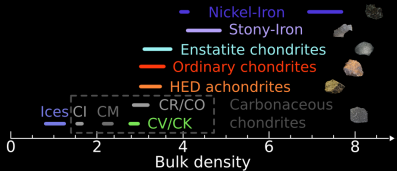
● Densité ⇔ composition

- Glaces: $\rho \approx 1 \text{ g.cm}^{-3}$
- Roches: $\rho \approx 2-3 \text{ g.cm}^{-3}$
- Métaux: $\rho \approx 5 \text{ g.cm}^{-3}$
- Terre: $\rho = 5.5 \text{ g.cm}^{-3}$

● Densité = Masse / Volume

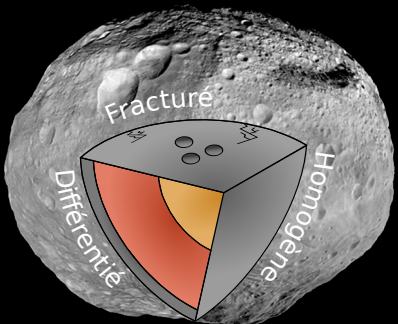


Propriétés physique: Densité



- Densité \Leftrightarrow composition
 - Glaces: $\rho \approx 1 \text{ g.cm}^{-3}$
 - Roches: $\rho \approx 2-3 \text{ g.cm}^{-3}$
 - Métaux: $\rho \approx 5 \text{ g.cm}^{-3}$
 - Terre: $\rho = 5.5 \text{ g.cm}^{-3}$

● Densité = Masse / Volume



1. Mesure de masse

1. Survol d'une sonde

- Astéroïde - Sonde
- Précis mais rare

2. Satellites

3. Déflexion



Concept de mission AIDA, ESA

1. Mesure de masse

1. Survol d'une sonde

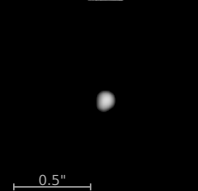
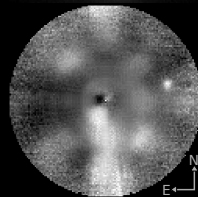
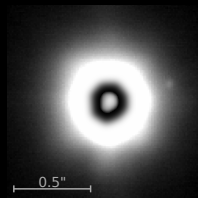
- Astéroïde - Sonde
- Précis mais rare

2. Satellites

- Astéroïde - Satellite
- Précis et assez commun

3. Déflexion

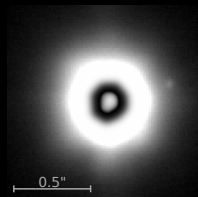
- Astéroïde - Astéroïde
- Peu précis mais commun



1. Mesure de masse

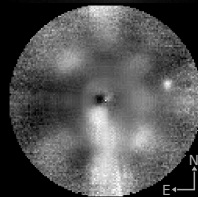
1. Survol d'une sonde

- Astéroïde - Sonde
- Précis mais rare



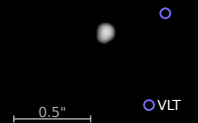
2. Satellites

- Astéroïde - Satellite
- Précis et assez commun



3. Déflexion

- Astéroïde - Astéroïde
- Peu précis mais commun



1. Mesure de masse

1. Survol d'une sonde

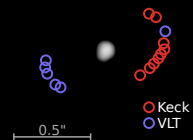
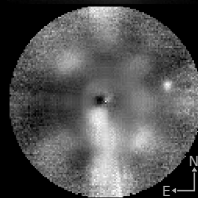
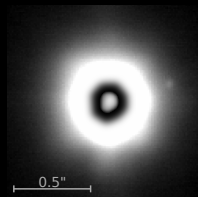
- Astéroïde - Sonde
- Précis mais rare

