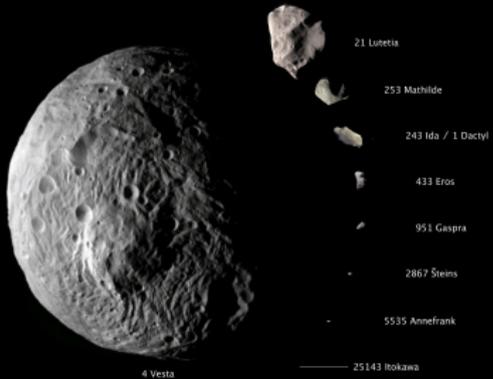


# L'histoire du système solaire vue par les petits corps



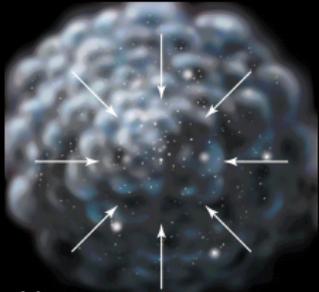
B. Carry

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



(a)



(b)



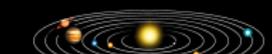
(c)



(d)



(e)

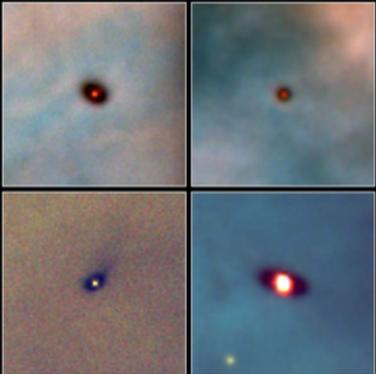


(f)

Un processus par étapes successives:

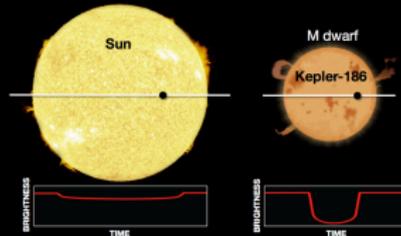
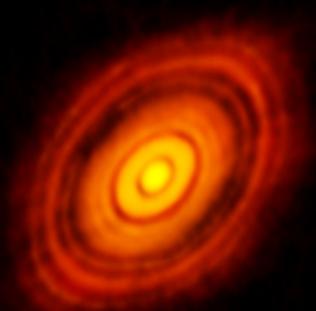
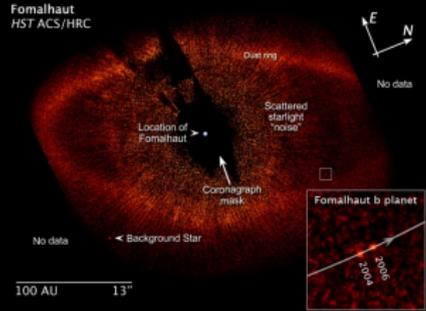
- a. Contraction du nuage de gaz & poussière
- b. Formation d'un disque
- c. Rotation, accumulation de matériaux
- d. Naissance de l'étoile
- e. Accrétion dans le disque et planétésimaux
- f. Système planétaire

# Formation planétaire: Exemples



Protoplanetary Disks  
Orion Nebula

PRC95-15b - ST ScI OPO - November 20, 1995  
M. J. McCaughrean (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA



# Formation planétaire: Petits corps

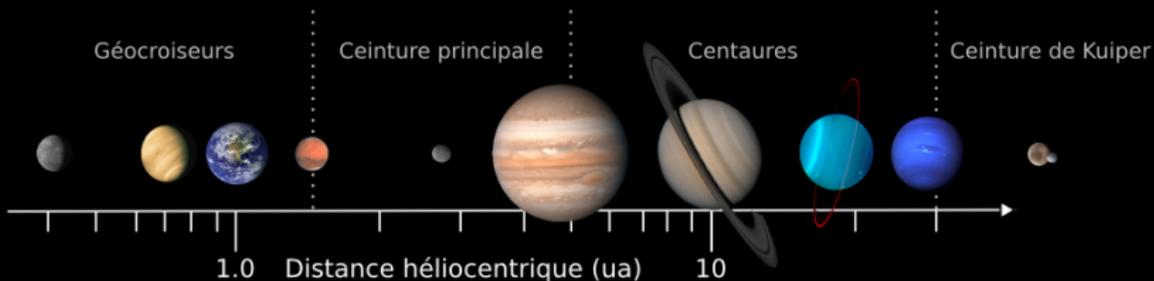
## 1. Population importante

- 732 833 objets (*plusieurs millions*)
- Large gamme de distances héliocentriques [ $1 \rightarrow 10^{2-5}$  ua]
- Large gamme de compositions [roches  $\rightarrow$  glaces]

## 2. Population primitive

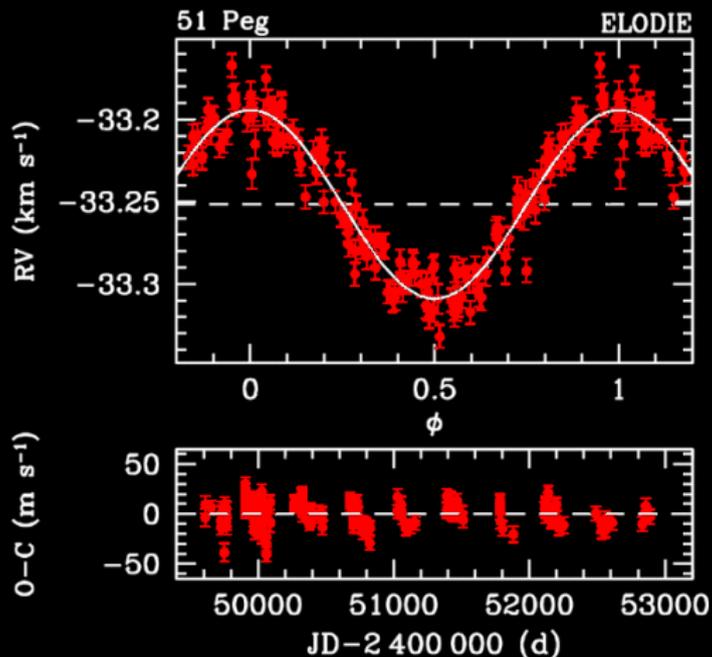
- **Petits** objets [m  $\rightarrow$  1000 km]
- Énergie interne  $\approx$  nulle
- Pas d'activité endogène

