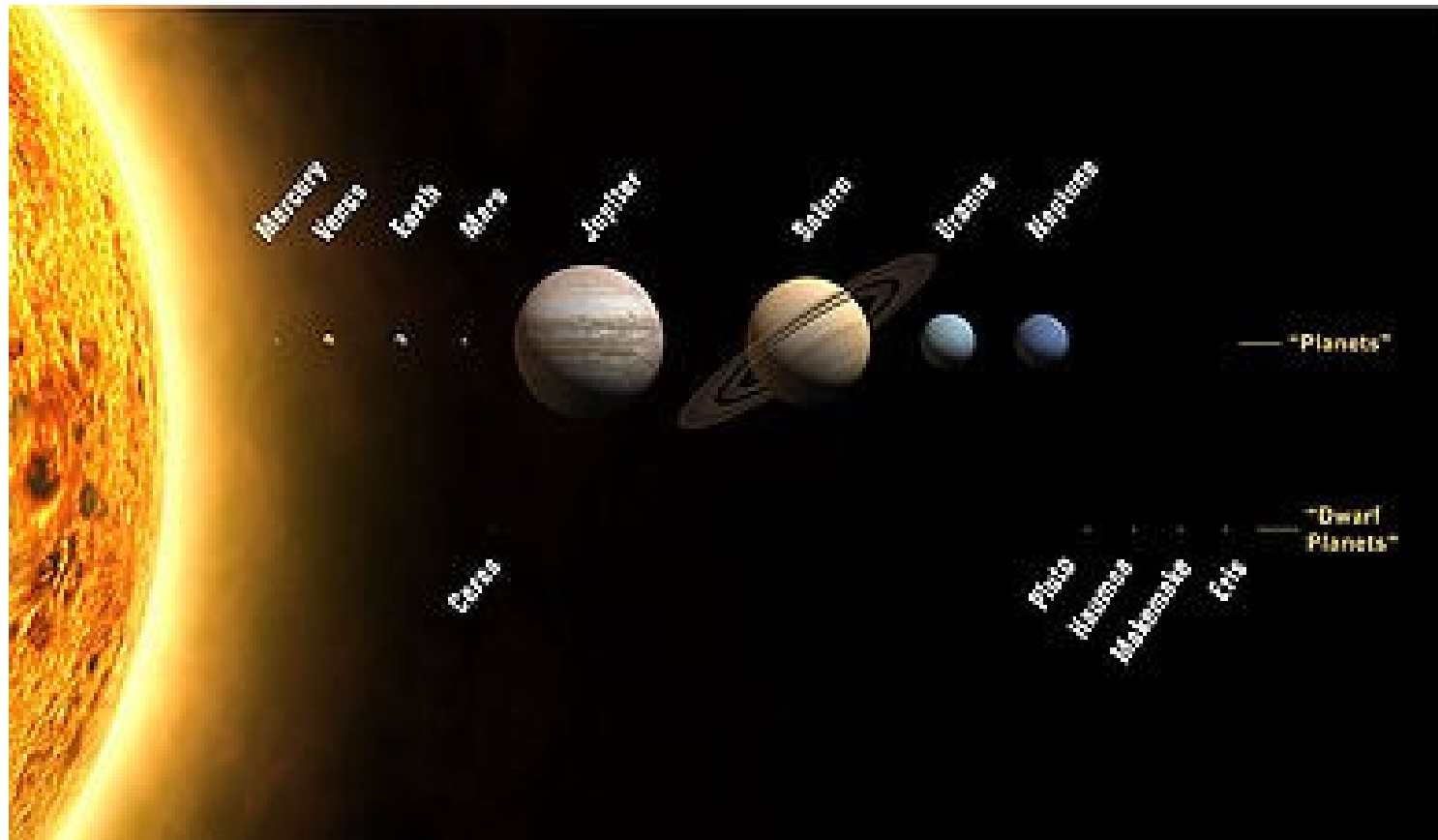


# Δυναμική Εξέλιξη του Ηλιακού Συστήματος: σύγχρονες απόψεις

Κλεομένης Τσιγάνης

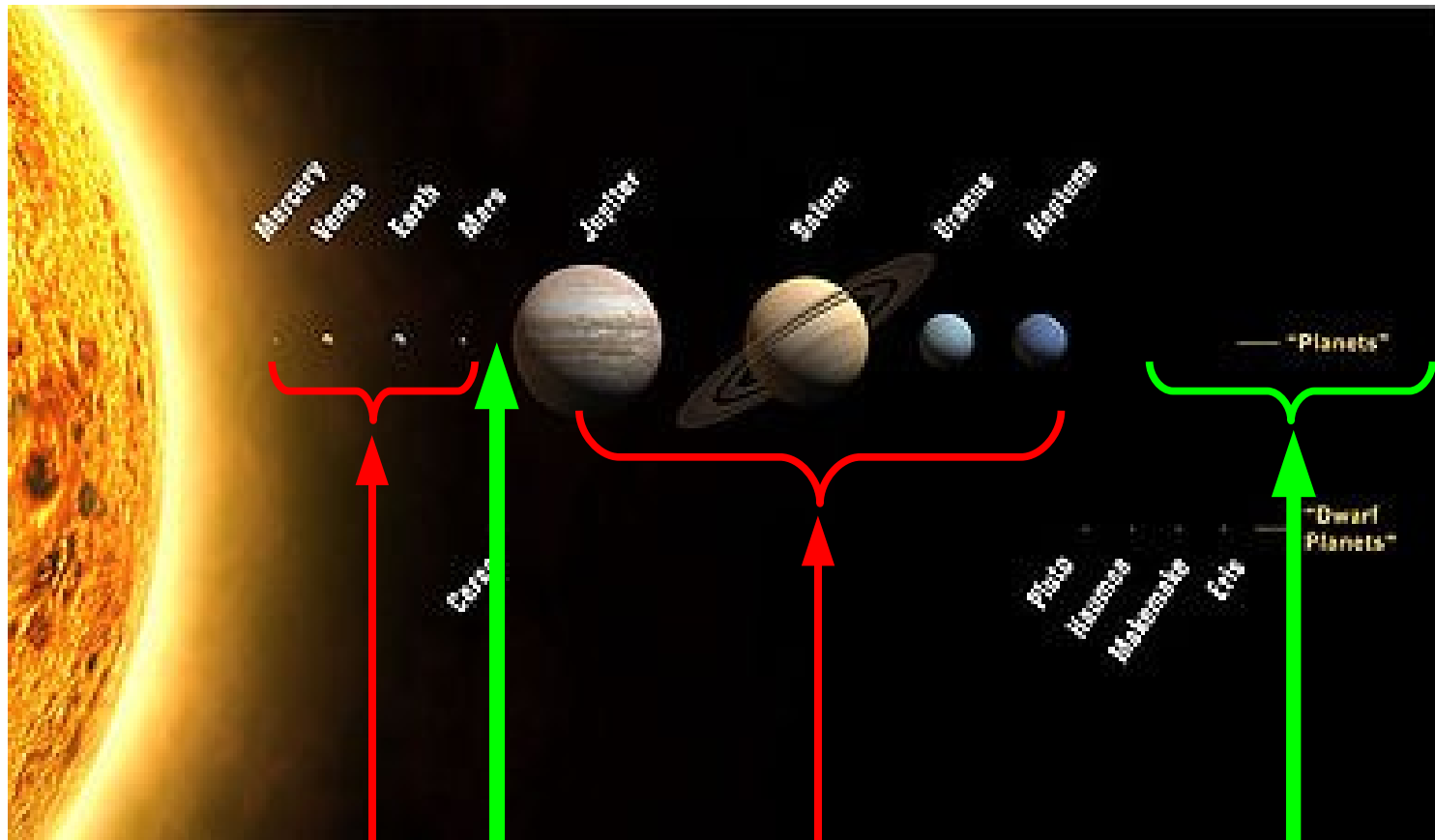


Σεμινάριο του Τμήματος Φυσικής, 17/3/2010, A<sub>31</sub>

# Περίληψη

- Περιγραφή του **Ηλιακού Συστήματος (ΗΣ)**
- **Δυναμική** του ΗΣ για  $t > -3.8 \text{ Gy}$ 
  - είναι **ευσταθές** το πλανητικό σύστημα;
  - **αστεροειδείς**, κομήτες, κ.λ.π.
- **Δυναμική** για  $t < -3.8 \text{ Gy}$ 
  - **Κοσμογονία** του ΗΣ
  - οι **τροχιές** των μεγάλων πλανητών
  - ο σφοδρός βομβαρδισμός (**LHB**) του εσωτερικού ΗΣ
- Συμπεράσματα

