

ΔΗΜΟΣΙΑ ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 10<sup>ΗΣ</sup> ΜΑΡΤΙΟΥ 2005

ΑΝΑΚΟΙΝΩΣΗ

Ἡ σημασία τοῦ χάους στὴν ἐξέλιξη τῶν γαλαξιῶν, ὑπὸ τοῦ Ἀκαδημαϊκοῦ κ. Γ. Κοντόπουλου μετὰ τῶν κ.κ. Ν. Βόγγλη καὶ Κ. Καλαποθαράκου\*.

Ἐνα ἀπὸ τὰ κύρια θέματα ποὺ μᾶς ἀπασχολοῦν στὸ Κέντρο Ἀστρονομίας τῆς Ἀκαδημίας Ἀθηνῶν εἶναι τὸ χάος στὸς γαλαξίες καὶ σὲ ἄλλα ἀστρονομικὰ συστήματα.

Ἡ ἱστορία τοῦ χάους ξεκινᾷ ἀπὸ τὸν Poincaré στὸ τέλος τοῦ 19ου αἰῶνος (Poincaré 1899). Ἐπειδὴ ὅμως τὸ θέμα αὐτὸ ἦταν ἐξαιρετικὰ δύσκολο πολὺ λίγοι προσπάθησαν νὰ συνεχίσουν τὸ ἀναλυτικὸ (δηλαδὴ μαθηματικὸ) ἔργο τοῦ Poincaré.

Εἰδικότερα στὴν Ἀστρονομία ἀναπτύχθηκαν δύο πολὺ διαφορετικὲς κατευθύνσεις. Ἀπὸ τὸ ἓνα μέρος ἦταν ἡ Οὐράνια Μηχανικὴ, ἡ ὁποία ἀσχολεῖται κυρίως μὲ τὶς κινήσεις τῶν πλανητῶν καὶ δορυφόρων στὸ ἡλιακὸ σύστημα, ὅπου ὑπέθεταν ὅτι δὲν ὑπάρχει καθόλου χάος. Οἱ τροχιᾶς τῶν πλανητῶν δίδονται συνήθως ἀπὸ προσεγγιστικούς τύπους ποὺ ἐπιτρέπουν ἀκριβεῖς προβλέψεις γιὰ χιλιάδες καὶ ἑκατομύρια ἔτη.

Ἀπὸ τὸ ἄλλο μέρος ἡ Ἀστρική Δυναμικὴ ἀκολούθησε τὶς μεθόδους τῆς Στατιστικῆς Μηχανικῆς, σὲ περιπτώσεις ὅπου τὸ χάος εἶναι πλήρες. Π.χ. ἡ κατανομὴ τῶν ἀστέρων στὸν Γαλαξία μας ἐθεωρεῖτο ὅτι ἦταν παρόμοια μὲ τὴν κατανομὴ τῶν μορίων ἐνὸς αἰερίου μέσα σὲ ἓνα δωμάτιο, ὅπου πράγματι τὸ χάος κυριαρχεῖ.

---

\* G. CONTOPOULOS, N. VOGLIS, C. KALAPOTHARAKOS. — **The role of chaos in the evolution of galaxies**

Λίγοι ήσαν αυτοί που προσπάθησαν να βρουν κανονικότητες στις κινήσεις των αστερών, που έδειχναν διαφορές από τη χαοτική κατανομή.

Η κατάσταση άλλαξε δραματικά με την είσοδο στην Αστρονομία των ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Οι πρώτοι υπολογισμοί τροχιών αστερών στον Γαλαξία γύρω στο 1956 (Contopoulos 1958) έδειξαν απροσδόκητες κανονικότητες που ήσαν ασυμβίβαστες με την ύπαρξη χάους. Ήταν προφανές ότι οι τροχιές αυτές ήσαν εξαρτημένες από όρισμένα νέα ολοκληρώματα της κινήσεως με μορφή σειρών (του τύπου του τρίτου ολοκληρώματος). Έτσι άρχισε μια έντονη δραστηριότητα στον χώρο της Δυναμικής Αστρονομίας τόσο αναλυτική (δηλαδή με καθαρά μαθηματικά), όσο και υπολογιστική (με ηλεκτρονικούς υπολογιστές).

