

Ντετερμινισμός είναι η φιλοσοφική πίστη ότι κάθε γεγονός ή δράση είναι το αναπόφευκτο αποτέλεσμα προηγούμενων γεγονότων και δράσεων. Έτσι τουλάχιστον κατ' αρχήν κάθε γεγονός ή δράση μπορεί να προβλεφθεί πλήρως εκ των προτέρων ή αναδρομικά. Ως φιλοσοφική πίστη για τον υλικό κόσμο ο ντετερμινισμός μπορεί να ανιχνευτεί πίσω στην Αρχαία Ελλάδα πολλές χιλιάδες χρόνια πριν. Ο ντετερμινισμός ενσωματώθηκε στη νεώτερη επιστήμη γύρω στο 1500μΧ με την εδραίωση της ιδέας ότι οι νόμοι αιτίου και αποτελέσματος διέπουν πλήρως όλες τις κινήσεις και τη δομή του υλικού κόσμου.

Σύμφωνα με το ντετερμινιστικό μοντέλο της επιστήμης, το Σύμπαν ξεδιπλώνεται στο χρόνο σαν το έργο μιας τέλει μηχανής, χωρίς ούτε μια ατέλεια τυχαιότητας ή απόκλισης από τους προκαθορισμένους νόμους.

Ο άνθρωπος που συνδέθηκε πιο στενά με την εδραίωση του ντετερμινισμού ήταν ο Ισαάκ Νεύτων που έζησε στην Αγγλία πριν 300 περίπου χρόνια. Ο Νεύτωνας ανακάλυψε ένα αυτοσυνεπές σύνολο αρχών, τις εξέφρασε με μερικές μόνον προτάσεις και έδειξε ότι μ' αυτές μπορούσε να προβλεφθεί η κίνηση μιας εκπληκτικά μεγάλης ποικιλίας συστημάτων με πολύ υψηλό βαθμό ακρίβειας. Ο Νεύτωνας απέδειξε ότι οι τρεις νόμοι της κίνησης που πρότεινε, σε συνδυασμό με μια λογική επεξεργασία μπορούσαν ανάμεσα σε άλλα πράγματα να προβλέψουν με ακρίβεια τις τροχιές των πλανητών γύρω από τον Ήλιο, τις μορφές των τροχιών των βλημάτων επί της γης και το χρονοπρόγραμμα των παλιρροιών στους ωκεανούς, μήνα με το μήνα και χρόνο με το χρόνο.

Οι νόμοι του Νεύτωνα είναι πλήρως ντετερμινιστικοί διότι υποδηλώνουν ότι κάθετί που συμβαίνει μια μελλοντική χρονική στιγμή είναι τελείως προκαθορισμένο από ότι συμβαίνει τώρα, και επιπλέον το τώρα είναι πλήρως καθορισμένο από ότι συνέβη σε οποιαδήποτε στιγμή του παρελθόντος.

Οι νόμοι του Νεύτωνα ήταν τόσο πετυχημένοι ώστε για αρκετούς αιώνες μετά την ανακάλυψή τους, η επιστήμη της φυσικής αποτελείτο κυρίως από την επίδειξη πως οι νόμοι του θα μπορούσαν να εξηγήσουν τις παρατηρούμενες κινήσεις σχεδόν κάθε φυσικής διαδικασίας που θα μπορούσαμε να φανταστούμε.

Αν και οι νόμοι του Νεύτωνα ξεπεράστηκαν γύρω στα 1900 από ένα ευρύτερο σύνολο φυσικών νόμων, ο ντετερμινισμός παραμένει και σήμερα ως ο πυρήνας της φιλοσοφίας και ο στόχος της φυσικής επιστήμης.