2. Satellites

- Astéroïde - Satellite
- Précis et assez commun

3. Déflexion

- Astéroïde - Astéroïde
- Peu précis mais commun



1. Mesure de masse

1. Survol d'une sonde

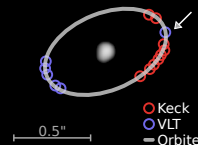
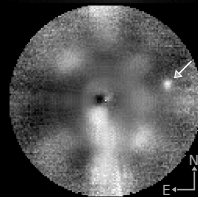
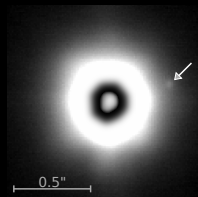
- Astéroïde - Sonde
- Précis mais rare

2. Satellites

- Astéroïde - Satellite
- Précis et assez commun

3. Déflexion

- Astéroïde - Astéroïde
- Peu précis mais commun



1. Mesure de masse

1. Survol d'une sonde

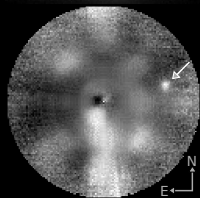
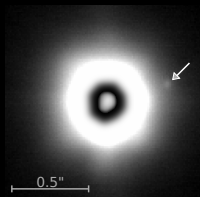
- Astéroïde - Sonde
- Précis mais rare

2. Satellites

- Astéroïde - Satellite
- Précis et assez commun

3. Déflexion

- Astéroïde - Astéroïde
- Peu précis mais commun



1. Mesure de masse

1. Survol d'une sonde

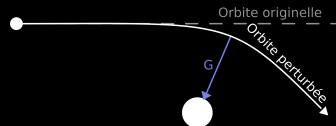
- Astéroïde - Sonde
- Précis mais rare

2. Satellites

- Astéroïde - Satellite
- Précis et assez commun

3. Déflexion

- Astéroïde - Astéroïde
- Peu précis mais commun
- Meilleur dans le futur?



1. Mesure de masse

1. Survol d'une sonde

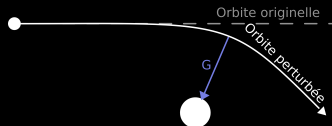
- Astéroïde - Sonde
- Précis mais rare

2. Satellites

- Astéroïde - Satellite
- Précis et assez commun

3. Déflexion

- Astéroïde - Astéroïde
- Peu précis mais commun
- Meilleur dans le futur?

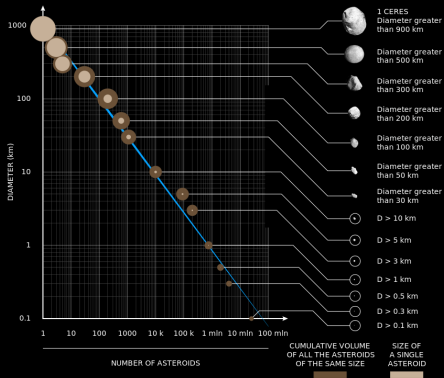


ESA

2. Mesure de volume

► Petits corps (physiquement)

- Ceres = 950 km
- 100 objets >100 km



► Petits corps (angulairement)

► Imagerie directe difficile

► Autres méthodes nécessaires

Marco Colombo

2. Mesure de volume

► Petits corps (physiquement)

- Ceres = 950 km
- 100 objets >100 km

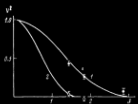
► Petits corps (angulairement)

- @ 200-750 000 000 km!
- Ceres = 0.6''!

► Imagerie directe difficile

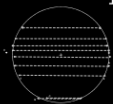
► Autres méthodes nécessaires

1980



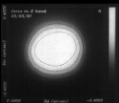
Interférométrie

1987



Occultation

1993



ESO 3.6m

1998



USAF 1.5m

2002



Hubble Space Telescope

2005



2002



Keck

2013



NASA Dawn

2. Mesure de volume

► Petits corps (physiquement)

- Ceres = 950 km
- 100 objets >100 km

► Petits corps (angulairement)

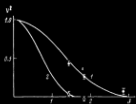
- @ 200-750 000 000 km!
- Ceres = 0.6''!