# Περιγραφή του ΗΣ



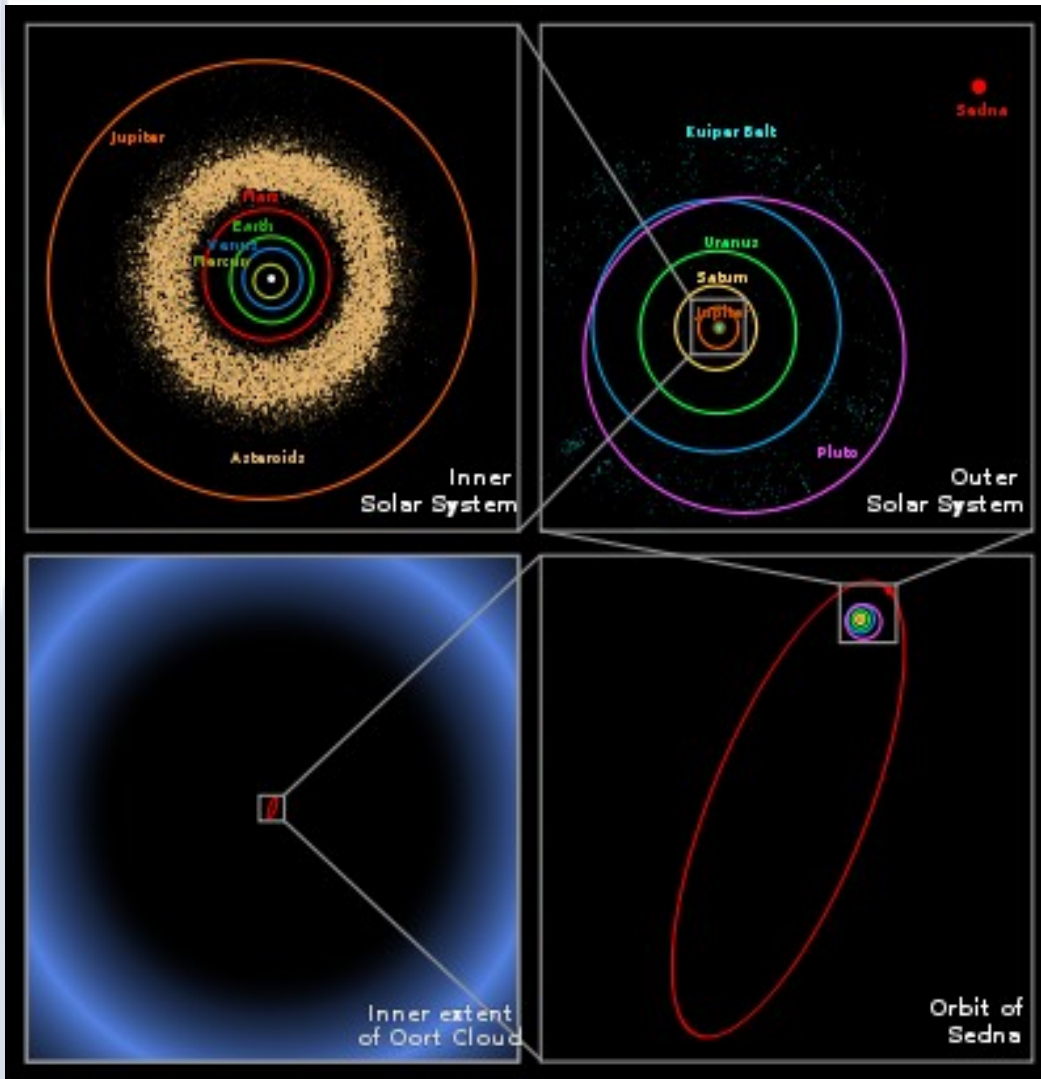
στερεοί πλανήτες

Κύρια ζώνη των Αστεροειδών

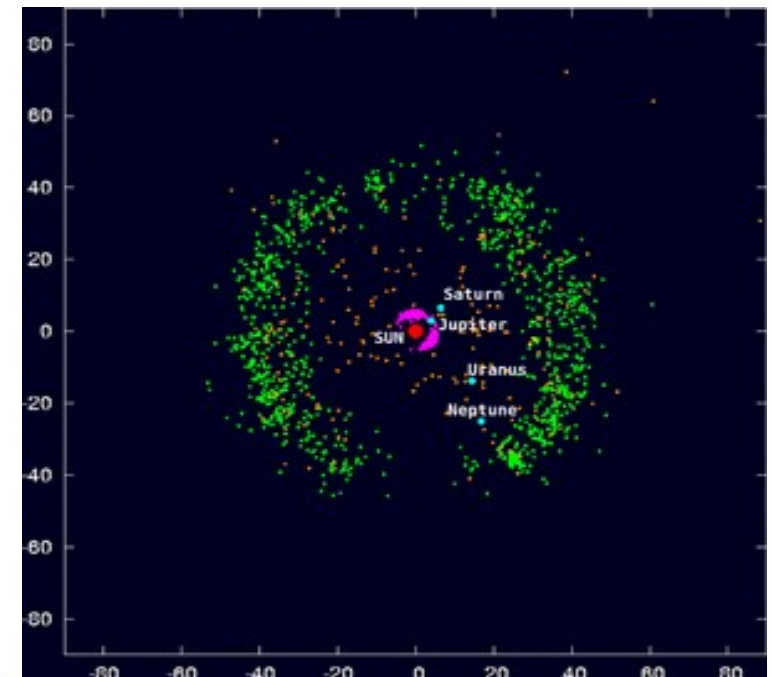
Γίγαντες αερίου/πάγου

Ζώνη του Kuiper

Στη σωστή κλίμακα αποστάσεων...

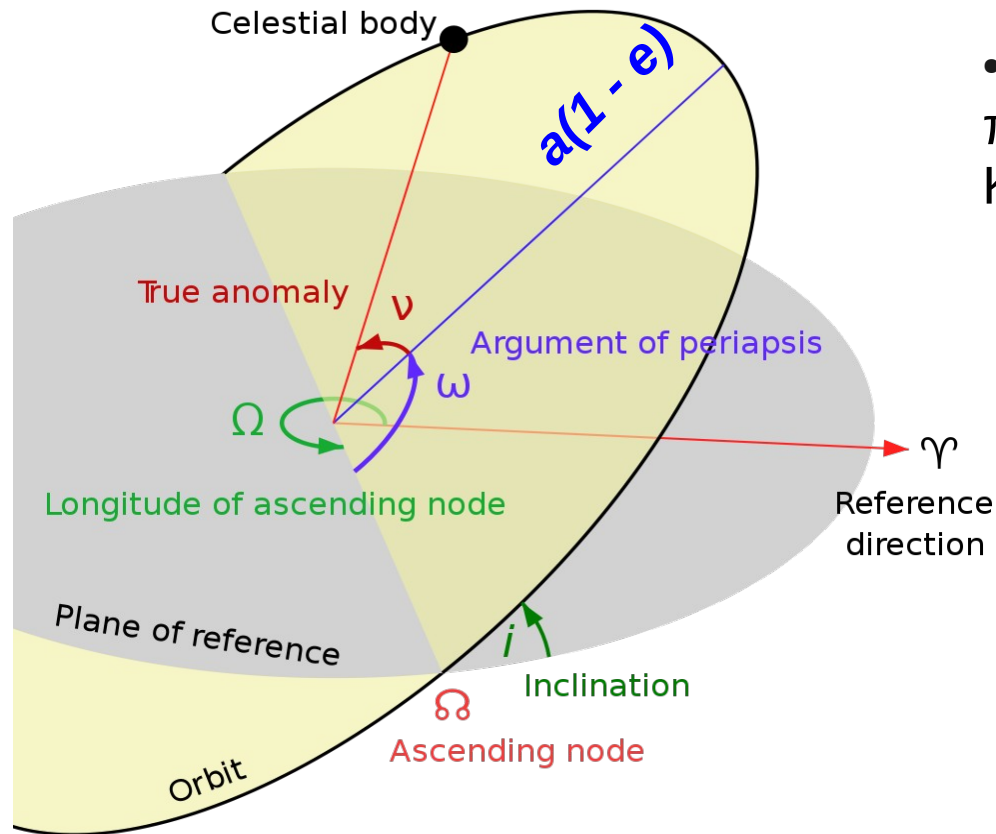


### Ζώνη του Kuiper



\* Η κατανομή των τροχιών των μικρών σωμάτων (αστεροειδείς, κομήτες) είναι η κύρια πηγή πληροφορίας, σχετικά με τη δυναμική εξέλιξη του ΗΣ.

# Είναι ευσταθές το ΗΣ;



- Οι τροχιές των πλανητών είναι (σε πρώτη προσέγγιση) ελλειπτικές (νόμοι Kepler)

