

ΔΗΜΟΣΙΑ ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 10^{ΗΣ} ΜΑΡΤΙΟΥ 2005

ΑΝΑΚΟΙΝΩΣΗ

Ἡ σημασία τοῦ χάους στὴν εξέλιξη τῶν γαλαξιών, 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 ἀστρονομικά 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 ἑξατομύρια 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 αερίου 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 ἦσαν αὐτοὶ ποὺ προσπάθησαν νὰ βροῦν κανονικότητες στὶς κινήσεις τῶν ἀστέρων, ποὺ ἔδειχναν διαφορὲς ἀπὸ τὴν χασομικὴ κατανομή.

Ἡ κατάσταση ἄλλαξε δραματικά μετὰ τὴν εἴσοδο στὴν Ἀστρονομία τῶν ἠλεκτρονικῶν ὑπολογιστῶν.

Οἱ πρῶτοι ὑπολογισμοὶ τροχιῶν ἀστέρων στὸν Γαλαξία γύρω στὸ 1956 (Contopoulos 1958) ἔδειξαν ἀπροσδόκητες κανονικότητες ποὺ ἦσαν ἀσυμβίβαστες μετὰ τὴν ὑπαρξὴ χάους. Ἦταν προφανὲς ὅτι οἱ τροχιές αὐτὲς ἦσαν ἐξαρτημένες ἀπὸ ὀρισμένα νέα ὀλοκληρώματα τῆς κινήσεως μετὰ μορφὴ σειρῶν (τοῦ τύπου τοῦ τρίτου ὀλοκληρώματος). Ἔτσι ἄρχισε μιὰ ἐντονη δραστηριότητα στὸν χῶρο τῆς Δυναμικῆς Ἀστρονομίας τόσο ἀναλυτικὴ (δηλαδή μετὰ καθαρά μαθηματικά), ὅσο καὶ ὑπολογιστικὴ (μετὰ ἠλεκτρονικοὺς ὑπολογιστές).

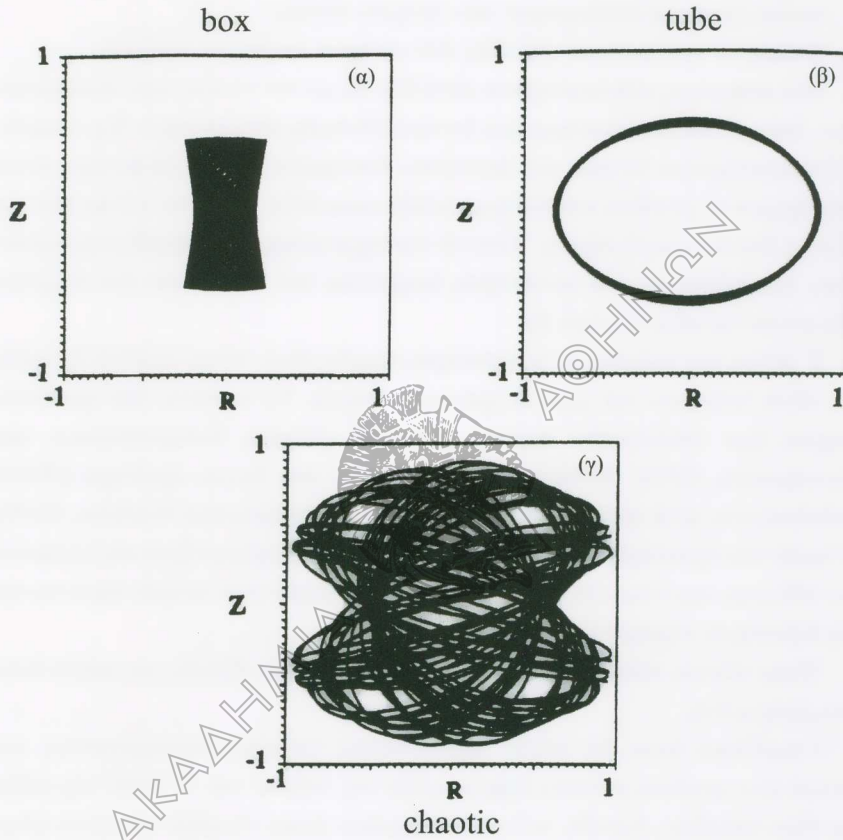
Σιγά-σιγά ἡ ἀτμόσφαιρα στὸ χῶρο τῆς Ἀστρονομίας ἄλλαξε σημαντικά. Οἱ περισσότεροὶ ἀστρονόμοι γύρω στὰ 1980-1990 ἔφθασαν νὰ ὑποστηρίζουν ὅτι στοὺς γαλαξίες δὲν ὑπάρχει καθόλου χάος. Δημιούργησαν ἕνα πλήθος ἀπὸ ὀλοκληρώσιμα μοντέλα γαλαξίων, δηλαδή μοντέλα ὅπου ὅλες οἱ τροχιές εἶναι ὀργανωμένες, χωρὶς καθόλου χάος. Ἐντούτοις ἔχει ἀποδειχθεῖ ὅτι τὰ ὀλοκληρώσιμα μοντέλα ἀποτελοῦν ἐξαιρέσεις.

