

Χάος και Σύγχρονη Φυσική

Δρ. Χάρης Βάρβογλης

Τομέας Αστροφυσικής, Αστρονομίας και Μηχανικής, Τμήμα Φυσικής, ΑΠΘ

Ο Γάλλος μαθηματικός Πιερ Σιμόν, μαρκήσιος ντε Λαπλάς, είχε γράψει στην εισαγωγή του βιβλίου όπου πραγματευόταν τη Θεωρία των Πιθανοτήτων: *"Αν ένα ον γνώριζε, σε μια συγκεκριμένη στιγμή, όλες τις δυνάμεις της φύσης, καθώς και τις θέσεις και τις ταχύτητες των σωμάτων που υπάρχουν στο Σύμπαν, θα είχε πλήρη γνώση του παρελθόντος και του μέλλοντος κάθε αντικειμένου, ζωντανού ή άψυχου."* Το συμπέρασμα αυτό το στηρίζει στην πίστη του ότι η ισχύς των νόμων της Φυσικής είναι παγκόσμια και ότι οι μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν αυτούς τους νόμους είναι δυνατό να λυθούν ακριβώς. Κατά τον Λαπλάς, λοιπόν, η έννοια της πιθανότητας οφείλεται μόνο στην ατελή γνώση που έχουμε για τους νόμους και τις αρχικές συνθήκες δημιουργίας του Σύμπαντος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ο νόμος που είχε κατά νου ο Λαπλάς ήταν ο τρίτος νόμος της κίνησης του Νεύτωνα, σύμφωνα με τον οποίο η κίνηση οιασδήποτε σώματος είναι δυνατόν να περιγραφεί με μία εξίσωση που περιλαμβάνει τη θέση, την ταχύτητα και την επιτάχυνσή του, αν είναι γνωστή η δύναμη που ασκείται σε αυτό. Η σημασία του συμπεράσματος είναι προφανής για τη φιλοσοφία και τη ηθική: αν οι κινήσεις όλων των σωμάτων, από τα μικρότερα άτομα στο σώμα μας μέχρι τα μεγαλύτερα αστέρια σε ένα γαλαξία, καθοδηγούνται από αυστηρούς μαθηματικούς νόμους, τότε δεν υπάρχει η ελευθερία βούλησης των ανθρώπων!



Εκατό χρόνια περίπου μετά από τον Λαπλάς, ο μεγάλος Γάλλος μαθηματικός και αστρονόμος Πουανκαρέ ανακάλυψε ένα φαινόμενο που θα μπορούσε να αποκαταστήσει την αξία της ανθρώπινης βούλησης. Το φαινόμενο αυτό είναι η ύπαρξη **χαοτικών κινήσεων** ακόμη και στα απλούστερα συστήματα της Κλασικής Μηχανικής. Δυστυχώς το σημαντικότερο αυτό αποτέλεσμα, στο οποίο ο Γάλλος μαθηματικός κατέληξε βασιζόμενος μόνο σε ποιοτικούς γεωμετρικούς συλλογισμούς και χωρίς να χρησιμοποιήσει σχήματα, δεν ήταν δυνατό να εκτιμηθεί στην εποχή του, αφού έλειπε ακριβώς ο τρόπος με τον οποίο θα μπορούσε κανείς να αποκτήσει μια ποσοτική αίσθηση του φαινομένου. Έτσι αυτή η ανακάλυψη του Πουανκαρέ έμεινε στην ιστορία της Μηχανικής ως ένα θεωρητικό παράδοξο, χωρίς προφανή σχέση με το οικοδόμημα της Φυσικής του 19ου αιώνα.