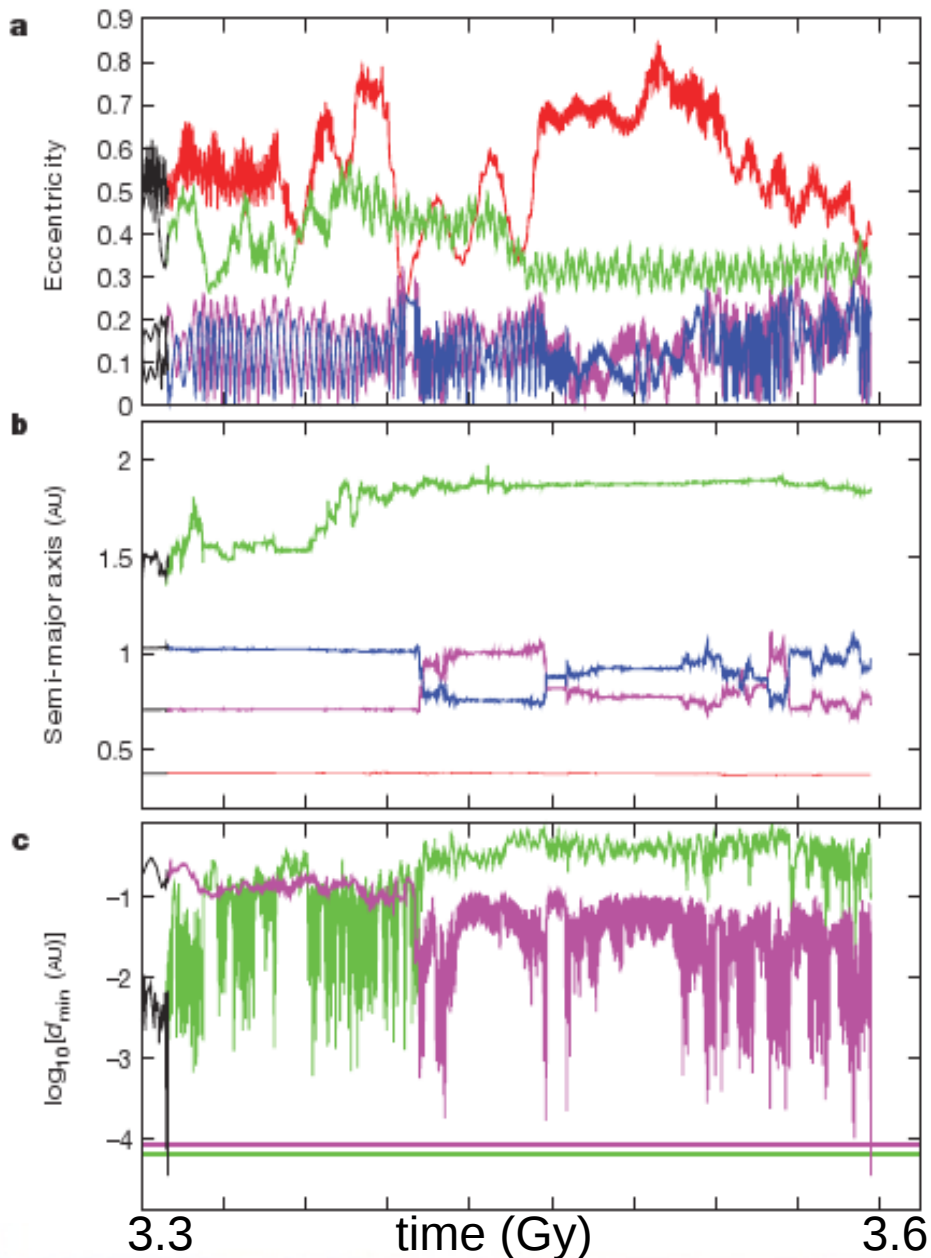
$a$  = μέγανος ημιάξονας

$e$  = εκκεντρότητα

$i$  = κλίση του επιπέδου της τροχιάς

\* αγνοούμε τις **βαρυτικές αλληλεπιδράσεις** των πλανητών!  
→ παρέλξεις → (ημι-)περιοδικές (ή μήπως όχι;) μεταβολές των στοιχείων της τροχιάς...

# “Χάος” στις τροχιές των πλανητών



Μη γραμμική αλληλεπίδραση →  
μη γραμμικό σύστημα Δ.Ε (συντηρητικό)

→ περιοχές αρχικών συνθηκών (στο  
χώρο των φάσεων) όπου η κίνηση είναι  
**χαστική** (ακανόνιστη, μη προβλέψιμη ..)

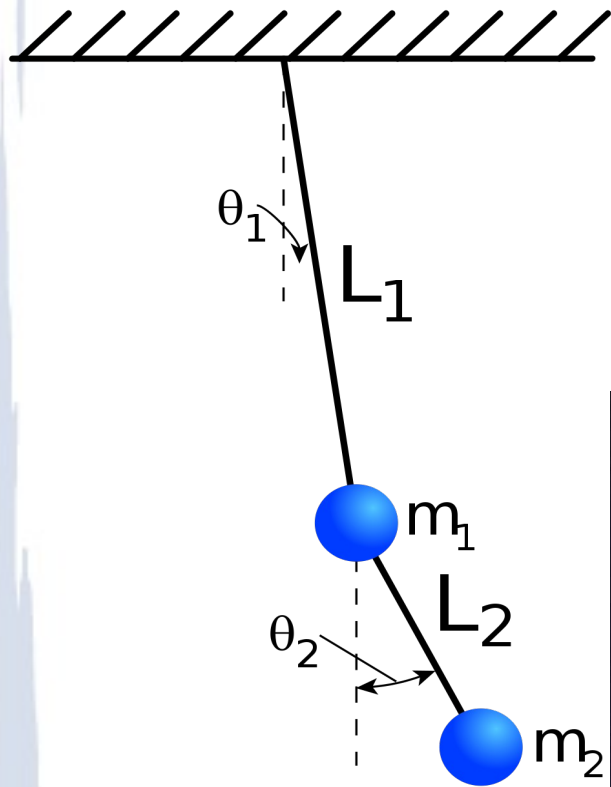
→ οι διαταραχές γίνονται όλο και πιο  
έντονες

→ οι τροχιές των στερεών πλανητών  
τέμνονται

→ σύγκρουση πλανητών!

Laskar et al.: στατιστικά, σε ~2.500  
προσομοιώσεις, ~1% πιθανότητα  
διάλυσης του ΗΣ μέσα σε 4.5 Gy

*Το φαινόμενο είναι πολύ πιο έντονο στις  
τροχιές των αστεροειδών/κομητών!*



Το διπλό εκκρεμές: Ένα απλό σύστημα 2 β.ε.

→ η μη γραμμική σύζευξη των δύο μαζών μπορεί να οδηγήσει σε ...

*Χαοτική κίνηση του διπλού εκκρεμούς*



## Αστεροειδείς (μικροί πλανήτες): 10m – 1.000 km

- Κύρια Ζώνη, Τρωικοί, Παραγήνιοι (NEAs)

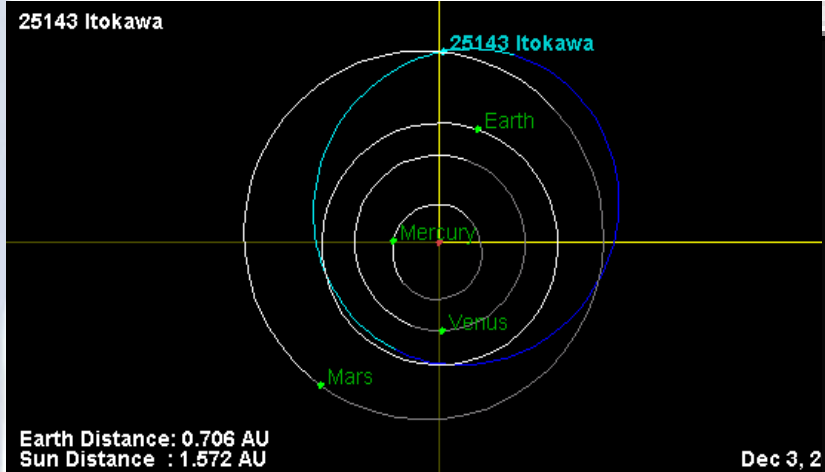
**γιατί είναι τόσο σημαντικοί;**

- Κατανομή Τροχιών → Δυναμική του ΗΣ

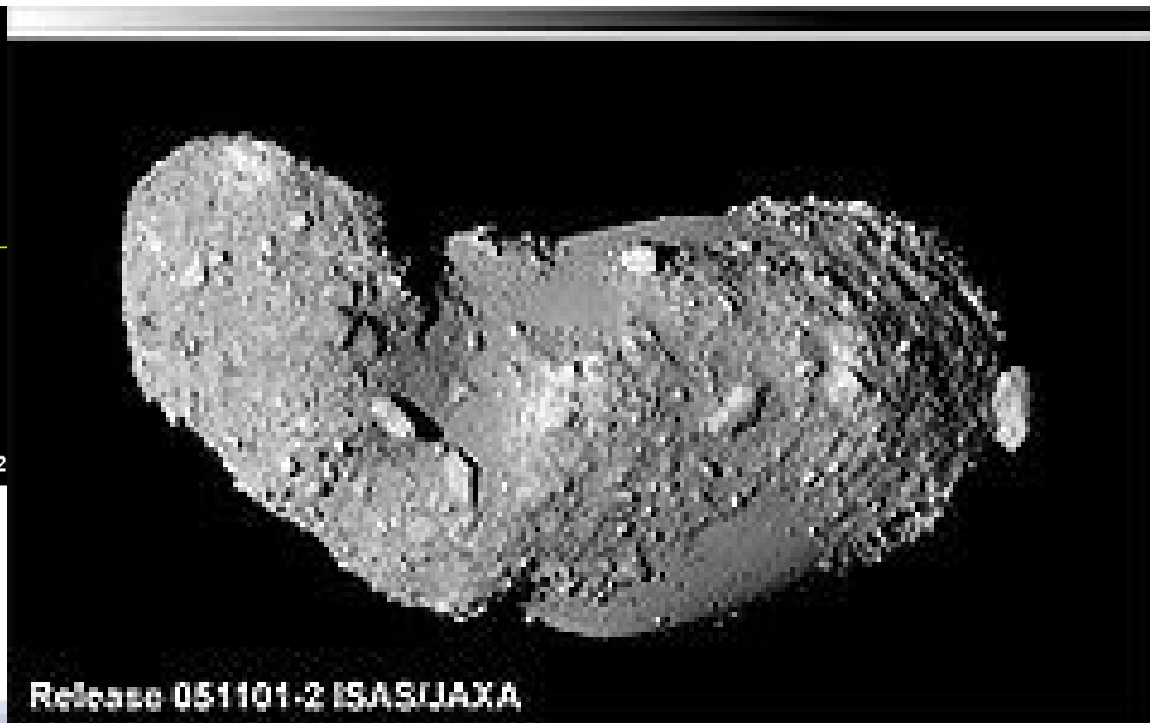
- Φυσικά χαρακτηριστικά (μέγεθος, σύσταση)  
→ υλικό απο το οποίο φτιάχτηκαν οι πλανήτες  
→ διαστημικό καιρό  
→ εξέλιξη της βιόσφαιρας των πλανητών