### ▷ 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: Le feu aux poudres

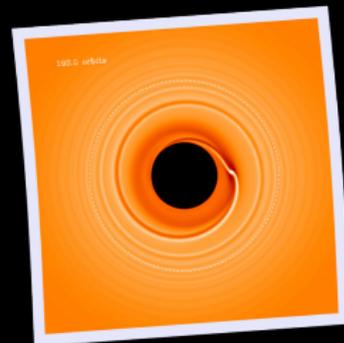


Mayor & Queloz, 1995



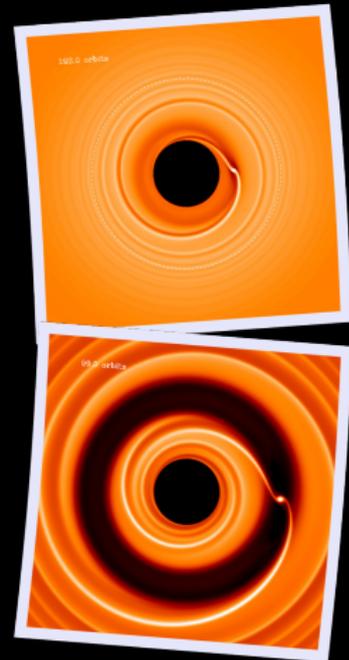
# Histoire: Ingrédients

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



# Histoire: Ingrédients

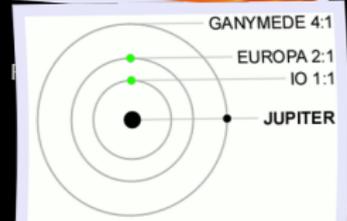
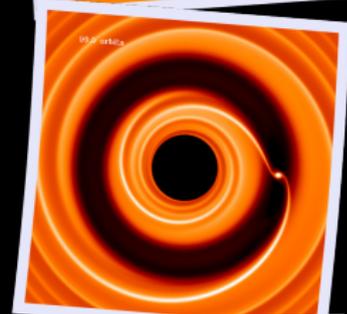
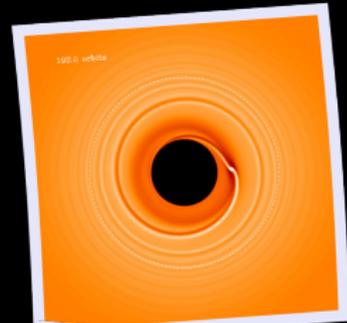
- Migration de type I
  - Déplacement dans le disque
  - Vers l'intérieur
  - Très rapide
- Migration de type II
  - Ouverture d'un gap
  - Vers l'intérieur ou extérieur
  - Beaucoup plus lent



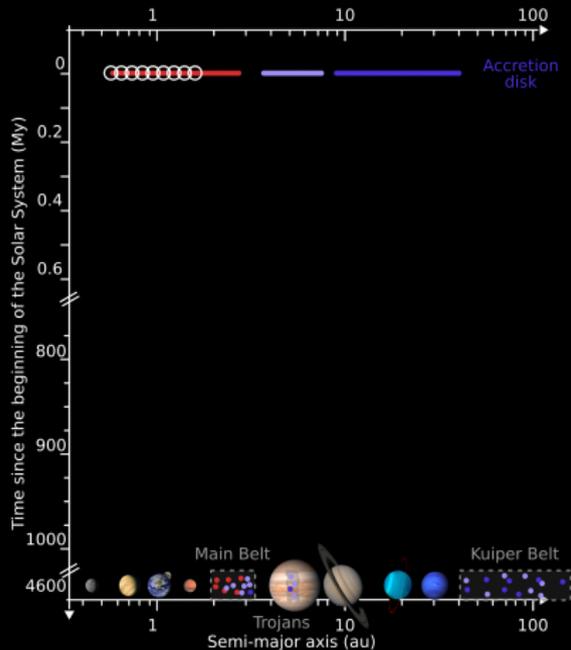
F. Masset

# 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

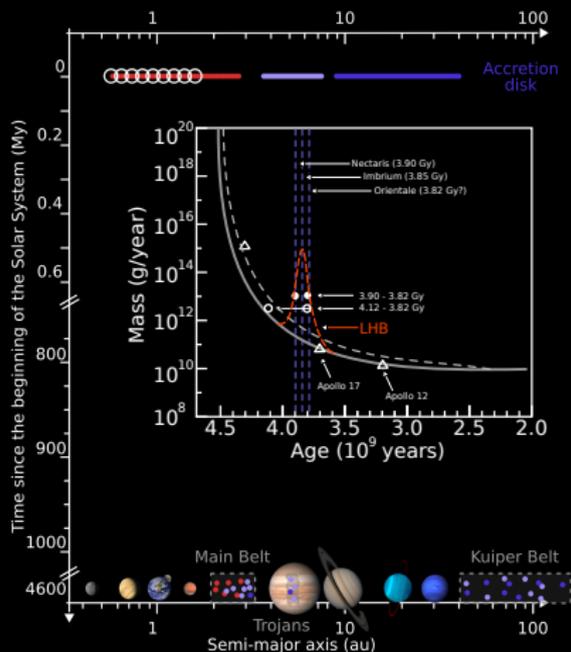
- Masses relatives
- Excentricités

## 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

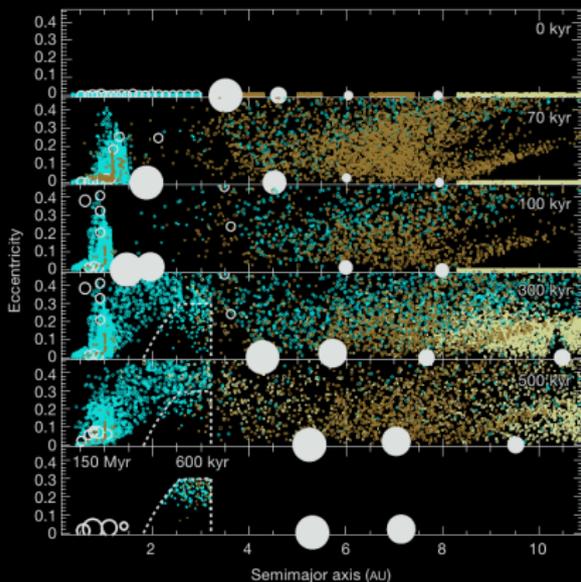
- Masses relatives
- Excentricités

## 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

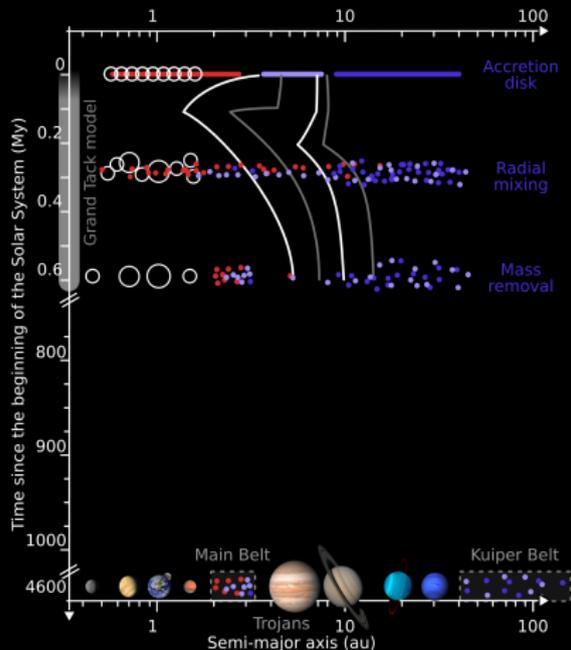
## B. Saturne entraine Jupiter

- 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

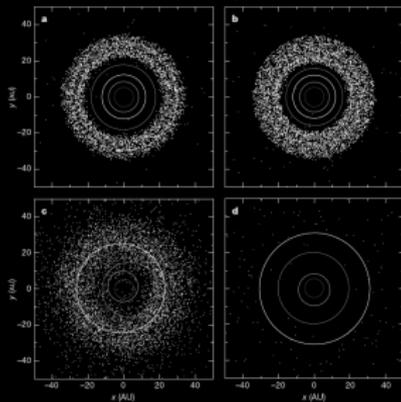
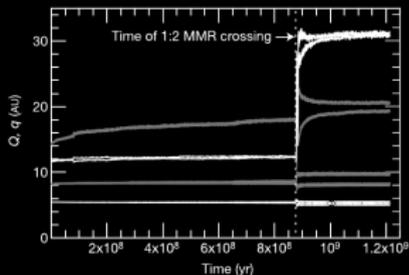
## B. Saturne entraine Jupiter