Μια από τις σπουδαίες επινοήσεις που δημιούργησε η σύγχρονη επιστήμη γύρω στα 1500μΧ ήταν η ιδέα ότι οι νόμοι του υλικού Σύμπαντος μπορούσαν να γίνουν κατανοητοί μόνο με το να εκφράσουμε τις φυσικές ιδιότητες ως ποσοτικές μετρήσεις, δηλαδή με αριθμητικούς όρους και όχι μόνο με λέξεις.

Η χρήση αριθμητικών ποσοτήτων για να περιγράψουμε τον φυσικό κόσμο είναι η αιτία γιατί οι νόμοι της φυσικής πρέπει τελικά να εκφραστούν ως μαθηματικές εξισώσεις, και όχι απλά ως συνηθισμένες λεκτικές προτάσεις.

Για παράδειγμα, αν και οι νόμοι του Νεύτωνα εκφράζονται με λέξεις, προκειμένου να εφαρμόσουμε τους νόμους για να μελετήσουμε κάποιο συγκεκριμένο σύστημα,

είναι αναγκαίο να χρησιμοποιήσουμε τους νόμους με υπό την μορφή μαθηματικών εξισώσεων.

Οι νόμοι του Νεύτωνα είναι ίσως τα πιο σημαντικά παραδείγματα δυναμικών νόμων. Αυτό σημαίνει ότι συνδέουν τις αριθμητικές τιμές των μετρήσεων σε μια δεδομένη χρονική στιγμή με τις τιμές τους σε μια κατοπινή ή προηγούμενη χρονική στιγμή.

Οι μετρήσεις που εμφανίζονται στους νόμους του Νεύτωνα εξαρτώνται από το συγκεκριμένο σύστημα που μελετάμε, αλλά αυτές περιλαμβάνουν τυπικά τη θέση, την ταχύτητα, και την κατεύθυνση κίνησης όλων των σωμάτων που περιλαμβάνει το σύστημα, όπως επίσης και το μέτρο και κατεύθυνση όλων των δυνάμεων που ενεργούν στα σώματα αυτά κάθε χρονική στιγμή στην ιστορία του συστήματος.

Στην προσπάθειά μας να εκφράσουμε τις κατάλληλες μετρήσεις για ένα συγκεκριμένο σύστημα - είτε αυτό είναι το ηλιακό σύστημα, είτε ένα σώμα που πέφτει ελεύθερα στη γη, είτε τα ωκεάνια ρεύματα- αποκαλούμε τις τιμές των μετρήσεων μια δεδομένη χρονική στιγμή αρχικές συνθήκες για το σύστημα αυτό.

Ως δυναμικοί νόμοι οι νόμοι του Νεύτωνα είναι ντετερμινιστικοί διότι υποδηλώνουν ότι για ένα δεδομένο σύστημα, οι ίδιες αρχικές συνθήκες θα παράγουν πάντα το ίδιο κατοπινό αποτέλεσμα.

Το Νευτώνειο πρότυπο του Σύμπαντος απεικονίζεται συχνά ως ένα παιχνίδι μπιλιάρδου, στο οποίο το αποτέλεσμα ξεδιπλώνεται μαθηματικά από τις αρχικές συνθήκες κατά τελείως προκαθορισμένο τρόπο, σαν κινηματογραφική ταινία που μπορεί να παιχτεί είτε προς τα εμπρός είτε προς τα πίσω στο χρόνο.

Το παιχνίδι του μπιλιάρδου αποτελεί ένα χρήσιμο ανάλογο, διότι στο μικροσκοπικό επίπεδο, η κίνηση των μορίων μπορεί να παραλληλιστεί με τις συγκρούσεις των σφαιρών στο τραπέζι του μπιλιάρδου, όπου ισχύουν οι ίδιοι δυναμικοί νόμοι.

Μια από τις θεμελιώδεις αρχές των πειραματικών επιστημών είναι ότι καμιά πραγματική μέτρηση δεν είναι απεριόριστα ακριβής. Αντίθετα πρέπει αναγκαστικά να εμπεριέχει ένα βαθμό απροσδιοριστίας στην τιμή της.