► Imagerie directe difficile

- 10m avec optique adaptative
- Hubble dans l'espace

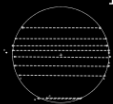
► Autres méthodes nécessaires

1980



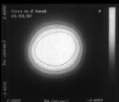
Interférométrie

1987



Occultation

1993



ESO 3.6m

1998



USAF 1.5m

2002



Hubble Space Telescope

2005



2002



Keck

2013



NASA Dawn

2. Mesure de volume

► Petits corps (physiquement)

- Ceres = 950 km
- 100 objets >100 km

► Petits corps (angulairement)

- @ 200-750 000 000 km!
- Ceres = 0.6''!

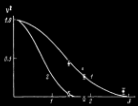
► Imagerie directe difficile

- 10m avec optique adaptative
- Hubble dans l'espace

► Autres méthodes nécessaires

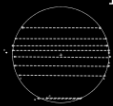
- Courbes de lumière
- Occultations stellaires
- Interférométrie
- ...

1980



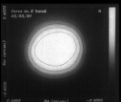
Interférométrie

1987



Occultation

1993



ESO 3.6m

1998



USAF 1.5m

2002



Hubble Space Telescope

2005



2002



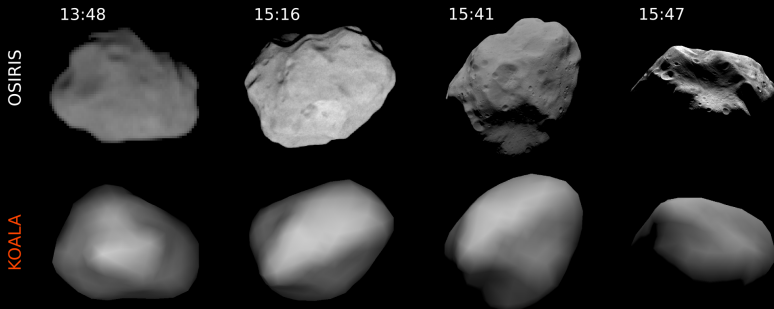
Keck

2013



NASA Dawn

Reconstruction de forme 3-D



Modèle pre-Flyby
KOALA

300 000 000 km

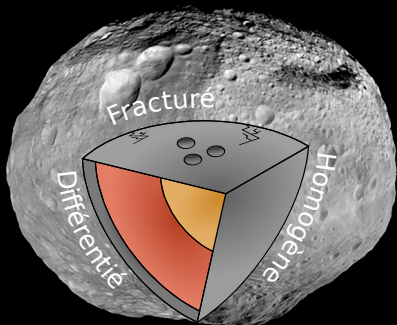
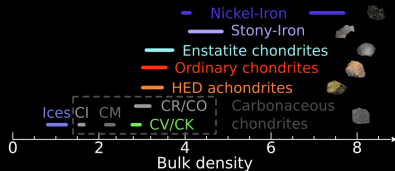
vs. Rosetta
 Forme: **2 km**

3 000 km

Précision
Diamètre: 2–5%

Carry et al. 2010,2012

Propriétés physique: Densité



• Densité \Leftrightarrow composition

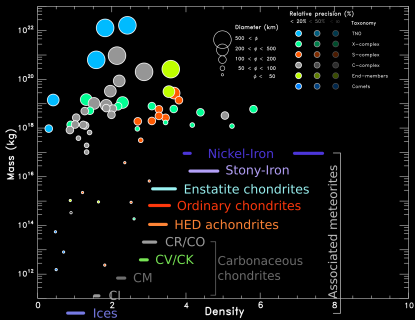
- Glace: $\rho \approx 1 \text{ g.cm}^{-3}$
- Roche: $\rho \approx 2-3 \text{ g.cm}^{-3}$
- Metal: $\rho \approx 5 \text{ g.cm}^{-3}$
- Terre: $\rho = 5.5 \text{ g.cm}^{-3}$

• Densité = Masse / Volume

• Densité et compositions

Accès à la structure interne!