Τὰ τελευταῖα πάντως 15 περίπου ἔτη οἱ ἐρευνητὲς κατάλαβαν ὅτι τάξη καὶ χάος συνυπάρχουν ἐν γένει στοὺς γαλαξίες. Ὑπάρχουν πολλὲς ὀργανωμένες τροχιές, ἀλλὰ ὑπάρχουν καὶ χασομικὲς τροχιές σὲ σημαντικὲς ποσότητες.

Τὴν ἴδια περίπου ἐποχὴ βρέθηκε πολὺ χάος καὶ στὸ ἠλιακὸ μας σύστημα, κυρίως στὶς κινήσεις τῶν μικρῶν πλανητῶν καὶ σὲ ὀρισμένους δορυφόρους. Ἐνα ἐντυπωσιακὸ παράδειγμα εἶναι ἡ τροχιά τοῦ πλανήτη Ἑρμῆ (Laskar 1996), ἡ ὁποία ὑπολογίζεται ὅτι θὰ ἀλλάξει σημαντικὰ σὲ 4 περίπου δισεκατομμύρια ἔτη. Ἡ κίνηση τοῦ πλανήτη αὐτοῦ τότε θὰ εἶναι τόσο ἀπρόβλεπτη, ὥστε θὰ μπορούσε ὁ Ἑρμῆς ἢ νὰ πέσει στὸν ἥλιο ἢ νὰ φύγει πολὺ μακριὰ ἀπὸ αὐτόν. Φαίνεται ὅτι καὶ οἱ τροχιές τῶν ὑπολοίπων πλανητῶν εἶναι ἐν πολλοῖς χασομικές, ἀλλὰ ἡ ἐκδήλωση τοῦ χάους θὰ ἀπαιτήσῃ πολλὰ δισεκατομμύρια ἔτη.

Οἱ περισσότεροὶ ὑπολογισμοὶ τάξεως καὶ χάους στοὺς γαλαξίες ἔγιναν σὲ διάφορα μοντέλα ποὺ ἔδιναν τὸ δυναμικὸ τοῦ κάθε γαλαξίου μετὰ ἕνα ἀπλὸ μαθηματικὸ τύπο. Κατόπιν οἱ ἠλεκτρονικοὶ ὑπολογιστὲς ὑπολόγιζαν ἕνα πλήθος τροχιῶν σὲ αὐτὸ τὸ μοντέλο. Οἱ κύριοι τύποι τροχιῶν παρουσιάζονται στὸ Σχῆμα 1.

Ὑπάρχουν πρῶτον οἱ ὀργανωμένες τροχιές, οἱ ὁποῖες διαιροῦνται σὲ τροχιές-κουτιά (box orbits) καὶ σὲ τροχιές-σωληνὲς διαφόρων τύπων (tube orbits). Κατόπιν ἔρχονται οἱ χασομικὲς τροχιές οἱ ὁποῖες εἶναι πολὺ ἀκανόνιστες.