- 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. Évolution lente

- Planètes en résonance
- Instabilité tardive
- Éjection de Neptune

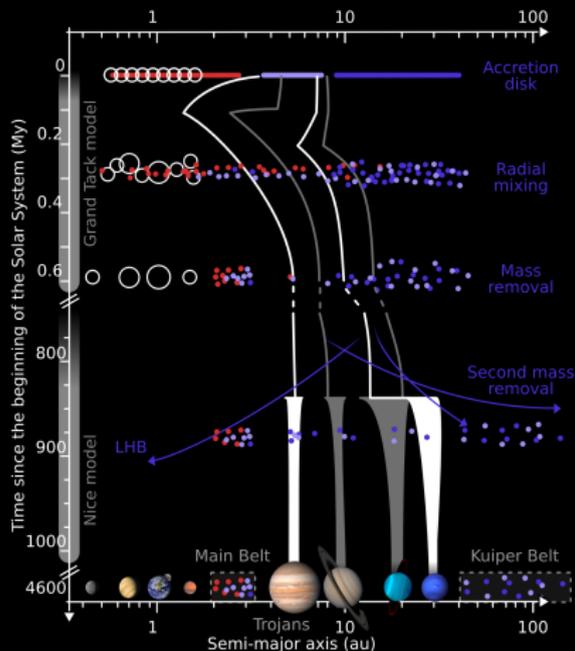
## B. Nouveau paradigme

- Géante glacée
- **Jumping Jupiter**

## C. Bilan

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

# Histoire: Modèle de Nice



DeMeo & Carry 2014

## A. Évolution lente

- Planètes en résonance
- Instabilité tardive
- Éjection de Neptune

## B. Nouveau paradigme

- Géante glacée
- **Jumping Jupiter**

## 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?

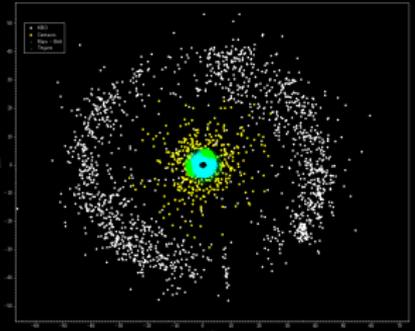
## 1. Découvertes & Recensement

- Observation → population
- Nouvelles catégories
- ▶ Grands relevés

## 2. Dynamique

## 3. Composition

## 4. Propriétés physiques



# Comment y répondre?

## 1. Découvertes & Recensement

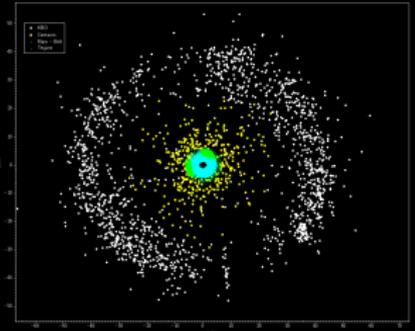
- Observation → population
- Nouvelles catégories
- ▶ Grands relevés

## 2. Dynamique

- Origine & évolution
- ▶ Modèles numériques

## 3. Composition

## 4. Propriétés physiques



# Comment y répondre?

## 1. Découvertes & Recensement

- Observation → population
- Nouvelles catégories
- ▶ Grands relevés

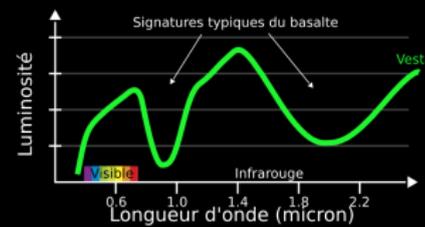
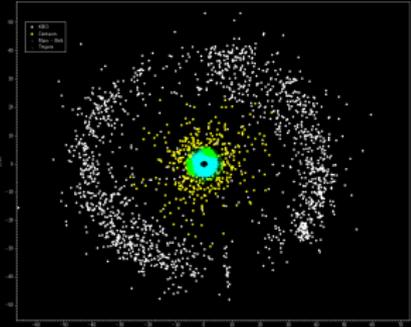
## 2. Dynamique

- Origine & évolution
- ▶ Modèles numériques

## 3. Composition

- Astéroïdes → Minéraux
- Comètes → Volatiles
- ▶ Spectroscopie

## 4. Propriétés physiques



# Comment y répondre?

## 1. Découvertes & Recensement

- Observation → population
- Nouvelles catégories
- ▶ Grands relevés

## 2. Dynamique

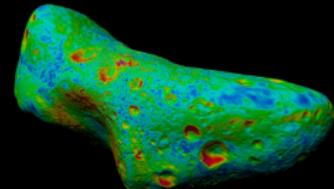
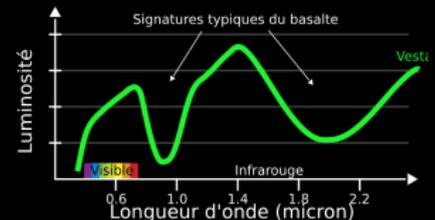
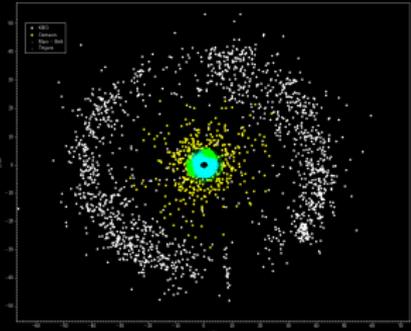
- Origine & évolution
- ▶ Modèles numériques

## 3. Composition

- Astéroïdes → Minéraux
- Comètes → Volatiles
- ▶ Spectroscopie

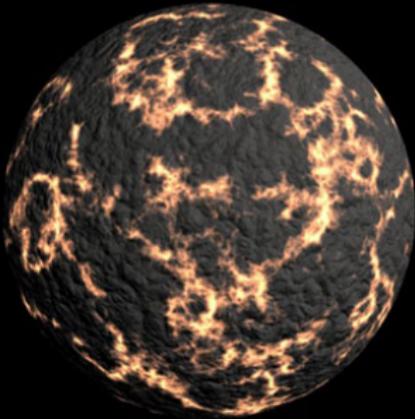
## 4. Propriétés physiques

- Points → Mondes
- Structure intérieure & surface



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?

