

# Τοπολογία και δυναμική πολυπλόκων συστημάτων

**Ι. Σ. Νίκολης**

*Καθηγητής Πανεπιστημίου*



ιαδίκτυο, WWW, δίκτυο αλληλεπιδρώντων υποσπρωμάτων και αλληλεπιδρωσών πρωτεϊνών στο κύτταρο, δίκτυο αλληλεπιδρωσών λέξεων στη φυσική γλώσσα, δίκτυο αλληλεπιδρώντων νευρώνων και ιστών στο νευρικό σύστημα, οικολογικά δίκτυα, επιδημιολογικά δίκτυα, κοινωνικά (ή αντικοινωνικά!) δίκτυα, δίκτυα συμβολικών αλληλεπιδράσεων και τέλος δίκτυα συνυπαρχουσών μνημών-συνυπαρχόντων ελκυστών στο κεντρικό νευρικό σύστημα.\*

## **ΣΥΝΟΨΙΣ**

Θα αναφερθούν εκτενώς πρόοδοι της τελευταίας πενταετίας στη μοντελοποίηση (ερμηνεία) πολυπλόκων συστημάτων ανηκόντων στο μεσοσκοπικό επίπεδο (βιολογικά συστήματα και τεχνολογικοί «επίγονοι»). Οι πρόοδοι αυτοί

---

\* Σημ. Ο κ. Νίκολης μας έδωσε μια σύνοψη του περιεχομένου της ομιλίας του. Στη συνέχεια ακολουθεί κείμενό του σχετικά με τη «Χαοτική Δυναμική: Μια κατ' εξοχήν 'χρήσιμη' επιστήμη», μία από τις θεωρίες στην οποία εκτενώς αναφέρθηκε στην εν λόγω ομιλία του. Το κείμενο αυτό, στο οποίο υπάρχουν πολλές βελτιώσεις και προσθήκες, είχε δημοσιευθεί στα ΧΗΜΙΚΑ ΧΡΟΝΙΚΑ καθώς επίσης και στην έκδοση των Μορφωτικών Εκδηλώσεων του ΕΙΕ με τίτλο: «Μοριακή Βάση των Ασθενειών, Αθήνα 1993» η οποία έχει εξαντληθεί.

οφείλονται στο ότι τα τελευταία χρόνια κατέστη δυνατή η αξιοποίηση (massive down-loading) μεγάλων βάσεων δεδομένων. Για συστήματα αυτού του είδους εν απουσία οργανικών νόμων που διέπουν τις αλληλεπιδράσεις συνιστώσων, μέχρι πρόσφατα μόνο η προσομοίωση (μίμηση) ήταν η ενδεδειγμένη μέθοδος για να μπορέσουμε με χρήση κυρίως κυψελικών αυτομάτων να δώσουμε μια αλληγορική περιγραφή χωρίς αξιώσεις ερμηνείας. Θα πρέπει να λεχθεί ότι οι τέσσερις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις (βαρύτητας, ηλεκτρομαγνητισμός, ισχυρά και ασθενής πυρηνική αλληλεπίδραση), ενώ αποτελούν αναγκαίους και ικανούς νόμους μοντελοποίησης συστημάτων στο μικροσκοπικό και κοσμολογικό επίπεδο, είναι μόνο αναγκαίες συνθήκες και όχι ικανές στο μεσοσκοπικό επίπεδο. Στα εκτενή παραδείγματα που θα δοθούν, θα δειχθεί ότι αρχίζει η ανίχνευση και των ικανών νόμων που διέπουν τις αλληλεπιδράσεις στο μεσοσκοπικό επίπεδο και οι οποίοι νόμοι τόσο στο επίπεδο της δομής όσο και στο επίπεδο της λειτουργίας (hardware and software) αναδεικνύουν στοχαστικούς power laws, οι οποίοι υπαινίσσονται αναλλοίωτες ιδιότητες ως προς μετασχηματισμούς κλίμακος (fractals). Αυτό σημαίνει ότι στα παραπάνω πολύπλοκα δίκτυα λίγοι κόμβοι διεκδικούν τη «μερίδα του λέοντος», από πλευράς αριθμού διασυνδέσεων με τους υπολοίπους· αυτοί οι λίγοι κόμβοι καθορίζουν και την ευστάθεια του δικτύου, δηλαδή την αντοχή του σε περιβαλλοντικές διαταραχές. Είναι, τέλος, ενδιαφέρον να τονίσει κανείς ότι εάν σε κάθε κόμβο καθενός από τα παραπάνω δίκτυα τοποθετηθεί ένα δυναμικό σύστημα, που να διαθέτει έναν ελκυστή (περιοδικό ή χαοτικό), τότε η τοπολογία διασυνδέσεων που εγκυάται τη μεγαλύτερη ευστάθεια στον συγχρονισμό ανάμεσα στους καθέκαστα ταλαντωτές είναι η τοπολογία fractal.

### ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

A. L. Barabasi, *Linked. The new science of networks*, Perseus Publishing, 2002.

M. Buchanan, *Small world: uncovering nature's hidden networks*, Widenfield and Nicholson, 2002.

D. J. Watts, *Small worlds: the dynamics of networks between order and randomness*, Princeton University Press, 1999.

## **ΧΑΟΤΙΚΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ: ΜΙΑ ΚΑΤ' ΕΞΟΧΗΝ «ΧΡΗΣΙΜΗ» ΕΠΙΣΤΗΜΗ**

Μέχρι και πριν 30 περίπου χρόνια οι επιστήμονες αναγνώριζαν μόνο δύο σαφώς διαχωρισμένα είδη δυναμικών συστημάτων: α) Συστήματα «ντετερμινιστικά» (καθοριστικά), μικρού αριθμού αλληλεπιδρώσων συνιστωσών (βαθμών ελευθερίας), η εξέλιξη των οποίων στον χρόνο εθεωρείτο απόλυτα προβλέψιμη και β) Συστήματα «στοχαστικά» μεγάλου ή απείρου αριθμού βαθμών ελευθερίας, των οποίων η σπουδή απαιτούσε τη χρήση της θεωρίας πιθανοτήτων και των οποίων η λεπτομερής πορεία και εξέλιξη στον χρόνο εθεωρείτο τυχαία και απρόβλεπτη. Βεβαίως, και τα στοχαστικά συστήματα υπήκουαν σε οργανικούς νόμους που όμως δεν εξέφραζαν μαθηματικά την εξέλιξη στον χρόνο των συγκεκριμένων μεταβλητών αλλά μάλλον την εξέλιξη συλλογικών ιδιοτήτων της πυκνότητας πιθανότητας των μεταβλητών αυτών, όπως π.χ. η μέση τιμή ή τετραγωνική απόκλιση και άλλες «ροπές» ή μακροϊδιότητες ανωτέρας τάξεως.