Εστία Δήμητρα Σελήνη



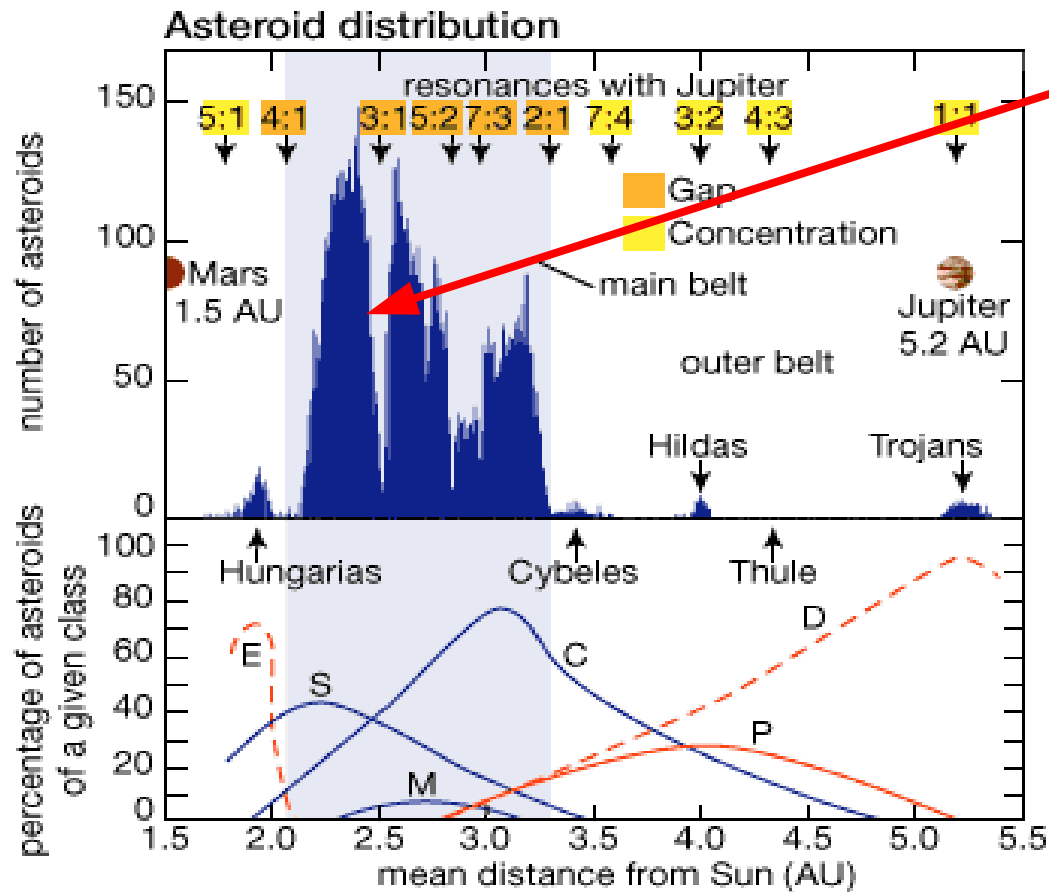
Itokawa



Release 051101-2 ISAS/JAXA



# Κατανομή Αστεροειδών (ΚΖ)



© 2007 Encyclopædia Britannica, Inc.

Τα **Διάκενα του Kirkwood (gaps)** εμφανίζονται στις περιοχές των κύριων **συντονισμών περιόδου περιφοράς** με το Δία

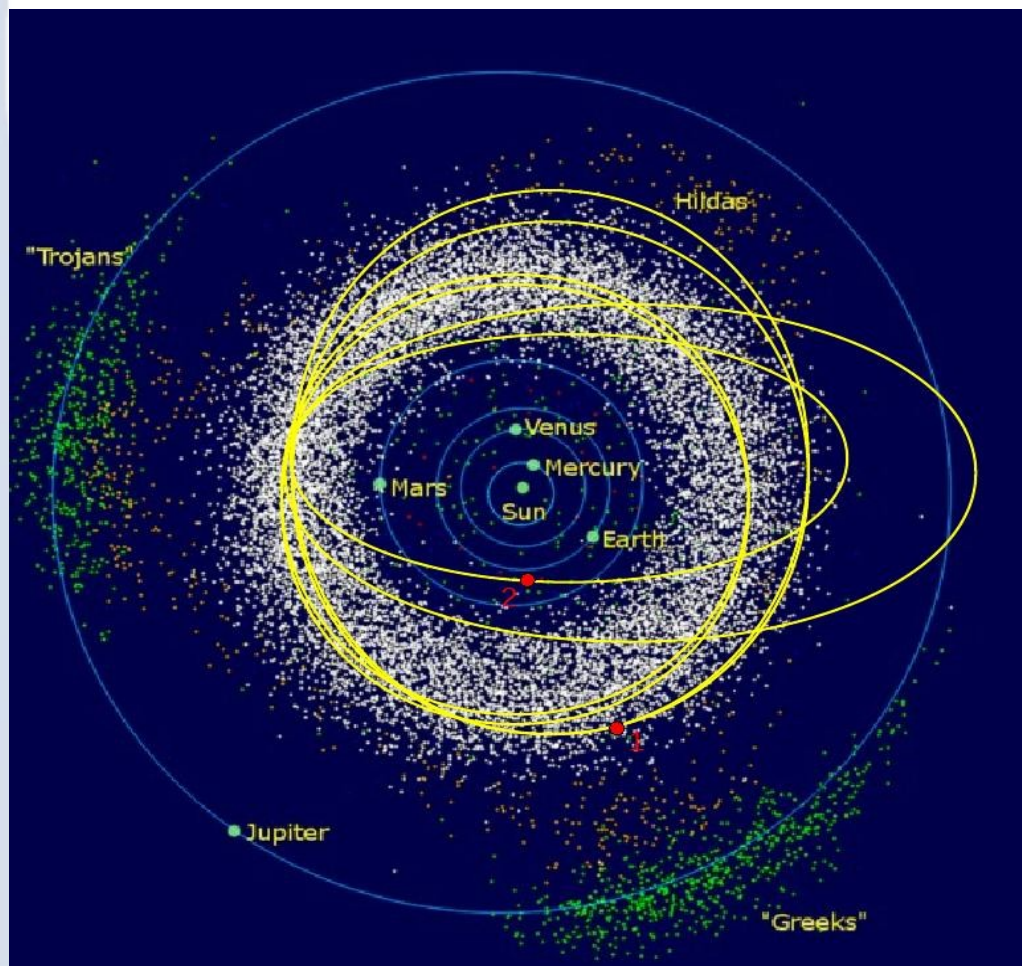
→ οι συντονισμοί επηρεάζουν αποφασιστικά την **ευστάθεια** της τροχιάς των αστεροειδών

→ Γνωρίζουμε ότι η κίνηση στη γειτονιά ενός συντονισμού είναι **χαοτική**

→ μετά από κάποιο χρονικό διάστημα (???) οι εν λόγω αστεροειδείς διαφεύγουν από την ΚΖ **προς την περιοχή των NEAs**

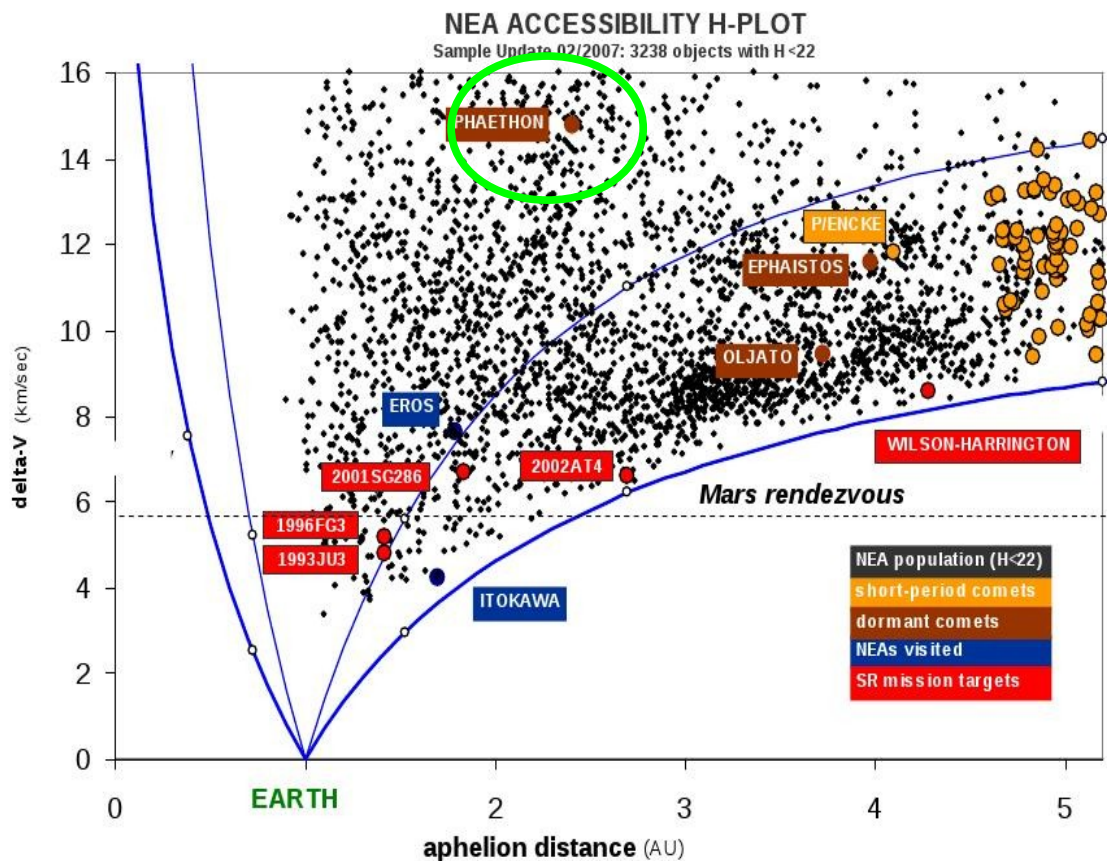
## Παράδειγμα “μετατροπής” ενός αστεροειδούς της ΚΖ σε ΝΕΑ:

- Ο αστεροειδής κινείται στην περιοχή 1 της ΚΖ σε συντονισμό με το Δία
- η εκκεντρότητα της τροχιάς του αυξάνει με αργό ρυθμό ...
  - η τροχιά του να τέμνει αυτήν του Άρη ή/και της Γης (θέση 2)
  - οι πολύ ισχυρές παρέλξεις της Γης τον “αποσπούν” από την ΚΖ
  - μετατρέπεται σε ΝΕΑ



- Ο “μέσος χρόνος ζωής” των ΝΕΑ είναι  $\sim 10$  My
- Οι κύριες “πηγές τροφοδοσίας” είναι οι περιοχές των συντονισμών **3 : 1** ( $a=2.5$  AU) και **4 : 1** ( $a=2$  AU) με το Δία
- Ο ρυθμός αναπλήρωσης των ΝΕΑ εξισορροπεί το ρυθμό διαφυγής
  - “σταθερή” κατάσταση (steady state)

# Διαστημικές Αποστολές σε NEAs



Στόχος ESA / NASA / JAXA :

- η “επίσκεψη” σε όσο το δυνατόν περισσότερους NEAs, η συλλογή υλικού και η επιστροφή του στη Γη για ανάλυση (**sample return missions**)

- Έχουμε ήδη επισκεφτεί τους *Eros* (landing) και *Itokawa* (SR??)

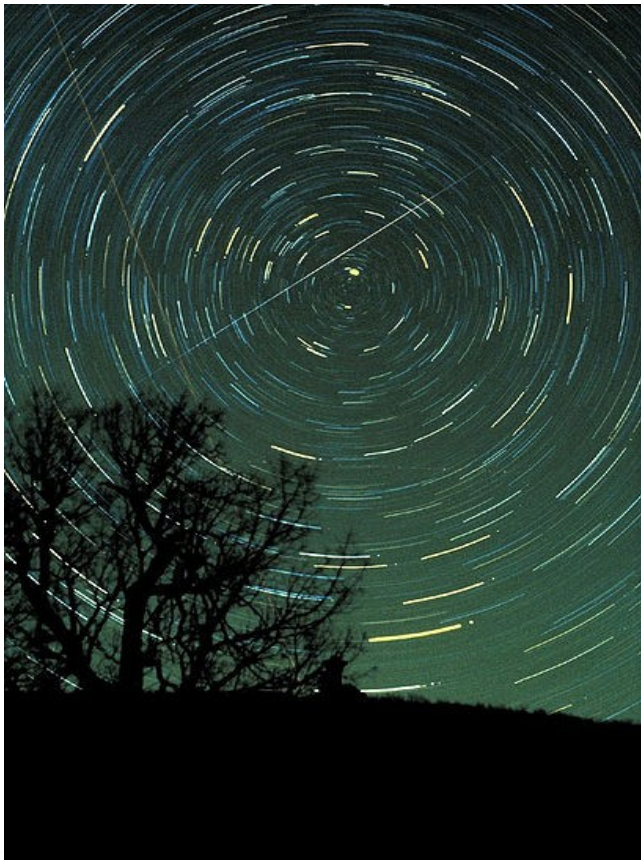
- Προγραμματίζονται τουλάχιστον 3 αποστολές:

- *Marco Polo* (ESA)
- *Osiris REx* (NASA)
- *Hayabusa 2* (JAXA)

**Βασικός Κανόνας:** ελαχιστοποίηση κόστους με ταυτόχρονη μεγιστοποίηση της επιστημονικής ωφέλειας

→ όσο πιο “περίεργος” ο NEA τόσο το καλύτερο...

# Σύνδεση: Geminids – Phaethon και (2) Pallas



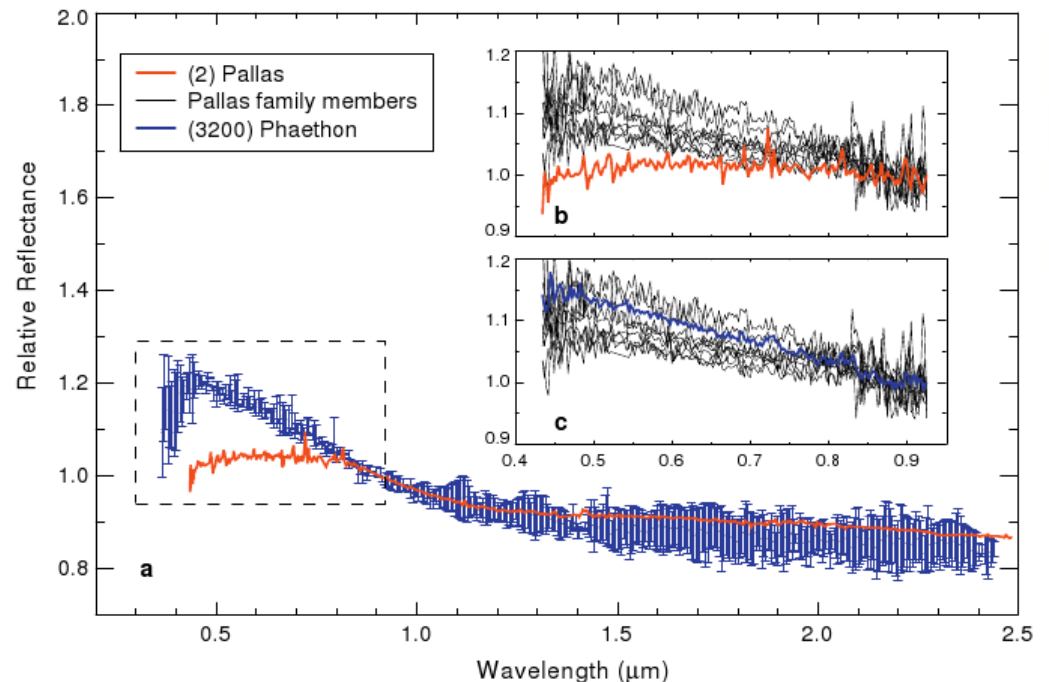
Διδυμίδες (geminids) = βροχή μετεώρων (Δεκ.)

→ η **μόνη** που γνωρίζουμε ότι **δεν** σχετίζεται με κάποιον κομήτη αλλά με τον ΝΕΑ **(3200) Phaethon...**

... που με τη σειρά του είναι θραύσμα (~5 km) κάποιου μεγαλύτερου αστεροειδή της ΚΖ

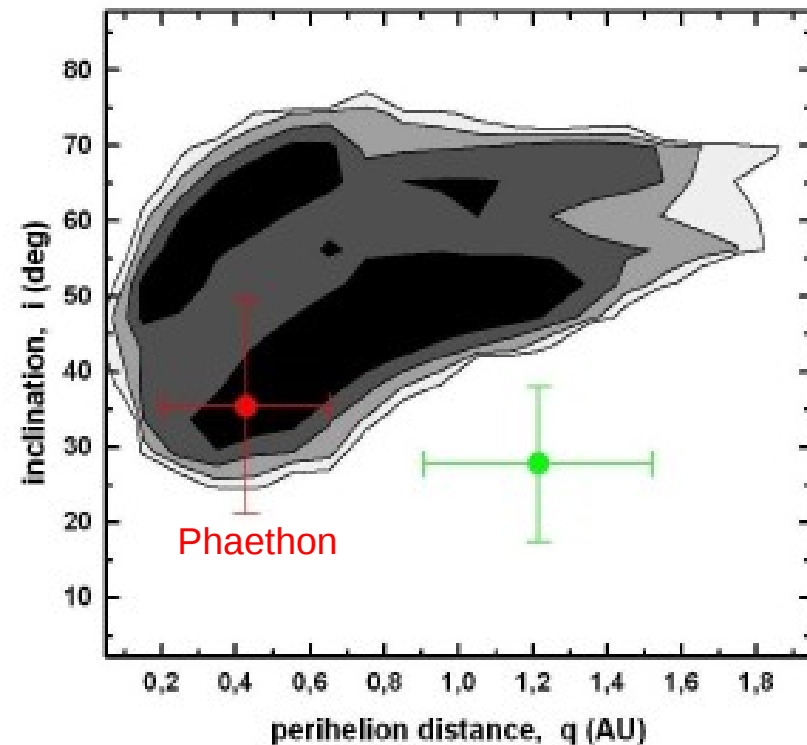
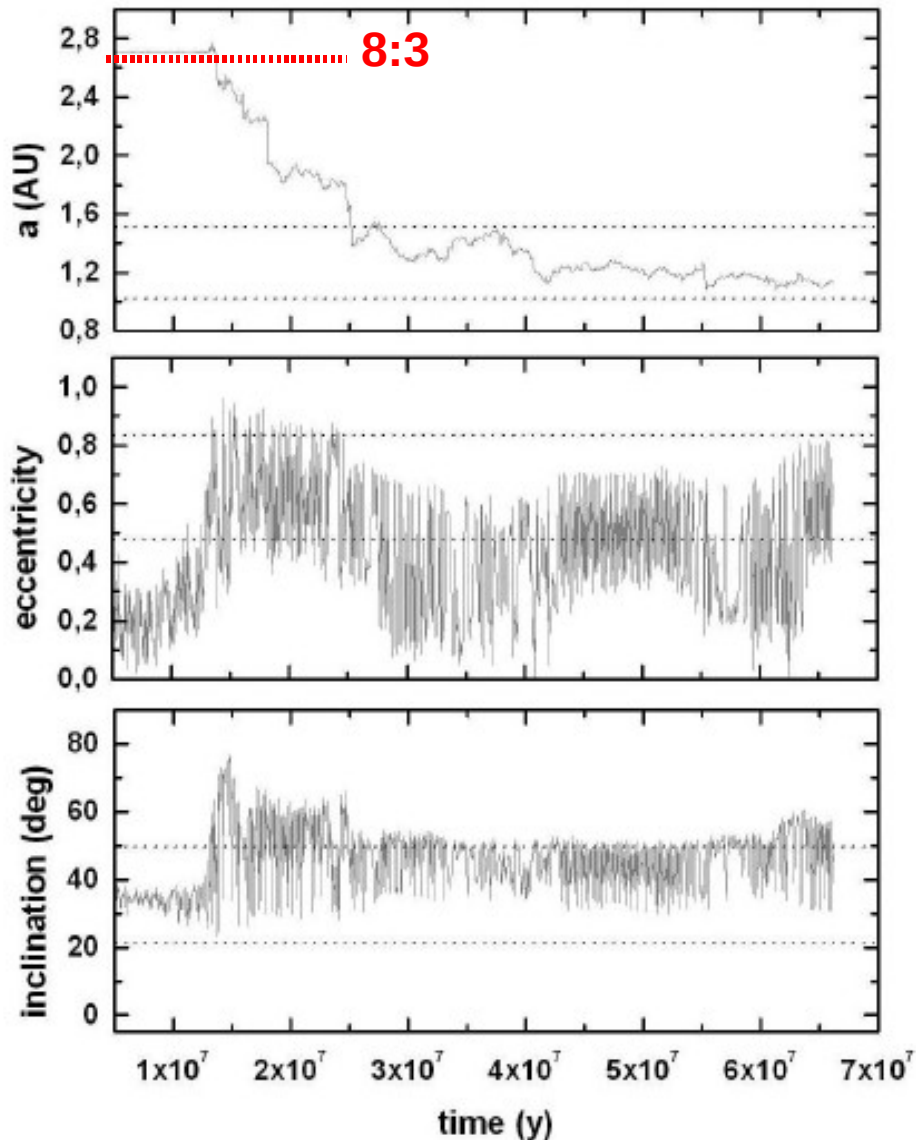
**\* Προσοχή:** το φάσμα του (3200) Phaethon είναι **πολύ** ιδιαίτερο