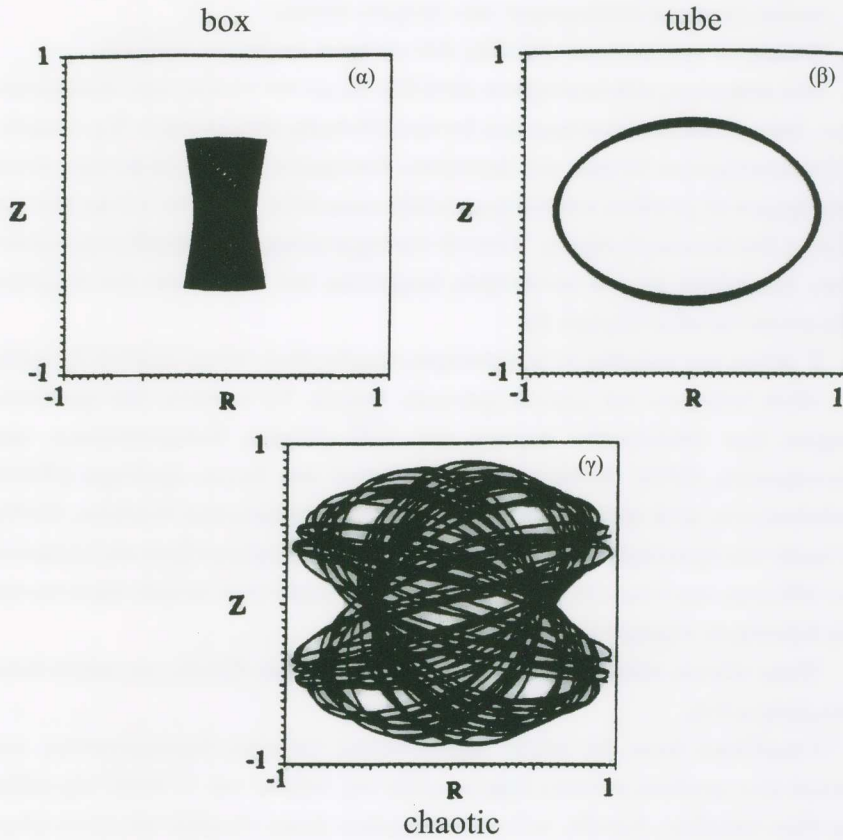
Σιγά-σιγά η ατμόσφαιρα στο χώρο της Αστρονομίας άλλαξε σημαντικά. Οι περισσότεροι αστρονόμοι γύρω στα 1980-1990 έφθασαν να υποστηρίζουν ότι στους γαλαξίες δεν υπάρχει καθόλου χάος. Δημιούργησαν ένα πλήθος από ολοκληρώσιμα μοντέλα γαλαξιών, δηλαδή μοντέλα όπου όλες οι τροχιές είναι οργανωμένες, χωρίς καθόλου χάος. Έντούτοις έχει αποδειχθεί ότι τα ολοκληρώσιμα μοντέλα αποτελούν εξαιρέσεις.

Τα τελευταία πάντως 15 περίπου έτη οι έρευνητές κατάλαβαν ότι τάξη και χάος συνυπάρχουν εν γένει στους γαλαξίες. Υπάρχουν πολλές οργανωμένες τροχιές, αλλά υπάρχουν και χαοτικές τροχιές σε σημαντικές ποσότητες.

Την ίδια περίπου εποχή βρέθηκε πολύ χάος και στο ήλιακό μας σύστημα, κυρίως στις κινήσεις των μικρών πλανητών και σε όρισμένους δορυφόρους. Ένα έντυπωσιακό παράδειγμα είναι η τροχιά του πλανήτη Έρμη (Laskar 1996), η οποία υπολογίζεται ότι θα αλλάξει σημαντικά σε 4 περίπου δισεκατομμύρια έτη. Η κίνηση του πλανήτη αυτού τότε θα είναι τόσο απρόβλεπτη, ώστε θα μπορούσε ο Έρμης ή να πέσει στον ήλιο ή να φύγει πολύ μακριά από αυτόν. Φαίνεται ότι και οι τροχιές των υπολοίπων πλανητών είναι εν πολλοίς χαοτικές, αλλά η εκδήλωση του χάους θα απαιτήσει πολλά δισεκατομμύρια έτη.

Οι περισσότεροι υπολογισμοί τάξεως και χάους στους γαλαξίες έγιναν σε διάφορα μοντέλα που έδιναν το δυναμικό του κάθε γαλαξίου με ένα απλό μαθηματικό τύπο. Κατόπιν οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές υπολόγιζαν ένα πλήθος τροχιών σε αυτό το μοντέλο. Οι κύριοι τύποι τροχιών παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.

Υπάρχουν πρώτον οι οργανωμένες τροχιές, οι οποίες διαιρούνται σε τροχιές-κουτιά (box orbits) και σε τροχιές-σωληνες διαφόρων τύπων (tube orbits). Κατόπιν έρχονται οι χαοτικές τροχιές οι οποίες είναι πολύ άκανόνιστες.



Σχήμα 1. Τρεις βασικοί τύποι τροχιών στο επίπεδο R-Z (κυλινδρικές συντεταγμένες) (a) Τροχιά-κουτί (box), (b) Τροχιά σωλήνας (tube) (c) χαοτική τροχιά (chaotic).

Σε 3 διαστάσεις οι υποδιαιρέσεις των τροχιών είναι λεπτομερέστερες (Σχήμα 2).

Τα κύρια προβλήματα είναι τώρα δύο:

- 1) Μπορούμε με την υπέρθεση πολλών τέτοιων τροχιών να κάνουμε μοντέλα που να είναι αυτοσυνεπή, δηλαδή να δημιουργούν το αρχικό δυναμικό στο όποιο έγιναν οι υπολογισμοί των τροχιών αυτών;
- 2) Υπάρχουν πραγματικοί γαλαξίες που να έχουν παρόμοιες τροχιές;