Ομοίως, οι μόνες γνωστές «τροχιές» των συστημάτων αυτών ήταν καμπύλες ομαλές, δηλαδή σχεδόν παντού διαφορίσιμες,<sup>1</sup> συνεχείς, με ακέραιους (φυσικά) βαθμούς ελευθερίας (1,2,3,...). Η επιστήμη των χαοτικών φαινομένων έρχεται να προσθέσει στο επιστημονικό ρεπερτόριο μία νέα κατηγορία συστημάτων με τελείως διαφορετική δυναμική και τοπολογία.

Κατ' αρχάς, η χαοτική δυναμική αφορά αποκλειστικώς και μόνο σε μη γραμμικά δυναμικά συστήματα, συστήματα δηλαδή όπου οι καθ' έκαστα μεταβλητές συνδέονται όχι προσθετικά αλλά πολλαπλασιαστικά και οι καθ' έκαστα λύσεις των συστημάτων αυτών δεν είναι γραμμικά υπερθέσιμες, αλλά μάλλον συμπληρωματικές και αμοιβαία αποκλειόμενες.

Δεύτερον, τα χαοτικά συστήματα ενώ είναι εν γένει ολιγοδιάστατα και πλήρως ντετερμινιστικά είναι και απρόβλεπτα από πλευράς μακράς χρονικής εξέλιξης λόγω ευαίσθητης εξάρτησης της πορείας τους από τις αρχικές συνθήκες

1. Μια καμπύλη είναι μη-διαφορίσιμη σε κάποιο σημείο της όταν στο σημείο αυτό η ακτίνα καμπυλότητας είναι μηδέν, δηλαδή δεν ορίζεται η εφαπτομένη.

«εκκινήσεως». Τούτο σημαίνει ότι μικροδιακυμάνσεις στις αρχικές συνθήκες πολλαπλασιάζονται στον χρόνο κατά μέσον όρο εκθετικά, έτσι ώστε δύο «τροχιές» του συγκεκριμένου συστήματος που εκκινούν με μικροδιαφορές στις αρχικές συνθήκες να αποκλίνουν τάχιστα.

Εάν όμως υπάρχουν κατευθύνσεις κατά τις οποίες αρχικά γεγονικές τροχιές αποκλίνουν εκθετικά, υπάρχουν σε κάθε χαοτικό σύστημα και κατευθύνσεις κατά τις οποίες αρχικά απομακρυσμένες τροχιές συγκλίνουν εκθετικά.

Έτσι, αν θεωρήσουμε ότι το σύστημα δειγματοληπτεί ούτως ειπείν τον χώρο των καταστάσεων στον οποίο εξελίσσεται μέσω των δυναμικών «ψευδοποδίων» του, δηλαδή των τροχιών του, τότε αντιλαμβάνεται κανείς ότι κατά τις κατευθύνσεις των αποκλινουσών τροχιών ο χώρος των καταστάσεων δειγματοληπτείται όλο και πιο αραιά. Έτσι, αρχικές αβεβαιότητες αυξάνουν με αποτέλεσμα το χαοτικό μας σύστημα να δρα ουσιαστικά κατά τις κατευθύνσεις αυτές ως πηγή εντροπίας, ενώ κατά τις κατευθύνσεις των συγκλινουσών τροχιών αρχικές αβεβαιότητες «συμπιέζονται» προοδευτικά ώστε να κάνουν το σύστημα να δρα ως πηγή πληροφορίας.

Για την κατηγορία των «διατηρητικών» χαοτικών συστημάτων, οι διαγραφόμενοι «όγκοι» στον χώρο των καταστάσεων παραμένουν σταθεροί κατά μέσον όρο κατά την εξέλιξη του συστήματος, δηλαδή ο ρυθμός παραγωγής εντροπίας εξισορροπείται ακριβώς από τον ρυθμό παραγωγής πληροφορίας. Για την πολύ ενδιαφέρουσα όμως κατηγορία των μη διατηρητικών χαοτικών συστημάτων –που έχουν και το πρακτικό ενδιαφέρον– οι όγκοι στον χώρο των καταστάσεων συρρικνούνται προοδευτικά με ασυμπτωτική τιμή το μηδέν, που σημαίνει ότι ο μέσος ρυθμός παραγωγής πληροφορίας είναι μεγαλύτερος από τον μέσο ρυθμό παραγωγής εντροπίας.

Τα συστήματα αυτά έχουν λοιπόν το χαρακτηριστικό της ασυμπτωτικής ευστάθειας, και μάλιστα σε πολλαπλό βαθμό:

Έχουν δηλαδή την ιδιότητα –εξελισσόμενα από διαφορετικά υποσύνολα αρχικών συνθηκών– να καταλήγουν σε συνυπάρχοντες πολλαπλούς εκλυστές (attractors) καθένας από τους οποίους δρα, θα μπορούσε κανείς να πει, ως

αφαίρεση ή abstraction, ως «συμπιεστής» ή ως «γνωστική ρουφήχτρα» ενός πεπερασμένου υποσυνόλου αρχικών συνθηκών που λέγεται «κοίτη έλξης». Οι συνυπάρχοντες λοιπόν ελκυστές ενός τέτοιου μη διατηρητικού χαοτικού συστήματος μπορούν να παίξουν τον ρόλο συνεπτυγμένων κατηγοριών ή μνημών στις οποίες το υπό εξομοίωση γνωστικό σύστημα διαμερίζει ένα αρχικά αδιαφοροποίητο σύνολο αρχικών συνθηκών ή εξωτερικών ερεθισμάτων.