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 υποδιαίρέσεις 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;

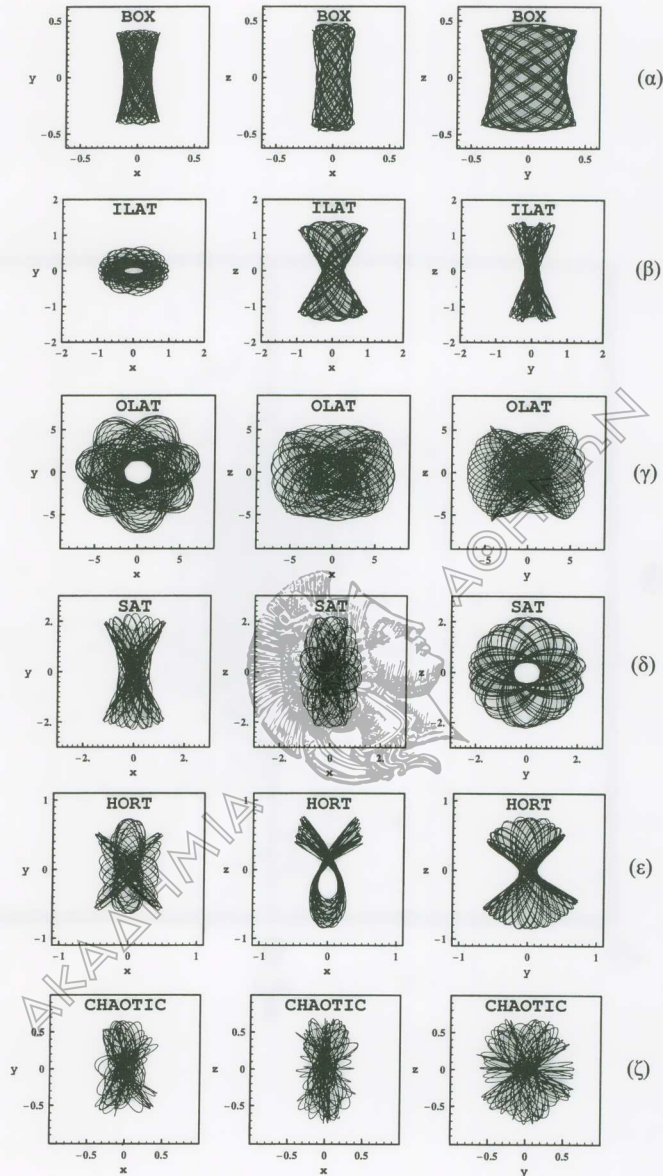
Μια απάντηση στα ερωτήματα αυτά δίνεται με τον υπολογισμό προσομοιώσεων από χιλιάδες και εκατομμύρια άστρες (N-body simulations). Π.χ. θεωρούμε ένα εκατομμύριο άστρες που αποτελούν ένα πρωτογαλαξία. Οι άστρες αυτές είναι αρχικά σε μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους, αλλά έλκονται ο ένας από τον άλλο με Νευτώνειες 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 χαστικές τροχιές. Το ποσοστό των χαστικών 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 χαστικές τροχιές παρίστανται από διάσπαρτα σημεία (Σχήμα 4).