→ απ' όλους τους αστεροειδείς τύπου Β της ΚΖ, μοιάζει μόνο με αυτούς της **οικογένειας** της **(2) Pallas** !



**Δυναμική θραυσμάτων της Παλλάδας:** ο συντονισμός 8:3 αυξάνει την εκκεντρότητα της τροχιάς σε τιμές  $e \sim 0.9$  → η Γη αποσπά το θραύσμα από το συντονισμό → NEA

→ Η κλίση παραμένει μεγάλη,  $i > 30$  deg  
→ ο Phaethon κινείται στην περιοχή που καταλαμβάνεται κατά προτίμηση από θραύσματα της Παλλάδας!



Συνεργασία με OSIRIS REx prep.:  
συμβαίνει το ίδιο με τον "στόχο" 1999RQ36;

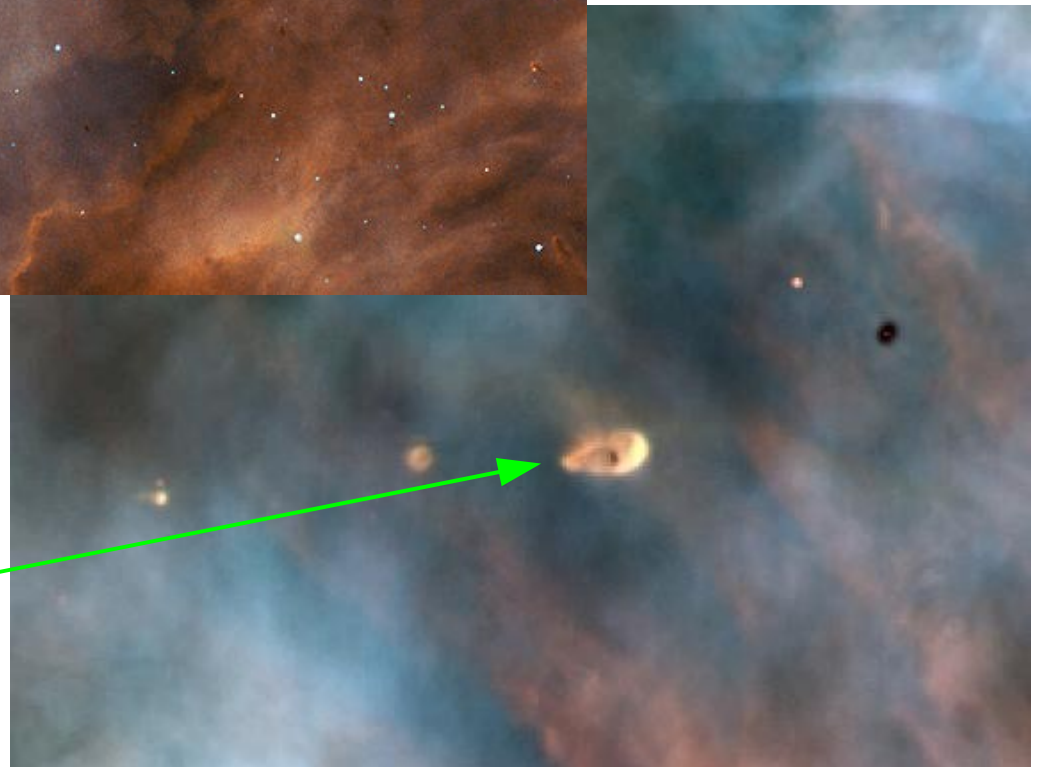
*Πάμε λίγο πιο πίσω....*

# Δημιουργία του ΗΣ



Νεαρός αστέρας που  
περιβάλλεται από  
πρωτοπλανητικό δίσκο

*(VIDEO: protoplanetary discs)*



# Εξελικτικά στάδια της Δημιουργίας του ΗΣ

- Γένεση του Ήλιου και σχηματισμός του *πρωτοπλανητικού δίσκου* (αέριο, σκόνη  $\sim 1/10$  της μάζας του ήλιου)
- Καθίζηση των στερεών υλικών και σχηματισμός των μικρών *πλανητοειδών* ( $\sim 1$  km /  $\sim 10^5$  έτη)
- Συγκρούσεις πλανητοειδών  $\rightarrow$  σχηματισμός πλανητικών “εμβρύων” ( $\sim 100$  km)
- Συγχώνευση των εμβρύων και σχηματισμός *στερεού πυρήνα* των μεγάλων πλανητών
- Όταν  $M_p > 10-15 M_{Γης}$   $\rightarrow$  κατάρρευση μεγάλων ποσοτήτων αερίου  $\rightarrow$  Δίας, Κρόνος, ... ( **$< 3$  My!!!**)

## *terra incognita 1...*

- Συγκρούσεις μικρών εμβρύων στο εσωτερικό ΗΣ  $\rightarrow$  σχηματισμός των γήινων πλανητών (  $\sim 30-100$  My)

## *terra incognita 2...*

- Σημερινό ΗΣ



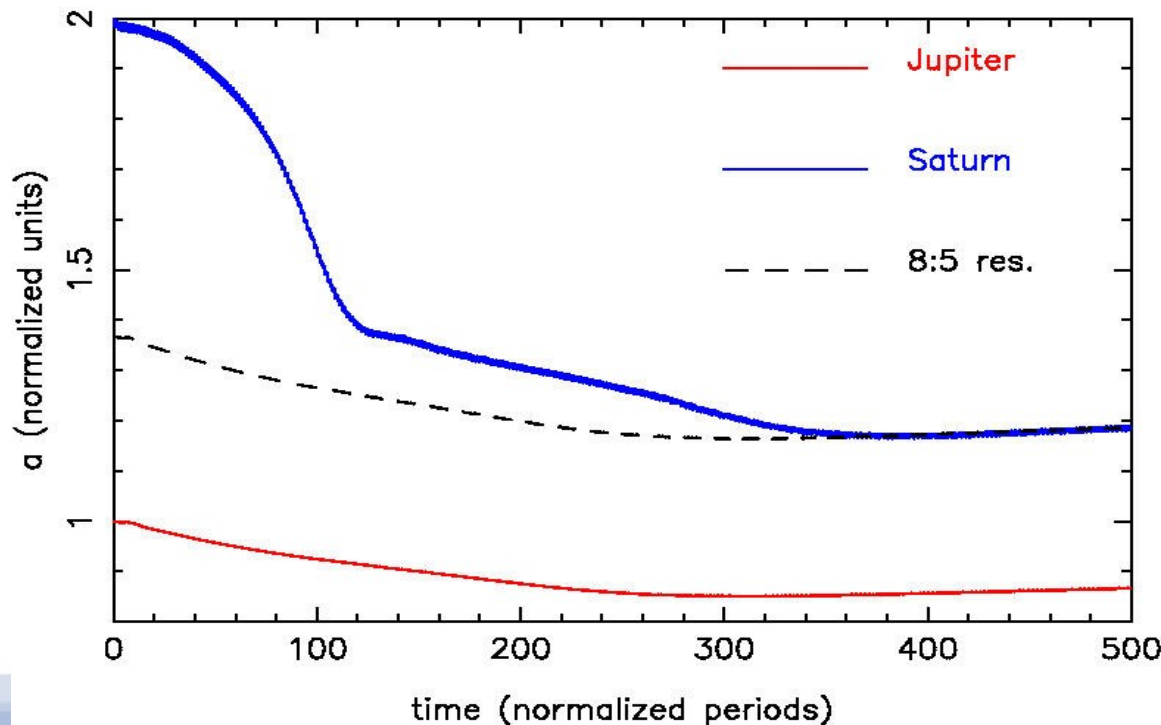
# Τ.Ι. 1: Αλληλεπίδραση Πλανήτη ( $\sim 1 M_J$ ) – Αέριου Δίσκου

Η **βαρυτική** αλληλεπίδραση πλανήτη-δίσκου προκαλεί ακτινική **μετανάστευση** των πλανητών!