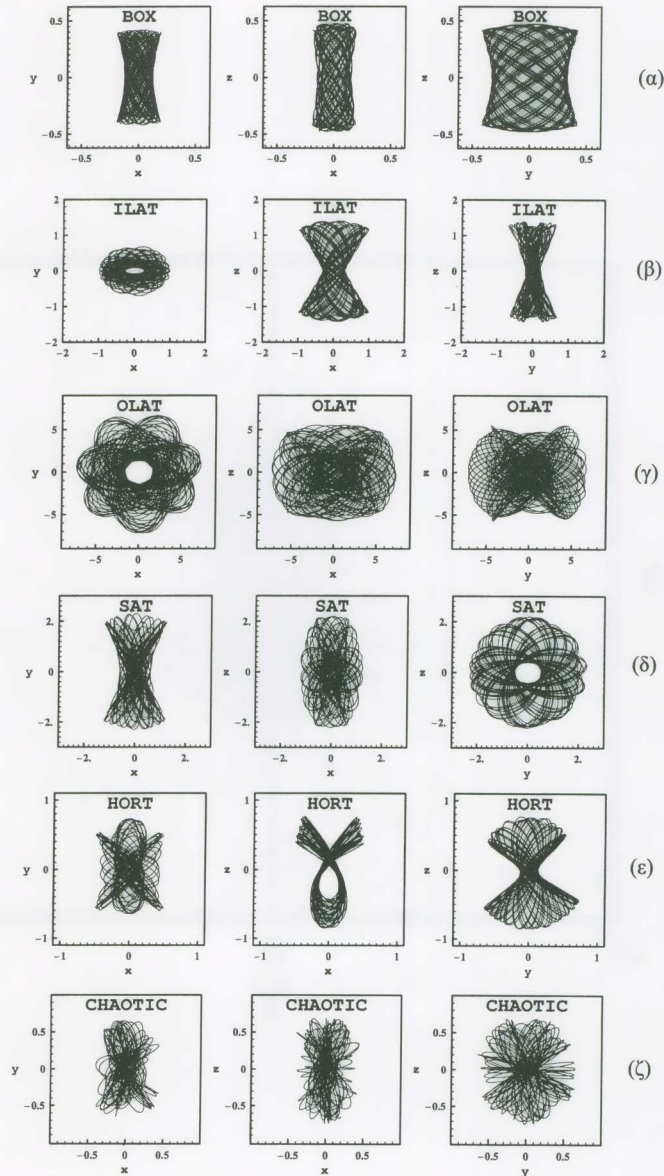
Μια απάντηση στα ερωτήματα αυτά δίνεται με τον υπολογισμό προσομοιώσεων από χιλιάδες και εκατομμύρια άστρες (N-body simulations). Π.χ. θεωρούμε ένα εκατομμύριο άστρες που αποτελούν ένα πρωτογαλαξία. Οι άστρες αυτοί είναι αρχικά σε μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους, αλλά έλκονται ο ένας από τον άλλο με Νευτώνειες δυνάμεις. Έτσι το σύστημα καταρρέει, δηλαδή συμπυκνώνεται, και φθάνει σε μια κατάσταση ισορροπίας που παριστάνει ένα επιμήκη έλλειπτικό γαλαξία (Σχήμα 3).

Σ' αυτόν τον γαλαξία οι περισσότερες τροχιές είναι τύπου κουτιού ή σωληνός, αλλά υπάρχουν και μερικές χαοτικές τροχιές. Το ποσοστό των χαοτικών τροχιών έχει υπολογισθεί περίπου στο 30% (Voglis, Kalapotharakos and Stavropoulos, 2002). Αντίστοιχοι υπολογισμοί που έγιναν αργότερα (2005) επιβεβαιώνουν αυτό το αποτέλεσμα (Muzzio, Carpintero and Wachlin, 2005). Οι τομές των οργανωμένων τροχιών από ένα επίπεδο σχηματίζουν τις λεγόμενες αμετάβλητες καμπύλες (invariant curves), ενώ οι χαοτικές τροχιές παρίστανται από διάσπαρτα σημεία (Σχήμα 4).

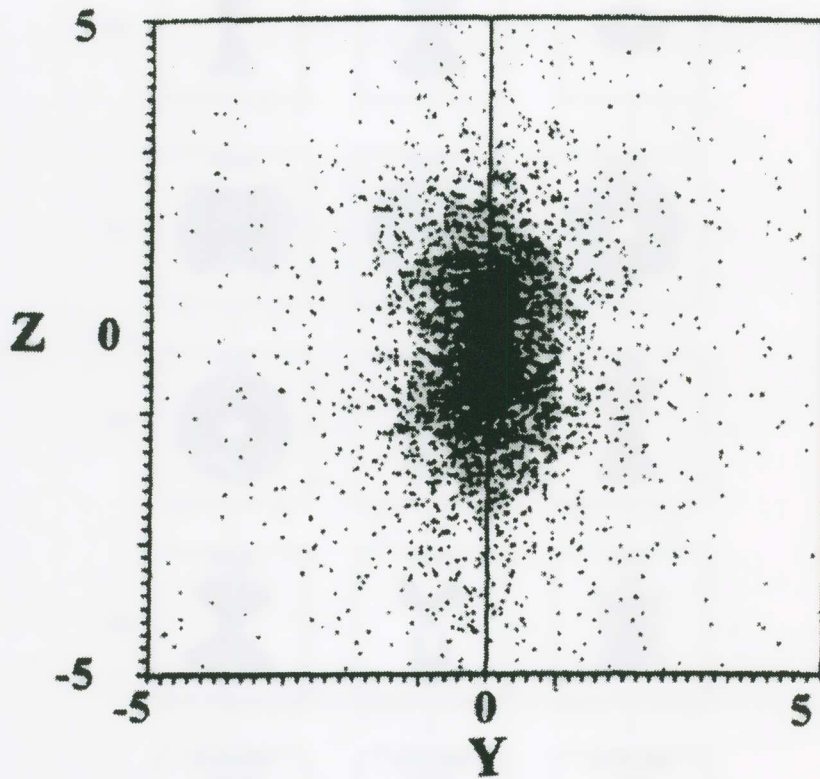
Ένας τέτοιος γαλαξίας δεν παρουσιάζει σημαντική εξέλιξη για πολλά δισεκατομμύρια έτη.