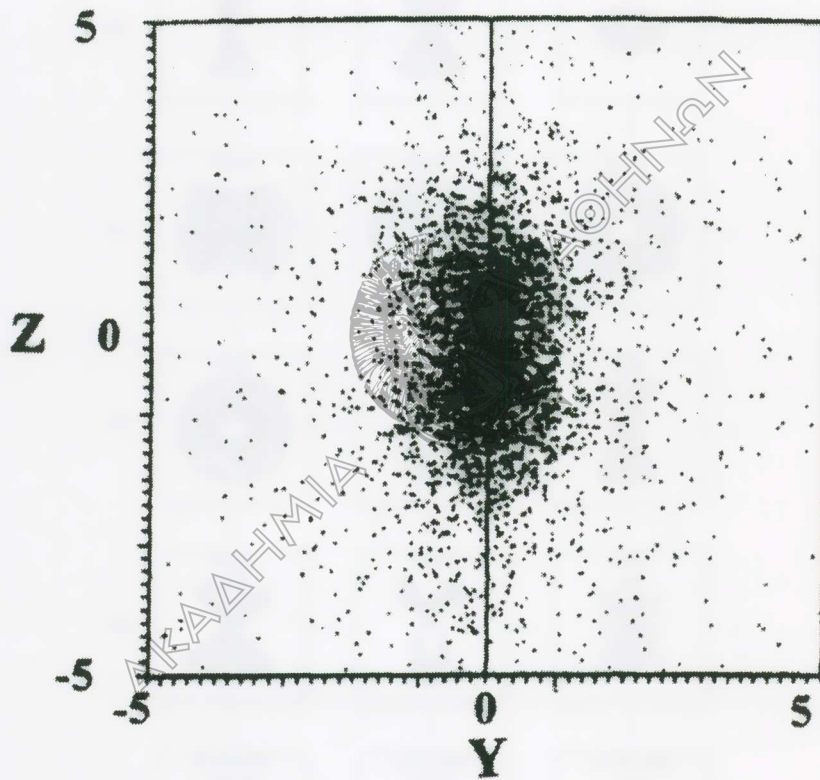
Ένας τέτοιος γαλαξίας δεν παρουσιάζει σημαντική εξέλιξη για πολλά δισεκατομμύρια έτη.

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 ήλιων).

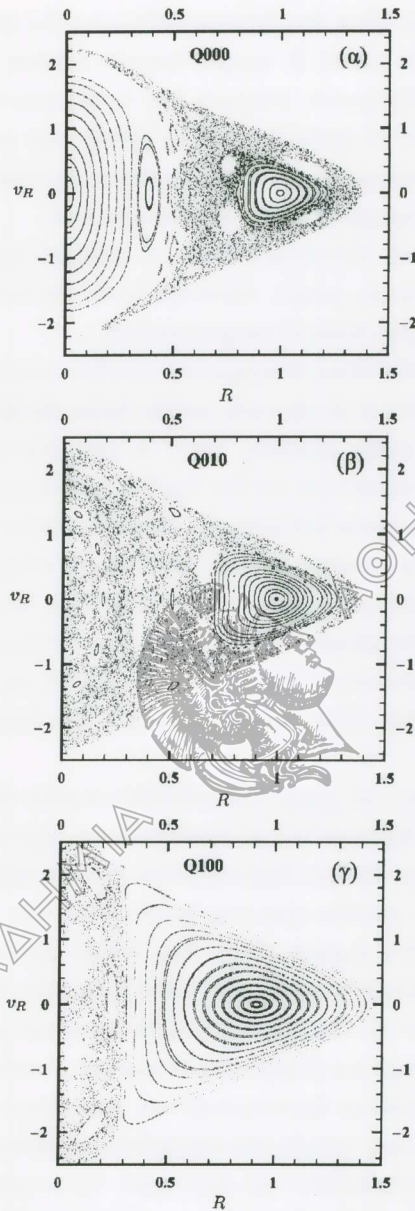
Αν δημιουργηθεί μια μελανή όπη στο κέντρον ενός γαλαξίου (κάτι πολύ συνηθισμένο) ο γαλαξίας αρχίζει να εξελίσσεται. Σε μια πρόσφατη εργασία μας στο Astronomy and Astrophysics (Kalapotharakos, C., Voglis, N., and Contopoulos, G., 428, 905, τέλος του 2004) μελετήσαμε ακριβώς αυτή την εξέλιξη.