Πενήντα χρόνια μετά τον Πουανκαρέ έκαναν την εμφάνισή τους οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές. Τότε πολλοί επιστήμονες αποφάσισαν να χρησιμοποιήσουν το καινούργιο αυτό εργαλείο στην αριθμητική επίλυση προβλημάτων που μέχρι τότε δεν είχε μπορέσει κανείς να λύσει αναλυτικά. Το 1963 ο μετεωρολόγος Λόρεντς δοκίμασε να λύσει τις εξισώσεις του απλούστερου δυνατού μοντέλου περιγραφής της ατμόσφαιρας, ακολουθώντας τη γενικά παραδεκτή, στη σύγχρονη επιστήμη, στρατηγική επίλυσης πολύπλοκων προβλημάτων. Πρώτα λύνουμε το απλούστερο πρόβλημα και μετά εισάγουμε, διαδοχικά, όλο και περισσότερες "λεπτομέρειες". Για παράδειγμα, αν θέλουμε να υπολογίσουμε την τροχιά της Γης, στην αρχή υποθέτουμε ότι την έλκει μόνο ο Ήλιος, που είναι το μεγαλύτερο σώμα στο ηλιακό σύστημα, θεωρώντας ότι όλα τα υπόλοιπα σώματα προκαλούν μόνο μικρές μεταβολές. Στη συνέχεια υπολογίζουμε τις διορθώσεις της αρχικής τροχιάς που προκύπτουν αν προσθέσουμε την έλξη της Σελήνης, των άλλων πλανητών κλπ. Συνήθως υποθέτουμε ότι τα υπόλοιπα μικρά σώματα του ηλιακού συστήματος, αστεροειδείς και κομήτες, καθώς και όλα τα απομακρυσμένα αστέρια έχουν ασήμαντη επίδραση στη Γη.

Προς μεγάλη του απογοήτευση, ο Λόρεντς διαπίστωσε ότι κάτι δεν πήγαινε καλά με τις λύσεις που υπολόγιζε: μικρές αλλαγές στις αρχικές συνθήκες οδηγούσαν σε ολοκληρωτικά διαφορετικές καταστάσεις της ατμόσφαιρας. Αφού προσπάθησε με διάφορους τρόπους να διορθώσει οποιοδήποτε πιθανό λάθος στη μέθοδο λύσης που χρησιμοποιούσε, κατέληξε σε ένα επαναστατικό συμπέρασμα. Η κλασική μέθοδος λύσης πολύπλοκων συστημάτων, που είχε ξεκινήσει από το Νεύτωνα πριν από 300 χρόνια, δεν μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στο συγκεκριμένο πρόβλημα της πρόγνωσης του καιρού, αφού ασήμαντες αλλαγές στις αρχικές συνθήκες οδηγούσαν σε ριζικά διαφορετικές λύσεις! Στο συμπέρασμα αυτό οφείλεται και η γνωστή, σε πολλούς, παραδοξολογία, σύμφωνα με την οποία το χτύπημα των φτερών μιας πεταλούδας στην Κίνα μπορεί να προκαλέσει μετά από ένα μήνα καταιγίδα στην Ευρώπη. Αυτή ήταν η αρχή της θεωρίας του χάους στη σύγχρονη εποχή.



Στα χρόνια που ακολούθησαν την ανακάλυψη του Λόρεντς, η θεωρία του χάους αναπτύχθηκε αλματωδώς, βασισμένη τόσο σε πειράματα (είτε πραγματικά είτε προσομοιώσεις με ηλεκτρονικούς υπολογιστές) όσο και στην ανάπτυξη νέων θεωρητικών εργαλείων και εννοιών. Σήμερα η αντίληψή μας για τη φύση και τις λύσεις των εξισώσεων που περιγράφουν χρονική εξέλιξη φαινομένων είναι ριζικά αντίθετες με ό,τι πιστεύαμε πριν από 50 χρόνια. Χαοτικά φαινόμενα, ανάλογα με αυτά που διαπίστωσε ο Λόρεντς, παρατηρήθηκαν σχεδόν σε όλες τις εξισώσεις αυτής της κατηγορίας, από την κίνηση των πλανητών γύρω από τον Ήλιο μέχρι τις διακυμάνσεις των χρηματιστηριακών δεικτών. Έτσι η ελευθερία της βούλησης των ανθρώπων απέκτησε και πάλι νόημα.

Οι βασικές χαρακτηριστικές ιδιότητες όλων των χαοτικών δυναμικών συστημάτων, όπως ονομάζονται, είναι δύο. Πρώτη είναι η ύπαρξη γεωμετρικής πολυπλοκότητας, αυτής ακριβώς που δεν επέτρεψε στον Πουανκαρέ να χρησιμοποιήσει σχήματα. Δεύτερη είναι η ευαίσθητη εξάρτηση από τις αρχικές συνθήκες. Η ιδιότητα αυτή μας επιβάλλει να γνωρίζουμε με ακρίβεια τόσο περισσότερων δεκαδικών ψηφίων τις αρχικές τιμές των ποσοτήτων που

περιγράφει το δυναμικό σύστημα (π.χ. πίεση και θερμοκρασία στην περίπτωση της Ατμόσφαιρας), όσο μεγαλύτερο είναι το χρονικό διάστημα για το οποίο θέλουμε να υπολογίσουμε τη λύση του προβλήματος. Επειδή η ακρίβεια ενός θερμομέτρου ή ενός βαρομέτρου, για παράδειγμα, περιορίζεται το πολύ στα δύο δεκαδικά ψηφία, προκύπτει ότι το χρονικό διάστημα για το οποίο μπορούμε να κάνουμε αξιόπιστη πρόγνωση του καιρού είναι εκ των πραγμάτων περιορισμένο, συνήθως τρεις ημέρες. Έτσι εξηγήθηκε θεωρητικά το παράδοξο, για την εποχή του, πειραματικό αποτέλεσμα του Λόρεντζ.