Πιστεύουμε ότι παίζει κυρίαρχο ρόλο στην εξέλιξη ενός πλανητικού συστήματος  
→ ερμηνεία των παρατηρήσεων σε εξωηλιακά συστήματα.

Οι βαρυτικές διαταραχές που ασκούν οι πλανήτες στο δίσκο μεταβάλουν την κατανομή πυκνότητας του δίσκου

- συνισταμένη ροπή που ασκεί ο δίσκος είναι  $\neq 0$  → μεταβολή της στροφορμής
- $dr_p/dt \neq 0$  !



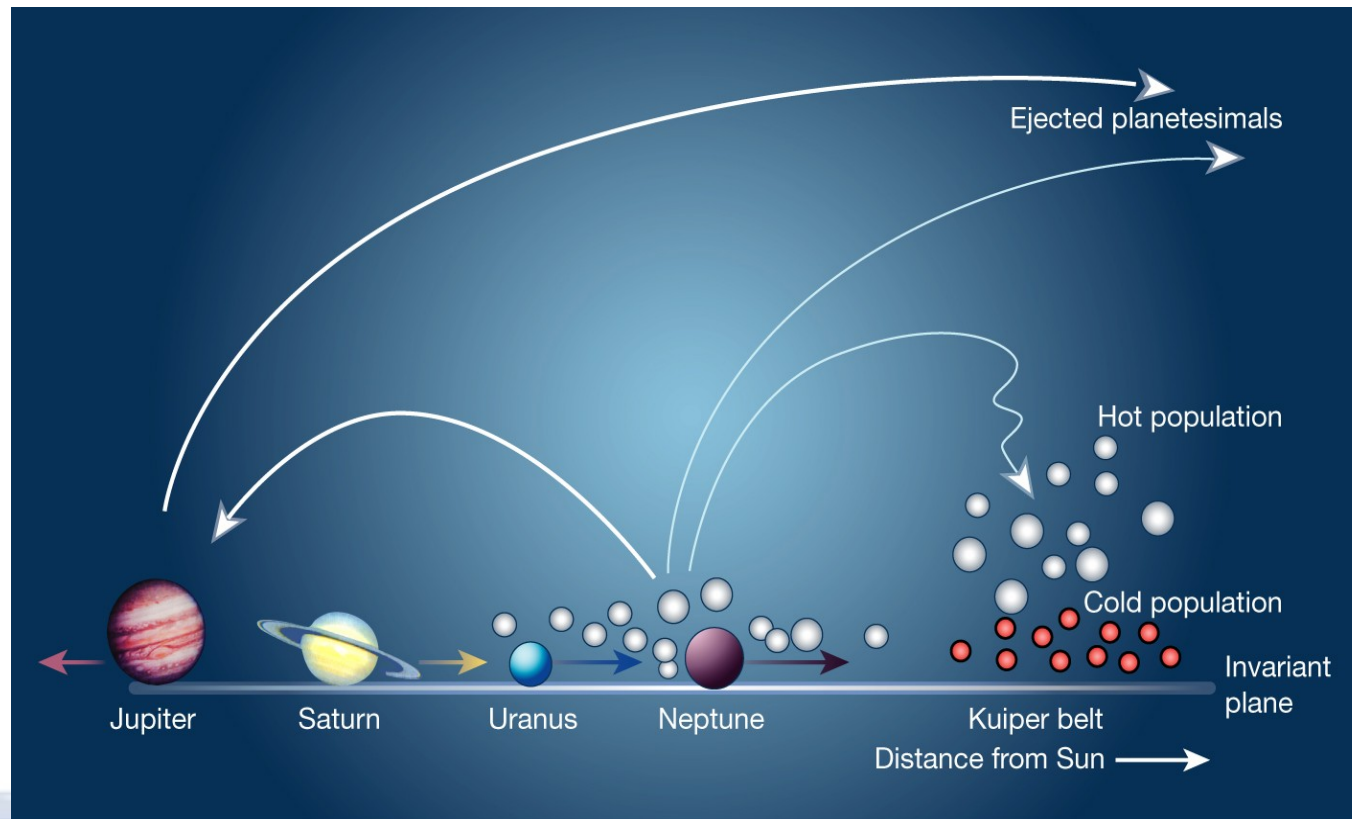
- Είναι δυνατόν οι τροχιές των μεγάλων πλανητών τότε να ήταν **πολύ διαφορετικές** από τις τωρινές !

- Τι αντίκτυπο είχε αυτό στα επόμενα εξελικτικά στάδια;

- Είναι **συμβατό** με άλλες παρατηρήσεις;

## Τ.Ι. 2: Αλληλεπίδραση Πλανητών – Δίσκου Πλανητοειδών

- Οι “αρχικές” τροχιές των μεγάλων πλανητών **πρέπει** να ήταν πολύ διαφορετικές! (πιο κοντά στον Ήλιο και πιο κοντά ο ένας στον άλλο)
  - ώστε ο **χρόνος σχηματισμού του “πυρήνα”** του Ποσειδώνα να είναι  $< 10$  My
  - μόνο αν μετανάστευσαν μπορούμε να ερμηνεύσουμε την **κατανομή των τροχιών** στη ζώνη Kuiper!
  - μια **δεύτερη φάση μετανάστευσης** θα “αφαιρούσε” το  $\sim 99\%$  της συνολικής μάζας στην “πρωταρχική” ζώνη Kuiper που απαιτείται για το σχηματιστό αντικειμένων με διάμετρο  $> 1.000$  km (π.χ. Πλούτων, Έρις, κ.α.)



## Επιπλέον ... πώς θα ερμηνεύσουμε τον LHB;



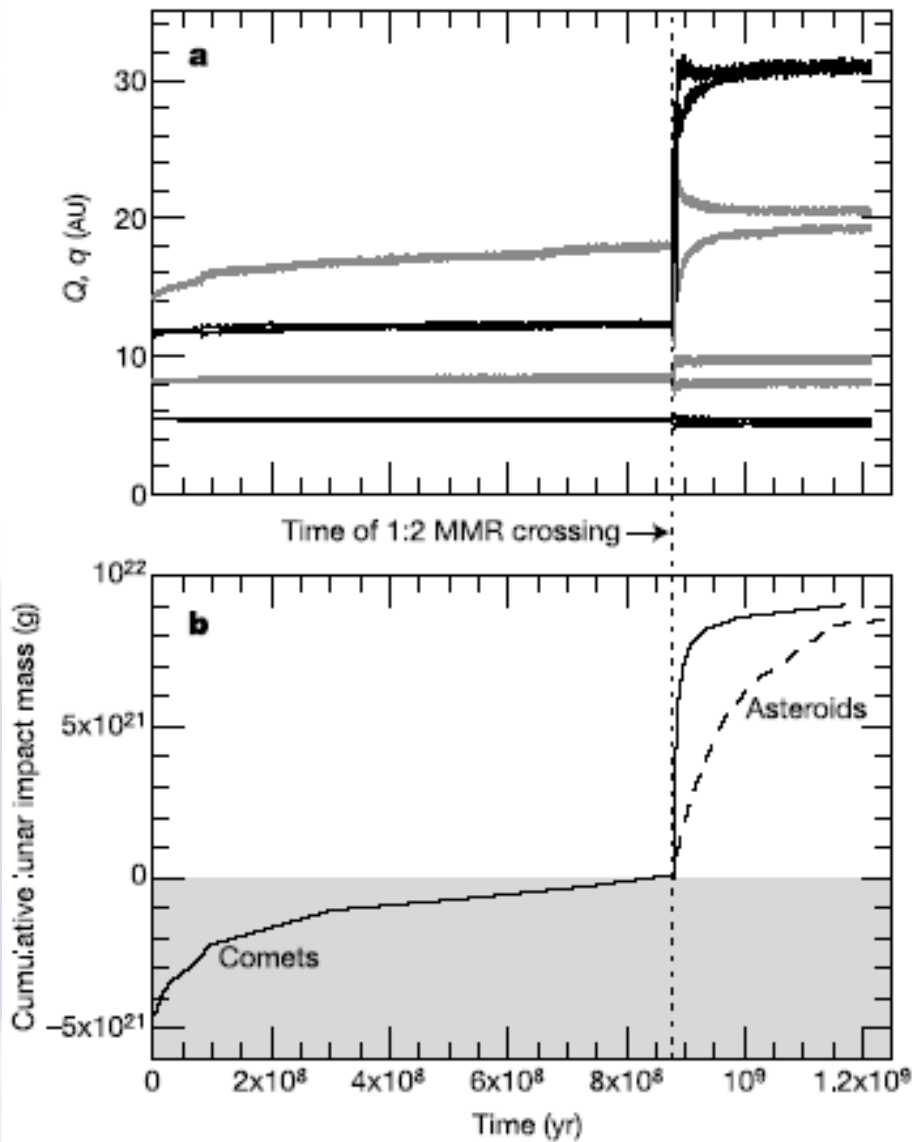
**LHB** = Μία σύντομη περίοδος σφοδρότατου **βομβαρδισμού** του εσωτερικού ΗΣ από αστεροειδείς / κομήτες πριν από  $\sim (3.9 \pm 0.1)$  Gyrs,  $\sim 700$  My μετά τη δημιουργία των πλανητών.