Γνωρίζουμε όμως ότι στους περισσότερους γαλαξίες δημιουργούνται στο κέντρο τους μεγάλες μελανές όπες με μάζα της τάξεως του  $1/1000$  της μάζης του όλου γαλαξίου, δηλαδή πολλά εκατομμύρια φορές τη μάζα του ήλιου (ένας γαλαξίας έχει μάζα περίπου 100.000.000.000 φορές τη μάζα του ήλιου, άρα η κεντρική μελανή όπη έχει μάζα της τάξεως των 100.000.000 ηλίων).

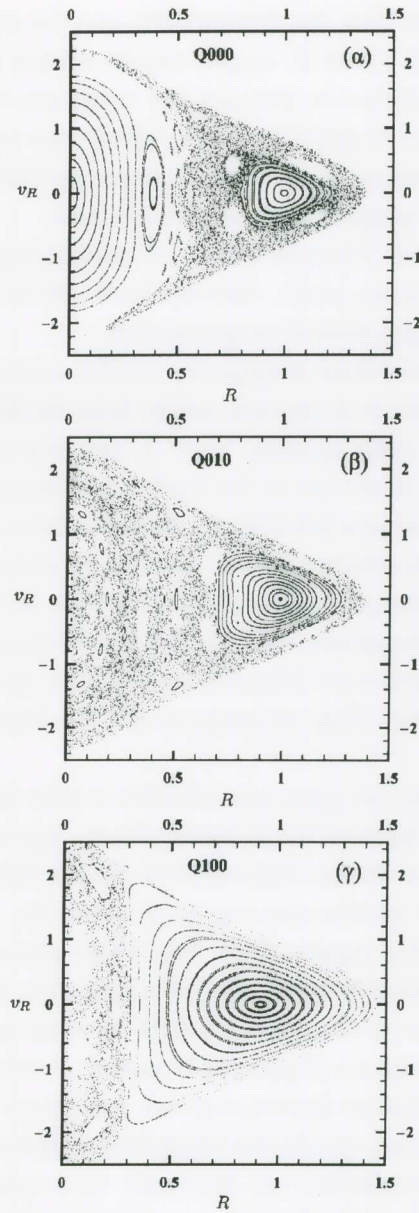
Αν δημιουργηθεί μια μελανή όπη στο κέντρον ενός γαλαξίου (κάτι πολύ συνηθισμένο) ο γαλαξίας αρχίζει να εξελίσσεται. Σε μια πρόσφατη εργασία μας στο Astronomy and Astrophysics (Kalapotharakos, C., Voglis, N., and Contopoulos, G., 428, 905, τέλος του 2004) μελετήσαμε ακριβώς αυτή την εξέλιξη.



Σχήμα 2. Διάφοροι τύποι τρισδιάστατων τροχιών. Προβολές στα επίπεδα X-Y, X-Z και Y-Z. (α) Τροχιά-κουτί, (β) Έσωτερικός σωλήνας γύρω από τον μεγάλο άξονα, (γ) Έξωτερικός σωλήνας γύρω από τον μεγάλο άξονα, (δ) σωλήνας γύρω από τον μικρό άξονα, (ε) τροχιά συντονισμού ανώτερης τάξεως, (ζ) χαοτική τροχιά.



Σχήμα 3. Έλλειπτικός γαλαξίας (προβολή στο επίπεδο Y-Z) που προήλθε από κατάρρευση.



Σχήμα 4. Τομές πολλών τροχιών από την επιφάνεια τομής  $(R, v_R)$ . (α) Χωρίς μελανή όπη, Q000, (β) Με μελανή όπη ένα χιλιοστό της μάζας του γαλαξία, Q010, (γ) Με μελανή όπη ένα εκατοστό της μάζας του γαλαξία, Q100.

Αρχικά ό γαλαξίας είναι ένα επίμηκες έλλειψοειδές που έχει πάρα πολλές τροχιές τύπου κουτιού. Αύτες οι τροχιές περνούν κάποια στιγμή πολύ κοντά από τó κέντρο και εκτρέπονται απότομα από τή μελανή όπή, ώστε να γίνουν χαοτικές τροχιές. Έτσι τó πρώτο βήμα στην εξέλιξη τών γαλαξιών αυτών είναι ή μετατροπή τών οργανωμένων τροχιών κουτιού σε χαοτικές (Σχήμα 5). Τó ποσοστό τών χαοτικών τροχιών φθάνει περίπου στο 80%.

Συνέπεια αυτού τού γεγονότος είναι ότι ό γαλαξίας αρχίζει να εξελίσσεται προς μία λιγότερο επιμήκη μορφή. Αυτό όφειλεται στο ότι οι χαοτικές τροχιές δέν έχουν επιμήκη μορφή όπως οι τροχιές κουτιού.