Η ιδιότητα αυτή καθιστά τα μη διατηρητικά χαοτικά συστήματα ιδεώδη μοντέλα (πρότυπα) βιολογικών επεξεργασιών πληροφορίας, τοσούτο μάλλον καθ' όσον η συνύπαρξη «θορύβου» και τάξης σε ένα χαοτικό ελκυστή συνάδει με τη φύση μιας βιολογικής μνήμης – η οποία, μακράν του να είναι «στατική» ή περιοδικώς επαναλαμβανόμενη, ενέχει στοιχεία αυτοσχεδιασμού και εξέλιξης. Η τοπολογία των χαοτικών ελκυστών είναι fractal (μορφοκλασματική). Μια fractal δομή χαρακτηρίζεται (σε αντιδιαστολή προς τα ευκλείδεια γεωμετρικά σχήματα) από αναλλοίωτες ιδιότητες σε αλλαγή κλίμακας και από κλασματικούς βαθμούς ελευθερίας. Το κύριο ίσως χαρακτηριστικό ενός οιαδήποτε υγιούς βιολογικού ιστού είναι η ικανότητα άνετης αυτοπροσαρμογής σε απότομα και απροσδόκητα περιβαλλοντικά ερεθίσματα. Δεν είναι τυχαίο ότι πλείστοι βιολογικοί ιστοί είναι δομικά μεν fractals, λειτουργικά δε χαοτικοί παράξενοι ελκυστές.

Πλείστοι βιολογικοί ιστοί (το βρογχοπνευμονικό δένδρο, ο προστάτης, ο εγκεφαλικός φλοιός, το εσωτερικό τοίχωμα του λεπτού εντέρου, ο νεφρός, τα οστά, το κυκλοφοριακό σύστημα των αρτηριών και φλεβών, όλες οι πρωτεΐνες, κ.λπ.) έχουν fractal δομή, είναι δε αξιοσημείωτο ότι, όταν μια fractal (αυτοόμοια σε μετασχηματισμούς κλίμακας) δομή διεγερθεί από ένα παλμικό ερέθισμα, παρουσιάζει μη διατηρητική χαοτική λειτουργία με απλούς ή πολλαπλούς συνυπάρχοντες ελκυστές. Η fractal δομή (καμπύλες συνεχείς αλλά πουθενά διαφορίσιμες) εξασφαλίζει σε ένα βιολογικό ιστό τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Σε πολύ μικρούς όγκους εμπεριέχονται τεράστιες επιφάνειες (π.χ. ο βρογχοπνευμονικός ιστός του ανθρώπου καταλαμβάνει όγκο  $\sim 0,1\text{lt}$  αλλά εάν η επιφάνειά του απλωθεί σε μία στρώση πάχους μιας κυπαρικής διαμέτρου καταλαμβάνει την έκταση περίπου... ενός γηπέδου τένις).

Ας σκεφτούμε τι θα συνέβαινε εάν οι βιολογικοί ιστοί ήταν «ευκλείδια στερεά»: τότε ένα βιολογικό ον διπλασιού επί παραδείγματι ύψους θα είχε τετραπλάσια επιφάνεια αλλά οκταπλάσιο βάρος. Αντιλαμβάνεται κανείς αμέσως ότι πέραν ενός ορίου ένας τέτοιος οργανισμός θα κατέρρεε υπό το ίδιο αυτού βάρος.

Η fractal δομή αντιπαρέχεται ένα τέτοιο ενδεχόμενο, δημιουργώντας δομές που στον τρισδιάστατο –π.χ. καρτεσιανό– χώρο έχουν διαστατικότητα μεταξύ 2 και 3, δηλαδή μεταξύ μιας ευκλείδιας επιφάνειας και ενός ευκλείδιου όγκου.

- ▶ Σε ένα σύνθετες ευκλείδιο στερεό ή επιφάνεια, ο «βαθμός διαχυτότητας» μιας ουσίας υπό την επίδραση τυχαίων διακυμάνσεων (θορύβου) είναι ευθέως ανάλογος του χρόνου  $t$ . Αποδεικνύεται ότι σε fractal δομές ο βαθμός διαχυτότητας αυξάνει ταχύτερα ως δύναμη του  $t^v$  ( $v > 1$ ). Έτσι, στους πνεύμονες ή στον προστάτη λόγου χάριν, η fractal δομή επιτρέπει ταχύτερη και αποτελεσματικότερη μίξη αερίων και υγρών αντίστοιχα (το φαινόμενο αυτό καλείται «υπερ-διάχυση»). Μια fractal δομή επίσης απορροφά ταλαντώσεις και κραδασμούς πολύ ταχύτερα και αποτελεσματικότερα από μια ευκλείδια δομή: για παράδειγμα, μια fractal παραλία φθείρεται από τα κύματα πολύ λιγότερο από μία λεία ακτή. Ο (υγιής) άνθρωπος δεν αντιλαμβάνεται τους καρδιακούς του παλμούς διότι οι περιβάλλοντες fractal ιστοί της θωρακικής του κοιλότητας τους αποσβαίνουν.
- ▶ Μια fractal δομή είναι δυνατόν να κατασκευαστεί σε μικρό χρόνο από έναν απλό αλγόριθμο, ο οποίος επαναλαμβάνει εαυτόν σε πολλές κλίμακες ταυτοχρόνως, χωρίς ουσιαστικές αλλαγές. Έτσι, ο γεννητικός αλγόριθμος εν προκειμένω χρειάζεται για την κατασκευή ενός βιολογικού ιστού πολύ μικρότερο χρόνο από αυτόν που θα απαιτούσε η κατασκευή ενός «συμπαγούς» ευκλείδιου ιστού [εάν για παράδειγμα η γυναικεία μήτρα δεν είχε επιφάνεια fractal θα ζύγιζε ~ 500 kg και ο χρόνος κύησης θα ήταν της τάξης εκατοντάδων ετών!. («συμπαγείς» βιολογικοί ιστοί οι οποίοι έχουν «κάσει» εν πολλοίς την fractal ιδιότητα είναι οι πάσης φύσεως νεοπλασίες)].
- ▶ Επειδή ακριβώς μια fractal δομή εμπεριέχει πολλαπλές κλίμακες, επιτρέπει βραδεία αύξηση του λεγόμενου «μορφογεννητικού σφάλματος», δηλαδή του

μοιραίου σφάλματος (λόγω μεταλλαγών) ανακατασκευής από γενεάς εις γενεάν ενός συγκεκριμένου ιστού.