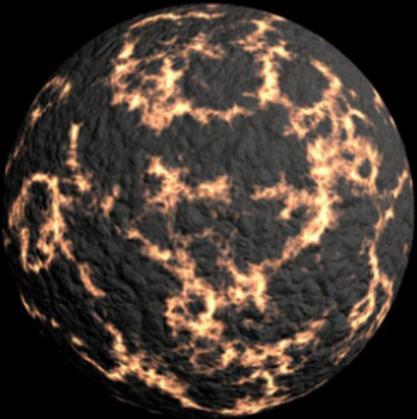
## 2. Implantation tardive

## 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?

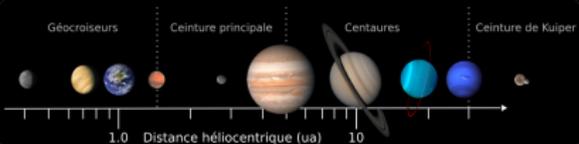
## 2. Implantation tardive

- Ségrégation héliocentrique
- Comètes!

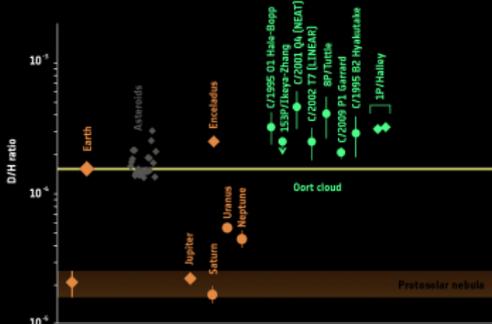
## 3. Composition de l'eau

## 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!

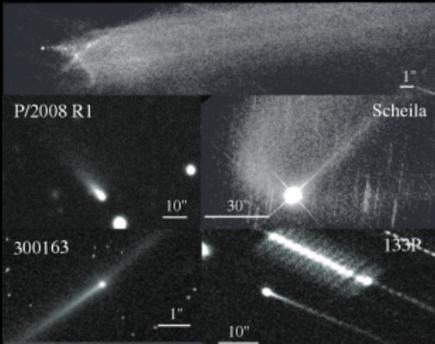
## 3. Composition de l'eau

- Isotopes O, D/H
- Comètes?

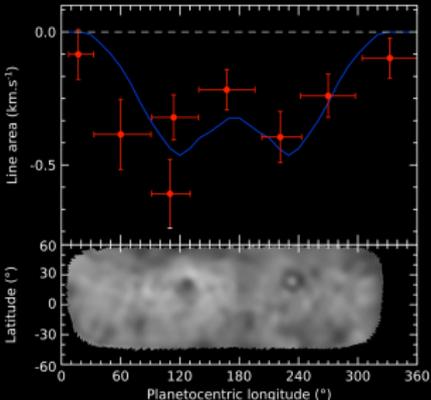
## 4. Des astéroïdes?

## 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

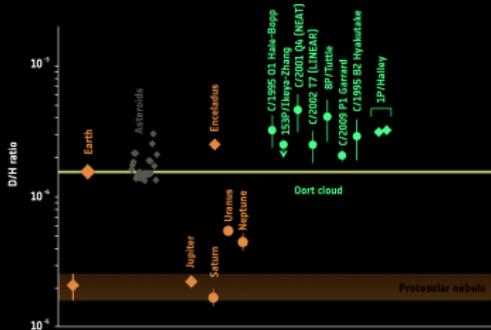
- Isotopes O, D/H
- Comètes?

## 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?

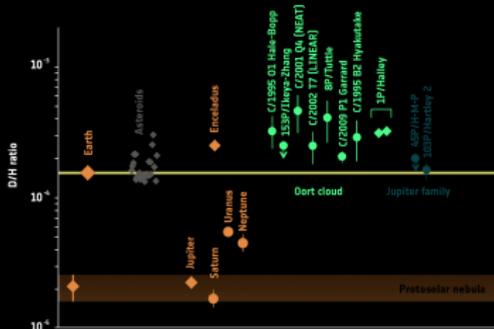
## 4. Des astéroïdes?

- 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 accréation
- Dégazage de l'eau?

## 2. Implantation tardive

- Ségrégation héliocentrique
- Comètes!

## 3. Composition de l'eau

- Isotopes O, D/H
- Comètes?

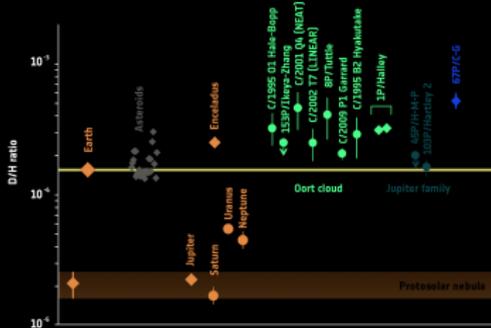
## 4. Des astéroïdes?

- 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  
 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?

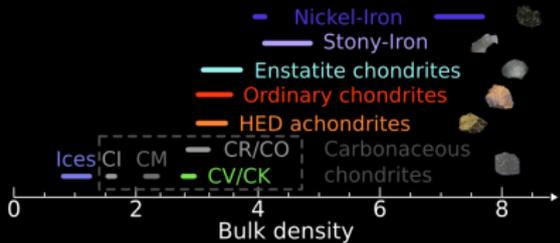
- Astéroïdes actifs!
- Cérès!

## 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

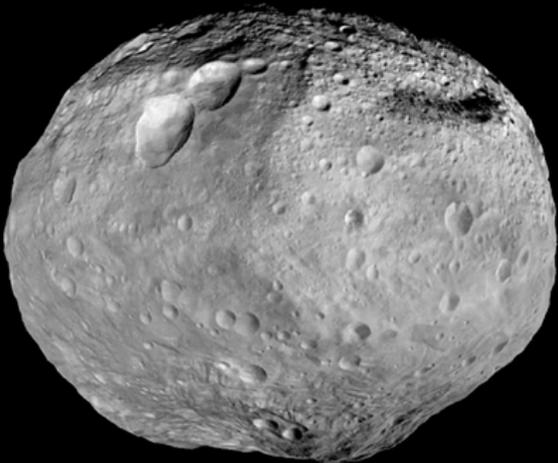
# Propriétés physique: Densité



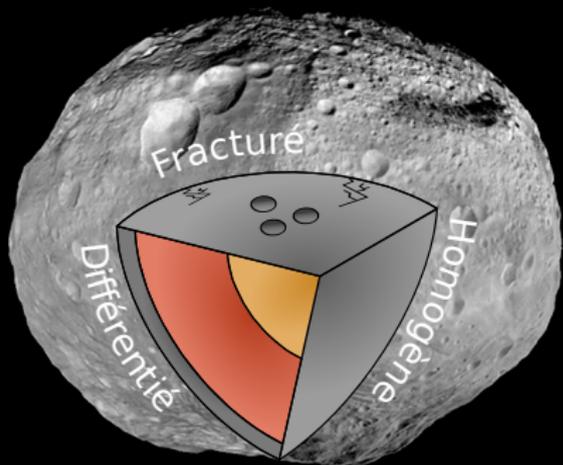
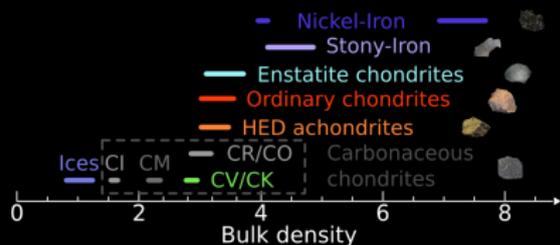
## • Densité ⇔ composition