Propriétés physique: Densité



- Densité \Leftrightarrow composition

- Glace: $\rho \approx 1 \text{ g.cm}^{-3}$
- Roche: $\rho \approx 2-3 \text{ g.cm}^{-3}$
- Metal: $\rho \approx 5 \text{ g.cm}^{-3}$
- Terre: $\rho = 5.5 \text{ g.cm}^{-3}$

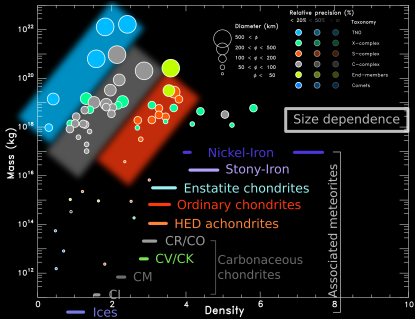
- Densité = Masse / Volume

- Densité et compositions

- Gamme par type
- Dépendance en taille

Accès à la structure interne!

Propriétés physique: Densité



- Densité \Leftrightarrow composition

- Glace: $\rho \approx 1 \text{ g.cm}^{-3}$
- Roche: $\rho \approx 2\text{--}3 \text{ g.cm}^{-3}$
- Metal: $\rho \approx 5 \text{ g.cm}^{-3}$
- Terre: $\rho = 5.5 \text{ g.cm}^{-3}$

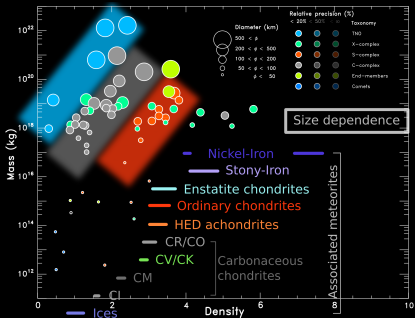
- Densité = Masse / Volume

- Densité et compositions

- Gamme par type
- Dépendance en taille

▷ Accès à la structure interne!

Propriétés physique: Densité



- Densité \Leftrightarrow composition

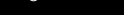
- Glace: $\rho \approx 1 \text{ g.cm}^{-3}$
- Roche: $\rho \approx 2\text{--}3 \text{ g.cm}^{-3}$
- Metal: $\rho \approx 5 \text{ g.cm}^{-3}$
- Terre: $\rho = 5.5 \text{ g.cm}^{-3}$

- Densité = Masse / Volume

- Densité et compositions

- Gamme par type
- Dépendance en taille

- ▷ Accès à la structure interne!



1. Formation planétaire
2. Système Solaire
3. Interrogations
4. Origine de l'eau
5. Masse et densité
6. Astéroïdes et Météorites

Les impacts d'astéroïdes

1. Collisions anciennes

2. Rapport récent de bolides

3. Bolides sont fréquents!

4. Source de météorite = NEAs

5. Source des NEAs?



Les impacts d'astéroïdes

1. Collisions anciennes
2. Rapport récent de bolides
3. Bolides sont fréquents!
4. Source de météorite = NEAs
5. Source des NEAs?

● Tunguska en 1908



● Carancas en 2008



● Chelyabinsk en 2013



Les impacts d'astéroïdes

1. Collisions anciennes
2. Rapport récent de bolides
3. Bolides **sont** fréquents!
4. Source de météorite = NEAs
5. Source des NEAs?



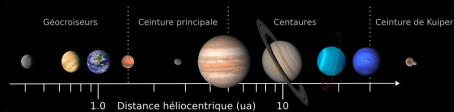
Les impacts d'astéroïdes

1. Collisions anciennes
2. Rapport récent de bolides
3. Bolides **sont** fréquents!
4. Source de météorite = NEAs
5. Source des NEAs?