Μια διαταραχή λόγω μεταλλαγών θα ισοδυναμούσε πρακτικά με την παρασιτική εισαγωγή μιας νέας κλίμακας. Αν όμως στην υπό κατασκευή fractal δομή η κλίμακα αυτή προϋπάρχει, τότε η εξωτερική διαταραχή «παραβιάζει» ούτως ειπείν «ανοικτές θύρες». Τούτο σημαίνει ότι μια fractal δομή παρουσιάζει μεγάλη αναισθησία σε τυχαίες διαταραχές – συγκεκριμένα το μορφογεννητικό σφάλμα αυξάνει λογαριθμικά με τη μέση απόκλιση της διαταραχής ενώ για μια μη fractal δομή θα αύξανε εκθετικά. Μια εντυπωσιακή βιολογική εφαρμογή της χασοικής δυναμικής απαντάται στην περιοχή της κλινικής καρδιολογίας. Μέχρι και προ 15 περίπου ετών επιστεύετο ότι η «υγιής» καρδιά παρουσιάζει αυστηρή περιοδικότητα, δηλαδή η ασυμπτωτικά ευσταθής δυναμική της είναι ένας «οριακός κύκλος». Πρόσφατες κλινικές και επιδημιολογικές σπουδές ανατρέπουν άρδην την (εύλογη) αυτή άποψη.

Ο Dr. Any Goldberger στην καρδιολογική κλινική του Χάρβαρντ άρχισε προ δεκαπενταετίας μια συστηματική φασματική ανάλυση του QRS ρυθμού (που καταγράφεται σε καταστάσεις ρουτίνας από τον κοινό ηλεκτροκαρδιογράφο) του κοιλιακού μυοκαρδίου. Βρήκε ότι σε υγιή άτομα το φάσμα αυτό, σε διπλή λογαριθμική κλίμακα, είναι μια ευθεία γραμμή με κλίση  $-1$  (αυτό που ονομάζουμε  $1/f$  θόρυβο) και συνεχές φάσμα συχνοτήτων από  $0,3 \text{ Hz}$   $-100\text{Hz}$ : σε άτομα όμως επιδεκτικά σε ανατάξιμη κοιλιακή μαρμαρυγή (ventricular fibrillation) το φάσμα αυτό συρρικνώνεται σημαντικά (η κλίση γίνεται  $-1,5$ ,  $-2$ ,  $-3,0, \dots$ ) έτσι ώστε οι υψηλές συχνότητες να αποκόπτονται. Τι σημαίνει αυτό;

Σημαίνει ότι η λειτουργία του υγιούς κοιλιακού μυοκαρδίου οφείλει να είναι εν τινι μέτρω «θορυβώδης» ώστε να καθιστά το άτομο ικανό να προσαρμόζεται σε ερεθίσματα (συγκινήσεις, μυϊκή καταπόνηση) που απαιτούν μικρό χρόνο χαλάρωσης (δηλαδή υψηλές συχνότητες). Η ασυμπτωτικά ευσταθής τροχιά (ο ελκυστής) μιας τέτοιας χρονοσειράς QRS με φάσμα « $1/f$ -noise» δεν είναι οριακός κύκλος (πράγμα που θα έδιδε ένα διακριτό φάσμα συχνοτήτων) αλλά ένας χασοικός ελκυστής με «διαστατικότητα» της τάξεως του  $\sim 5,2$  (και όχι 1 όπως θα συνέβαινε αν ο ελκυστής ήταν οριακός κύκλος).

Ας σημειωθεί ότι αυτή η χαοτική λειτουργική συμπεριφορά του (υγιούς) κοιλιακού μυοκαρδίου είναι απότοκος της fractal δομής ενός (αυτοόμοιου) δενδρικού σχηματισμού κυτταρικών αξόνων του μυοκαρδίου (του His-Purkinje σχηματισμού) μέσω του οποίου ο παλμός του κατώτερου καρδιακού βηματοδότη (του κόμβου AV) μεταβιβάζεται στο κοιλιακό μυοκάρδιο. Τυχόν τοπολογική παραμόρφωση του παραπάνω δενδρικού σχηματισμού (οφειλόμενη σε παθολογικά αίτια) τροποποιεί άρδην (και επί τα χείρω) το λειτουργικό φάσμα του υγιούς μυοκαρδίου, δηλαδή το «στενεύει» με αποτέλεσμα ο κάτοχός του να αδυνατεί να αντεπεξέλθει σε ξαφνικά ερεθίσματα που, όπως είπαμε, απαιτούν μικρούς χρόνους προσαρμογής.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί μια εφαρμογή των χαοτικών συστημάτων με πολλαπλούς ελκυστές (κατηγορίες-μήμες) στη δυναμική του εγκεφαλικού φλοιού. Η δυναμική αυτή πειραματικά ελέγχεται με το ηλεκτροεγκεφαλογράφημα, που είναι (όπως και το ηλεκτροκαρδιογράφημα) η καταγραφή μιας μονοδιάστατης προβολής (χρονοσειράς) μιας πολυδιάστατης δυναμικής διαδικασίας.

Στο προκείμενο, οι διάφορες μήμες-κατηγορίες-ελκυστές στον εγκεφαλικό φλοιό έχουν ως hardware (υλική υποδομή) υποσύνολα νευρωνικών δικτύων.

Ένας νευροφυσιολογικός «βηματοδότης»-βρόχος ανάδρασης, του οποίου η δυναμική εκπηγάει από ειδικά νευρωνικά κέντρα του θαλάμου (the “thalamocortical” pacemaker), εξικνεύεται μέχρι των νευρωνικών δικτύων του φλοιού και επιστρέφει στον θάλαμο, είναι υπεύθυνος για την εκ περιτροπής στον χρόνο «αναζωπύρωση» των καθ' έκαστα συνυπαρχουσών μνημών-χαοτικών ελκυστών.

Κατά τη διάρκεια συμπεριφερικών καθεστώτων, όπως λόγου χάρη η κατάσταση χαλάρωσης (relaxation) και ο ελαφρός ύπνος, η δυναμική του παραπάνω βηματοδότη είναι και αυτή ένας χαοτικός ελκυστής σχετικά μικρής διαστατικότητας (~3-4) και η διαλειπτική διαδικασία μεταπτώσεώς του από τη μία μνήμη στην άλλη είναι σχετικά ομοιογενής (δηλαδή περίπου ίσως χρόνος «προσοχής» εκκωρείται σε καθεμιά από τις συνυπάρχουσες μνήμες).