Η απροσδιοριστία η οποία είναι παρούσα σε κάθε πραγματική μέτρηση πηγάζει από το γεγονός ότι κάθε μετρητική συσκευή που μπορούμε να φανταστούμε ακόμη και αν σχεδιαστεί και χρησιμοποιηθεί τέλεια, μπορεί να καταγράψει την μέτρησή της με πεπερασμένη ακρίβεια.

Ένας τρόπος για να το κατανοήσουμε αυτό είναι να αναγνωρίσουμε ότι για να καταγραφεί μια μέτρηση με άπειρη ακρίβεια, η συσκευή θα απαιτούσε ένα μέσο καταγραφής ικανό να απεικονίζει άπειρο αριθμό ψηφίων. Χρησιμοποιώντας πιο ακριβείς μετρητικές συσκευές, η απροσδιοριστία

(αβεβαιότητα) στις μετρήσεις μπορεί να γίνει όσο μικρή μας χρειάζεται για κάποιο ιδιαίτερο σκοπό, αλλά δεν μπορεί ποτέ να εξαλειφθεί τελείως, ούτε ως θεωρητική σκέψη.

Στη δυναμική η παρουσία της απροσδιοριστίας σε κάθε πραγματική μέτρηση σημαίνει ότι κατά τη μελέτη οποιοδήποτε συστήματος, οι αρχικές συνθήκες δεν μπορούν να καθοριστούν με άπειρη ακρίβεια.

Κατά τη μελέτη των κινήσεων με τη χρήση των νόμων του Νεύτωνα, η απροσδιοριστία που είναι παρούσα στις αρχικές συνθήκες του συστήματος μας οδηγεί σε μια αντίστοιχη απροσδιοριστία, άσχετα αν είναι μικρή ή μεγάλη, στο πεδίο των προγνώσεών μας για κάθε κατοπινή ή προηγούμενη χρονική στιγμή.

Κατά το μεγαλύτερο μέρος της σύγχρονης ιστορίας της φυσικής, έχει υποτεθεί ότι είναι δυνατόν να συρρικνωθεί η αβεβαιότητα κατά την τελική δυναμική πρόγνωση, αρκεί να μετρήσουμε τις αρχικές συνθήκες με όλο και μεγαλύτερη ακρίβεια. Έτσι κατά την μελέτη της κίνησης ενός πυραύλου για παράδειγμα, κάποιος θα μπορούσε να γνωρίζει την τελική θέση του πυραύλου με ακρίβεια δέκα φορές μεγαλύτερη αρκεί να καθορίσει τις αρχικές συνθήκες της εκτόξευσης με δέκα φορές μεγαλύτερη ακρίβεια.

Είναι σημαντικό να θυμόμαστε ότι η απροσδιοριστία στο δυναμικό αποτέλεσμα δεν προέρχεται από κάποια τυχαιότητα στις εξισώσεις της κίνησης- αφού αυτές είναι τελείως ντετερμινιστικές- αλλά μάλλον από την έλλειψη της άπειρης ακρίβειας κατά τις αρχικές συνθήκες.

Ο ανομολόγητος σκοπός της πειραματικής επιστήμης είναι, καθώς τα όργανα των μετρήσεων γίνονται όλο και ακριβέστερα με την τεχνολογία, η ακρίβεια των προβλέψεων που γίνονται καθώς εφαρμόζουμε τους νόμους της δυναμικής θα γίνεται όλο και πιο μεγάλη, τείνοντας αλλά μη φθάνοντας ποτέ στην απόλυτη ακρίβεια.

Έχοντας καταλάβει τι εννοούμε με τον Ντετερμινισμό, τις αρχικές συνθήκες και την απροσδιοριστία των μετρήσεων, μπορούμε τώρα να μάθουμε για τη δυναμική αστάθεια, η οποία για τους περισσότερους φυσικούς είναι ταυτόσημη με το χάος.

