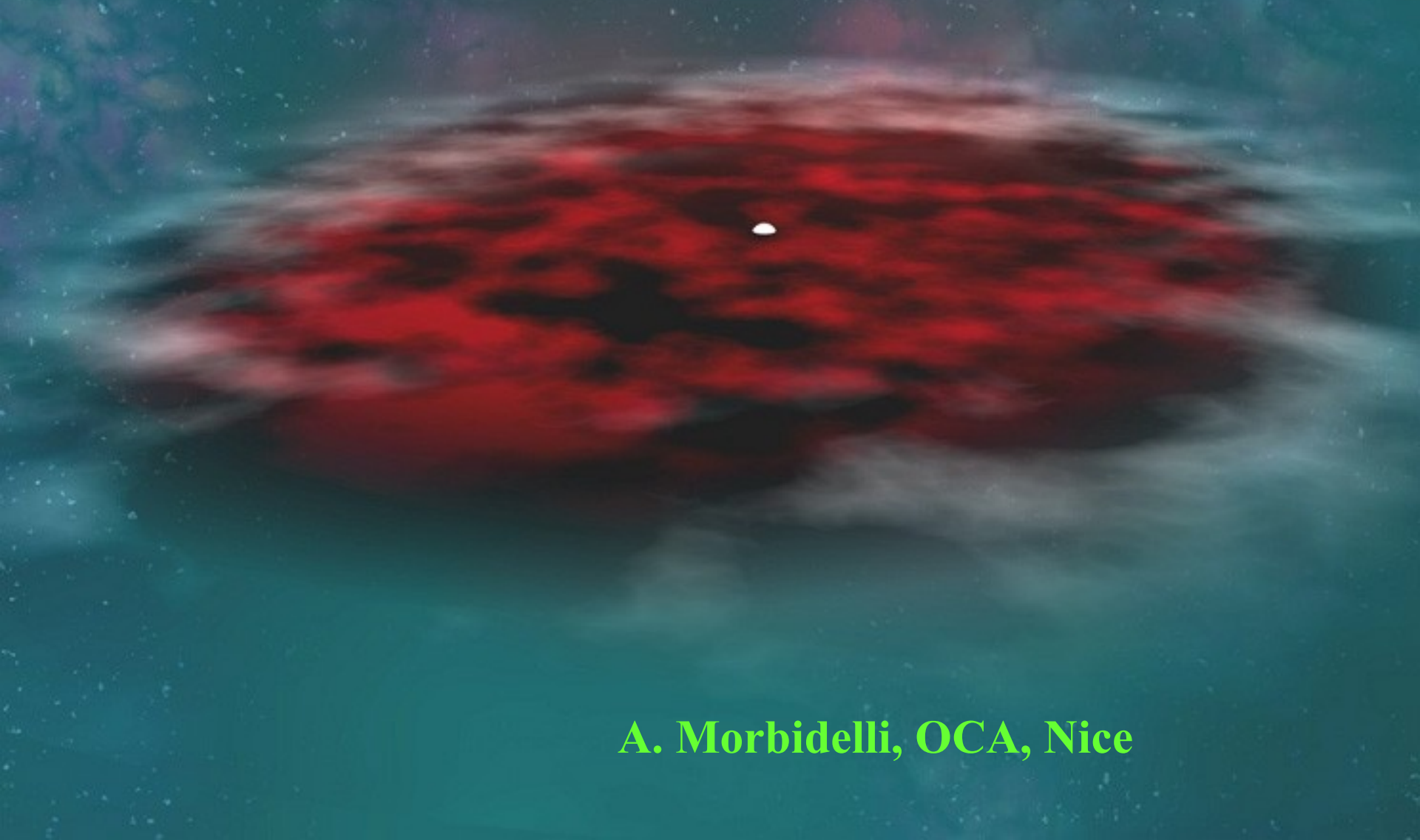
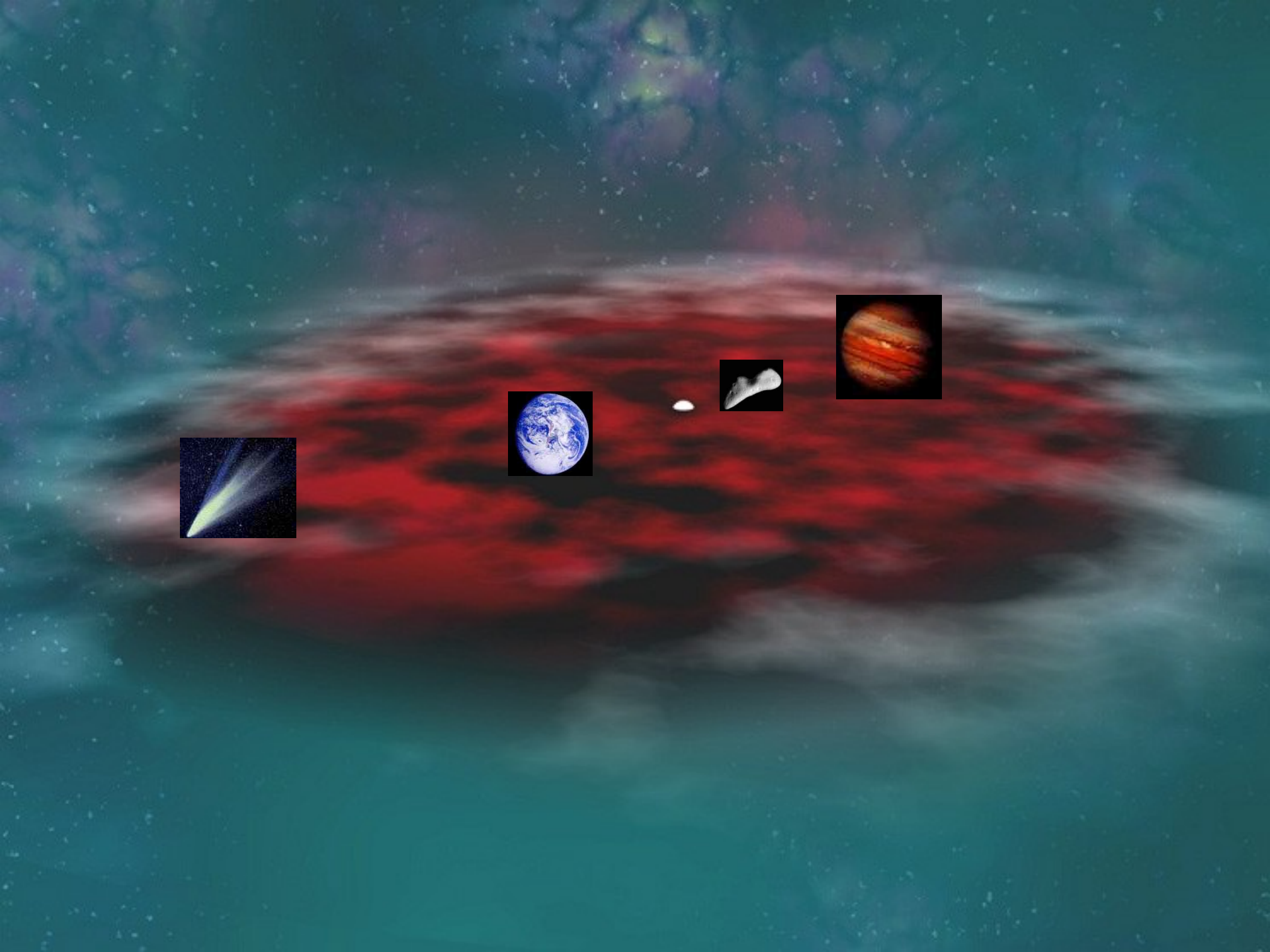


LE GRAND BOMBARDEMENT TARDIF ET LA FORMATION DU SYSTEME SOLAIRE



A. Morbidelli, OCA, Nice

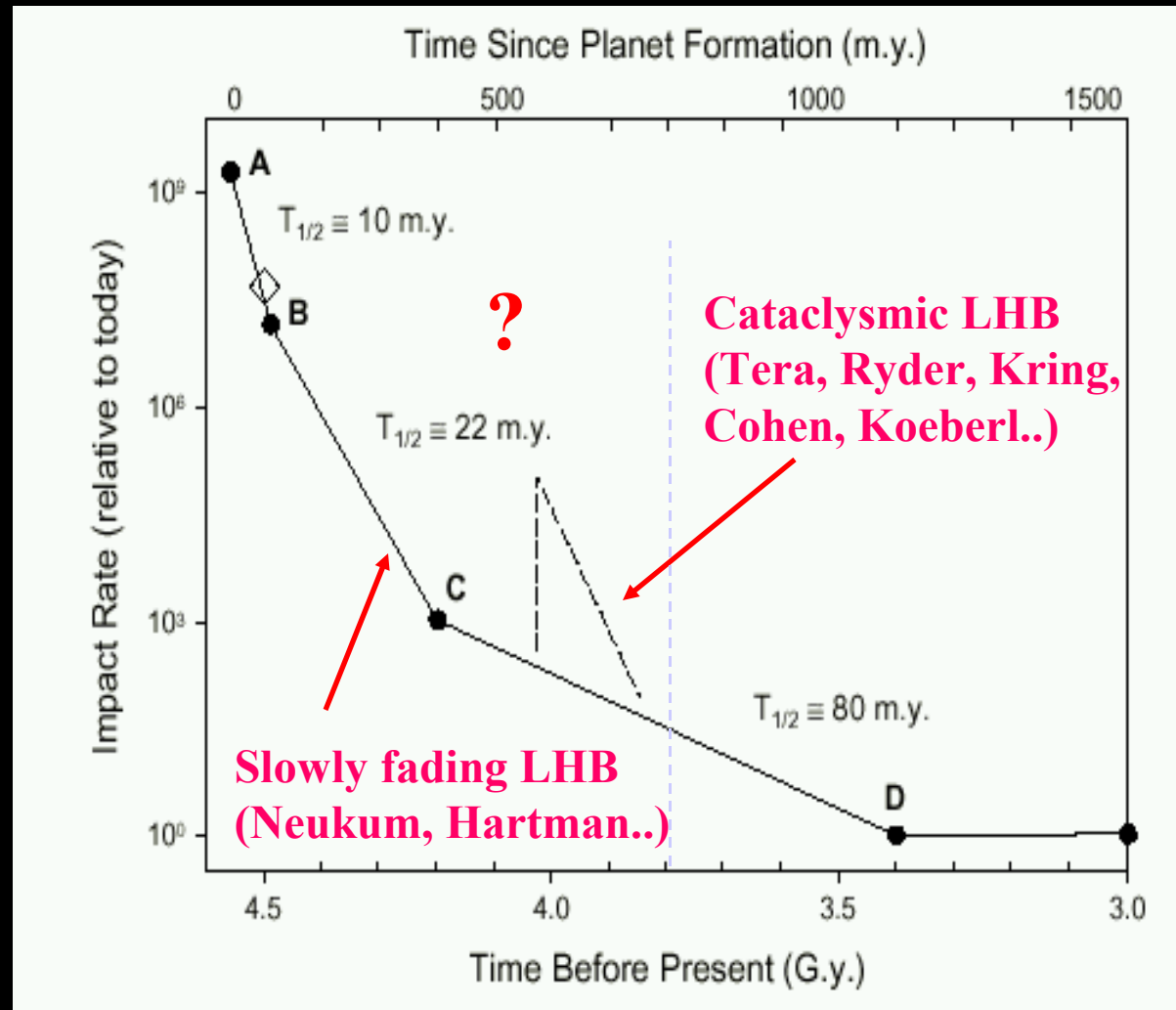




"LUNA"

Le bombardement de la Lune était beaucoup plus intense avant –3,6 Ga que maintenant

Problème: quelle a été l'évolution temporelle du bombardement depuis la formation des la Lune et des planètes?



Evidence for a cataclysm $\sim 4.0\text{-}3.8$ Gy ago:

The ages of the rocks collected on the Moon cluster at $\sim 3.9\text{-}3.8$ Gy, and rocks older than 4 Gy are extremely rare.