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 ο γαλαξίας είναι ένα επιμήκης έλλειψοειδές που έχει πάρα πολλές τροχιές τύπου κουτιού. Αυτές οι τροχιές περνούν κάποια στιγμή πολύ κοντά από το κέντρο και εκτρέπονται απότομα από τη μελανή όπη, ώστε να γίνουν χαοτικές τροχιές. Έτσι το πρώτο βήμα στην εξέλιξη των γαλαξιών αυτών είναι η μετατροπή των οργανωμένων τροχιών κουτιού σε χαοτικές (Σχήμα 5). Το ποσοστό των χαοτικών τροχιών φθάνει περίπου στο 80%.

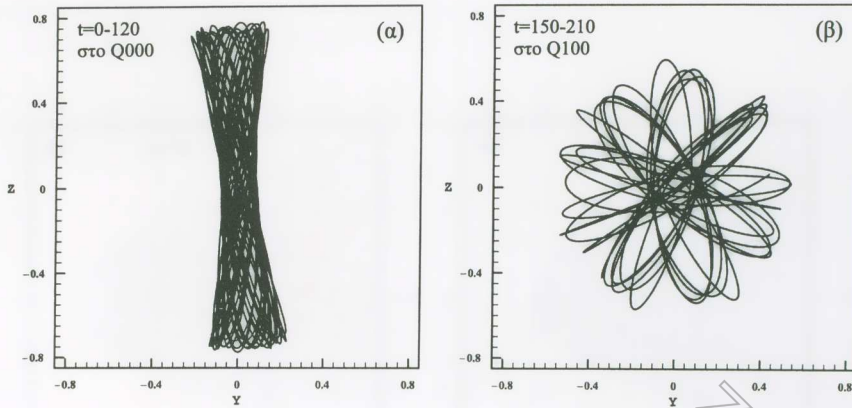
Συνέπεια αυτού του γεγονότος είναι ότι ο γαλαξίας αρχίζει να εξελίσσεται προς μία λιγότερο επιμήκη μορφή. Αυτό οφείλεται στο ότι οι χαοτικές τροχιές δεν έχουν επιμήκη μορφή όπως οι τροχιές κουτιού.

Στη συνέχεια της εξέλιξης το σχήμα του γαλαξίου γίνεται πιο πεπλατυσμένο (Σχήμα 6) και παράλληλα οι χαοτικές τροχιές βαθμιαία αλλάζουν και γίνονται οργανωμένες τροχιές τύπου σωλήνος. Έτσι το χάος ελαττώνεται περίπου στο 20% και ο γαλαξίας καταλήγει σε ένα σχεδόν πεπλατυσμένο έλλειψοειδές με μικρή, όμως, έλλειπτικότητα. Στο Σχήμα 7 παρακολουθούμε την εξέλιξη των τροχιών που από χαοτικές γίνονται όλο και πιο πολύ οργανωμένες τύπου σωλήνος.

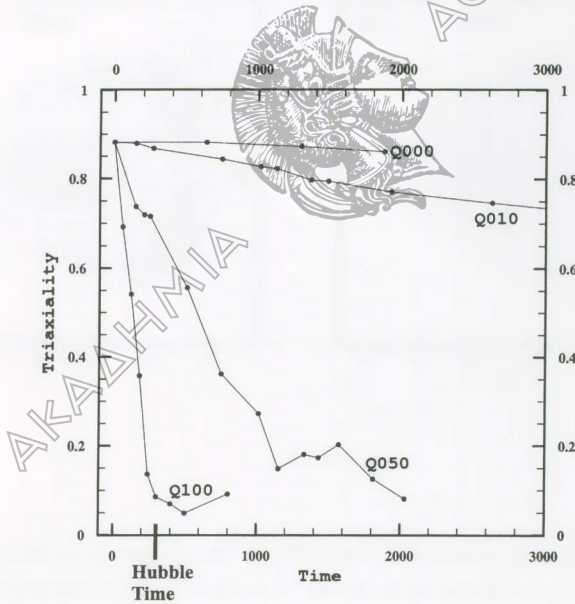
Η αύξηση του χάους μόλις δημιουργηθεί η μελανή όπη στον γαλαξία συνοδεύεται από μια μεγάλη αύξηση της έντροπίας του συστήματος. Αυτό είναι κάτι που γίνεται εύκολα κατανοητό δεδομένου ότι η αύξηση της έντροπίας είναι μια γενική ιδιότης της ύλης. Είναι το λεγόμενο «δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα» της φυσικής.