Σήμερα η παγκόσμια επιστημονική κοινότητα όχι μόνο έχει αντιληφθεί τη σημασία της ανακάλυψης του **φαινομένου του χάους** από τον Πουανκαρέ, αλλά προσπαθεί χρησιμοποιώντας το να δώσει την απάντηση και σε ένα από τα παλιότερα άλυτα προβλήματα της Φυσικής, αυτό της σχέσης της Θερμοδυναμικής με την υπόλοιπη Φυσική. Στα τέλη του 19ου αιώνα δύο από τους μεγαλύτερους φυσικούς όλων των εποχών, ο Σκώτος Ουίλλιαμ Τόμσον (μετέπειτα λόρδος Κέλβιν, γνωστός από το όνομα της μονάδας της θερμοκρασίας που δόθηκε προς τιμή του) και ο Γερμανός Χέλμχολτς προσπάθησαν μάταια να ενσωματώσουν τη Θερμοδυναμική στο τότε ενιαίο οικοδόμημα της Κλασικής Φυσικής. Το πρόβλημα λύθηκε τελικά από το γνωστό Σκώτο φυσικό Τζέιμς Κλερκ Μάξγουελ, ο οποίος κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα, που ορίζει ότι δεν μπορεί να υπάρξει πλήρης μετατροπή της θερμότητας σε μηχανικό έργο, δεν προκύπτει από τους νόμους της Μηχανικής του Νεύτωνα. Αυτό φαίνεται παράδοξο, αφού η θερμότητα είναι ουσιαστικά μια ποσότητα που μετράει πόσο γρήγορα κινούνται τα άτομα ή τα μόρια ενός σώματος, η κίνηση των οποίων φυσικά ακολουθεί τους νόμους του Νεύτωνα.

Η ιδιότητα της ευαίσθητης εξάρτησης από τις αρχικές συνθήκες πιστεύουμε σήμερα ότι μπορεί να αποτελέσει τη λύση σ' αυτό το ανοικτό πρόβλημα. **Αν ένα σύστημα που αποτελείται από λίγα σώματα μπορεί να έχει και κανονικές και χαοτικές κινήσεις, τότε είναι λογικό να αναμένουμε ότι ένα σύστημα που αποτελείται από πάρα πολλά σώματα θα έχει σχεδόν αποκλειστικά χαοτικές κινήσεις.** Αν λάβουμε υπόψη ότι σε κάθε κυβικό εκατοστό του ατμοσφαιρικού αέρα υπάρχουν ένα δισεκατομμύριο τρισεκατομμυρίων μόρια, καταλαβαίνουμε το βάσιμο του επιχειρήματος.

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει πάρα πολλές προσπάθειες από πειραματικούς και θεωρητικούς φυσικούς και μαθηματικούς για να αποδειχθεί αυτή η υπόθεση. Ήδη το 1970 ο Ρώσος μαθηματικός Σινάι απέδειξε ότι **ένα μαθηματικά τέλειο αέριο έχει μόνο χαοτικές κινήσεις.** Δυστυχώς το αέριο αυτό είναι ένα ιδανικό μοντέλο, μιας και υποτίθεται ότι τα μόριά του δεν έχουν διαστάσεις και ότι δεν εξασκούν το ένα στο άλλο δυνάμεις παρά μόνο όταν συγκρούονται. Αντίθετα όσα συστήματα με φυσική σημασία έχουν δοκιμαστεί μέχρι τώρα, βρέθηκαν να έχουν πάντα έστω και λίγες μη χαοτικές κινήσεις. **Η απόδειξη ότι το δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα είναι συνέπεια της θεωρίας του Χάους, και άρα των νόμων της Κλασικής Μηχανικής, θα αποτελέσει ένα από τα σημαντικότερα βήματα των φυσικών στην προσπάθειά τους να ενοποιήσουν τους νόμους της Φυσικής.**