Κατά τη διάρκεια όμως ενεργού συμμετοχής του ατόμου σε επίλυση προβλημάτων ή αναγνωρίσεως προτύπων, ο νευροφυσιολογικός βηματοδότης καθίσταται χαρακτηριστικά ανομοιογενής. Ο χρόνος που διατίθεται για καθεμιά από τις συνυπάρχουσες μνήμες-κατηγορίες διαφοροποιείται δραματικά έτσι ώστε λίγες μνήμες διεκδικούν από πλευράς χρόνου «προσοχής» τη μερίδα του λέοντος ενώ οι υπόλοιπες πρακτικά παραμερίζονται εντελώς. Αυτή η ανομοιογενής διαλειπότητα συνεπάγεται και την αύξηση της διαστατικότητας του βηματοδότη-ελκυστή που από την τιμή 3-4 είναι δυνατόν να μεταπηδήσει στην τάξη του  $\sim 10$ , δείχνοντας με αυτόν τον τρόπο μια αύξηση της χωρητικότητάς του (των βαθμών ελευθερίας του) ως επεξεργαστή πληροφορίας.

Είναι, τέλος, αξιοσημείωτο ότι κατά τη διάρκεια επιληπικών επεισοδίων (*petit-mal epilepsy*), όπου σχεδόν εξ ορισμού ο νευροφυσιολογικός επεξεργαστής πληροφορίας αδρανοποιείται, η διαστατικότης του βηματοδότη πέφτει στην τιμή  $\sim 2$ . Έτσι μπορούμε να πούμε ότι η χαοτική δυναμική προσφέρει ένα πειστικό πρότυπο ενός βιολογικού επεξεργαστή πληροφορίας που πριν απ' όλα πρέπει να είναι άνετα αυτοπροσαρμόσιμος.

Επομένως, η υγιής καρδιά και ο υγιής εγκέφαλος λειτουργικά εμφανίζουν χαοτικούς ελκυστές μεγάλης διαστατικότητας με ευρέα συνεχή φάσματα συχνότητων.

Άρα, μπορούμε ίσως να πούμε ότι η επιληψία αφενός και η κοιλιακή μαρμαρύνη αφετέρου είναι ούτως ειπείν «ισομορφικές» ασθένειες: και στις δύο περιπτώσεις το αντίστοιχο βιολογικό όργανο είναι ανίκανο να λειτουργήσει σαν προσαρμοστικός επεξεργαστής πληροφορίας.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η σύγχρονη αντίληψη για τον τρόπο αναγνώρισης ενός ενζύμου από το υπόστρωμά του δεν αφορά στην προσαρμογή των αντιστοιχικών στερεοδομών (τύπου «κλειδιού-κλειδαριάς») αλλά μάλλον στη δυναμική αλληλεπίδραση των φασμάτων των συχνότητων του ενζύμου (που είναι ένα χαοτικό δυναμικό σύστημα) με τον υποδοχέα (που είναι επίσης ένα χαοτικό δυναμικό σύστημα).

Προσθέτουμε επίσης ότι οι χαοτικοί ελκυστές μπορούν να μοντελοποιήσουν γεννήτριες τεχνητών γλωσσών, των οποίων τα *αναγκαία* χαρακτηριστικά συνάδουν με εκείνα των φυσικών, γεννητικών και μουσικών γλωσσών.

Ας υπενθυμίσουμε ότι τα εκ των ουκ άνευ χαρακτηριστικά (αναγκαίες αλλά όχι και ικανές συνθήκες) κάθε γλώσσας επικοινωνίας είναι:

- ▶ Η ύπαρξη μνήμης μακράς κλίμακας, ώστε ο αποδέκτης να ανιχνεύει και να διορθώνει λάθη εκ των συμφραζομένων (γραμματικοί και συντακτικοί κανόνες).
- ▶ Η επιλεκτικότητα: Λίγες λέξεις-κλειδιά και λίγες λεπτομέρειες σε ένα πρότυπο διεκδικούν τη «μερίδα του λέοντος» από πλευράς συχνότητας εμφάνισης (Νόμος του Zipf).
- ▶ Το σπάσιμο συμμετρίας στον μονοδιάστατο φυσικό χώρο (όλες οι γλώσσες διαβάζονται και γράφονται μονόφωρα· «παλίνδρομα» είναι αξιοπερίεργες εξαιρέσεις).
- ▶ Όλες οι γλώσσες σχηματίζουν φράσεις που είναι συστήματα αυτοαναφοράς. Επιβάλλεται λοιπόν αυτοσυνέπεια σε κάθε γλωσσικό σχήμα ώστε ένα τμήμα μιας φράσης να μην αναιρεί άλλο τμήμα της ίδιας φράσης. Η αυτοσυνέπεια σε μια φράση αυτοαναφοράς συνεπάγεται ασυμπτωπική ευστάθεια, δηλαδή ύπαρξη ελκυστή, στο δυναμικό σύστημα το οποίο προσομοιώνει τη φράση αυτή.
- ▶ Κάθε γλώσσα διασφαλίζει μια «ισορροπία τρόμου» μεταξύ ποικιλίας ρεπερτορίου (αναγκαίας για να ελκύει το ενδιαφέρον του συνδιαλεγόμενου) και αξιοπιστίας (ύπαρξη συντακτικών κανόνων και ικανότητα ανίχνευσης και διόρθωσης λαθών).

Όλες οι παραπάνω ιδιότητες είναι δυνατόν να τηρηθούν σε μια τεχνητή γλώσσα-κείμενο που προκύπτει ως μονοδιάστατη χρονοσειρά ή ως αποτέλεσμα διαμερισμού ενός χαοτικού πολυμορφοκλασματικού ελκυστή σε μη αλληλοκαλυπτόμενες κυψελίδες («σύμβολα»). Η τροχιά του ελκυστή περνά *ανομοιόμορφα* και *διαλειπτικά* από τις διάφορες κυψελίδες-σύμβολα, με αποτέλεσμα τα σύμβολα αυτά να διαδέχονται το ένα το άλλο στον χρόνο σχηματίζοντας έτσι ένα μονοδιάστατο κείμενο. Η στατιστική ανάλυση του τεχνητού αυτού κειμένου