Suggests a disastrous sudden and short-lived cratering episode about 3.9 Gy ago, which destroyed all primordial rocks, resetting their ages (Tera et al., 1974)

Counter-argument:

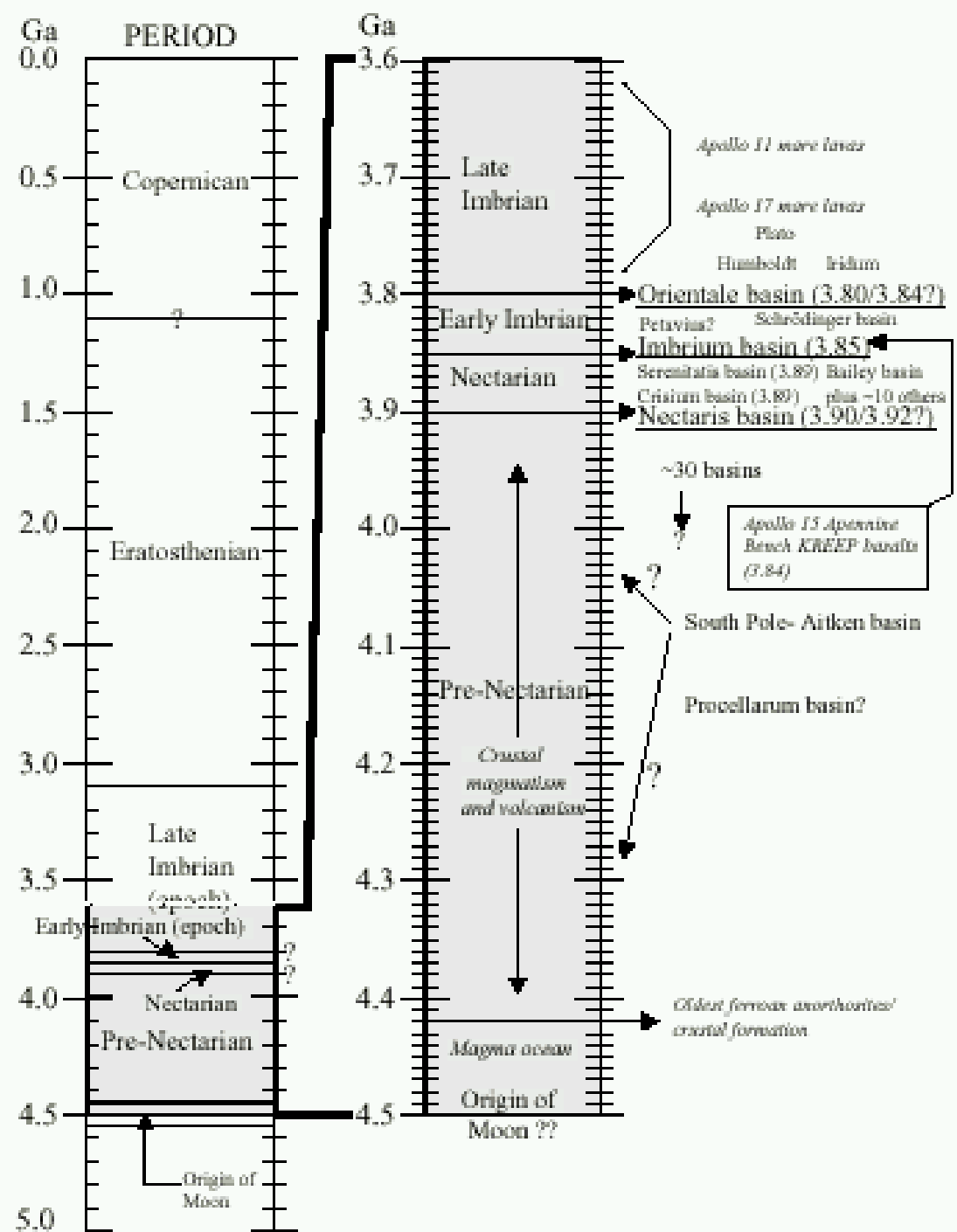
A very heavy, time declining, bombardment, could produce the same effect (Hartung, 1974; Hartmann, 1975, 1980, Grinspoon, 1989)

**Evidence for a
cataclysm ~4.0-3.8
Gy ago:**

**The ages of many
basins (impact features
> 200km) cluster in the
3.9-3.8 Gy period
(Wilhelms, 1987;
Ryder, 1994)**

Counter-argument:

**Basins datations are
fooled because
collected samples are
dominated by Imbrium
ejecta (Haskin, 1998).
Only Imbrium is dated.**



Evidence for a cataclysm ~4.0-3.8 Gy ago:

The amount of siderophile elements on the ancient highlands suggest that the amount of interplanetary mass accumulated by the Moon in the 4.4-3.9 Gy period is about the same of that required to form the basins in the 3.9-3.8 Gy period (5×10^{21} g), 20 times less than suggested by models with a declining bombardment from the time of formation

Counter-argument:

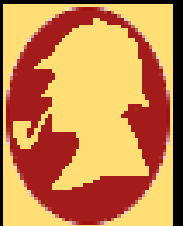
It critically depends on the assumed composition of the early impactors. Was it the same as that of the current meteorites?

Quelque fait sur le Grand Bombardement Tardif:

- Cataclysme déclenché il y a 3,9 Gy, ~600My après la formation des planètes
- Événement globale: il concerne Mercure, Venus, la Terre, Mars, Vesta....., peut être les satellites des planètes géantes
- 20.000 fois le taux de bombardement actuel: un impact d'un objet de 1 km tous les 20 ans sur Terre!
- Durée: 50-150 My

Il défie notre vision naïve d'un Système Solaire qui graduellement évolue du chaos primordiale vers l'ordre actuel

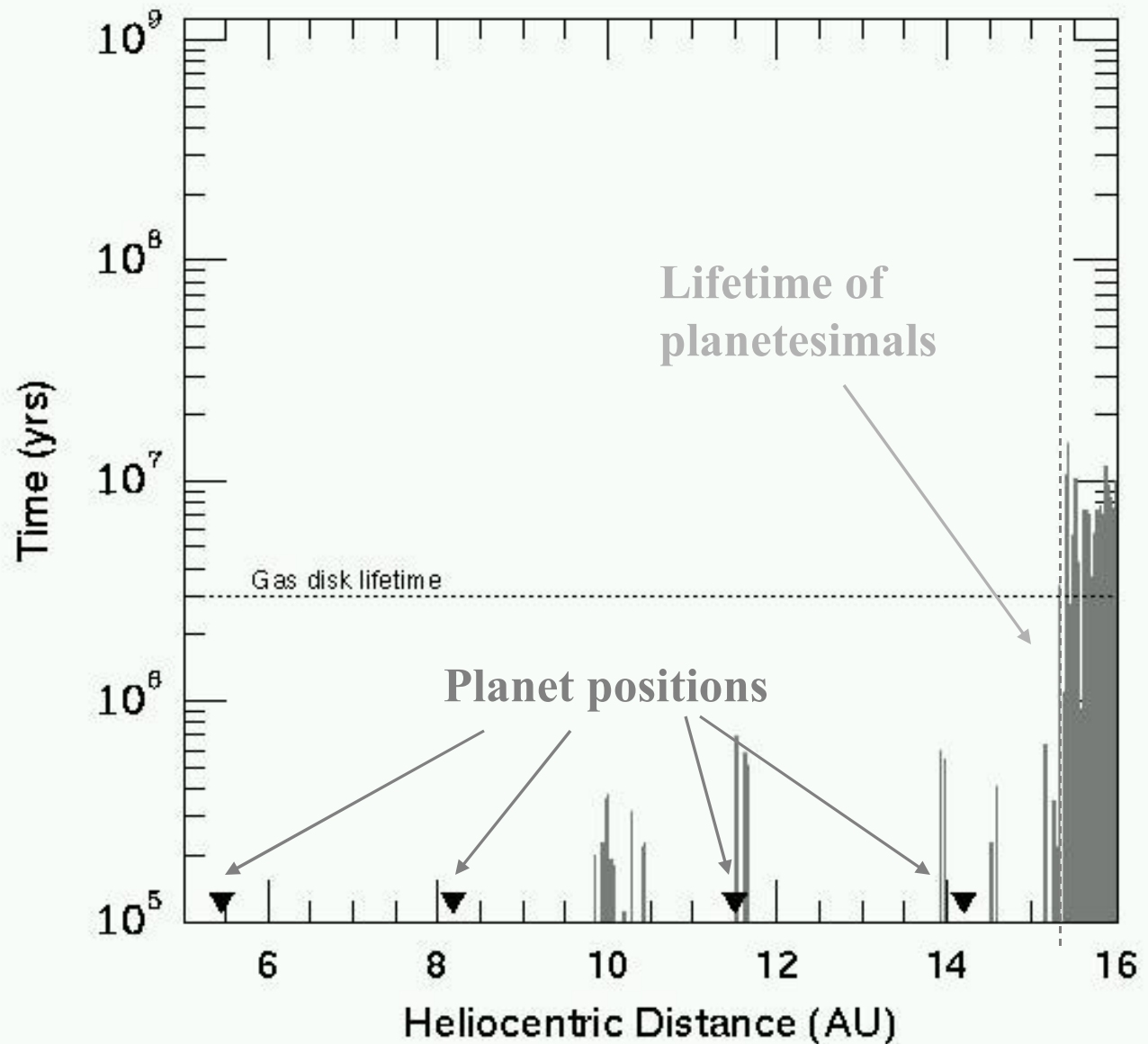
- **Un bombardement cataclysmique peut être possible seulement si un réservoir des petits corps, qui est resté stable pour ~ 600 My, devient soudainement instable**
- Ceci est possible seulement si il y a un changement dans la structure orbitale des planètes géantes.



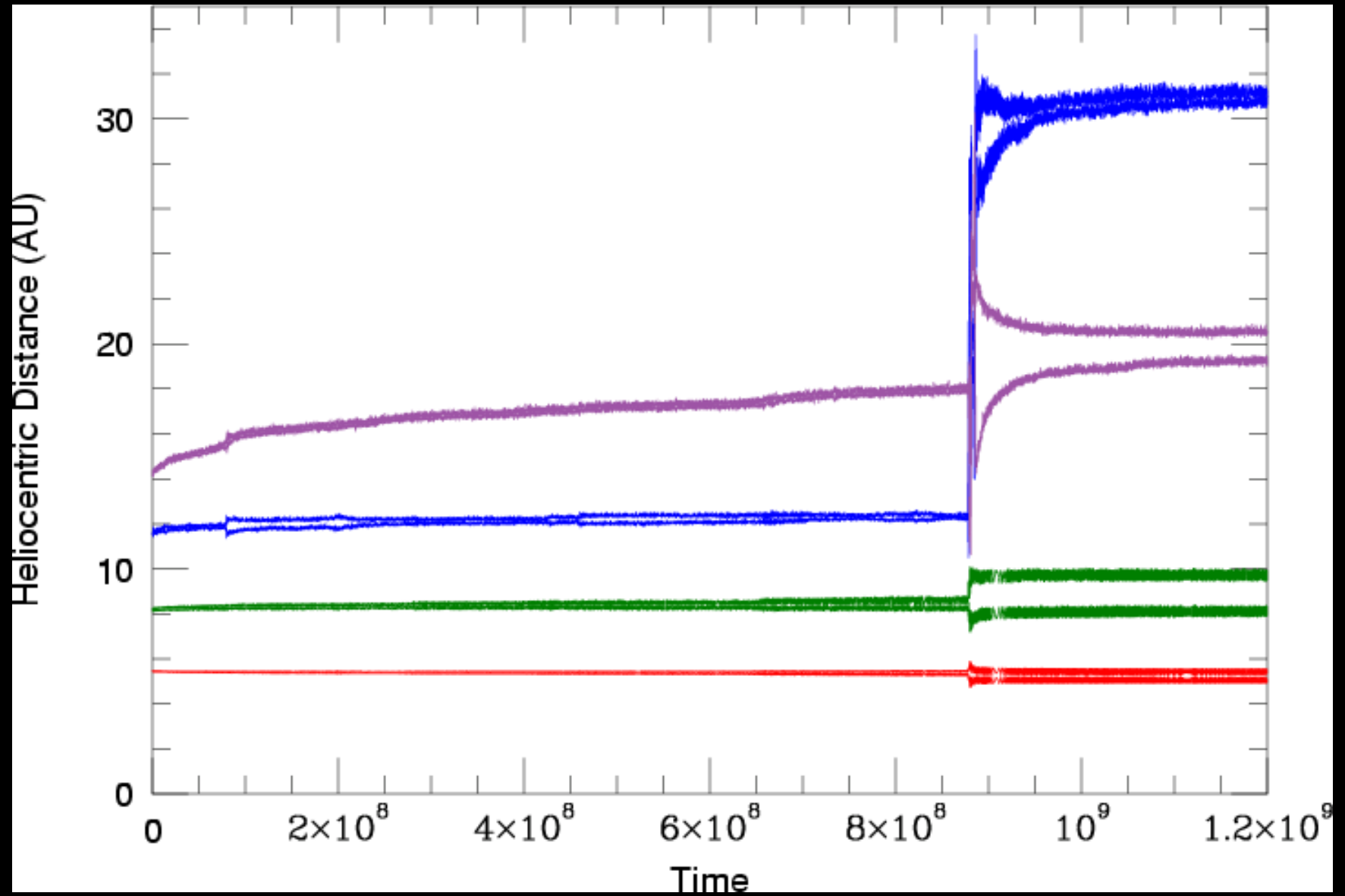
LATE PLANET INSTABILITIES Gomes, Levison, Tsiganis, Morbidelli, (2005)

In all previous simulations, migration started immediately because planetesimals were placed in very unstable regions.