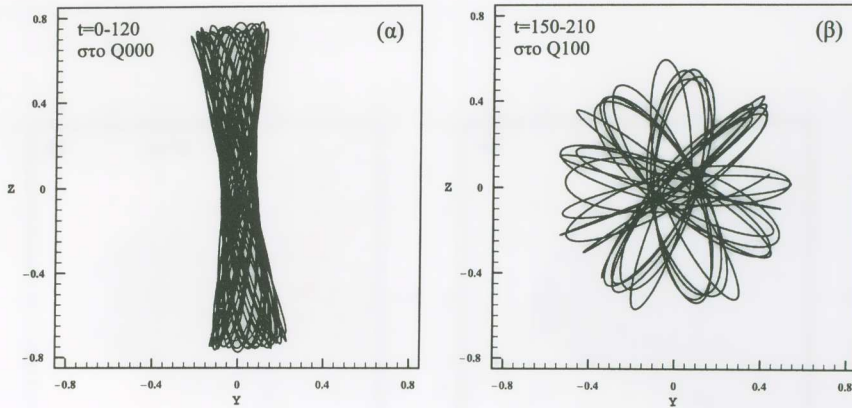
Στή συνέχεια τής εξέλιξως τó σχήμα τού γαλαξίου γίνεται πιό πεπλατυσμένο (Σχήμα 6) και παράλληλα οι χαοτικές τροχιές βαθμιαία αλλάζουν και γίνονται οργανωμένες τροχιές τύπου σωλήνος. Έτσι τó χάος ελαττώνεται περίπου στο 20% και ό γαλαξίας καταλήγει σε ένα σχεδόν πεπλατυσμένο έλλειψοειδές με μικρή, όμως, έλλειπτικότητα. Στο Σχήμα 7 παρακολουθούμε τήν εξέλιξη τών τροχιών που από χαοτικές γίνονται όλο και πιό πολύ οργανωμένες τύπου σωλήνος.

Η αύξηση τού χάους μόλις δημιουργηθεί ή μελανή όπή στον γαλαξία συνοδεύεται από μιá μεγάλη αύξηση τής έντροπίας τού συστήματος. Αυτό είναι κάτι που γίνεται εύκολα κατανοητό δεδομένου ότι ή αύξηση τής έντροπίας είναι μιá γενική ιδιότης τής ύλης. Είναι τó λεγόμενο «δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα» τής φυσικής.

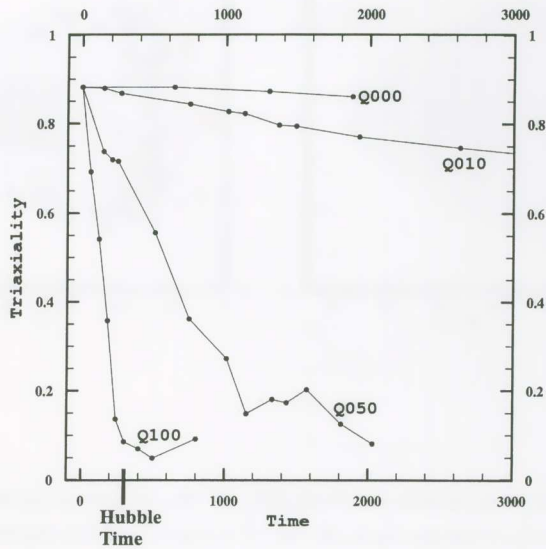
Όμως ή ελάττωση τού χάους στα τελευταία στάδια τής εξέλιξως τών γαλαξιών είναι κάτι τó περίεργο που εκ πρώτης όψεως έρχεται σε αντίθεση με τó δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα. Δημιουργείται δηλαδή τάξη από τó χάος. Έπομένως ή έντροπία τού γαλαξίου φαίνεται ότι ελαττώνεται.

Αυτό όμως δέν είναι ακριβές. Διότι, ενώ πολλές χαοτικές τροχιές γίνονται οργανωμένες με μηδενική έντροπία, ένα άλλο μέρος τών τροχιών τού γαλαξία όχι μόνο εξακολουθούν να είναι χαοτικές, αλλά αποκτούν μεγαλύτερη έντροπία από όση είχαν προηγουμένως (Σχήμα 8). Έπομένως, ενώ ένα μεγάλο μέρος τών χαοτικών τροχιών γίνονται οργανωμένες και άρα χάνουν τήν έντροπία τους, οι σχετικά λίγες χαοτικές τροχιές που παραμένουν αυξάνουν κατά πολύ τήν έντροπία τους και αντισταθμίζουν τήν ελάττωση τής έντροπίας τών υπολοίπων τροχιών. Επί πλέον ό γαλαξίας διαστέλλεται, δηλαδή πολλές τροχιές απομακρύνονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Αυτό συνεπάγεται μιá επί πλέον αύξηση τής έντροπίας τού συστήματος. Κατά συνέπεια ή όλική έντροπία τού γαλαξία αυξάνει με τó χρόνο.