δίνει τις παραπάνω συλλογικές ιδιότητες της τεχνητής γλώσσας. Συγκρίσεις με τις αντίστοιχες συλλογικές ιδιότητες φυσικών γλωσσών (ελληνικής, αγγλικής) γεννητικών κειμένων (DNA, mRNA) και μουσικών γλωσσών (κείμενα J.S. Bach) δίνουν ικανοποιητική *ποιοτική* ταύτιση. Έτσι είναι κατ' αρχάς δυνατόν, χρησιμοποιώντας πολύ απλά μη γραμμικά ανομοιογενή χαοτικά δυναμικά συστήματα ως hardware, να παράγουμε πολυπλοκότερες συμβολικές διαδικασίες software που να μιμούνται κατά πρωτόλειο έστω τρόπο τα αναγκαία χαρακτηριστικά κάθε γλώσσας επικοινωνίας. Η *επιλεκτικότητα* της τεχνητής γλώσσας βασίζεται στο ότι ο ελκυστής επισκέπτεται τα διάφορα σύμβολα-κυψελίδες κατά τρόπο *ανομοιογενή*, δίνοντας διαφορετικούς συντελεστές βαρύτητας σε διάφορα σύμβολα ή λέξεις ή φράσεις του *τεχνητού κειμένου*.<sup>2</sup>

Η σχεδίαση, λοιπόν, «νοημόνων» robots, με πολύ απλή «γνωστική hardware» ικανών να «εκφράζονται» σε μια αποδεκτή «πρωτόγονη» γλώσσα είναι κατ' αρχάς δυνατή.

Για τον αναγνώστη που θα ήθελε περισσότερες τεχνικές λεπτομέρειες για το υλικό αυτής της εισαγωγής παραπέμπουμε στα ακόλουθα βιβλία:

- ▶ J. S. Nicolis, *Chaotic Dynamics applied to biological information processing*, Academie – Verlag, 1987.
- ▶ J. S. Nicolis, *Διλήμματα και αδιέξοδα στην ανθρώπινη επικοινωνία*, Εκδ. Σάκκουλας, Αθήνα, 1988.
- ▶ J. S. Nicolis, *Dynamics of Hierarchical systems. An evolutionary approach*, Springer-Verlag, 1986. [Transl. Into Russian, MIR 1990)].
- ▶ J. S. Nicolis, *Chaos and information Processing*, World Scientific Publishing Co, 1991.

---

2. Ο γεννήτορας-ελκυστής δίνει τα πιστότερα προς μία πραγματική γλώσσα αποτελέσματα όταν είναι πολυμορφοκλασματικός αλλά μη χαοτικός –«στην κόψη του ξυραφιού» όπως θα λέγαμε– ανάμεσα σε περιοδικούς ελκυστές και σε πλήρως χαοτικούς ελκυστές, όπως για παράδειγμα ο ελκυστής Feigenbaum.

Ένα ενδιαφέρον βιβλίο του I. Stewart που τιτλοφορείται *Does God play Dice* θίγει τις αρχές της χαοτικής δυναμικής (χωρίς να υπεισέρχεται σε εφαρμογές βάθους) κυρίως από μαθηματικής και φιλοσοφικής απόψεως.

Συγκεκριμένα, ο Stewart ορθά ανάγει την αρχή της χαοτικής δυναμικής στο έργο του μεγαλοφούς μαθηματικού Henri Poincare της τελευταίας δεκαετίας του προ-περασμένου αιώνα. Το θεμελιώδες ερώτημα που έδρασε σαν καταλύτης για την εξέλιξη της νέας επιστήμης του χάους ήταν: Το ηλιακό σύστημα είναι ευσταθές ή όχι; Οι ελλειπτικές τροχιές των εννέα (προς το παρόν) πλανητών θα μείνουν ως έχουν για πάντα; Ο Poincare δεν απάντησε άμεσα στο ερώτημα αυτό (ακόμη και σήμερα η οριστική απάντηση δεν έχει δοθεί) αλλά έκανε, αν θέλετε, κάτι παραγωγικότερο: εφεύρε την επιστήμη της τοπολογίας, η οποία κυριολεκτικά «γεωμετροκοποιεί» τη δυναμική και τα εγγενή προς αυτή προβλήματα και κριτήρια ευστάθειας. Τούτο, συνδυαζόμενο τα τελευταία χρόνια με εξαιρετικά λεπτομερείς παρατηρήσεις και ταχείς ηλεκτρονικούς υπολογιστές, επέτρεψε σε σύγχρονους επιστήμονες (όπως, ο Jack Wisdom του MIT και ο Jacques Laskar του ερευνητικού κέντρου Bureau de Longitude στο Παρίσι) να αποφανθούν τουλάχιστον για τη μακροπρόθεσμη συμπεριφορά ενός πλανήτη: του «εξωιάτου» Πλούτωνα. Κατά τον Wisdom, η τροχιά του Πλούτωνα είναι χαοτική με χρονικό όριο προβλεψιμότητας ~200 εκατομμύρια χρόνια. Μετά από αυτό το χρονικό διάστημα «κανείς» κυριολεκτικά δεν ξέρει τι «τύχη» θα έχει ο Πλούτων και η φύση της τροχιάς του.

Αρχής γενομένης λοιπόν από την πλανητική δυναμική, η χαοτική συμπεριφορά άρχισε να... ανακαλύπτεται και να μελετάται στη μετεωρολογία, στις χημικές ταλαντώσεις, την υδροδυναμική, την ηλεκτρονική, τη γεωφυσική («σεισμική δράση», αναστροφές μαγνητικού πεδίου) και σιγά-σιγά και σε «πρακτικά» θέματα που αρχίζουν από την οικολογία και που όπως είδαμε παραπάνω εξικνούνται και μέχρι των βιοχημικών ταλαντώσεων και της κλινικής καρδιολογίας. Ας σημειωθεί ότι ο Stewart στο βιβλίο του θα μπορούσε να είχε ίσως αναφέρει, δίκην μαθηματικού παραδόξου αν θέλετε, και την εμφάνιση Χάους σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές.