- 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

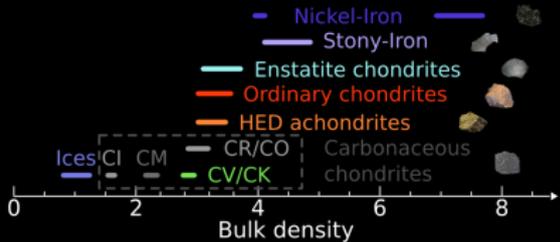


## • Densité $\Leftrightarrow$ composition

- 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

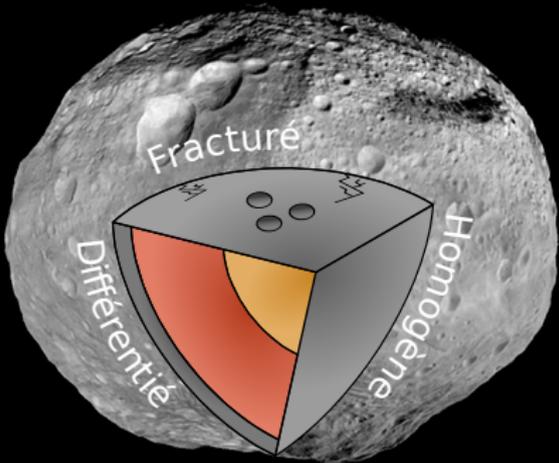
# Propriétés physique: Densité



- Densité  $\Leftrightarrow$  composition

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

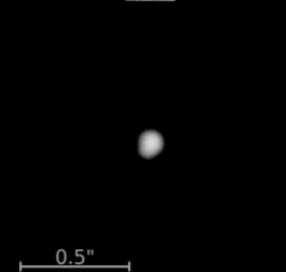
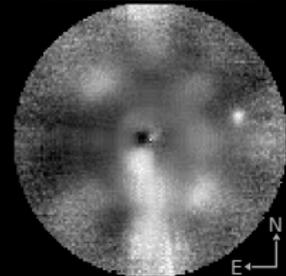
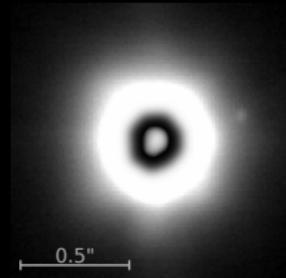
- Astéroïde - Sonde
- Précis mais rare

## 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

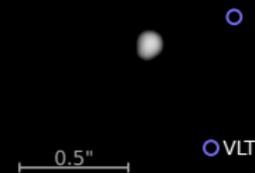
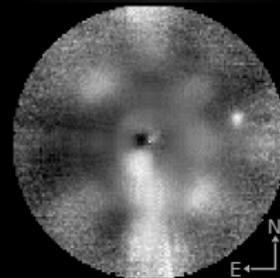
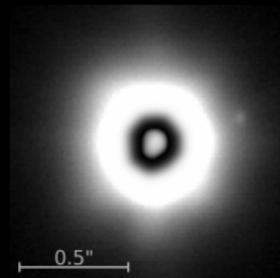
- Astéroïde - Sonde
- Précis mais rare

## 2. Satellites

- Astéroïde - Satellite
- Précis et assez commun

## 3. Déflexion

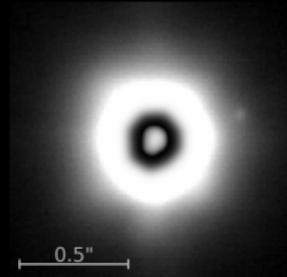
- Astéroïde - Astéroïde
- Peu précis mais commun



# 1. Mesure de masse

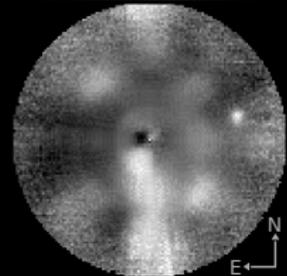
## 1. Survol d'une sonde

- Astéroïde - Sonde
- Précis mais rare



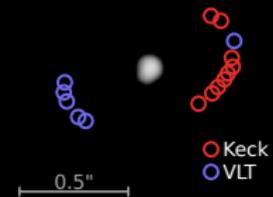
## 2. Satellites

- Astéroïde - Satellite
- Précis et assez commun



## 3. Déflexion

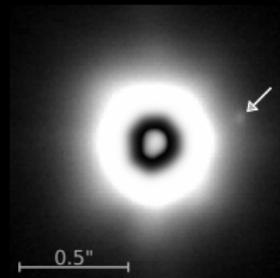
- Astéroïde - Astéroïde
- Peu précis mais commun



# 1. Mesure de masse

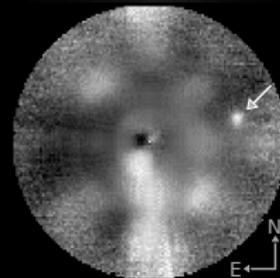
## 1. Survol d'une sonde

- Astéroïde - Sonde
- Précis mais rare



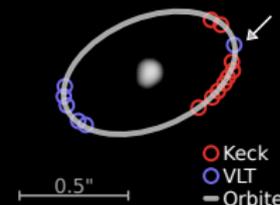
## 2. Satellites

- Astéroïde - Satellite
- Précis et assez commun



## 3. Déflexion

- Astéroïde - Astéroïde
- Peu précis mais commun



# 1. Mesure de masse

## 1. Survol d'une sonde

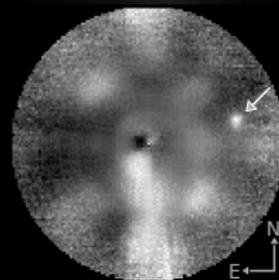
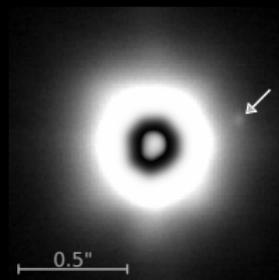
- Astéroïde - Sonde
- Précis mais rare

## 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

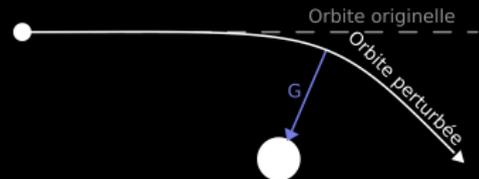
- Astéroïde - Sonde
- Précis mais rare

## 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

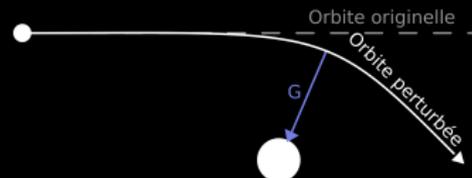
- Astéroïde - Sonde
- Précis mais rare

## 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

### 1. Mesures directes

- **WYSIWYG**  $\neq$  model-dépendant
- ▶ Images du disque apparent
- ▶ Occultations stellaires

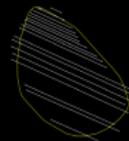
### 2. Forme 3-D réaliste

### 3. Complétude des géometries

(21) Lutetia



(135) Hertha



(1) Ceres



1 Euro



@ 2km

## 2. Mesure de volume

### 1. Mesures directes

- **WYSIWYG**  $\neq$  model-dépendant
- ▶ Images du disque apparent
- ▶ Occultations stellaires