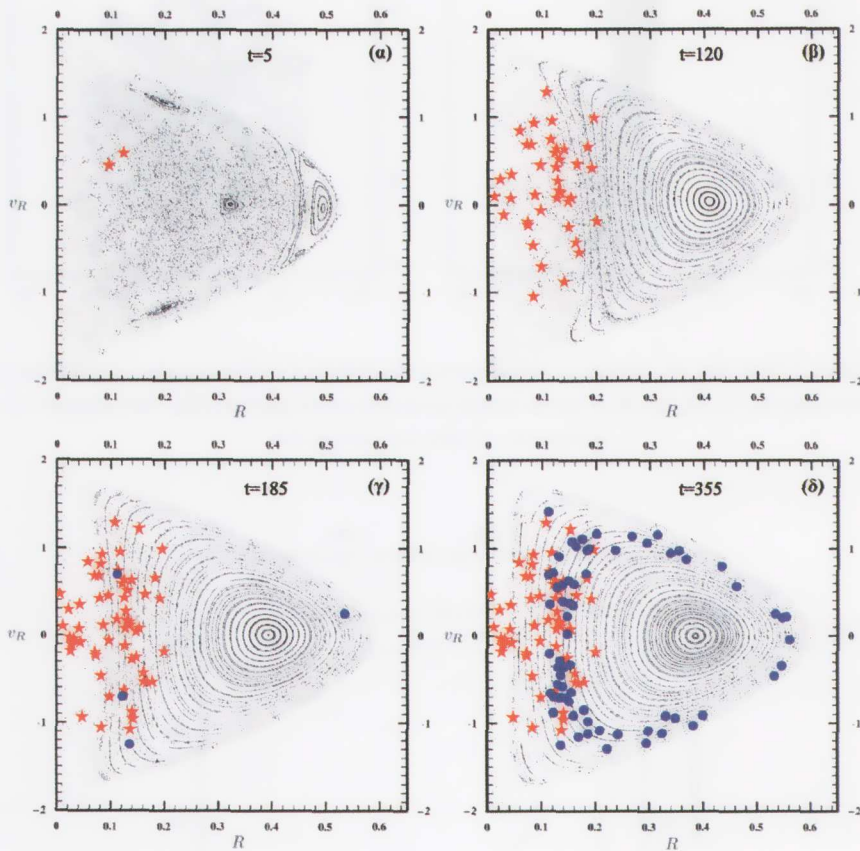




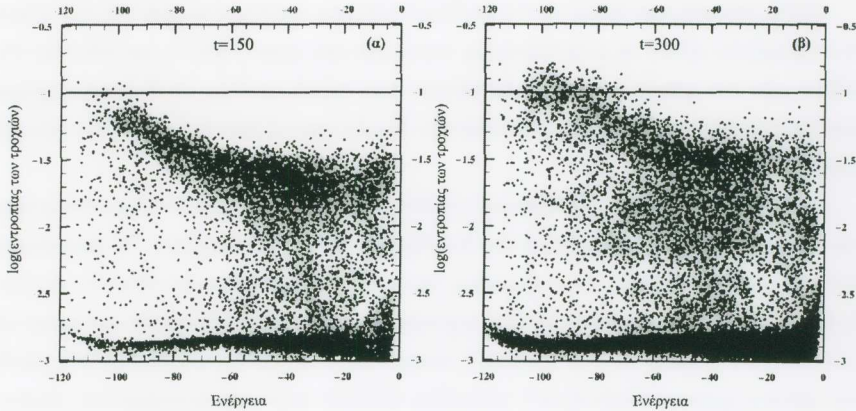
Σχήμα 5. Πριν από την εισαγωγή της μελανής όπης υπάρχουν πολλές τροχιές-κουτιά, όπως ή εικονιζόμενη στο Σχ. (α). Μια τέτοια τροχιά μετατρέπεται σε χαοτική (β), όταν εισαχθεί στο κέντρο του γαλαξία μια μελανή όπη.



Σχήμα 6. Η τριαξονικότητα διαφόρων γαλαξιών συναρτήσει του χρόνου με μονάδα τη μέση περίοδο των τροχιών. Q000 χωρίς μελανή όπη, Q010 με μελανή όπη  $10^{-3} M_G$  (όπου  $M_G$  είναι η μάζα του γαλαξία), Q050, με μελανή όπη  $5 \times 10^{-3} M_G$  Q100, με μελανή όπη  $10^{-2} M_G$ . Η ηλικία του Σύμπαντος σημειώνεται ως Hubble Time.



Σχήμα 7. Η εξέλιξη ενός γαλαξία με μελανή όπη  $10^{-3} M_G$ , σε χρόνους (α)  $t=5$ , (β)  $t=120$ , (γ)  $t=185$ , (δ)  $t=355$  στην επιφάνεια τομής  $(R, v_R)$ . Οι συνεχείς καμπύλες παριστάνουν οργανωμένες τροχιές και τα διάσπαρτα σημεία χαοτικές τροχιές στο δυναμικό που υπάρχει στους αντίστοιχους χρόνους. Οι διαδοχικές τομές της επιφάνειας τομής από την τροχιά ενός (όρισμένου) άστρου παρίστανται ως κόκκινα άστρα, όταν η τροχιά του είναι χαοτική και μπλε κύκλους, όταν η τροχιά του γίνει οργανωμένη. Τα άστρα και οι κύκλοι δίνονται μέχρι τους αντίστοιχους χρόνους.



Σχήμα 8. Ο λογάριθμος της έντροπίας πολλών τροχιών συναρτῆσει τῆς ἐνέργειας των γιὰ χρόνους (α)  $t=150$  καί (β)  $t=300$ . Ἡ κάτω σκοτεινὴ περιοχὴ, ποὺ περιλαμβάνει ὁργανωμένες τροχιές, αὐξάνει στὸ σχῆμα (β), ἀλλὰ συγχρόνως οἱ τιμές τῆς ἐντροπίας ὀρισμένων τροχιῶν αὐξάνουν πάνω ἀπὸ τὴν ὀριζόντια γραμμὴ.