Ένα φλέγον πράγματι ερώτημα στο προκείμενο είναι: Όταν προσομειώσουμε ένα μαθηματικό πρότυπο ενός φυσικού φαινομένου στον ηλεκτρονικό υπολογιστή (που κι αυτός είναι ουσιαστικά ένα δυναμικό σύστημα), πώς είναι δυνατόν να διαχωρίσουμε την τυχόν χαοτική συμπεριφορά, που είναι εγγενής στο φυσικό φαινόμενο αυτό καθ' αυτό, από την «υπολογιστική» χαοτική συμπεριφορά που μοιραία ανακύπτει όταν ο υπολογιστής λειτουργήσει επί πολύ μακρύ χρονικό διάστημα (έτσι ώστε να «αποσυρευχθεί» από τις αρχικές συνθήκες, δηλαδή το πρόγραμμα, και να αρχίζει να «αυτοσχεδιάζει»);

Η προσωρινή απάντηση είναι ότι εάν το φυσικό σύστημα έχει χαοτικό ελκυστή ή χαοτικούς ελκυστάς, οι οποίοι είναι εξ ορισμού αναίσθητοι σε ευρείες διακυμάνσεις εξωτερικών διαταραχών, τότε το υπολογιστικό χάος μπορεί να ξεχωριστεί. Είναι όμως δυνατό το ίδιο πράγμα να γίνει για τις καθ' έκαστα (individual) τροχιές του υπό μελέτη συστήματος; Η απάντηση είναι μάλλον όχι.

Το βιβλίο του Stewart λοιπόν προορίζεται κυρίως για αναγνώστες μη τεχνικούς που ενδιαφέρονται να έλθουν σε επαφή με το νόημα μάλλον παρά με τη «χρησιμότητα» της νέας θεωρίας. Αυτό κατά τη γνώμη μας είναι απαραίτητο. Για να «ελκυστεί» ο αναγνώστης –τεχνικός ή μη– σε ένα θέμα, μια νέα επιστήμη, θα πρέπει πριν απ' όλα να «συντονιστεί» συναισθηματικά και υπαρξιακά. Τότε μόνο θα μπορεί να εκτιμήσει και να δικαιολογήσει στον εαυτό του τον τυχόν κόπο που είναι απαραίτητο να καταβάλει για να προχωρήσει σε ουσιαστικότερο βάθος.

Είναι αξιοσημείωτο πάντως να διαπιστώνει κανείς το εξής: Ένα βιβλίο όπως το παραπάνω έχει τον ρητορικό τίτλο *Αν ο Θεός παίζει ζάρια* – μια ερώτηση στο κάτω-κάτω εντελώς ακαδημαϊκής σημασίας για τον «κοινό» άνθρωπο. Εντούτοις, ο αναγνώστης των βιβλιογραφικών αναφορών τις οποίες παραθέτουμε θα διαπιστώσει με έκπληξη, και τολμούμε να προσθέσουμε με ένα παράξενο αίσθημα χαράς, ότι από αυτή την «υπαρξιακή» θέση εκπηγάζουν χάρις στη χαοτική δυναμική τόσο πρακτικά συμπεράσματα όσο –ούτε λίγο ούτε πολύ– μια ιατρική πρόγνωση με βάση το φάσμα του QRS ρυθμού του κοιλιακού μυοκαρδίου που μας προειδοποιεί αν στους επόμενους μήνες ή λίγα χρό-

να υπάρχει βásiμη πιθανότητα να καταληφθούμε από (ανατάξιμη ή και μοιραία) κοιλιακή μαρμαρυγή. Τι πιο χρήσιμο από αυτό;

Τέλος, η χαοτική δυναμική έχει τη θέση της και στο αιώνιο θέμα της «ελεύθερης βούλησης», πράγμα που μέχρι τώρα εθεωρείτο αντικείμενο ψυχολογικών ή μάλλον φιλοσοφικών και θεολογικών συζητήσεων (και διαμαχών) και βεβαίως θέμα τραγωδιών (*Οιδίπους Τύραννος*). Γνωρίζουμε σήμερα ότι η συνειδητοποίηση μιας γνωστικής μεταλλάξεως (απότομης ή εξελικτικής) στον εγκέφαλο γίνεται πάντοτε «κατόπιν εορτής». Το εν εγρηγόρει άτομο είναι πάντοτε «Επιμηθεύς»: διαπιστώνει και περιγράφει μια βιοχημική και νευροφυσιολογική δυναμική διαδικασία που ήδη το ξεπερνάει (κατά 4/5 του δευτερόλεπτου περίπου). «Λαχανιάζουμε» κυριολεκτικά πίσω από τον εγκέφαλό μας. Στην ουσία ο «Δαίμων» που αποφασίζει μέσα μας είναι αυτόνομος. Η λήψη αποφάσεων λοιπόν εκ μέρους μας (βάση του μύθου της ελεύθερης βούλησης του ατόμου) είναι απλώς a posteriori λογικοποίηση (rationalization) ενός fait accompli (τετελεσμένου γεγονότος). Υπεύθυνη γι' αυτό είναι η δυναμική των νευρωνικών δικτύων του εγκεφάλου μας.

Όσο πιο «πειστική» είναι η λογικοποίηση της εγκεφαλικής μας δυναμικής από τη συμβολική γλώσσα, τόσο πιο κοινωνικά «υπεύθυνοι» και «αποδεκτοί» νιώθουμε.

Η ψευδαίσθηση της ελεύθερης βούλησης στηρίζεται στο γεγονός ότι παρά το ότι η δυναμική του εγκεφάλου που ουσιαστικά «κινεί τα ντία» της συμπεριφοράς μας είναι ντετερμινιστική είναι και απρόβλεπτη (χαοτική) λόγω των μη γραμμικών διασυνδέσεων των νευρωνικών μας δικτύων και της ευαίσθητης εξάρτησης της τελικής τους κατάστασης (ελκυστή) από τις αρχικές συνθήκες. Κατά συνέπεια παρουσιάζει για τον κάτοχό της στοχαστικό χαρακτήρα. Σε τελευταία ανάλυση υποστηρίζω ότι η συμβολική γλώσσα είναι ένας συνήγορος της συμπεριφοράς μας που καλείται σε επικουρία όταν συνειδητοποιηθεί ότι η απόφαση για δράση έχει ληφθεί.