Η δυναμική αστάθεια αναφέρεται σε μια ειδική συμπεριφορά στον χρόνο η οποία συναντάται σε ορισμένα φυσικά συστήματα και ανακαλύφθηκε γύρω στο έτος 1900, από τον φυσικό Henri Poincare. Ο Poincare ήταν ο φυσικός που ενδιαφέρθηκε για τις μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν την κίνηση των πλανητών γύρω από τον Ήλιο. Οι εξισώσεις της κίνησης των πλανητών είναι μια εφαρμογή των Νευτώνειων νόμων και ως εκ τούτου τελείως ντετερμινιστικές. Το ότι αυτές οι μαθηματικές εξισώσεις των τροχιών είναι ντετερμινιστικές σημαίνει ότι γνωρίζοντας τις αρχικές συνθήκες,- οι οποίες στην περίπτωση αυτή είναι οι θέσεις και οι ταχύτητες των πλανητών μια δεδομένη αρχική στιγμή - μπορούμε να βρούμε τις θέσεις και τις ταχύτητες των πλανητών σε κάθε άλλη χρονική στιγμή στο μέλλον ή στο παρελθόν.

Φυσικά είναι αδύνατον να μετρήσουμε τις αρχικές θέσεις και ταχύτητες των πλανητών με άπειρη ακρίβεια, ακόμα και αν διαθέτουμε τέλειες συσκευές μέτρησης, απλά και μόνο επειδή είναι αδύνατο να καταγραφεί κάθε μέτρηση με άπειρη ακρίβεια. Ως εκ τούτου πάντα υπάρχει μια ανακρίβεια, οσοδήποτε μικρή, σε όλες τις αστρονομικές προβλέψεις που γίνονται από τις εξισώσεις των νόμων του Νεύτωνα.

Μέχρι τον καιρό του Poincare, η έλλειψη άπειρης ακρίβειας στις αστρονομικές προβλέψεις εθεωρείτο πρόβλημα μικρής σημασίας, λόγω μιας σιωπηρής υπόθεσης όλων των φυσικών μέχρι την εποχή εκείνη. Η υπόθεση ήταν ότι αν μπορούσαμε να μικρύνουμε την απροσδιοριστία στις αρχικές συνθήκες - ίσως χρησιμοποιώντας τελειότερα όργανα - η ανακρίβεια στην πρόβλεψη θα μίκραινε κατά τον ίδιο τρόπο. Με άλλα λόγια, βάζοντας περισσότερο ακριβείς πληροφορίες στους νόμους του Νεύτωνα, παίρνεις πιο ακριβή αποτελέσματα για κάθε μεταγενέστερη ή προηγούμενη στιγμή. Έτσι υπέθεταν όλοι ότι θεωρητικά ήταν δυνατόν να πετύχουμε σχεδόν τέλειες προβλέψεις για τη συμπεριφορά κάθε φυσικού συστήματος.

Ο Poincare όμως παρατήρησε ότι ορισμένα αστρονομικά συστήματα δεν φαίνονταν να υπακούουν τον κανόνα ότι ελαττώνοντας την απροσδιοριστία των αρχικών συνθηκών ελαττωνόταν επίσης κατ' αντίστοιχο τρόπο η απροσδιοριστία της τελικής πρόβλεψης. Εξετάζοντας τις μαθηματικές εξισώσεις αυτός βρήκε ότι αν και ορισμένα απλά αστρονομικά συστήματα υπάκουαν στον κανόνα των αντίστοιχων ελαττώσεων των απροσδιοριστιών για τις αρχικές συνθήκες και τις τελικές προβλέψεις, άλλα συστήματα δεν υπάκουαν σ' αυτόν.