However, at the end of the gas-disk phase, planetesimals should be only where the lifetime is longer than the nebula dissipation time



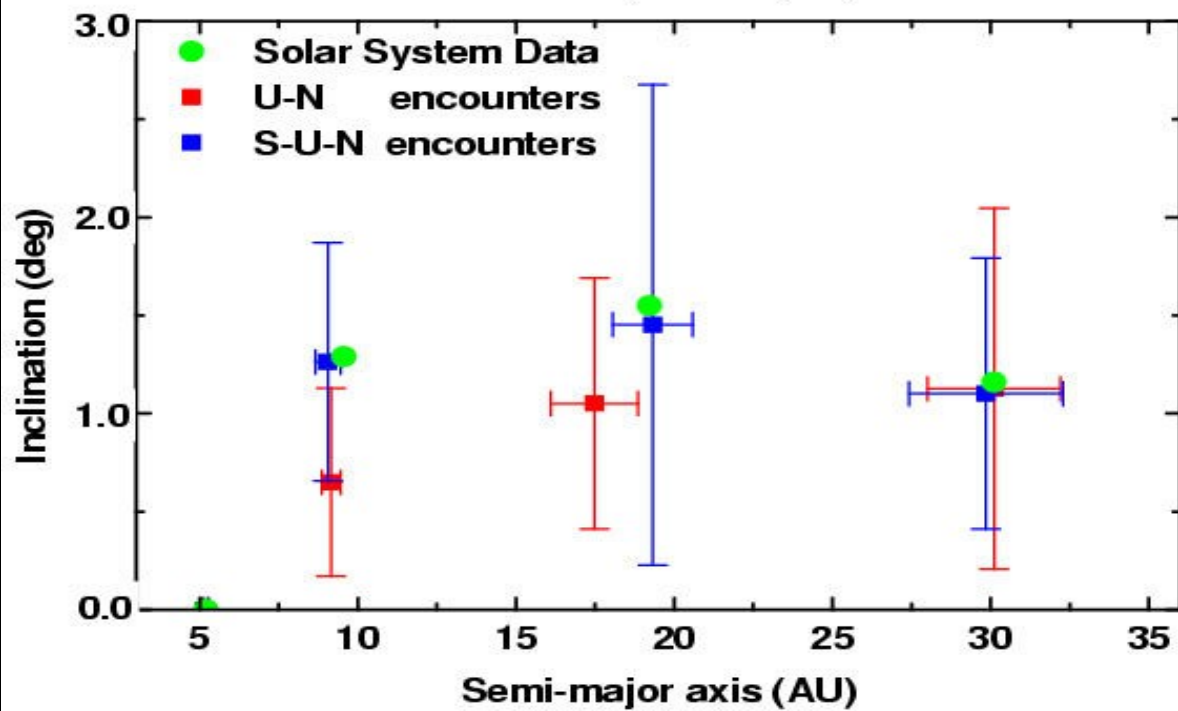
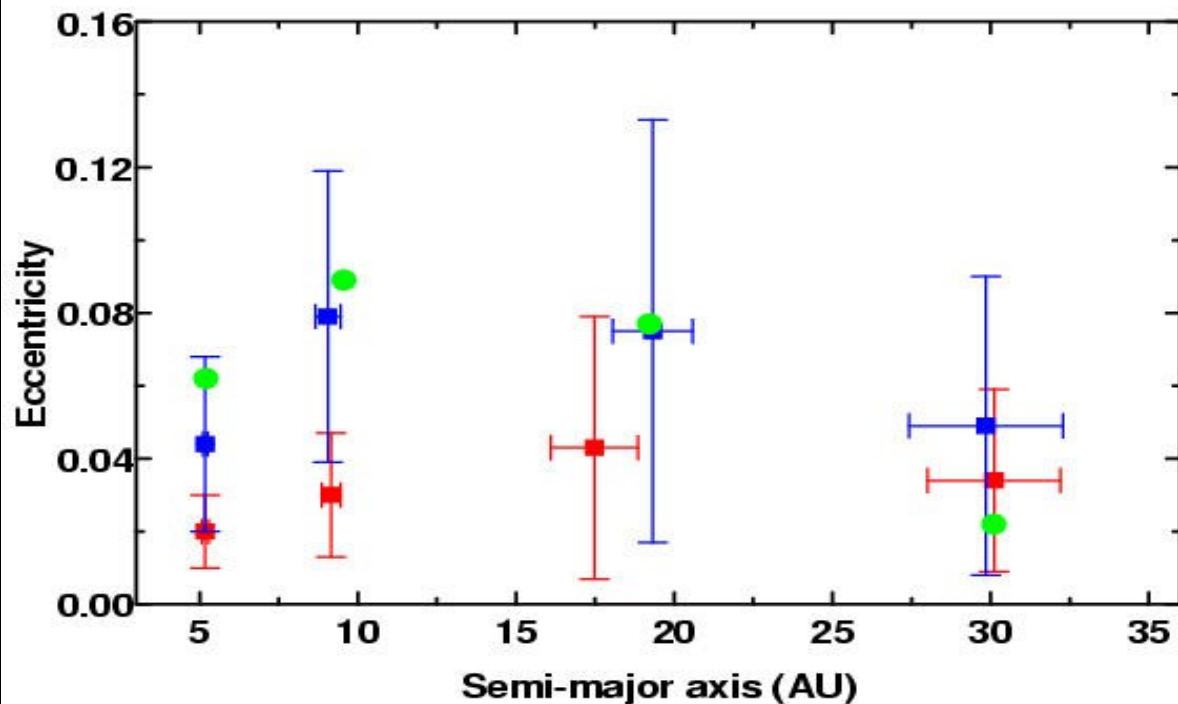




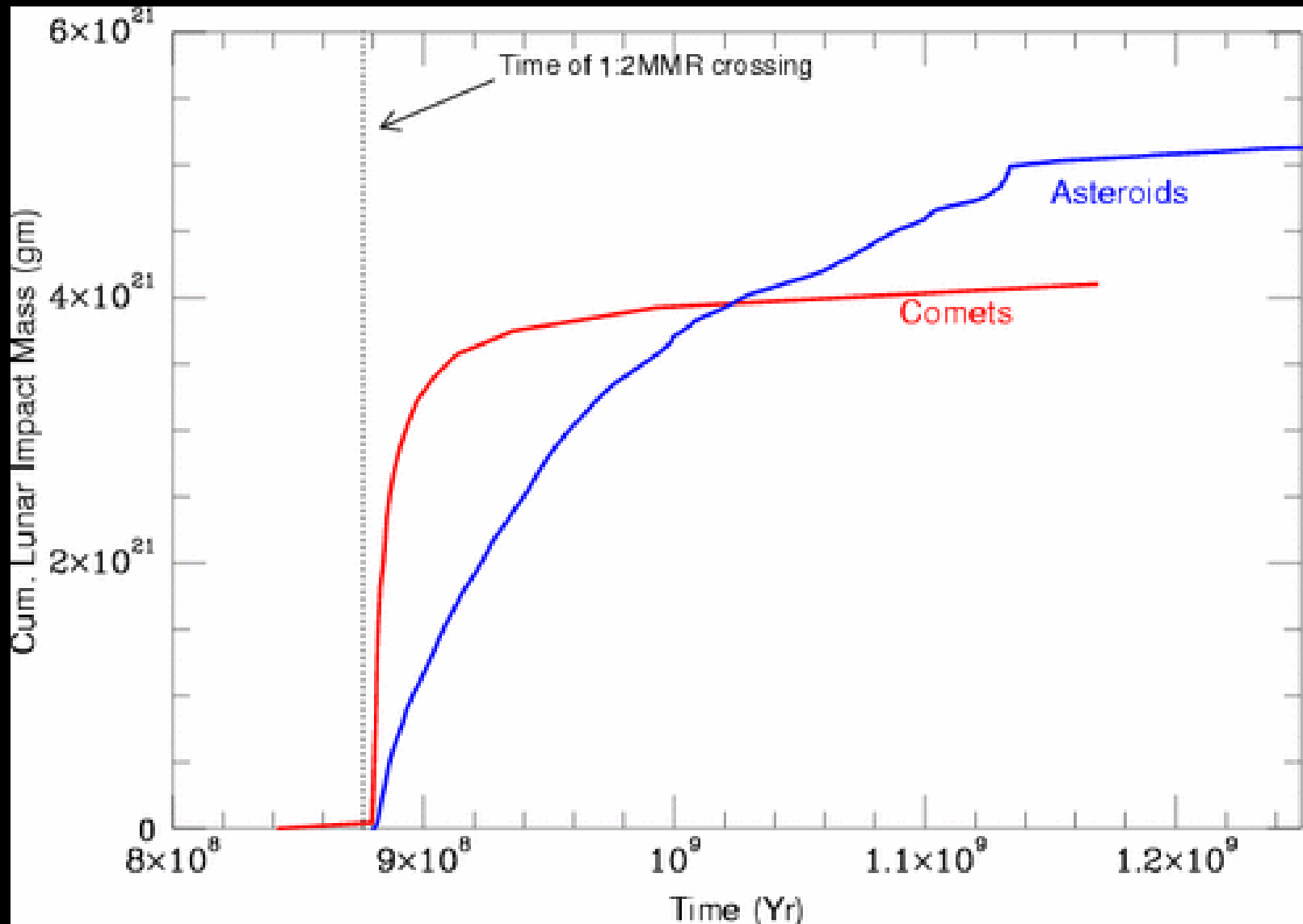
Deux points de force:

I: On explique les orbites actuelles des planètes géantes: leur demi grand axes, leur excentricités et inclinaisons en partant d'orbites circulaires