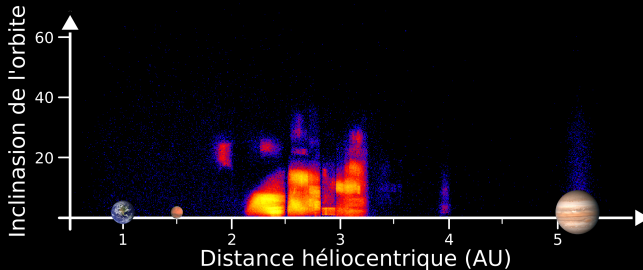


Les impacts d'astéroïdes

1. Collisions anciennes
2. Rapport récent de bolides
3. Bolides **sont** fréquents!
4. Source de météorite = NEAs
5. Source des NEAs?

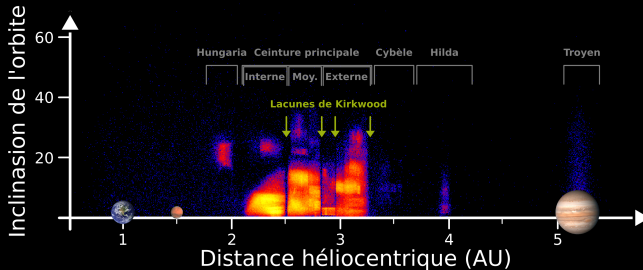


Géocroiseurs de la ceinture



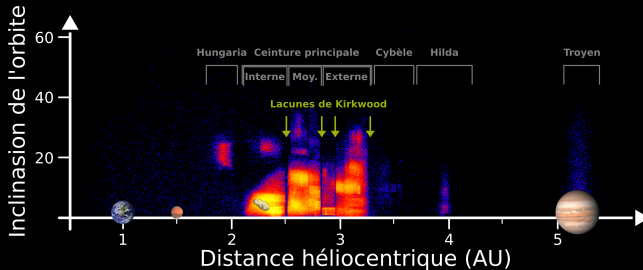
1. Ceinture & résonances
2. Astéroïde sur résonance par
 - ▶ Collision
 - ▶ Yarkovsky
3. Rencontres planétaires

Géocroiseurs de la ceinture



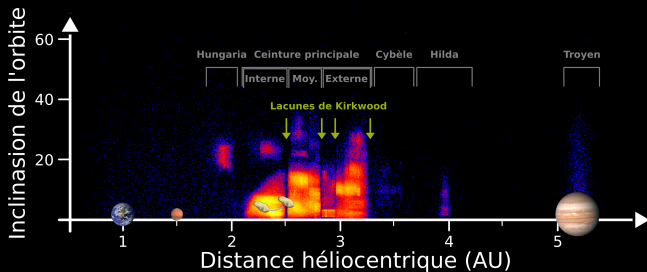
1. Ceinture & résonances
2. Astéroïde sur résonance par
 - ▶ Collision
 - ▶ Yarkovsky
3. Rencontres planétaires

Géocroiseurs de la ceinture

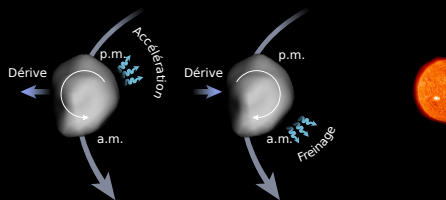


1. Ceinture & résonances
2. Astéroïde sur résonance par
 - ▶ Collision
 - ▶ Yarkovsky
3. Rencontres planétaires

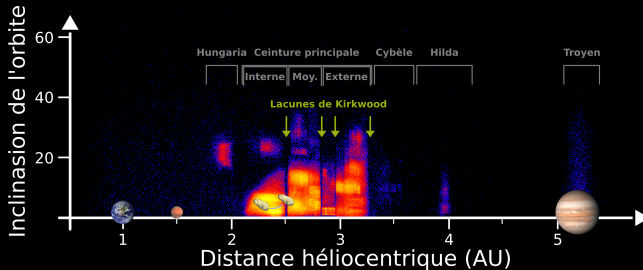
Géocroiseurs de la ceinture



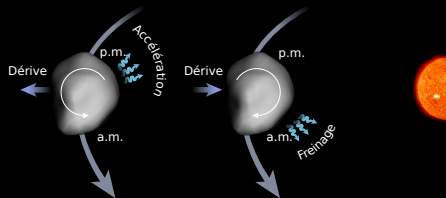
1. Ceinture & résonances
2. Astéroïde sur résonance par
 - ▶ Collision
 - ▶ Yarkovsky
3. Rencontres planétaires