Τα αστρονομικά συστήματα που δεν υπάκουαν σ' αυτόν τον κανόνα αποτελούνταν τυπικά από τρία ή περισσότερα αστρονομικά σώματα με αλληλεπιδράσεις μεταξύ και των τριών. Γι αυτούς τους τύπους συστημάτων ο Poincare έδειξε ότι μια πολύ μικρή ανακρίβεια στις αρχικές συνθήκες, αυξανόταν με τον χρόνο με τεράστιο ρυθμό. Έτσι δύο σχεδόν πανομοιότυπα σύνολα αρχικών συνθηκών για το ίδιο σύστημα, θα κατέληγαν σε δύο τελικές προβλέψεις οι οποίες διέφεραν πάρα πολύ ή μία από την άλλη.

Ο Poincare απέδειξε μαθηματικά ότι αυτή η μεγέθυνση μικρών απροσδιοριστιών στις αρχικές συνθήκες σε τεράστιες απροσδιοριστίες στις τελικές προβλέψεις, παρέμενε ακόμα και αν οι αρχικές αβεβαιότητες μίκραιναν στο πιο μικρό μέγεθος που μπορούσαμε να φανταστούμε.

Γι αυτά τα συστήματα δηλαδή, ακόμα και αν μπορούσαμε να καθορίσουμε τις αρχικές μετρήσεις εκατό φορές ή ένα εκατομμύριο φορές ακριβέστερα, η αβεβαιότητα για μεταγενέστερους ή προηγούμενους χρόνους δεν θα ελαττωνόταν αλλά θα παρέμενε τεράστια.

Το συμπέρασμα της μαθηματικής ανάλυσης του Poincare ήταν μια απόδειξη ότι γι αυτά τα σύνθετα συστήματα, ο μόνος τρόπος να πετύχουμε προβλέψεις με κάποιο βαθμό ακρίβειας, θα ήταν να καθορίσουμε τις αρχικές συνθήκες με άπειρο βαθμό ακρίβειας. Γι αυτά τα αστρονομικά συστήματα κάθε ανακρίβεια οσοδήποτε μικρή θα κατέληγε μετά από ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα σε μια αβεβαιότητα της ντετερμινιστικής πρόβλεψης η οποία μόλις που θα ήταν μικρότερη αν η πρόβλεψη είχε γίνει τελείως στην τύχη.

Η ακραία ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες, η οποία παρουσιάζεται μαθηματικά στα συστήματα που μελέτησε ο Poincare έχει επικρατήσει να λέγεται δυναμική αστάθεια ή απλά χάος.

Επειδή μακροχρόνιες μαθηματικές προβλέψεις που αφορούν χαοτικά συστήματα δεν έχουν περισσότερη ακρίβεια από τις προβλέψεις στην τύχη, οι εξισώσεις κίνησης μπορούν να δώσουν μόνο βραχυχρόνιες προβλέψεις που να έχουν όποιο βαθμό ακρίβειας επιθυμούμε.

Αν και η εργασία του Poincare θεωρήθηκε σημαντική από μερικούς διορατικούς φυσικούς του καιρού του, πολλές δεκαετίες θα περνούσαν πριν οι συνέπειες των

ανακαλύψεών του να αναγνωριστούν από την επιστημονική κοινότητα συνολικά. Ένας λόγος ήταν ότι αρκετό μέρος της επιστημονικής κοινότητας των φυσικών ήταν απασχολημένο με τις νέες ανακαλύψεις στον καινούριο κλάδο της φυσικής, την κβαντομηχανική, η οποία είναι η φυσική στον ατομικό κόσμο.

Στα πρώτα 4 μαθήματα μάθαμε ότι σε ένα χαοτικό σύστημα, το να χρησιμοποιήσουμε τους νόμους της φυσικής για να κάνουμε ακριβείς μακροχρόνιες προβλέψεις είναι αδύνατον, ακόμα και θεωρητικά. Το να κάνουμε μακροχρόνιες προβλέψεις με οποιονδήποτε βαθμό ακρίβειας, θα απαιτούσε να δοθούν οι αρχικές συνθήκες με άπειρη ακρίβεια.