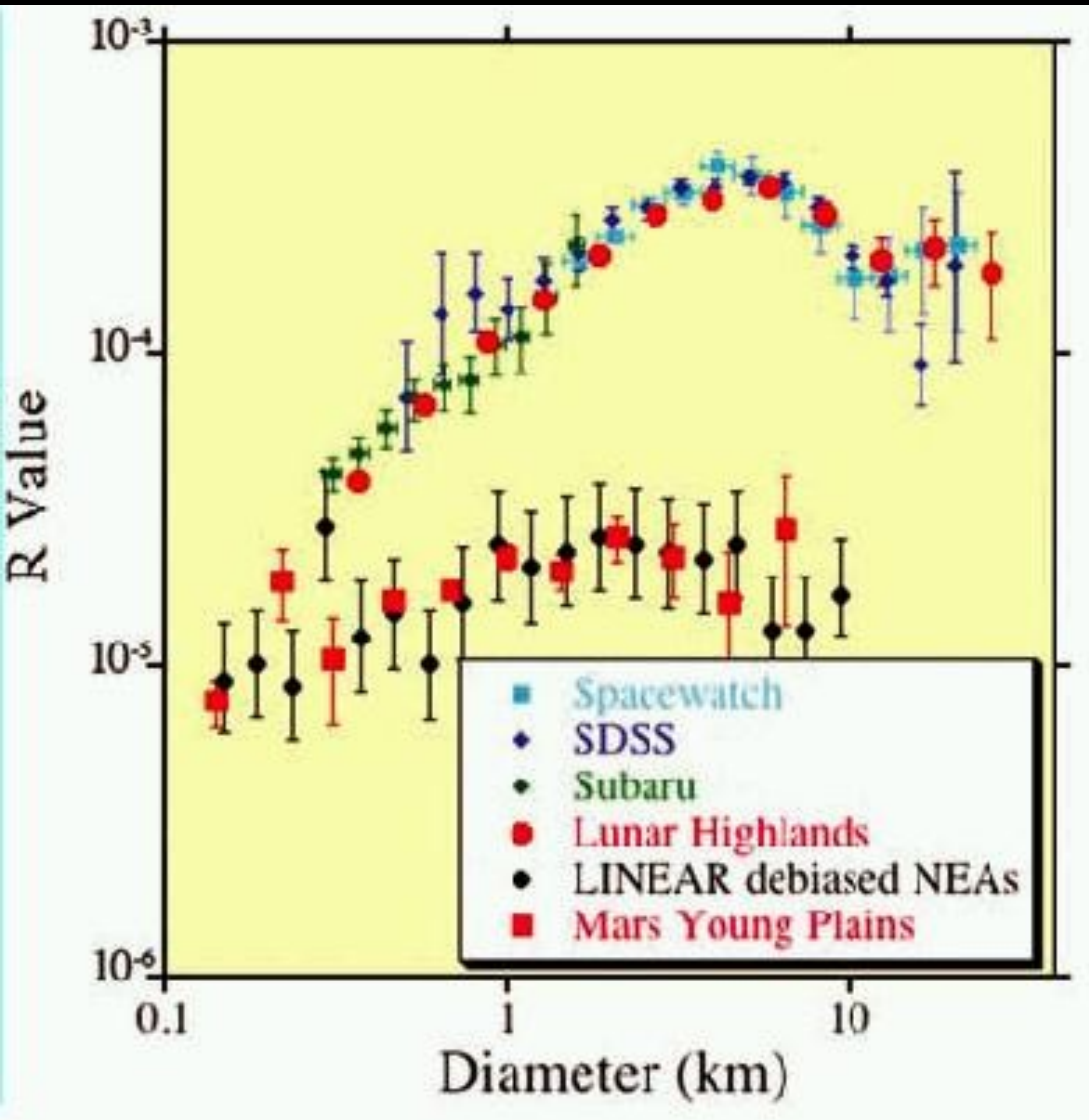
**K. Tsiganis, R. Gomes, A. Morbidelli, H.F. Levison 2005.
Nature, 435, 459**



II: On explique un bombardement cométaire et astéroïdale tardif, de la bonne magnitude par rapport aux contraintes dues aux cratères lunaires. R. Gomes et al. 2005. *Nature*, 435,466



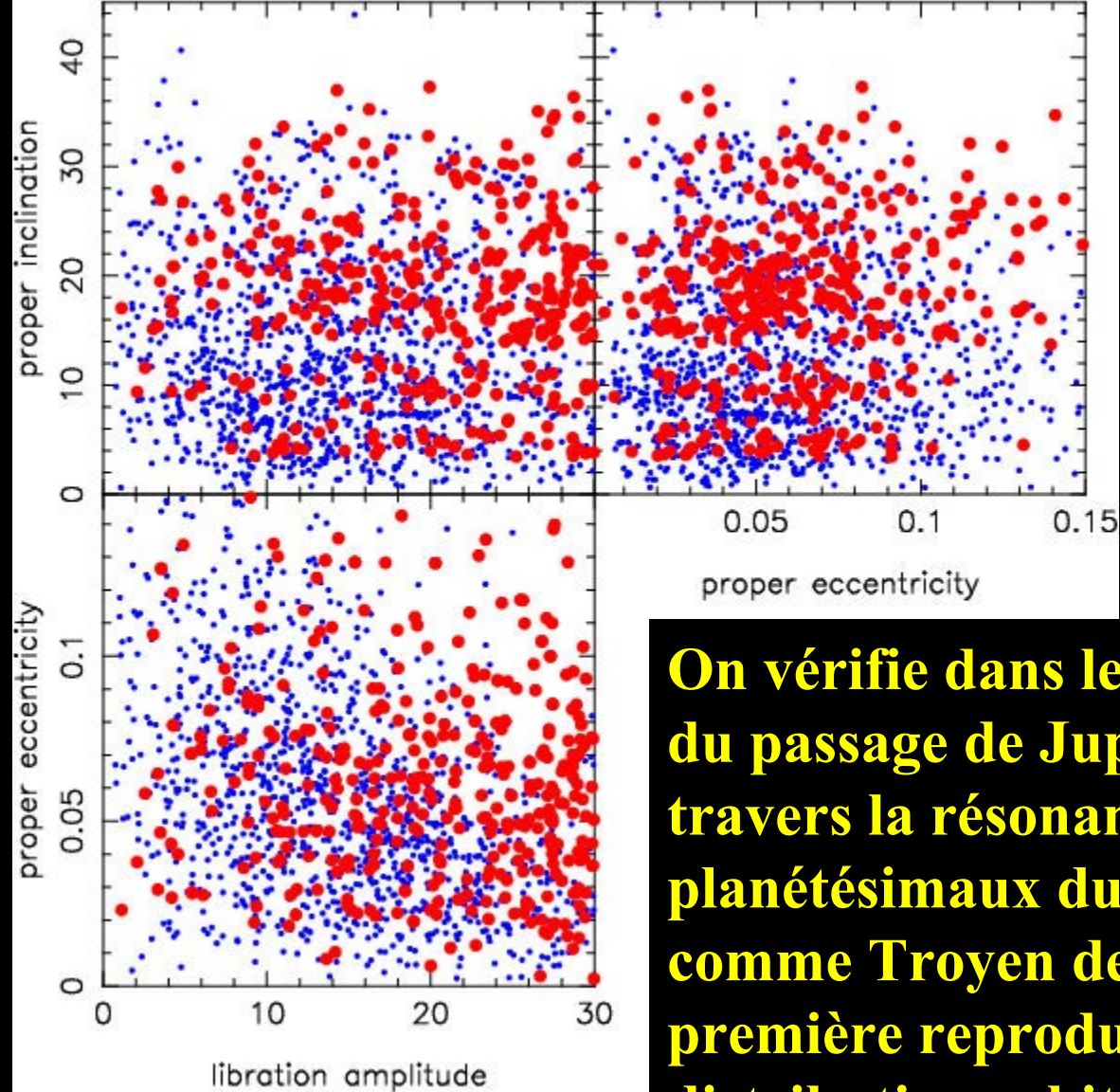
Une premiere confirmation...



La distribution de taille des cratères lunaires montre que le bombardement a été provoqué par la migration des planètes géantes (Storm et al., 2005).

Celle-ci n'a pas pu être provoquée par les astéroïdes (pas assez massifs). Donc elle a du être menée par un disque massif trans-Neptunien.

Est-ce bien le passage de Jupiter et Saturne à travers la résonance 1:2 l'élément déclencheur?

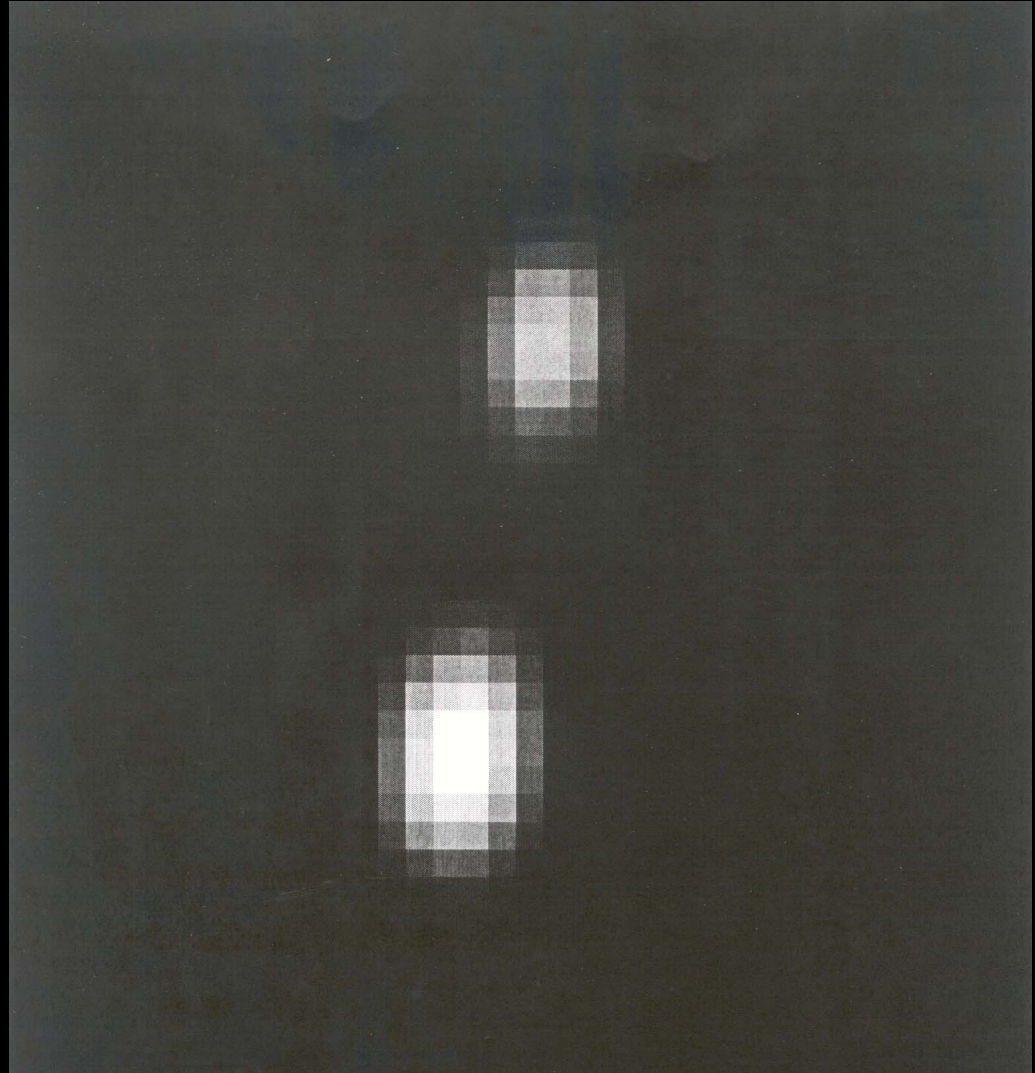


On vérifie dans les simulations que , lors du passage de Jupiter et Saturne à travers la résonance 1:2 une fraction des planétésimaux du disque est capturé comme Troyen de Jupiter. C'est la première reproduction théorique de la distribution orbitale des Troyens, ce qui renforce notre modèle

**A.Morbidelli, H.Levison, K.Tsiganis, R.Gomes 2005.
Nature, 435, 462.**

Une deuxième confirmation....