Όμως η ελάττωση του χάους στα τελευταία στάδια της εξέλιξης των γαλαξιών είναι κάτι το περίεργο που εκ πρώτης όψεως έρχεται σε αντίθεση με το δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα. Δημιουργείται δηλαδή τάξη από το χάος. Έπομένως η έντροπία του γαλαξίου φαίνεται ότι ελαττώνεται.

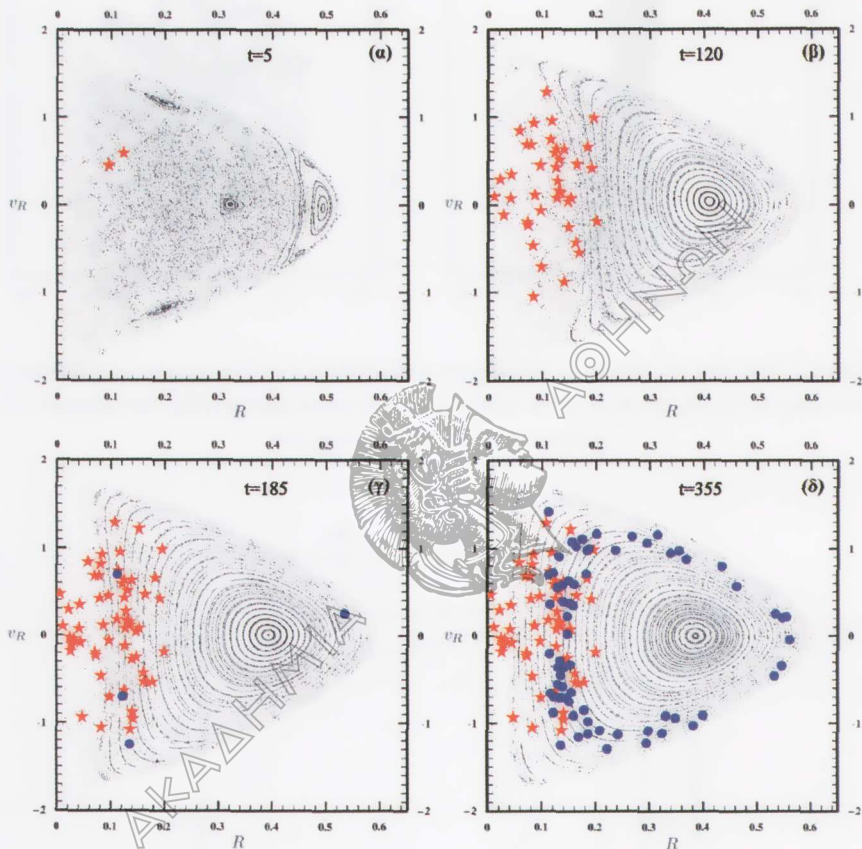
Αυτό όμως δεν είναι ακριβές. Διότι, ενώ πολλές χαοτικές τροχιές γίνονται οργανωμένες με μηδενική έντροπία, ένα άλλο μέρος των τροχιών του γαλαξία όχι μόνο εξακολουθούν να είναι χαοτικές, αλλά αποκτούν μεγαλύτερη έντροπία από όση είχαν προηγουμένως (Σχήμα 8). Έπομένως, ενώ ένα μεγάλο μέρος των χαοτικών τροχιών γίνονται οργανωμένες και άρα χάνουν την έντροπία τους, οι σχετικά λίγες χαοτικές τροχιές που παραμένουν αυξάνουν κατά πολύ την έντροπία τους και αντισταθμίζουν την ελάττωση της έντροπίας των υπολοίπων τροχιών. Επί πλέον ο γαλαξίας διαστέλλεται, δηλαδή πολλές τροχιές απομακρύνονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Αυτό συνεπάγεται μια επί πλέον αύξηση της έντροπίας του συστήματος. Κατά συνέπεια η ολική έντροπία του γαλαξία αυξάνει με το χρόνο.