Τον καιρό της ανακάλυψής του, το φαινόμενο της χαοτικής κίνησης εθεωρείτο σαν μια μαθηματική παραξενιά. Στις δεκαετίες που πέρασαν από τότε, οι φυσικοί ανακάλυψαν ότι η χαοτική συμπεριφορά είναι ένα πολύ διαδεδομένο φαινόμενο, και ίσως να αποτελεί τον κανόνα στο Σύμπαν.

Μια πολύ σπουδαία ανακάλυψη έγινε το 1963, από τον μετεωρολόγο Edward Lorenz, ο οποίος έγραψε ένα βασικό μαθηματικό υπολογιστικό πρόγραμμα για να μελετήσει ένα απλουστευμένο μοντέλο για τον καιρό. Πιο συγκεκριμένα ο Lorenz μελέτησε ένα υπεραπλουστευμένο μοντέλο πως ένα αέριο ρεύμα θα ανερχόταν και θα έπεφτε καθώς θερμαινόταν από τον Ήλιο. Ο κώδικας του Lorenz για τον υπολογιστή περιείχε τις μαθηματικές εξισώσεις που ρυθμίζουν τη ροή των αέριων ρευμάτων. Αφού λοιπόν ο κώδικας για τον υπολογιστή είναι πραγματικά ντετερμινιστικός, ο Lorenz περίμενε ότι εισάγοντας τις ίδιες αρχικές τιμές, θα έπαιρνε ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα όταν έτρεχε το πρόγραμμα.

Με έκπληξή του είδε όμως ότι όταν έβαζε αυτές που νόμιζε ως ίδιες αρχικές τιμές, έπαιρνε ένα δραστικά διαφορετικό αποτέλεσμα κάθε φορά. Εξετάζοντας την κατάσταση με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, αναγνώρισε ότι δεν έβαζε τις ίδιες ακριβώς αρχικές τιμές κάθε φορά, αλλά κάποιες που διέφεραν ελαφρά μεταξύ τους. Δεν παρατηρούσε ότι αυτές ήταν διαφορετικές διότι η διαφορά ήταν απίστευτα μικρή, τόσο μικρή ώστε να θεωρείται μικροσκοπική και αμελητέα σύμφωνα με τα συνηθισμένα standards. Τα μαθηματικά που περιείχονταν στο μοντέλο του Lorenz για τα ατμοσφαιρικά ρεύματα μελετήθηκαν πλατεία την δεκαετία του 70. Προοδευτικά έγινε γνωστό ότι ακόμη και η πιο μικρή διαφορά μεταξύ δύο συνόλων τιμών στις αρχικές συνθήκες θα έχει ως αποτέλεσμα πάντα μια τεράστια διαφορά στις προβλέψεις του μέλλοντος ή του παρελθόντος, κάτι που αποτελεί φυσικά το σήμα κατατεθέν των χαοτικών συστημάτων.

Οι επιστήμονες τώρα πιστεύουν ότι όπως το απλό υπολογιστικό μοντέλο του Lorenz για τα αέρια ρεύματα, ο καιρός ως σύνολο είναι ένα χαοτικό σύστημα.

Αυτό σημαίνει ότι προκειμένου να κάνουμε μακροχρόνιες προβλέψεις καιρού με όποιο βαθμό ακρίβειας επιθυμούμε, θα ήταν αναγκαίο να πάρουμε ένα άπειρο αριθμό μετρήσεων. Ακόμα και αν ήταν δυνατόν να γεμίσουμε όλη την ατμόσφαιρα της Γης με ένα τρομερά μεγάλο δίκτυο μετρητικών συσκευών,- στην περίπτωση αυτή θερμομέτρα, ανεμόμετρα και βαρόμετρα - η αβεβαιότητα στις αρχικές

συνθήκες θα προέκυπτε από τις μικρές διακυμάνσεις στις μετρούμενες τιμές μεταξύ των οργάνων του δικτύου.