Σειρά δεδομένων (Apollo, κ.α.) δείχνουν:

- Ίδια ηλικία για 12 διαφορετικά σημεία πρόσκρουσης
- Συνολική μάζα βλημάτων  $\sim 6 \times 10^{21}$  gr

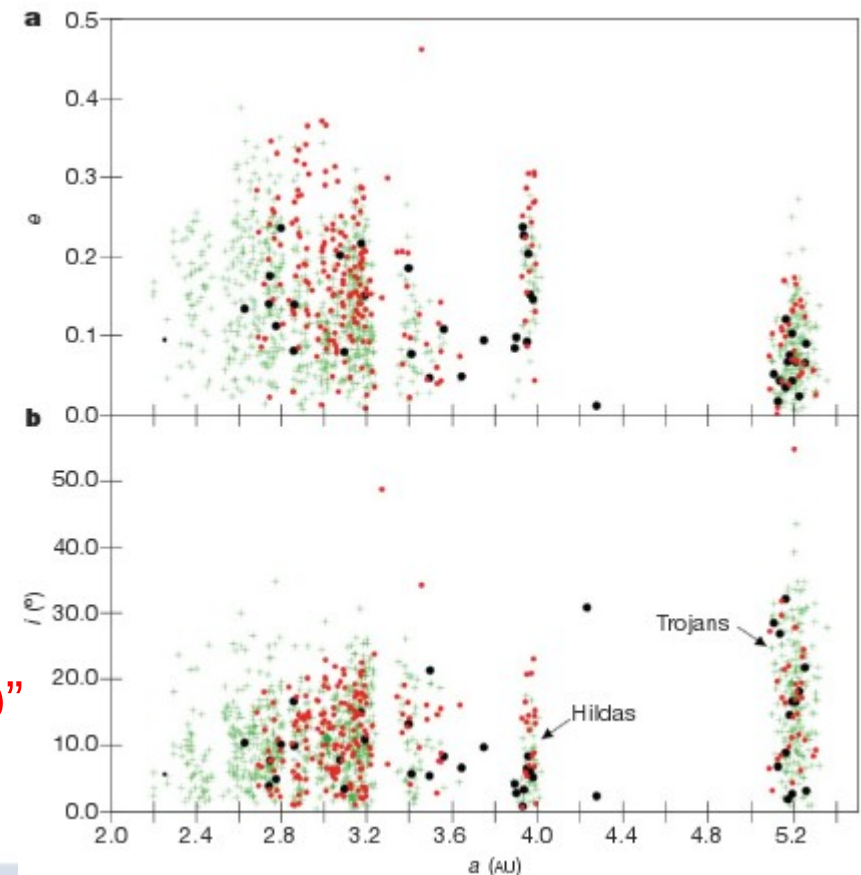
\* Χρειαζόμαστε μια μεγάλη πηγή σωμάτων, πρακτικά άθικτη για  $\sim 600$  Myr και την ξαφνική αποσταθεροποίησή της που θα οδηγήσει στο βομβαρδισμό του εσωτερικού ΗΣ

*VIDEO: μετανάστευση πλανητών – μοντέλο της Νίκαιας*



## Το μοντέλο ερμηνεύει:

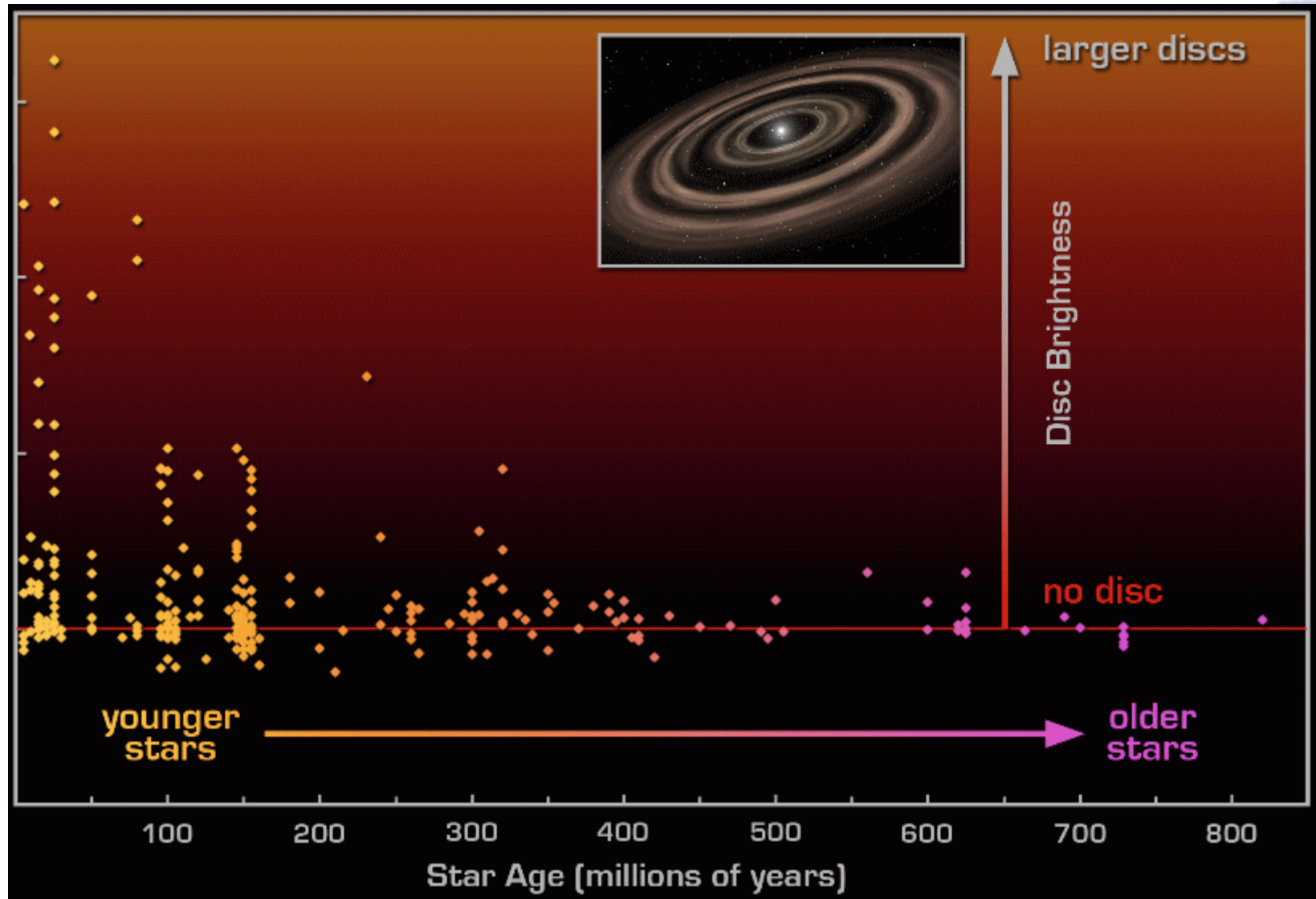
1. τις τελικές **τροχιές των πλανητών**
2. τα κύρια χαρακτηριστικά του **LHB** (χρόνος έναρξης, διάρκεια και συνολική μάζα)
3. Την **κατανομή των τροχιών** στη ζώνη Kuiper κ.α. και...



.. την εισροή και παγίδευση “**κομητικού**” υλικού (D-type asteroids) στην ΚΖ

# αυτό σημαίνει ότι είναι σωστό;

- Προφανώς **όχι** – άλλωστε **δεν** μπορεί να υπάρξει αναλυτική απόδειξη...αλλά...
- Οι βασικές υποθέσεις **δεν** μπορεί να αμφισβητηθούν εύκολα...
- **Δεν** έρχεται σε αντίθεση (μέχρι στιγμής) με τις παρατηρήσεις
- Η ιδέα του “**στατικού**” ΗΣ είναι “νεκρή” → η κύρια συνεισφορά αυτής της έρευνας
- **Πρόβλημα(;) :** Δεν είναι όλες οι λύσεις καλές! Η πιθανότητα το ΗΣ να εξελίχτηκε κατ' αυτόν τον τρόπο και να μη συνέβη κάτι **μοιραίο** είναι **<33%** (και “βγάλε”...)
- Είναι πιθανόν παρόμοιες διαδικασίες να έχουν συμβεί και σε άλλα, **Εξωηλιακά**, πλανητικά συστήματα;



- Έχει παρατηρηθεί **έντονη εκπομπή υπέρυθρης ακτινοβολίας** (IR excess) από αστέρες με **ηλικία  $>100 My$**  → δεν περιβάλλονται από δίσκο αερίου!
- Φαινόμενα **τύπου LHB**;;;

# Συμπέρασμα

- Το ΗΣ **δεν είναι** ένα καλοκουρδισμένο ρολόι!
- Η κατανομή των τροχιών των αστεροειδών και κομητών και η ύπαρξη NEAs αποδεικνύουν την ύπαρξη **χάους** στην σημερινή “σταθερή” κατάσταση
- Η **δυναμική εξέλιξη** του ΗΣ δεν ήταν καθόλου ομαλή κατά τα πρώτα ~700 εκατομμύρια χρόνια...
- Οι δύο φάσεις **μετανάστευσης** των πλανητών παίζουν καθοριστικό ρόλο στην τελική κατάσταση ενός πλανητικού συστήματος (και του ΗΣ)
- Πρέπει να αποδεχτούμε ότι μπορεί να είμαστε ένα **low-probability event ;(!)**
- Αν ναι, υπάρχει και ποια είναι η μορφολογία ενός **τυπικού πλανητικού συστήματος;**

*Ευχαριστώ για την προσοχή....*