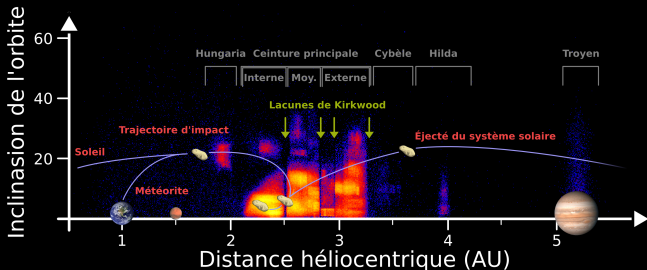
Géocroiseurs de la ceinture



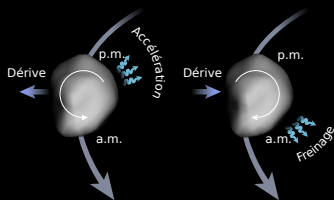
1. Ceinture & résonances
2. Astéroïde sur résonance par
 - ▶ Collision
 - ▶ Yarkovsky
3. Rencontres planétaires



Géocroiseurs de la ceinture



1. Ceinture & résonances
2. Astéroïde sur résonance par
 - ▶ Collision
 - ▶ Yarkovsky
3. Rencontres planétaires



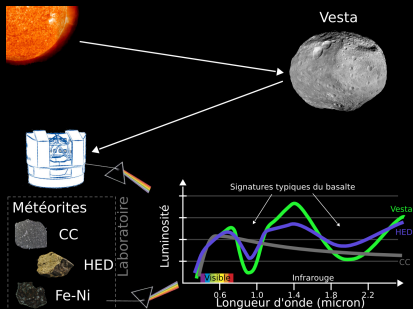
Météorites & Composition

► Composition des astéroïdes:

- Spectroscopie V+IR
- Comparaison avec météorites

► Représentativité?

► Solutions?



Météorites & Composition

► Composition des astéroïdes:

- Spectroscopie V+IR
- Comparaison avec météorites

► Représentativité?

- Astéroïdes: 26 classes
- Météorites: 46 classes
- ▷ ???

► Solutions?

Bus-DeMeo Taxonomy Key

S-complex



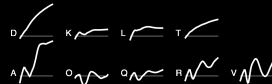
C-complex



X-complex



End Members



<http://smass.mit.edu/busdemeoclass.html>

F. E. DeMeo, R. P. Binzel, S. M. Slivan, and S. J. Bus. Icarus 202 (2009) 180-180

DeMeo et al. 2009

Météorites & Composition

► Composition des astéroïdes:

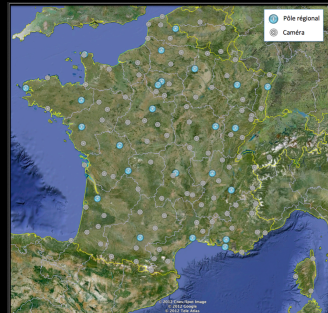
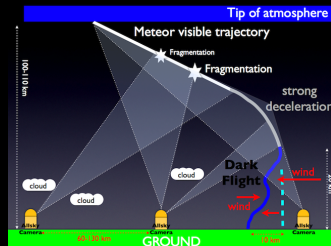
- Spectroscopie V+IR
- Comparaison avec météorites

► Représentativité?

- Astéroïdes: 26 classes
- Météorites: 46 classes
- ▷ ???

► Solutions?

- Réseau de vigie ciel
- Spectres d'astéroïdes



Astéroïdes, Comètes, Météores



Briques de constructions du système solaire