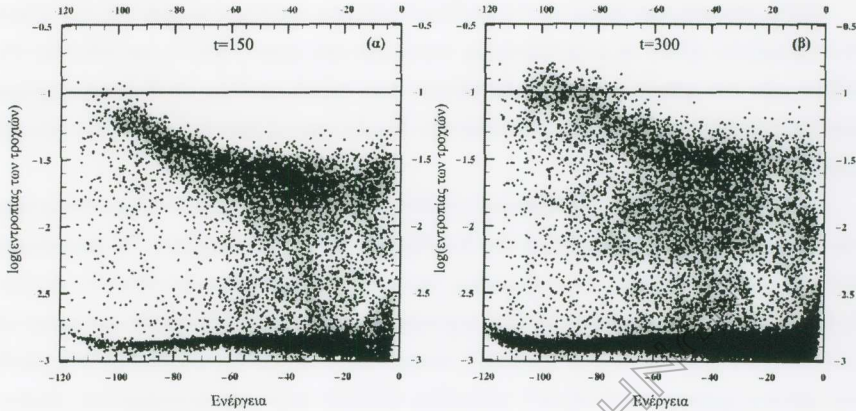
Σχήμα 5. Πριν από την εισαγωγή της μελανής όπτης υπάρχουν πολλές τροχιές-κουτιά, όπως ή εικονιζόμενη στο Σχ. (α). Μια τέτοια τροχιά μετατρέπεται σε χαοτική (β), όταν εισαχθεί στο κέντρο του γαλαξία μια μελανή όπη.



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 ή 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) άστρους 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 συναρτήσει της ενέργειας των για χρόνους (α) $t=150$ και (β) $t=300$. Η κάτω σφαιρική περιοχή, που περιλαμβάνει οργανωμένες τροχιές, αυξάνει στο σχήμα (β), αλλά συγχρόνως οι τιμές της έντροπίας ώρισμένων τροχιών αυξάνουν πάνω από την οριζόντια γραμμή.

Αυτό το φαινόμενο της τοπικής ελαττώσεως της έντροπίας με σύγχρονη αύξηση της έντροπίας σε άλλες περιοχές παρουσιάζεται και σε άλλα φαινόμενα στη φύση. Ένα παράδειγμα είναι η ψύξη που δημιουργεί ένα ψυγείο, κάτι που φαίνεται αντίθετο με το δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα. Αυτή η ψύξη γίνεται με δαπάνη ηλεκτρικού ρεύματος που θερμαίνει το περιβάλλον περισσότερο από όσο ψύχει το εσωτερικό του ψυγείου. Έτσι παρ' όσον στο εσωτερικό του ψυγείου η έντροπία ελαττώνεται η συνολική έντροπία του ψυγείου μαζί με το περιβάλλον του αυξάνει.

Ανάλογα φαινόμενα τοπικής ελαττώσεως της έντροπίας παρουσιάζονται στους ζωντανούς οργανισμούς. Σ' αυτούς δημιουργείται οργάνωση και τάξη, δηλαδή ελάττωση της έντροπίας. Στο σύστημα όμως του οργανισμού μαζί με το περιβάλλον του η ολική έντροπία αυξάνει.

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.