La densité du Troyen binaire Patroclus est de $0,8\text{g/cm}^3$, inférieure à celle des astéroïdes, mais identique à celles des objets de Kuiper (Marchis et al., 2005)



Un regard nouveau: Les 3 phases du Système Solaire

1. La phase de l'accrétion planétaire

- Formation des planètes géantes
- Formation des planètes telluriques
- Première excitation/déplétion dynamique de la ceinture des astéroïdes

2. Une phase quiescente de ~600 My

- Une ceinture d'astéroïdes ~20 fois plus massive que celle actuelle
- Un disque trans-Neptunien massif (50 → 35 M_E)

GRAND BOMBARDEMENT TARDIF

- Déplacement des orbites planétaires
- Mise en forme finale des ceintures des astéroïdes et de Kuiper
- Capture des Troyens et des satellites irréguliers

4. La phase actuelle

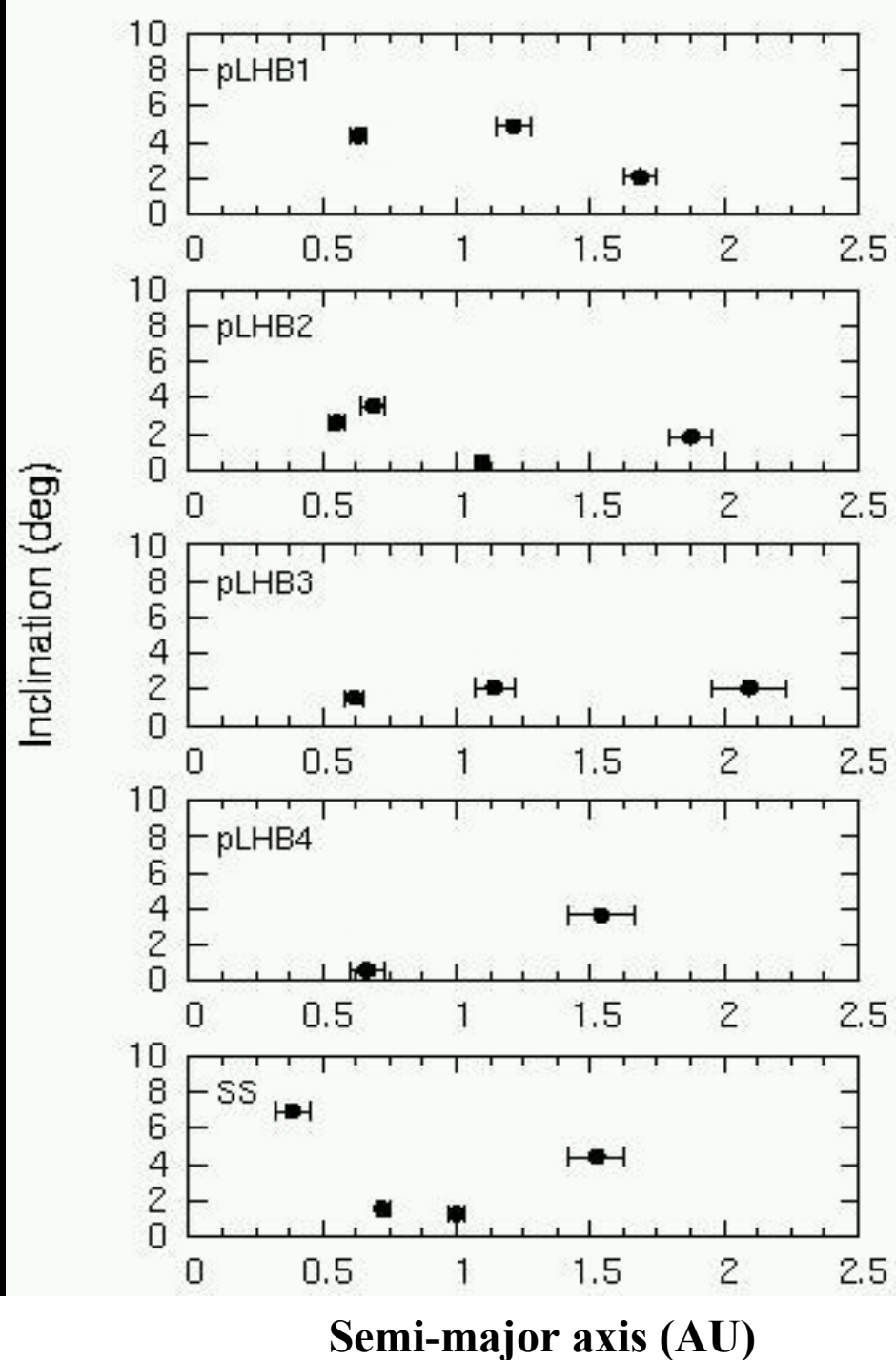
Nouvelles simulations de la formation des planètes telluriques et de l'évolution de la ceinture des astéroïdes. O'Brien et Morbidelli (2005)



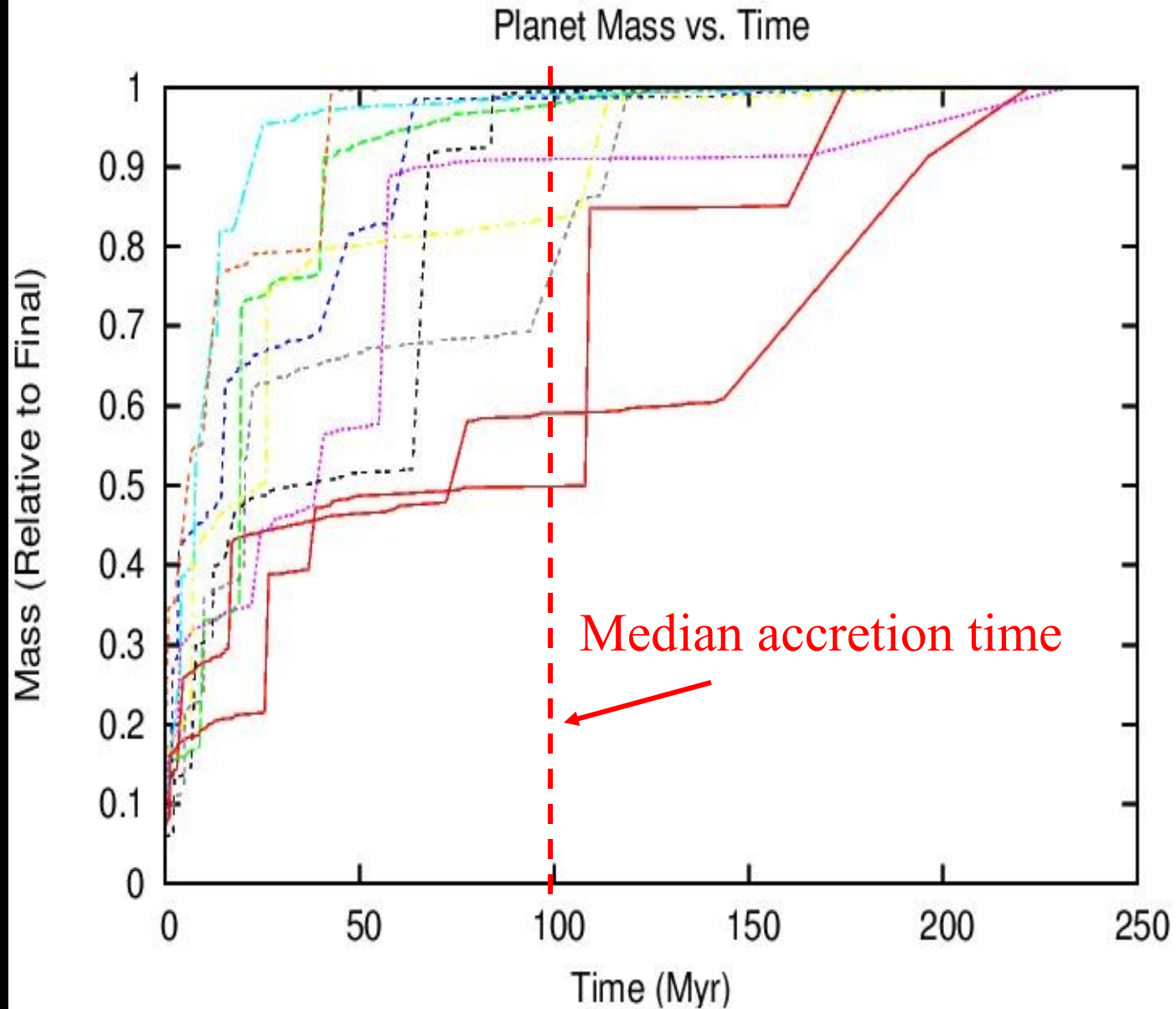
Formations des planètes telluriques:

Distributions finales, comparées aux Système Solaire
(O'Brien et Morbidelli, 2005)

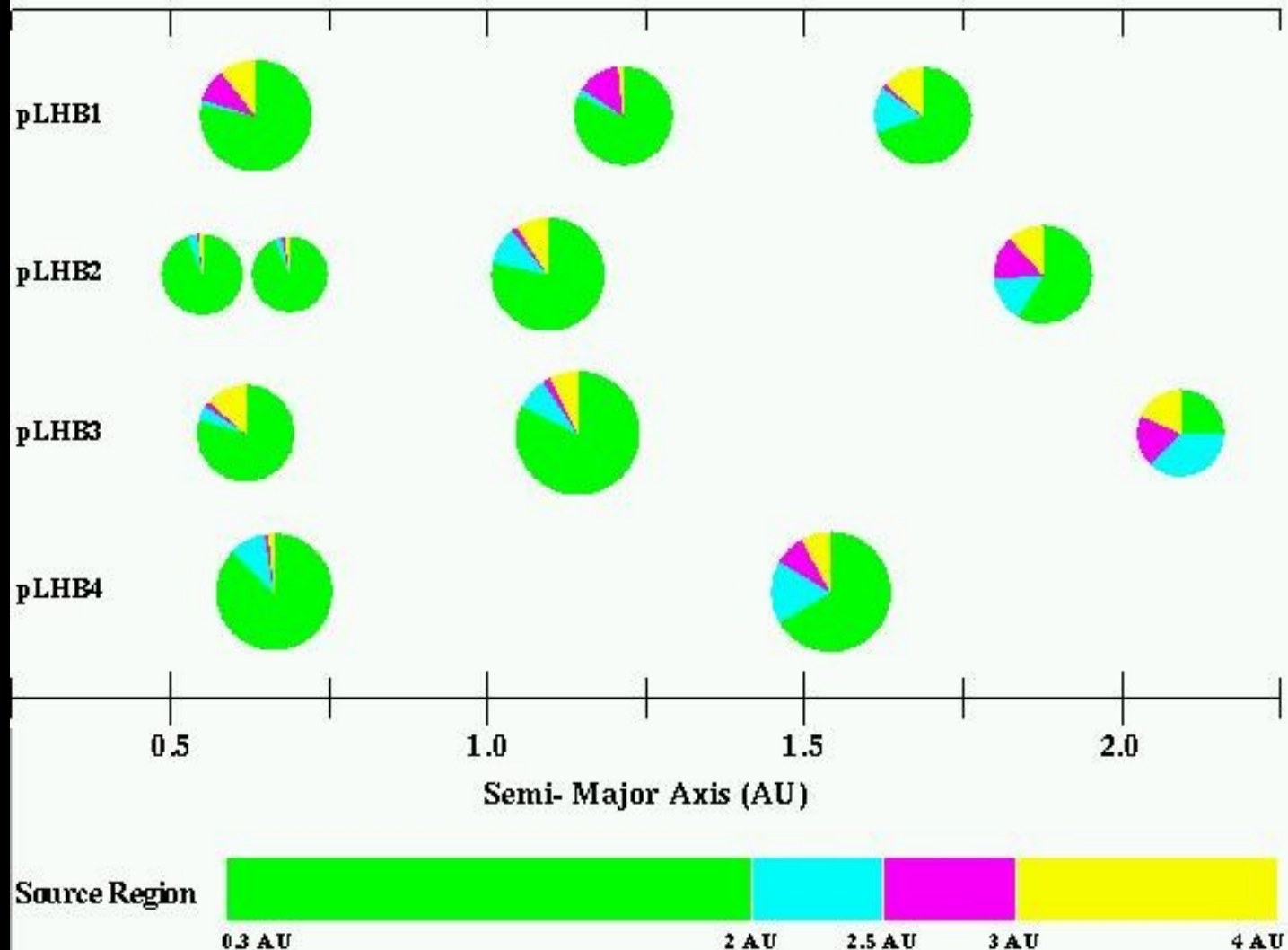
Les planètes synthétiques sont légèrement plus excentriques et inclinées que les planètes réelles.