### 2. Forme 3-D réaliste

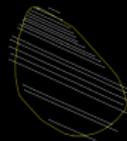
- Hypothèses  $\Rightarrow$  **biais**
- Concavité  $\Leftrightarrow$  Volume

### 3. Complétude des géometries

(21) Lutetia



(135) Hertha



(1) Ceres



1 Euro



@ 2km

## 2. Mesure de volume

### 1. Mesures directes

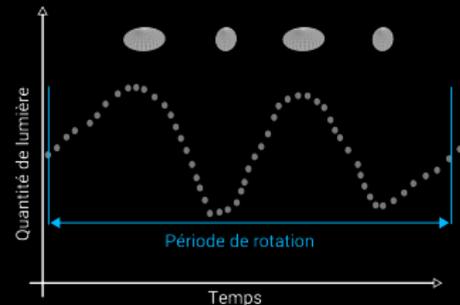
- **WYSIWYG**  $\neq$  model-dépendant
- ▶ Images du disque apparent
- ▶ Occultations stellaires

### 2. Forme 3-D réaliste

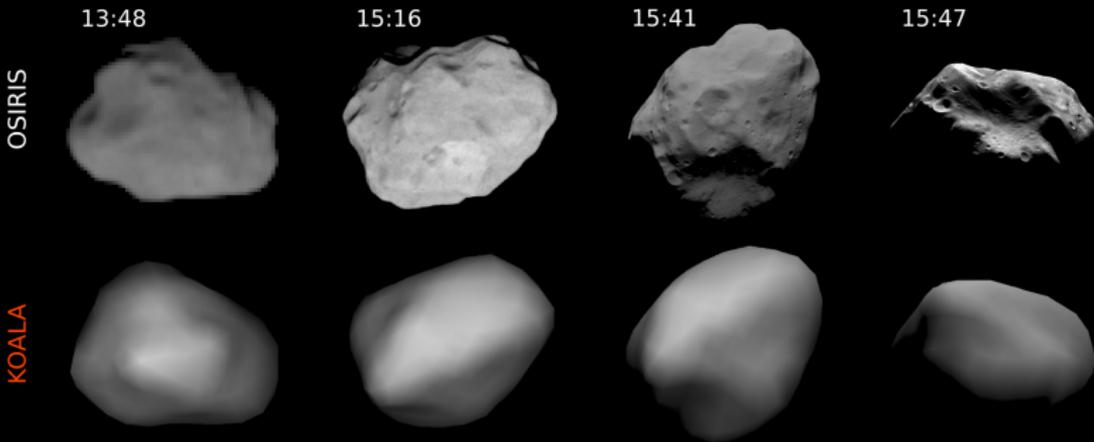
- Hypothèses  $\Rightarrow$  **biais**
- Concavité  $\Leftrightarrow$  Volume

### 3. Complétude des géometries

- Approche **extensive**
- ▶ Courbes de lumières
- ▶ Radiométrie thermique
- ▶ Interférométrie
- ▶ Echos radar



# Reconstruction de forme 3-D



Modèle pre-Flyby  
**KOALA**

300 000 000 km

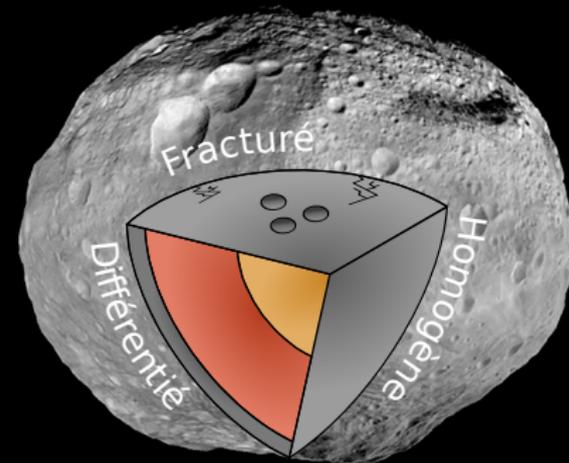
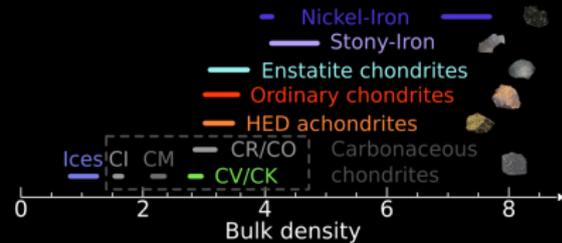
vs. Rosetta  
Forme: **2 km**

3 000 km

Précision  
**Diamètre: 2–5%**

Carry et al. 2010,2012

# Propriétés physique: Densité



## • Densité $\Leftrightarrow$ composition

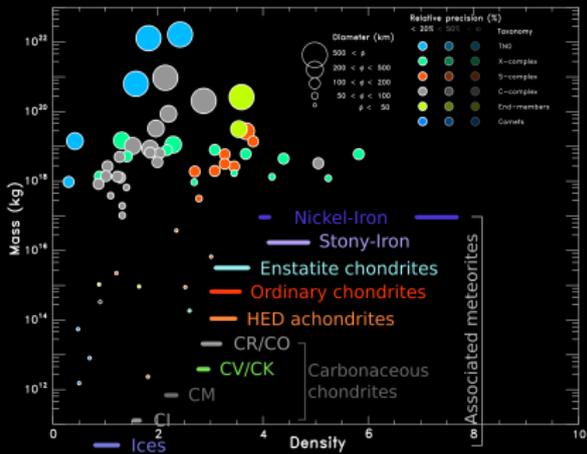
- Glace:  $\rho \approx 1 \text{ g.cm}^{-3}$
- Roche:  $\rho \approx 2-3 \text{ g.cm}^{-3}$
- Metal:  $\rho \approx 5 \text{ g.cm}^{-3}$
- Terre:  $\rho = 5.5 \text{ g.cm}^{-3}$