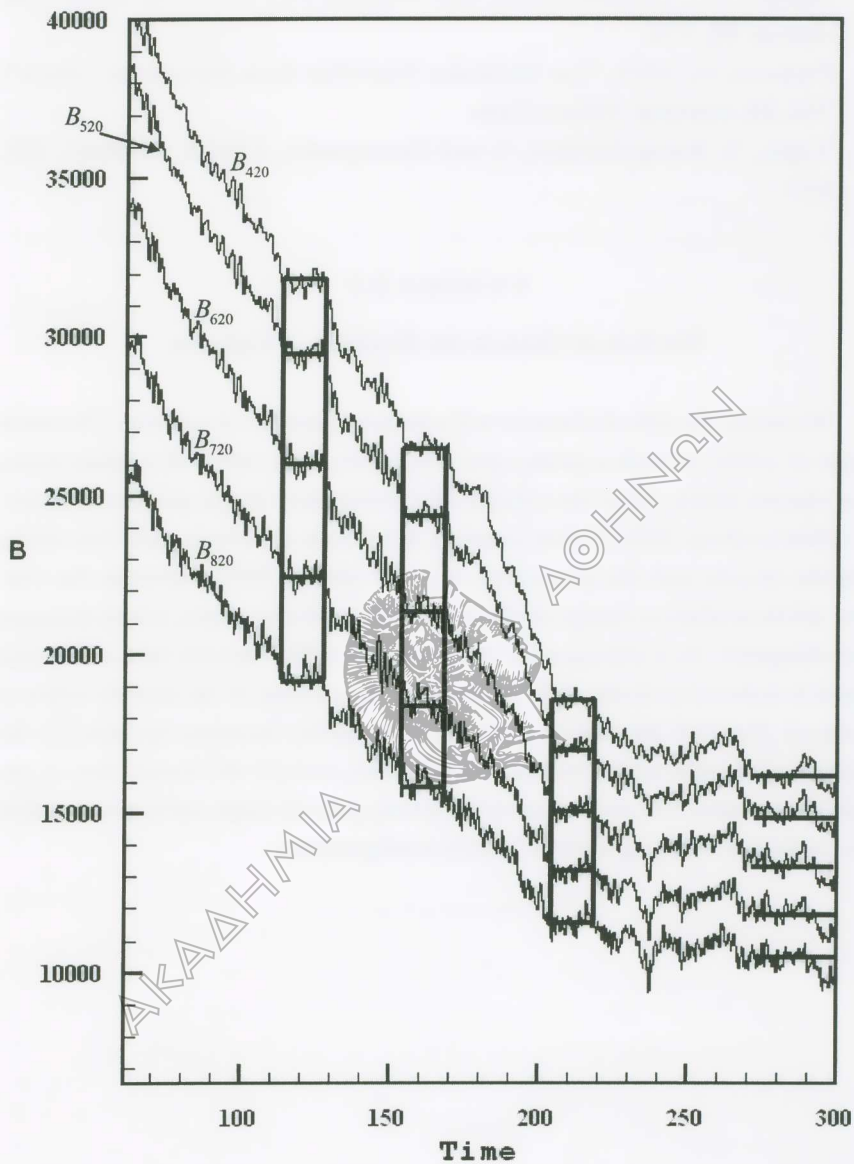
Αυτό πού κάναμε έμεις με τις άριθμητικές μας προσομοιώσεις τής εξέλιξης των γαλαξιών είναι νά μελετήσουμε ποιοτικά και ποσοτικά τις μεταβολές τής τάξεως και του χάους και κατά συνέπειαν και τής έντροπίας σε άπλά δυναμικά συστήματα πού μπορούν νά άποτελέσουν ύποδείγματα και για άλλα πιό γενικά φυσικά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

Στή μελέτη μας τής αύξήσεως τής έντροπίας των γαλαξιών διαπιστώσαμε ένα άκόμη φαινόμενο πού φαίνεται ότι έχει ιδιαίτερο ένδιαφέρον. Τò φαινόμενο αυτό είναι ότι ή εξέλιξη του σχήματος των γαλαξιών γίνεται με άλματα. Δηλαδή ό γαλαξίας για όρισμένα (μικρά σχετικώς) χρονικά διάστημα 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 μία 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 μία σχεδόν τελική ίσοροπία, όποτε οι μεταβολές είναι σχετικά μικρές. Τò Σχήμα 9 δίνει τη 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 άφορα μόνο την 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 μία ειδική περίπτωση «αυτοοργανούμενης κρισιμότητας» πού άποτελεί ένα άπό τά πιό ένδιαφέροντα σύγχρονα προβλήματα των 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 θά 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 скалоπάτια 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.