Le temps de formation des planètes sont un peu longs par rapport à ceux indiqués par le chronomètre Hf-W (30 Ma)

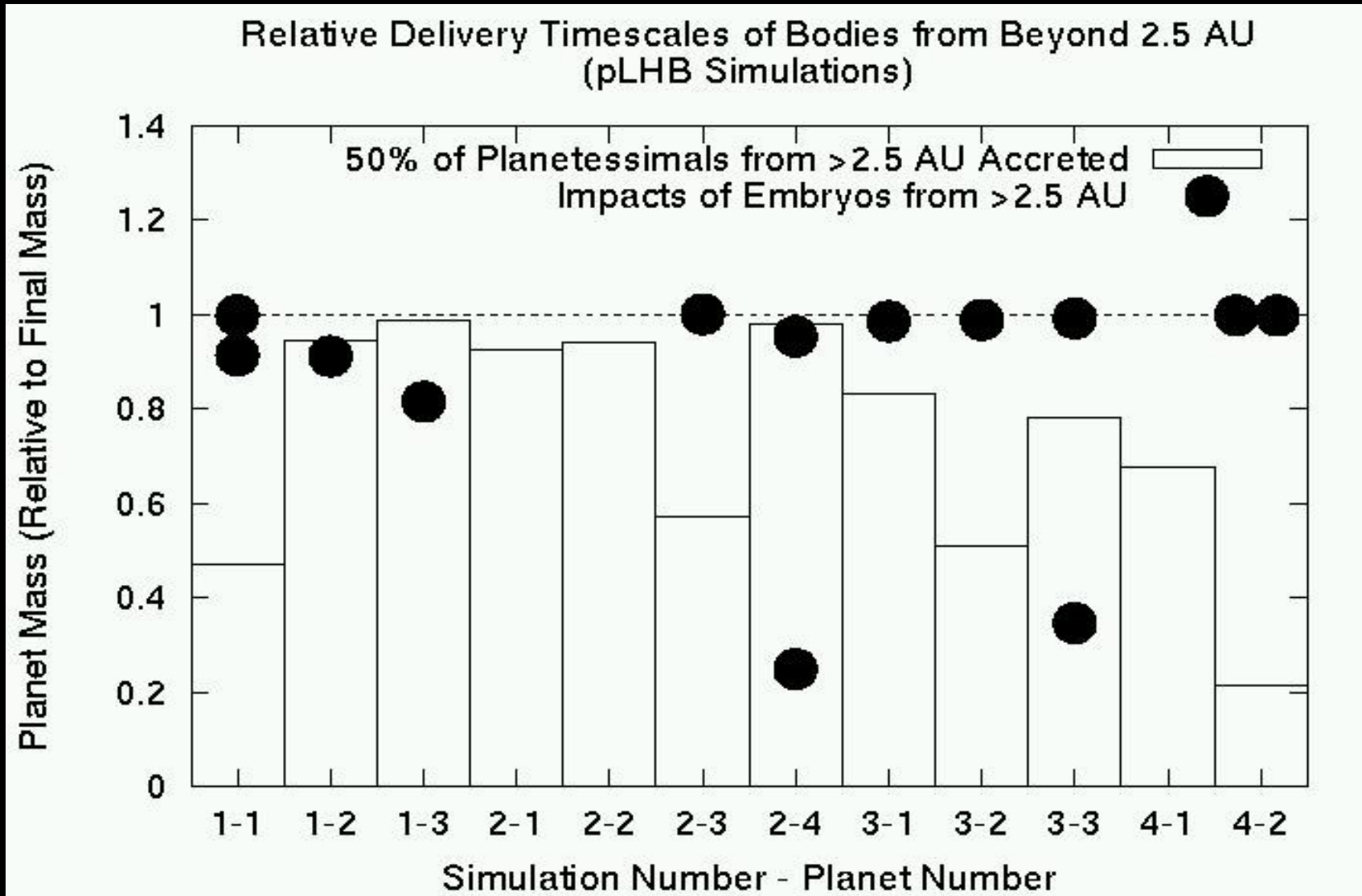


Location and Composition of Final Terrestrial Planets (Contributions of Material from All Regions)



En moyenne, 15% de la masse des planètes est accrétée depuis $> 2,5$ UA (Chondrites carbonées riches en eau?). 75% de cette quantité est emmenée par les embryons. *L'excentricité de Jupiter est critique.*

Ceci n'est pas un 'late veneer'...



Le vrai 'late veneer' concerne seulement ~1% de la masse de la planète et il vient à 80% depuis < 2,5 UA

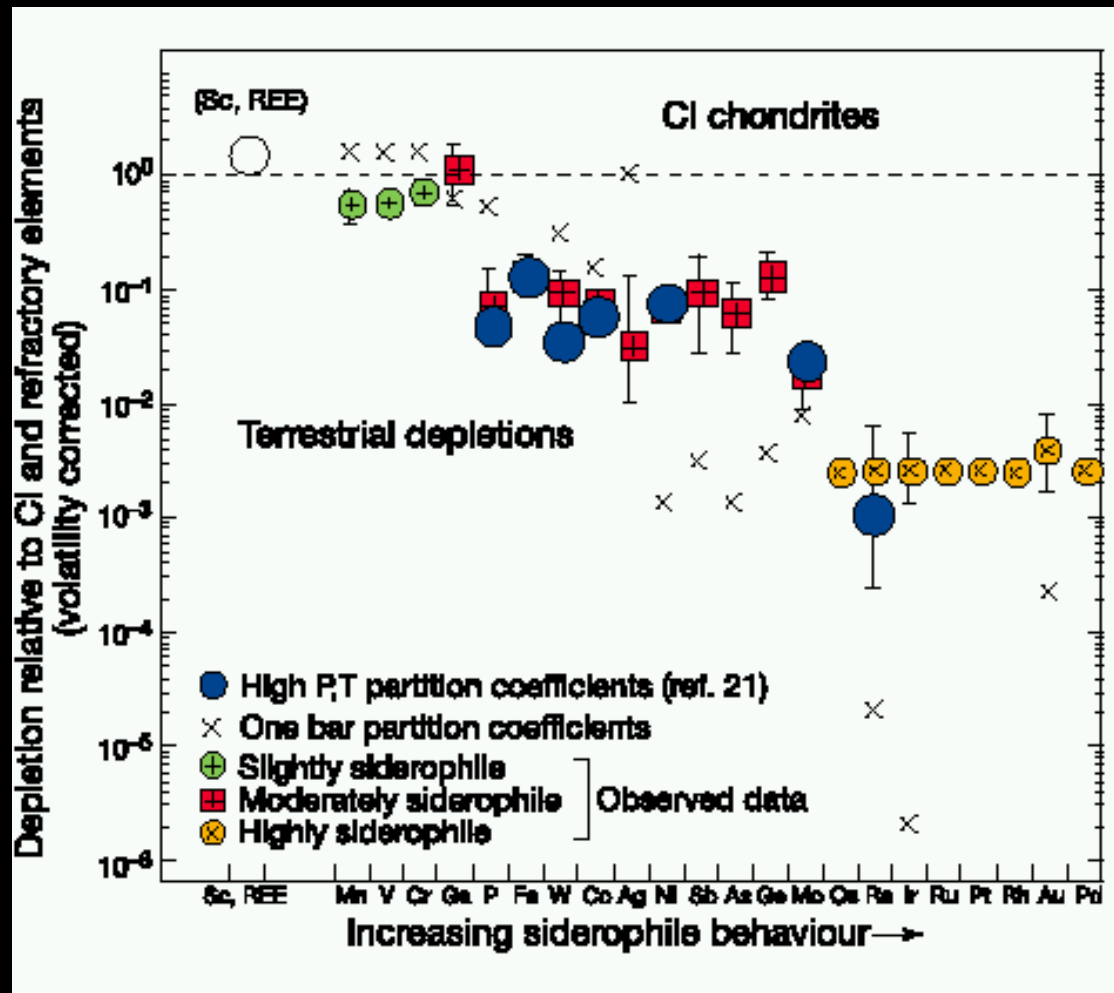
PROBLEMS (from Drake and Richter, Nature 416, 39)

Siderophiles/water in the Upper mantle

A carbonaceous embryo carrying enough water to the Earth would also carry too many siderophile elements with respect to what is retained in the upper mantle

Possible solutions:

Siderophile elements are distributed in the whole mantle; no significant water losses occurred after the delivery; the mantle of the water carrying embryo was depleted in siderophiles due to partial differentiation

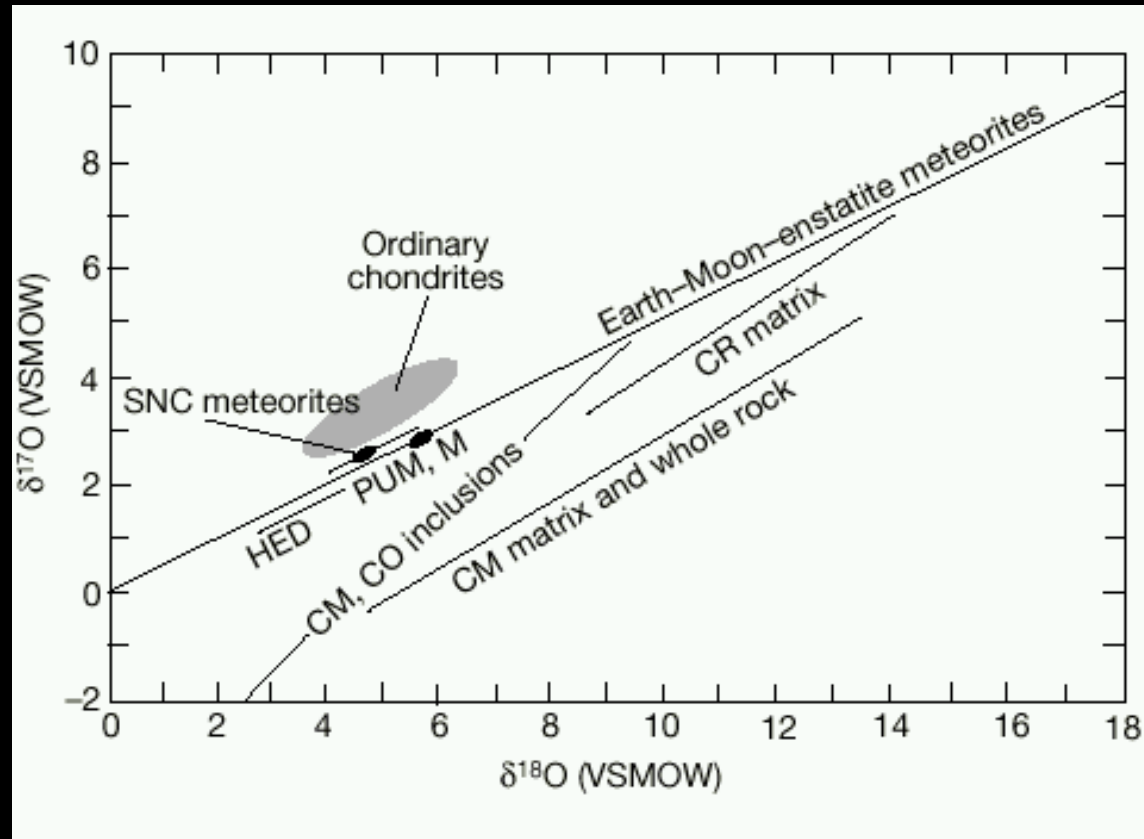


PROBLEMS (from Drake and Richter, Nature 416, 39)

- Oxygen isotope composition

The Earth and the Moon are at the same position on the same fractionation line. It should be different if the Earth got the water from a carbonaceous embryo.

However, this is a general problem, not specifically related to the origin of water...