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

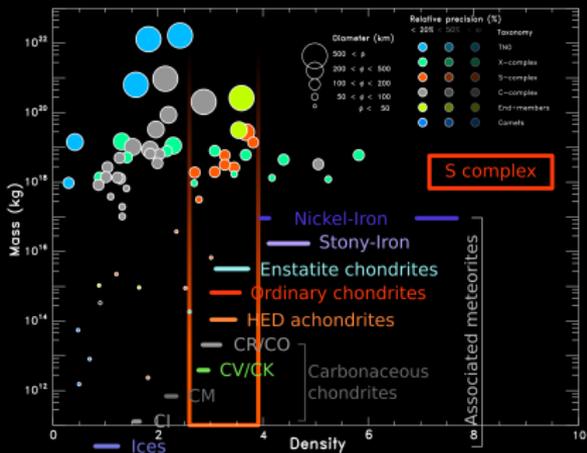
- Densité = Masse / Volume

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

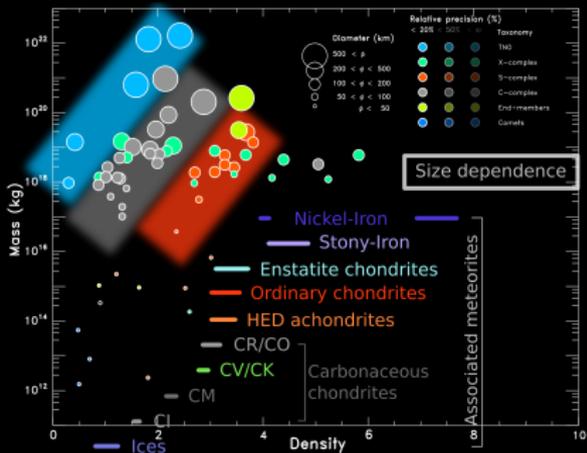
- Densité = Masse / Volume

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

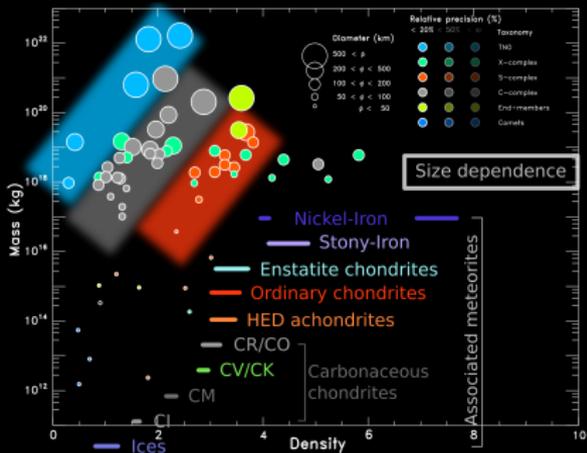
- Densité = Masse / Volume

- 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?



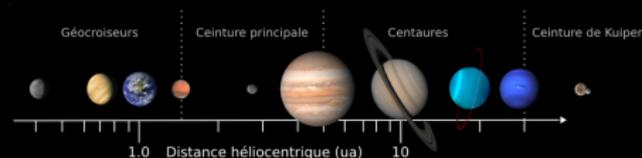
# Les impacts d'astéroïdes

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

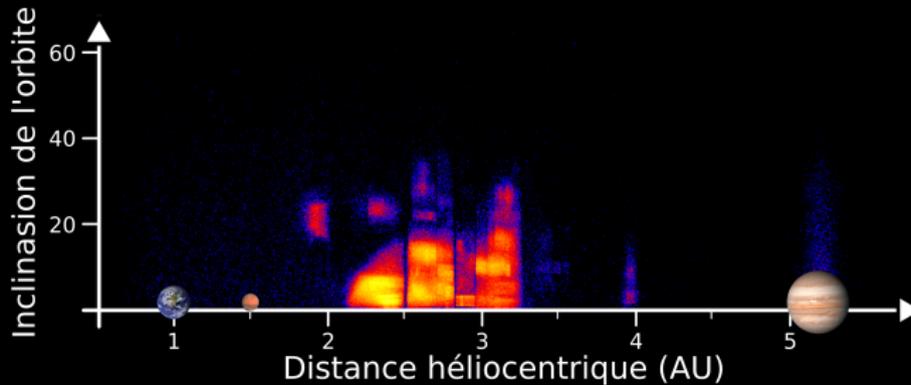


# Les impacts d'astéroïdes

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

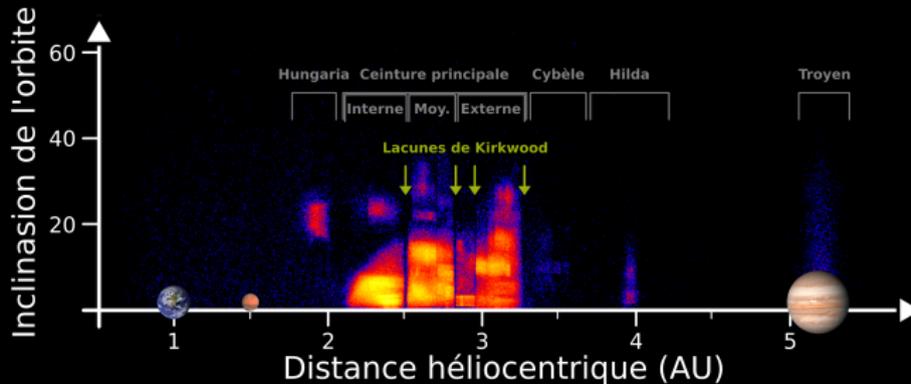


# Géocroiseurs de la ceinture



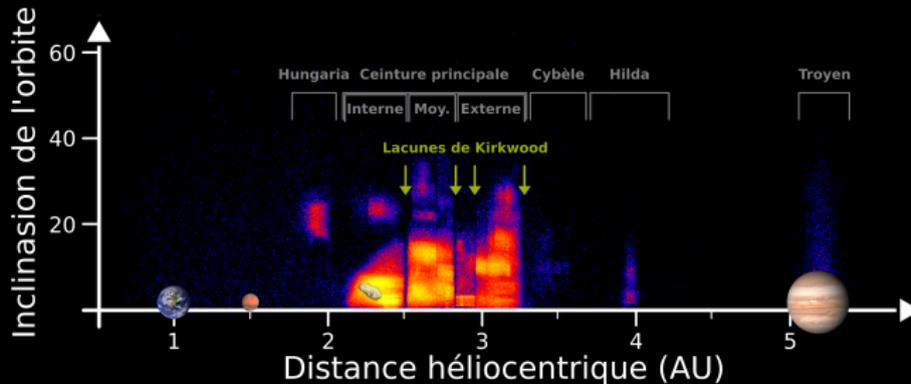
1. Ceinture & résonances
2. Astéroïde sur résonance par
  - ▶ Collision
  - ▶ Yarkovsky
3. Rencontres planétaires

# Géocroiseurs de la ceinture



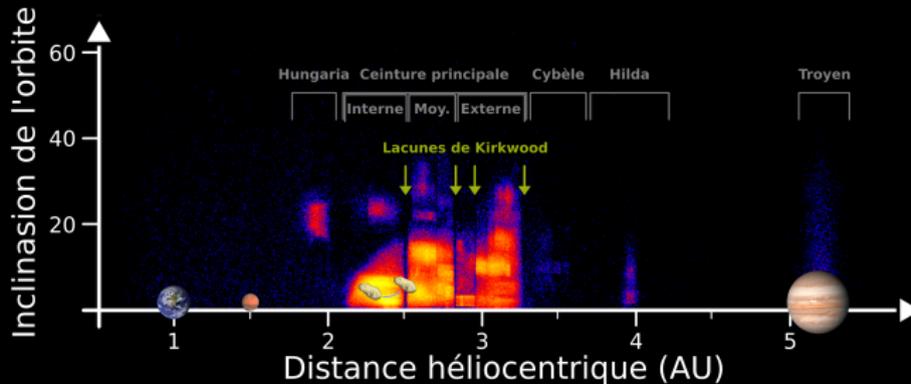
1. Ceinture & résonances
2. Astéroïde sur résonance par
  - ▶ Collision
  - ▶ Yarkovsky
3. Rencontres planétaires