Επειδή η ατμόσφαιρα είναι χαοτική, αυτές οι αβεβαιότητες, οσοδήποτε μικρές και αν είναι, θα υπερνικούσαν τελικά οποιουσδήποτε υπολογισμούς και θα έκαναν ανακριβή την πρόβλεψη. Αυτή η αρχή είναι συχνά γνωστή ως " το φαινόμενο της πεταλούδας". Με όρους της πρόβλεψης καιρού το "φαινόμενο της πεταλούδας" αναφέρεται στην ιδέα ότι αν μια πεταλούδα χτυπάει τα φτερά της σε κάποιο μέρος του κόσμου μπορεί να φέρει διαφορά στο αν θα έρθει ή όχι καταιγίδα μετά από ένα χρόνο στην άλλη μεριά της Γης.

Εξαιτίας "του φαινομένου της πεταλούδας", σήμερα είναι παραδεκτό ότι οι προβλέψεις καιρού μπορεί να είναι ακριβείς μόνο βραχυχρόνια, και ότι οι μακροχρόνιες προβλέψεις, ακόμα και αν γίνονται με τις πιο εξεζητημένες υπολογιστικές μεθόδους που μπορούμε να φανταστούμε, δεν θα είναι καλύτερες από απλές μαντεψιές.

Έτσι λοιπόν η ύπαρξη χαοτικών συστημάτων στη φύση μοιάζει να θέτει ένα όριο στη δυνατότητά μας να εφαρμόζουμε ντετερμινιστικούς φυσικούς νόμους για να προβλέψουμε κινήσεις με τον επιθυμητό βαθμό βεβαιότητας. Η ανακάλυψη του χάους μοιάζει να υπαινίσσεται ότι το τυχαίο κατοικεί μέσα στον πυρήνα οποιουδήποτε ντετερμινιστικού μοντέλου του Σύμπαντος.

Εξαιτίας αυτού του γεγονότος, μερικοί επιστήμονες έχουν αρχίσει να αναρωτιούνται αν έχει καθόλου νόημα ή όχι, να λέμε ότι το Σύμπαν είναι ντετερμινιστικό στη συμπεριφορά του. Αυτή είναι μια ανοικτή ερώτηση η οποία μπορεί να απαντηθεί εν μέρει καθώς η επιστήμη μαθαίνει όλο και πιο πολλά για το πώς λειτουργούν τα χαοτικά συστήματα.

Ένα από τα πιο ενδιαφέροντα θέματα στη μελέτη των χαοτικών συστημάτων είναι αν μπορεί η όχι η παρουσία του χάους να παράγει δομές και μορφές με τάξη σε μια μεγαλύτερη κλίμακα. Μερικοί επιστήμονες προβλέπουν ότι η παρουσία του χάους - δηλαδή η τυχαία έκβαση των ντετερμινιστικών νόμων της φυσικής σε μικροσκοπικό επίπεδο - μπορεί πραγματικά να είναι αναγκαία για να αναδυθούν φυσικοί σχηματισμοί με τάξη σε μεγαλύτερη κλίμακα.

Πρόσφατα, μερικοί επιστήμονες τείνουν να πιστέψουν ότι η παρουσία του χάους στη φυσική είναι ακριβώς αυτό που δίνει στο Σύμπαν το "βέλος του Χρόνου", δηλαδή το μη αντιστρεπτό πέρασμα από το παρελθόν στο μέλλον.

Καθώς η μελέτη του χάους στη φυσική εισέρχεται στο δεύτερο αιώνα της, το ζήτημα αν το Σύμπαν είναι πραγματικά ντετερμινιστικό αποτελεί ακόμη ένα ανοικτό ζήτημα και αναμφίβολα θα παραμείνει ανοικτό, έστω και αν κατανοούμε όλο και περισσότερο τη δυναμική των χαοτικών συστημάτων.