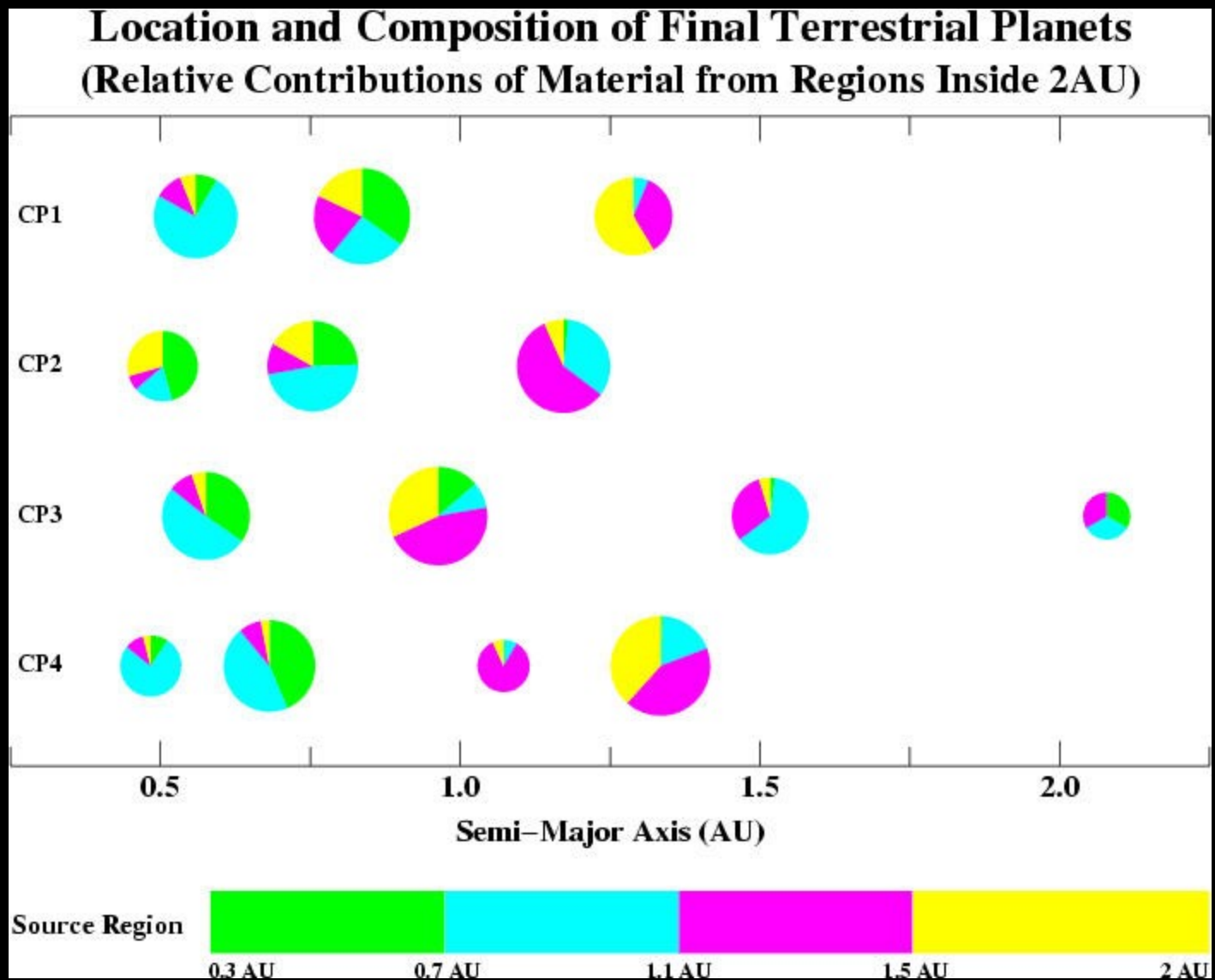
The Moon-forming impact.

SPH simulations by Canup and Asphaugh

**80% of the Moon
forming material
comes from the
impactor.**

**The similarity
between Earth and
Moon therefore
implies the
similarity between
the Earth and the
impactor**

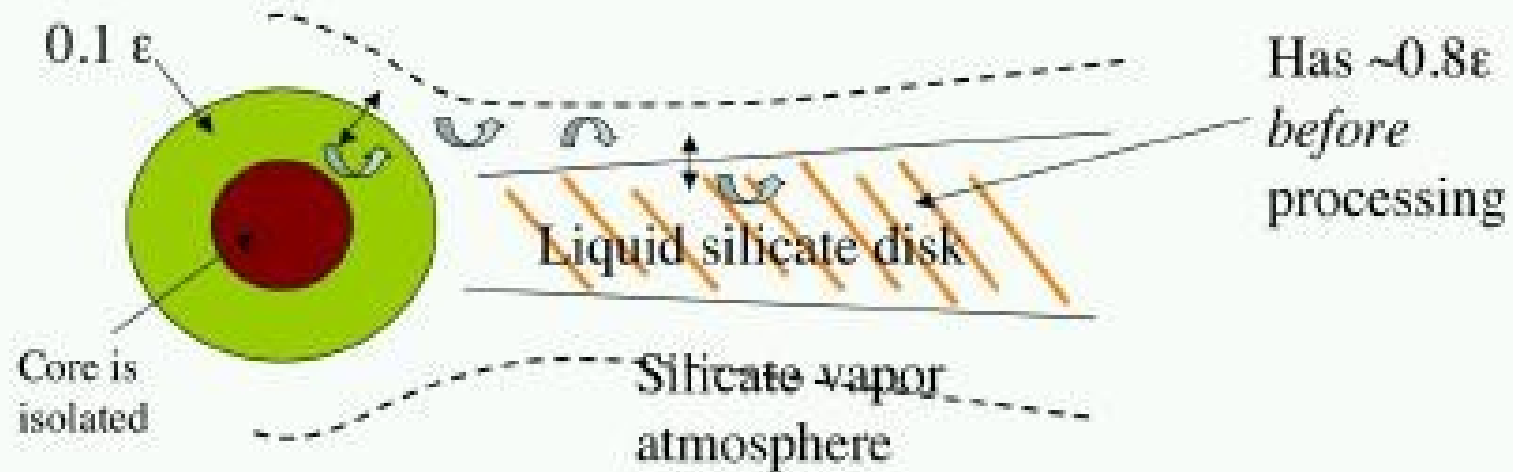




Même si les planètes n'avaient rien accrétés depuis la ceinture des astéroïdes, il est invraisemblable que la Terre et l'impacteur proto-Lunaire aient pu avoir la même composition.

A possible solution: EQUILIBRATION!

from Stevenson, KITP meeting, march 15-19, 2004



IN BETWEEN

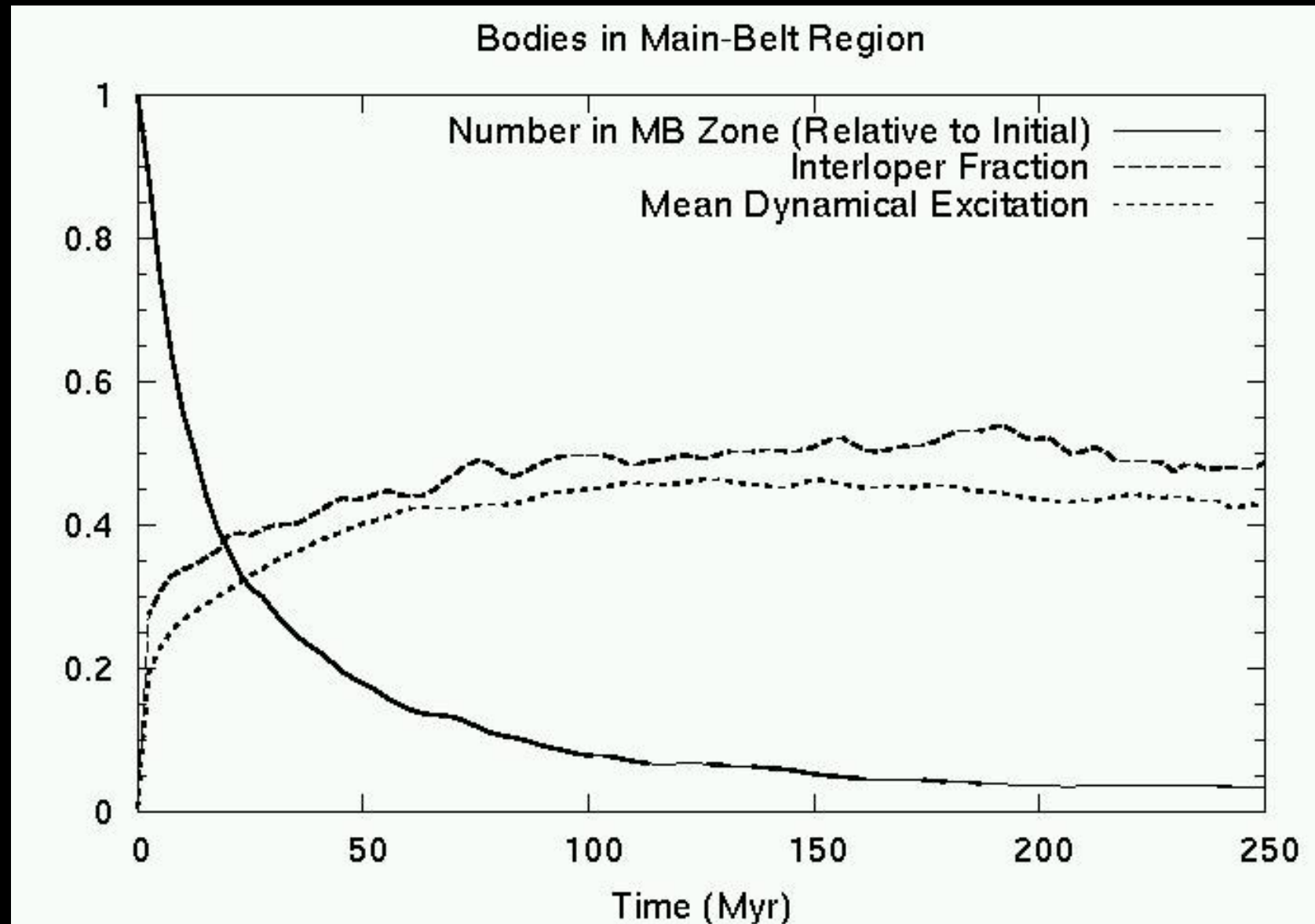
A disk exists for 10^2 10^3 years. Radiates at $\sim 2500\text{K}$.
Vapor pressure ~ 10 to 100 bars.

Timescale for exchange between vapor & atmosphere
 $\sim 10c/(G\sigma) \sim \text{week}$. Aided by “foam”.