# Géocroiseurs de la ceinture

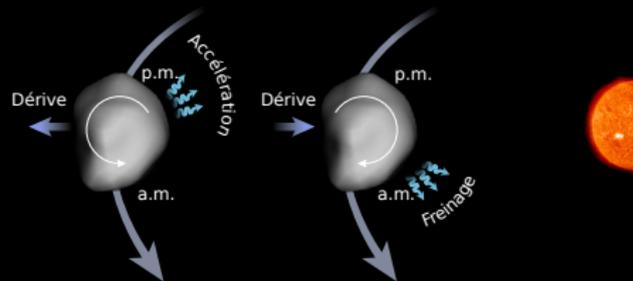


1. Ceinture & résonances
2. Astéroïde sur résonance par
  - ▶ Collision
  - ▶ Yarkovsky
3. Rencontres planétaires

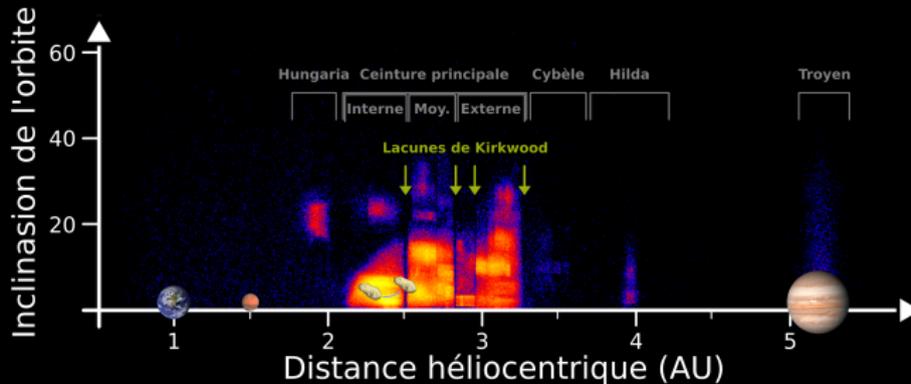
# Géocroiseurs de la ceinture



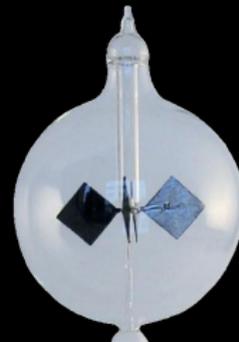
1. Ceinture & résonances
2. Astéroïde sur résonance par
  - ▶ Collision
  - ▶ Yarkovsky
3. Rencontres planétaires



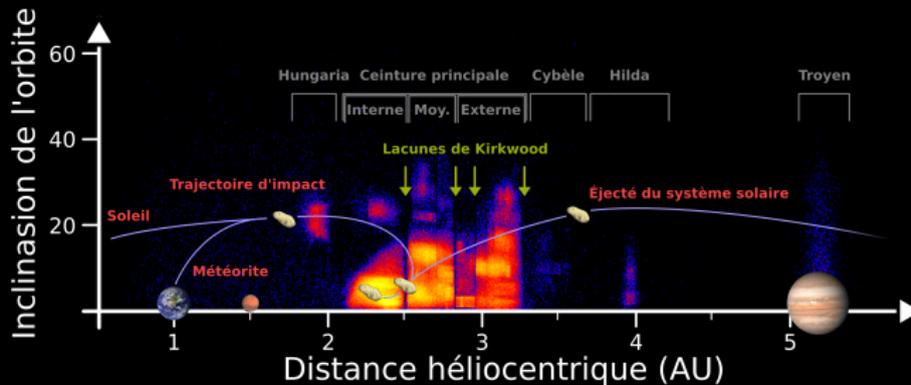
# Géocroiseurs de la ceinture



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



# Géocroiseurs de la ceinture



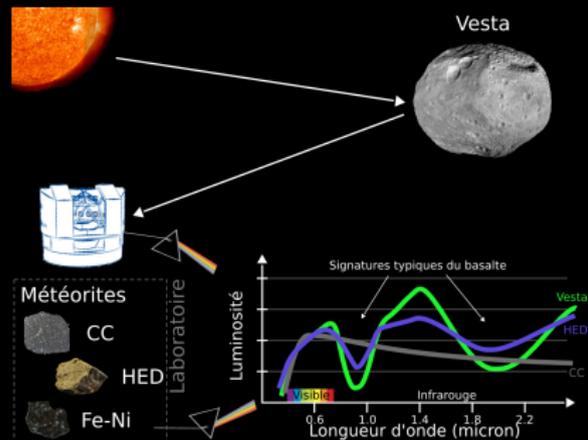
1. Ceinture & résonances
2. Astéroïde sur résonance par
  - ▶ Collision
  - ▶ Yarkovsky
3. Rencontres planétaires

# Météorites & Composition

## ► Composition des astéroïdes:

- Spectroscopie V+IR
- Comparaison avec météorites

## ► Représentativité?



## ► Solutions?

# Météorites & Composition

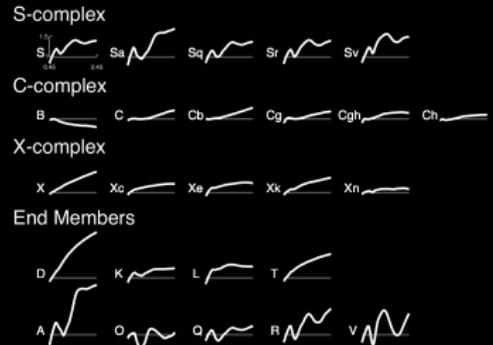
## ► Composition des astéroïdes:

- Spectroscopie V+IR
- Comparaison avec météorites

## ► Représentativité?

- Astéroïdes: 26 classes
- Minéralogie inconnue pour 20%
- Météorites: 46 classes
- Biais énormes
- Altérations!

Bus-DeMeo Taxonomy Key



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

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

## ► Solutions?

DeMeo et al. 2009

# Météorites & Composition

## ► Composition des astéroïdes:

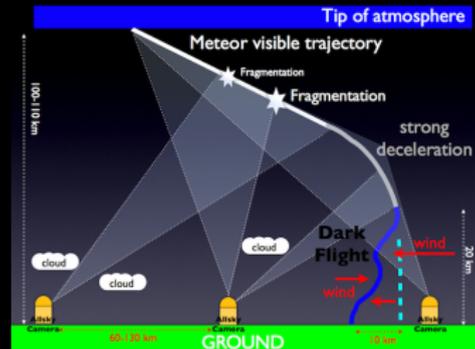
- Spectroscopie V+IR
- Comparaison avec météorites

## ► Représentativité?

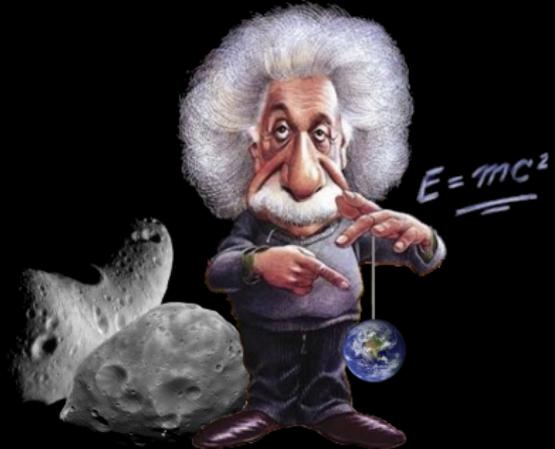
- Astéroïdes: 26 classes
- Minéralogie inconnue pour 20%
- Météorites: 46 classes
- Biais énormes
- Altérations!

## ► Solutions?

- Réseau de vigie ciel
- Spectres d'astéroïdes



# Astéroïdes, Comètes, Météores



Briques de constructions du système solaire