Αὐτὸ τὸ φαινόμενο τῆς τοπικῆς ἐλαττώσεως τῆς ἐντροπίας μετὰ σύγχρονη αὐξηση τῆς ἐντροπίας σὲ ἄλλες περιοχὲς παρουσιάζεται καὶ σὲ ἄλλα φαινόμενα στὴ φύση. Ἐνα παράδειγμα εἶναι ἡ ψύξη ποὺ δημιουργεῖ ἕνα ψυγεῖο, κάτι ποὺ φαίνεται ἀντίθετο μετὰ τὸ δεύτερο θερμοδυναμικὸ ἀξίωμα. Αὐτὴ ἡ ψύξη γίνεται μετὰ δαπάνη ἠλεκτρικοῦ ρεύματος ποὺ θερμαίνει τὸ περιβάλλον περισσότερο ἀπὸ ὅσο ψύχει τὸ ἐσωτερικὸ τοῦ ψυγείου. Ἔτσι παρ' ὅλον ὅτι στὸ ἐσωτερικὸ τοῦ ψυγείου ἡ ἐντροπία ἐλαττώνεται ἡ συνολικὴ ἐντροπία τοῦ ψυγείου μαζί μετὰ τὸ περιβάλλον του αὐξάνει.

Ἀνάλογα φαινόμενα τοπικῆς ἐλαττώσεως τῆς ἐντροπίας παρουσιάζονται στὸς ζωντανούς ὁργανισμούς. Σ' αὐτούς δημιουργεῖται ὁργάνωση καὶ τάξη, δηλαδή ἐλάττωση τῆς ἐντροπίας. Στὸ σύστημα ὅμως τοῦ ὁργανισμοῦ μαζί μετὰ τὸ περιβάλλον του ἡ ὀλικὴ ἐντροπία αὐξάνει.

Τò φαινόμενο αυτό θεβαίως διαρκεί όσο και ή ζωή του έμβιου όντος. Μετά τò θάνατο του όργανισμού τò σώμα του διαλύεται και αυτό, και δέν ύπάρχει πλέον διάκριση έσωτερικού και έξωτερικού χώρου, αλλά ή έντροπία αύξάνει παντού.

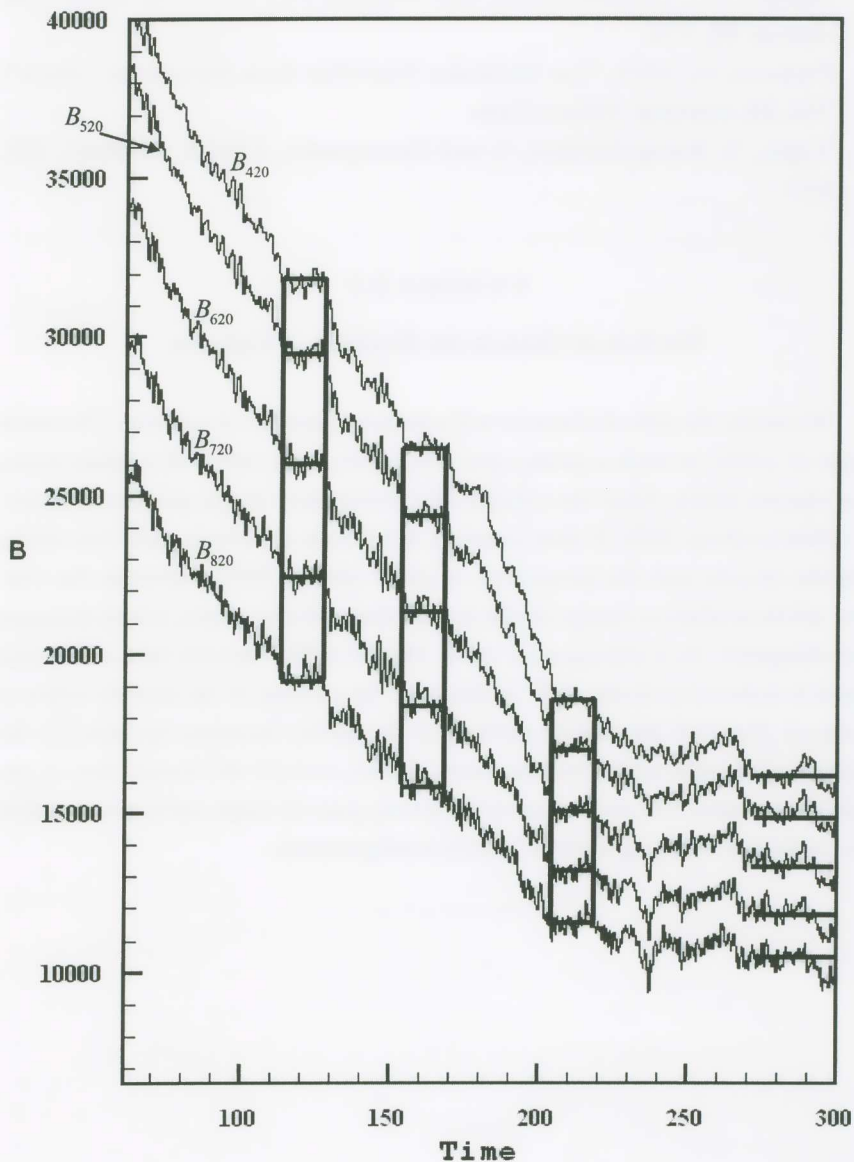
Αυτό πού κάναμε έμεις με τίς άριθμητικές μας προσομοιώσεις τής εξέλιξεως τών γαλαξιών είναι νά μελετήσουμε ποιοτικά και ποσοτικά τίς μεταβολές τής τάξεως και του χάους και κατά συνέπειαν και τής έντροπίας σε άπλά δυναμικά συστήματα πού μπορούν νά άποτελέσουν ύποδείγματα και για άλλα πιό γενικά φυσικά συστήματα.