Η έννοια της τραγωδίας πάντως για την οποία κάνουμε παραπάνω μνεία, επί επιστημονικής βάσεως αυτή τη φορά, θα μπορούσε ίσως να επαναπροσδιο-

ριστεί ως ακολούθως: «Τραγωδία» είναι η διαδικασία άγονης αναζήτησης αναλλοίωτων μεγεθών (δηλαδή συμμετριών) σε φυσικά (hardware) φαινόμενα αλλά κυρίως συμβολικά (software) φαινόμενα (όπως για παράδειγμα οι βιολογικές, κοινωνικές, ψυχολογικές και οικονομικές διαδικασίες). Η απία που οδηγεί στην τραγωδία είναι σχεδόν προφανής: Η τυχόν ανυπαρξία αναλλοίωτων μεγεθών συνεπάγεται ανυπαρξία εγγενών φυσικών νόμων και προκαλεί κατά συνέπεια την εντύπωση ότι ο άνθρωπος γενικά και ο ερευνητής ιδιαίτερα, είναι ίσως έρμαιο ενός «πανδαιμονίου» μάλλον παρά ένας υπήκοος μιας συγκεκριμένης νομοτέλειας. Ο άνθρωπος λοιπόν είναι το «παίγνιον» ενός αυθαίρετου «Θείου» και η συνειδητή ζωή μια κακόγουστη φαρσοκωμωδία.

Η δυσκολία εντοπίσεως αναλλοίωτων μεγεθών –συμμετριών– καθίσταται εντονότερη όσο αφήνοντας απλά προβλήματα της κλασικής ή quantum Φυσικής προχωρούμε στη σπουδή φαινομένων που προσιδιάζουν στις συμβολικές (software) διαδικασίες: Τα φαινόμενα αυτά χαρακτηρίζονται από λίγους βαθμούς ελευθερίας, δηλαδή πολλές σπασμένες συμμετρίες (άρα λίγα αναλλοίωτα μεγέθη) και συνεπώς αυξημένη πολυπλοκότητα.

Πράγματι, σχεδόν εξ ορισμού, ένα πολύπλοκο σύστημα είναι εκείνο στο οποίο υπάρχει μεγάλη δυσκολία ανακαλύψεως συμμετριών, αναλλοίωτων μεγεθών –ως προς δεδομένες ομάδες μετασχηματισμών– και επομένως νόμων. Τα συμβολικά αυτά συστήματα που περιγράφονται πολλές φορές δομικά μεν από πολύ–μορφοκλασματικές δομές (multifractals) δυναμικά δε από μη διατηρητικό χάος, χαρακτηρίζονται από συνύπαρξη πολλαπλών κλιμάκων στον χώρο και στον χρόνο.

Έτσι, η προσπάθειά μας εστιάζεται στην εύρεση “scaling laws” (διαδικασιών που διέπονται από σχέσεις αυτό-ομοιότητας) και στη σπουδή του φάσματος δηλαδή της διασποράς των exponents (δεικτών) αυτών των scaling laws (λόγου χάρη των δεικτών του Feigenbaum που είναι όντως αναλλοίωτοι για μια ευρεία κατηγορία συμμετρικών χαοτικών απεικονίσεων).

Η εφαρμογή της χαοτικής δυναμικής λοιπόν στη σπουδή των συμβολικών συστημάτων δίνει την ελπίδα απομυθοποίησής τους και συμβιβασμού με δύο

έννοιες που μέχρι τούδε εθεωρούντο αλληλοσυγκρουόμενες: την έννοια της καθοριστικότητας (ντετερμινισμού) και την έννοια της μη προβλεψιμότητας (ελεύθερη βούληση).

Στο παρελθόν μέχρι και προ 50 περίπου ετών, για παράδειγμα, οι φυσικοί επιστήμονες επέλεγαν προβλήματα επιλύσιμα, («ολοκληρώσιμα»)<sup>3</sup>, δηλαδή προβλήματα πολλών διατηρημένων συμμετριών (πολλών αναλλοίωτων χαρακτηριστικών) ή προβλήματα μικρής πολυπλοκότητας. Είχαν κατηγορηθεί –εν τινι μέτρω δικαίως– από «θεράποντες» συμβολικών επιστημών (όπως η Βιολογία, Ψυχολογία, Κοινωνιολογία, Οικονομική, κ.λπ.) ότι είναι εξωπραγματικοί και ότι τα προβλήματα με τα οποία νοχολούντο λίγη ή καμία συνάφεια είχαν προς την «πραγματικότητα». Κατά τους «Soft Scientists», τα «πραγματικά» προβλήματα χαρακτηρίζονται από πολλές σπασμένες συμμετρίες, λίγα αναλλοίωτα μεγέθη –δύσκολα ανιχνευόμενα– και μεγάλη πολυπλοκότητα (δηλαδή μεγάλη δυσκολία περιγραφής, όπως τα πολύπλοκα δίκτυα στα οποία αναφέρθηκε η κύρια ομιλία μου).

Σε τελευταία ανάλυση, και η «διαμάχη» ανάμεσα σε βασική και εφαρμοσμένη έρευνα ανάγεται πιθανώς στις παραπάνω διαφορετικές προτιμήσεις επιλογής θεμελιωδών προβλημάτων.

Η ενοποίηση πάντως των “Hard” & “Soft” επιστημών και η «συμφιλίωσή» τους μέσα στα πλαίσια ενός ευρέως φάσματος φυσικών φαινομένων με λιγότερη ή περισσότερη πολυπλοκότητα είναι ένα φλέγον αίτημα των καιρών. Η Χαοτική Δυναμική παίζει στην προσπάθεια αυτή έναν ουσιαστικό ρόλο.

3. Τα ολοκληρώσιμα συστήματα μπορούν να χαρακτηριστούν και «αν-ιστορικά»: αρκεί η γνώση των αρχικών συνθηκών (εκκινήσεως) και ο εμφυλοχώρων οργανικός νόμος για να υπολογιστεί η κατάσταση του συστήματος οποτεδήποτε στο μέλλον ή στο παρελθόν (π.χ. η κλασική νευτώνεια μηχανική των δύο σωμάτων). Αντιθέτως, στα μη-ολοκληρώσιμα ιστορικά συστήματα για τον υπολογισμό μιας καταστάσεως απαιτείται πλην της γνώσης των αρχικών συνθηκών και του δυναμικού νόμου και ο υπολογισμός όλων των ενδιάμεσων καταστάσεων (της «τροχιάς»), δηλαδή του τρόπου με τον οποίο το σύστημα έφτασε στον τελικό προορισμό· ο λόγος είναι ότι η τροχιά των μη ολοκληρώσιμων συστημάτων είναι εξαιρετικά ευαίσθητη στις περιβαλλοντικές συγκυρίες, πράγμα που σημαίνει ότι η τροχιά του συστήματος είναι ασταθής και επιδεκτική ριζικής (απροβλέπτου) αλλαγής ανά πάσα στιγμή.