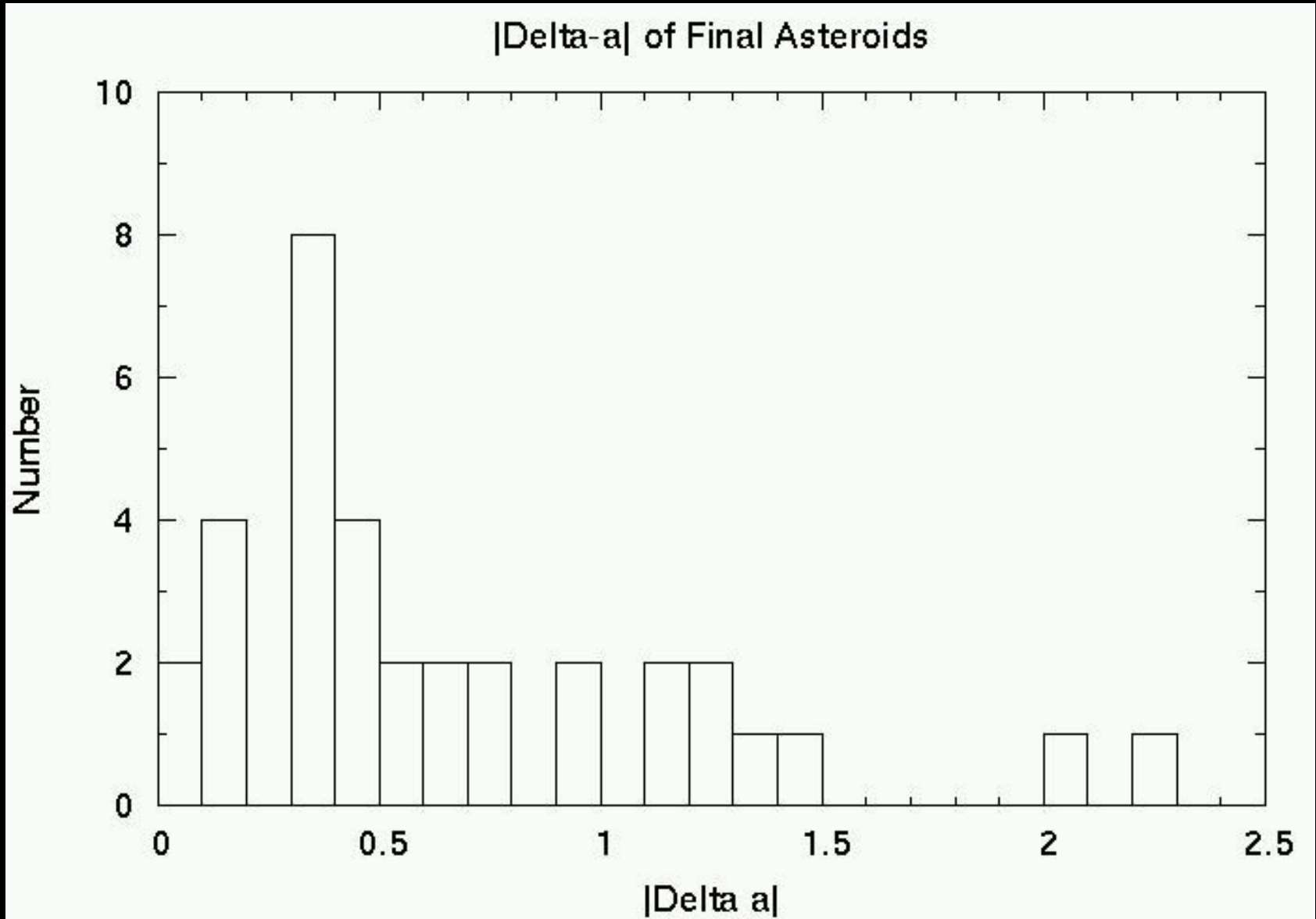
Convective timescale in disk or Earth mantle $\sim \text{week}$

Convective timescale in atmosphere $\sim \text{days}$

L'excitation et déplétion primordiale de la ceinture des astéroïdes

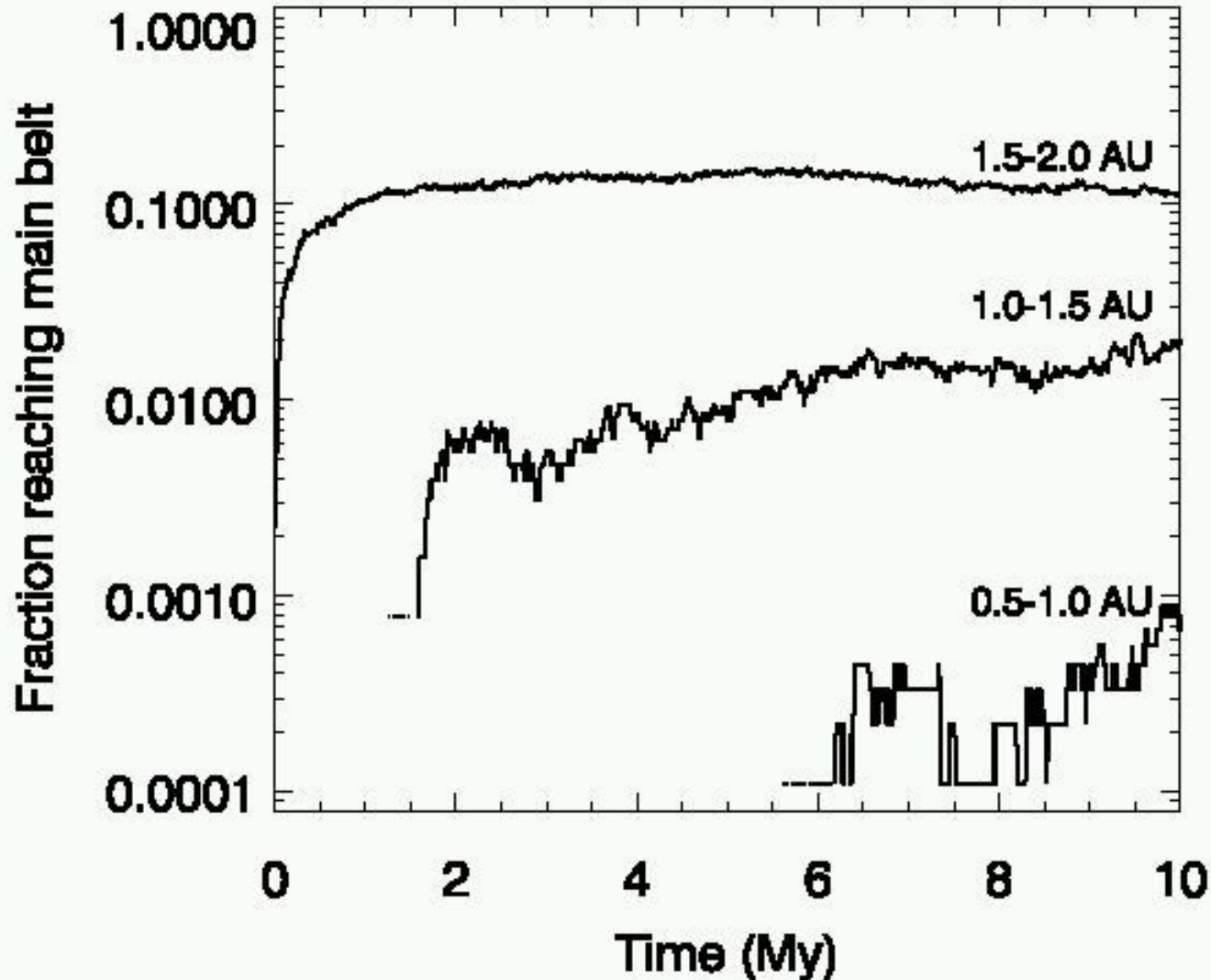


Les astéroïdes sont déplacés radicalement: bon pour expliquer le mélange des types taxonomiques



La ceinture des astéroïdes pourrait abriter des objets provenant du système solaire très interne (<1 UA). Ceci pourrait expliquer l'origine des corps parents des météorites de fer.

[Bottke, Nesvorny, Grimm, Morbidelli, O'Brien, Nature sous presse].



QUELQUE CHOSE NE TOURNE PAS ROND POUR LES METEORITES DE FER

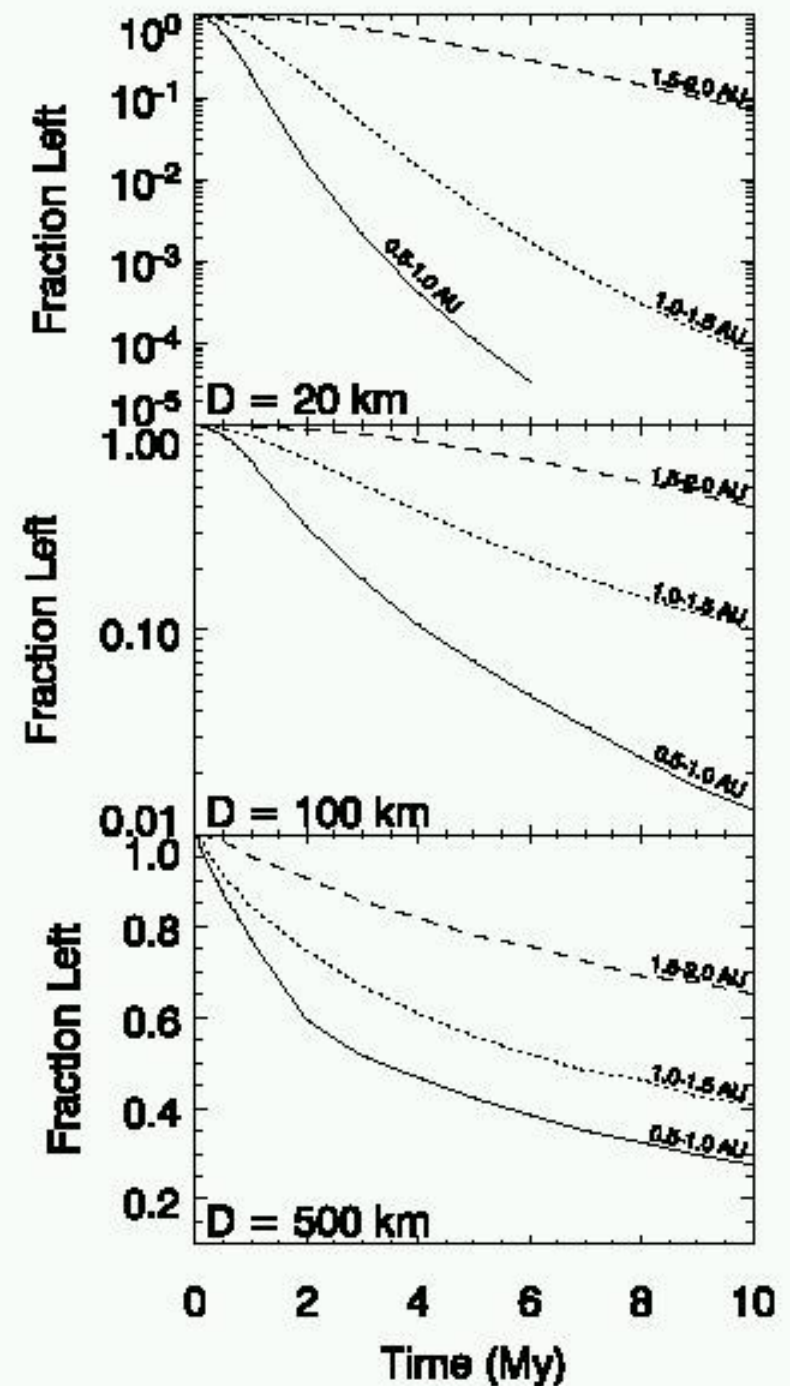
- **La différenciation des corps parents des météorites de fer a eu lieu 1-2 Ma avant la formation des chondrites (Kleine et al., 2005; Baker et al., 2005)**
- **La plupart des corps parents des météorites de fer était petit (10-200 km), alors que familles d'astéroïdes formées par corps parents de 10-400 km ne montre aucun signe de différenciation**
- **A l'exception de Vesta, on ne voit pas d'astéroïdes différenciés intacts. Tous les corps parents des météorites de fer se sont fragmentés, alors que très peu d'objets > 20km aurait du se fragmenter dans la ceinture des astéroïdes.**

Notre proposition:

Les corps parents des météorites de fer (ou au moins les plus petit entre eux) se sont formés dans le système solaire interne, où les temps d'accrétion étaient beaucoup plus courts, le ^{26}Al plus abondant, et l'activité collisionnelle beaucoup plus intense.

Après s'être différenciés, ces corps ont été brisés par collisions. Une partie des leurs fragments ont été implantés dans la ceinture des astéroïdes, d'où ils nous envoient les météorites.

(Bottke et al., Nature sous presse)



CONCLUSIONS

- Notre modèle sur l'origine du LHB est consistant avec beaucoup des données (les orbites actuelles des planètes, les cratères sur la Lune, les propriétés des astéroïdes Troyens...).
- Il donne une nouvelle vision de l'histoire du système solaire (3 étapes, planètes géantes sur orbites circulaires à leur formation)
- Notre modèle de formation des planètes telluriques et d'évolution primitive de la ceinture des astéroïdes:
 - Donne des planètes encore un peu trop excitées dynamiquement
 - Prévoit des temps de formation encore un peu trop longs
 - Explique l'origine de l'eau sur Terre
 - Montre que notre modèle sur la formation de la Lune est trop simpliste
 - Explique les propriétés principales de la ceinture des astéroïdes (excitation dynamique, masse, mélange taxonomique...)
 - Fournit un nouveau cadre pour comprendre l'origine des météorites de fer

**Problèmes en
voie de
disparition!**