Στή μελέτη μας τής αύξήσεως τής έντροπίας τών γαλαξιών διαπιστώσαμε ένα άκόμη φαινόμενο πού φαίνεται ότι έχει ιδιαίτερο ένδιαφέρον. Τò φαινόμενο αυτό είναι ότι ή εξέλιξη του σχήματος τών γαλαξιών γίνεται με άλματα. Δηλαδή ό γαλαξίας για όρισμένα (μικρά σχετικώς) χρονικά διαστήματα φαίνεται νά βρίσκεται σε ίσοροπία. Αύτή όμως ή ίσοροπία είναι μετασταθής, δηλαδή μετά άπό κάποιο χρονικό διάστημα ό γαλαξίας αλλάζει σχετικά γρήγορα και φθάνει σε μια άλλη μετασταθή κατάσταση, όπου φαίνεται πάλι νά ίσοροπει για ένα διάστημα κ.ο.κ. Αύτή ή εξέλιξη συνεχίζεται με άλματα κατά τόν ίδιο τρόπο μέχρι ότου ό γαλαξίας φθάσει σε μια σχεδόν τελική ίσοροπία, όποτε οι μεταβολές είναι σχετικά μικρές. Τò Σχήμα 9 δίνει τή μεταβολή όρισμένων συντελεστών του δυναμικού στο χρόνο. Παρατηρούμε ότι τά στάδια μετασταθούς ίσοροπίας παρουσιάζονται συγχρόνως στους διάφορους συντελεστές, πράγμα πού σημαίνει ότι ή ίσοροπία δέν άφορά μόνο τήν έξωτερική μορφή του γαλαξία, αλλά και τò έσωτερικό του πού παρουσιάζει συγχρόνως αντίστοιχα στάδια ίσοροπίας, πριν ή εξέλιξη προχωρήσει περαιτέρω.

Τò φαινόμενο αυτό φαίνεται ότι είναι μια ειδική περίπτωση «αυτοοργανούμενης κρισιμότητας» πού άποτελεί ένα άπό τά πιό ένδιαφέροντα σύγχρονα προβλήματα τών δυναμικών συστημάτων. Πράγματι ή αυτοοργάνωση είναι κάτι τò πολύ σημαντικό στα φυσικά συστήματα και ιδίως στα έμβια όντα. Η μελέτη του φαινομένου αυτού στο Κέντρο μας συνεχίζεται και θα συνεχιστεί και στο μέλλον.

### Βιβλιογραφία

- Contopoulos, G.: 1958, *Stockholm Ann.* **20**, No 5.
- Kalapotharakos, C., Voglis, N. and Contopoulos, G.: 2004, *Astron. Astrophys.* **428**, 905.
- Laskar, J.: 1996, *Cel. Mech. Dyn. Astron.* **64**, 115.



Σχήμα 9. Η εξέλιξη των κυρίων υποσυστημάτων ενός γαλαξία δίνεται από την μεταβολή των παραμέτρων  $B$  ( $B_{420}$ ,  $B_{520}$ ,  $B_{620}$ ,  $B_{720}$ ,  $B_{820}$ ) συναρτήσει του χρόνου. Η εξέλιξη γίνεται με διαδοχικά скаλοπάτια και καταλήγει σε περίπου σταθερές τιμές (μετά το χρόνο  $t=270$ ).

- Muzzio, J.C., Carpintero, D.D. and Wachlin, F.C.: 2005, *Cel. Mech. Dyn. Astron.* **91**, 173.
- Poincaré, H.: 1899, “Les Methodes Nouvelles de la Mécanique Céleste”, Vol. **III** *Gauthier Villars*, Paris.
- Voglis, N, Kalapotharakos, C. and Stavropoulos, J.:2002, *MNRAS*, **337**, 619.

## SUMMARY

### **The Role of Chaos in the Evolution of Galaxies**

We study the role of chaos in self-consistent models of galaxies. The main types of orbits in such a galaxy are: box orbits, tube orbits of various types, and chaotic orbits. After the collapse of a protogalaxy the proportion of chaotic orbits is about 30%. If then a central black hole is formed, most box orbits become chaotic and the proportion of chaos reaches 80%. However the chaotic orbits produce a change of the overall shape of the galaxy, which becomes less elongated. As a consequence many chaotic orbits become tube orbits and chaos is reduced to about 20%. In this way the entropy of the chaotic orbits is reduced. However the overall entropy of the galaxy increases because (a) the remaining chaotic orbits become more chaotic, and (b) the overall size of the galaxy increases. The evolution of the galaxy goes through various metastable phases before reaching a “final” stable configuration.

---