

Το χάος ελευθερώνει το σύμπαν*

Το χάος φαίνεται να παρέχει μια γέφυρα ανάμεσα στους αιτιοκρατικούς νόμους της φυσικής και στους νόμους της τύχης, υποδηλώνοντας ότι το Σύμπαν είναι γνήσια δημιουργικό και ότι η έννοια της ελεύθερης βούλησης είναι αληθινή.

*Paul Davies***

Η επιστήμη στο σύνολό της στηρίζεται στην υπόθεση ότι στο φυσικό κόσμο υπάρχει τάξη. Η πιο ισχυρή έκφραση αυτής της τάξης συναντιέται στους νόμους της φυσικής. Κανείς δεν ξέρει από πού προέρχονται αυτοί οι νόμοι, ούτε γιατί, από ό,τι φαίνεται, λειτουργούν παγκόσμια και αμείωτα, αλλά τους βλέπουμε να λειτουργούν γύρω μας: στην περιοδικότητα της νύχτας και της μέρας, στον τύπο των πλανητικών κινήσεων, στην κανονικότητα του κτυπήματος ενός ρολογιού.

Η κανονισμένη αξιοπιστία της φύσης δεν είναι, εν τούτοις, πανταχού παρούσα. Οι ιδιοτροπίες του καιρού, οι καταστροφές από σεισμούς, ή η πτώση ενός μετεωρίτη, όλα αυτά μοιάζουν να είναι αυθαίρετα και τυχαία. Καθόλου παράξενο που οι πρόγονοί μας απέδιδαν αυτά τα γεγονότα στην ιδιοτροπία των θεών. Πώς όμως μπορούμε να συμφιλιώσουμε αυτές τις προφανώς τυχαίες "ενέργειες των θεών" με την υποτιθέμενη βαθύτερη νομοτέλεια του Σύμπαντος;

* Το παρόν άρθρο με τίτλο: "Chaos Frees the Universe", είναι το τελευταίο μιας σειράς άρθρων του περιοδικού *New Scientist*, που θα εμφανιστεί με τη μορφή βιβλίου στο προσεχές μέλλον.

** Ο Paul Davies είναι καθηγητής της μαθηματικής φυσικής στο Πανεπιστήμιο της Αδελαΐδος και συγγραφέας του βιβλίου *The Cosmic Blueprint*.

Οι αρχαίοι Έλληνες φιλόσοφοι έβλεπαν τον κόσμο ως πεδίο μάχης ανάμεσα στις δυνάμεις της τάξης που παράγουν τον κόσμο και σ' εκείνες της αταξίας που οδηγούν στο χάος. Πίστευαν ότι οι τυχαίες κ' άτακτες διαδικασίες ήταν αρνητικές επιρροές του Κακού. Σήμερα δεν βλέπουμε το ρόλο της τύχης στη φύση ως κακόβουλο, αλλά απλά ως τυφλό. Ένα τυχαίο γεγονός μπορεί να λειτουργήσει εποικοδομητικά, όπως κατά τη βιολογική εξέλιξη, ή καταστροφικά, όπως όταν ένα αεροπλάνο πέφτει από φθορά των μετάλλων του.

Αν και τα ατομικά τυχαία γεγονότα μπορεί να δίνουν την εντύπωση της αταξίας, οι άτακτες διαδικασίες σαν σύνολο, μπορούν κατά κάποιο τρόπο να επιδείξουν στατιστικές κανονικότητες. Πράγματι, οι διευθυντές καζίνων δίνουν τόση πίστη στους νόμους της τύχης όσο και οι μηχανικοί στους νόμους της φυσικής. Αλλά αυτό ανεγείρει ένα παράδοξο. Πώς είναι δυνατόν οι ίδιες διαδικασίες της φυσικής να υπακούουν και στους φυσικούς νόμους και στους νόμους της τύχης;

Ακολουθώντας τη διατύπωση των νόμων της μηχανικής από το Νεύτωνα το 17ο αιώνα, οι επιστήμονες εξοικειώθηκαν με την ιδέα ενός σύμπαντος ως γιγαντιαίου μηχανισμού. Η πιο ακραία μορφή αυτής της θεωρίας αναπτύχθηκε εντυπωσιακά από τον Πιέρ Σιμόν ντε Λαπλάς το 19ο αιώνα. Φαντάστηκε κάθε μόριο της ύλης ως σταθερά εγκλωβισμένο στους κόλπους των αυστηρών μαθηματικών νόμων της κίνησης. Αυτοί οι νόμοι υπαγόρευαν τη συμπεριφορά ακόμη και του μικρότερου ατόμου στην παραμικρή λεπτομέρεια. Ο Λαπλάς υποστήριξε ότι, με δεδομένη την κατάσταση του Σύμπαντος κάθε στιγμή, ολόκληρο το κοσμικό μέλλον θα ήταν ενιαία διευθετημένο με άπειρη ακρίβεια, από τους νόμους του Νεύτωνα.

Η αντίληψη του Σύμπαντος ως μιας αυστηρά αιτιοκρατικής μηχανής που κυβερνάται από αιώνιους νόμους, επηρέασε βαθιά την επιστημονική σκέψη, καθώς βρισκόταν στους αντίποδες της παλιάς Αριστοτελικής εικόνας του κόσμου ως ζωντανού οργανισμού.

Μια μηχανή δεν μπορεί να έχει "ελεύθερη βούληση": το μέλλον της είναι αυστηρά καθορισμένο από την αρχή του χρόνου. Πράγματι, ο χρόνος παύει να έχει πολλή φυσική σημασία σ' αυτήν την εικόνα, αφού το μέλλον ήδη εμπεριέχεται στο παρόν. Όπως η Ίλια Πριγκονίνα – μια θεωρητική χημικός στο Πανεπιστήμιο των Βρυξελλών – έχει εύγλωττα εκφράσει, ο Θεός έχει περιοριστεί σ' έναν απλό αρχειοθέτη, που γυρνάει τις σελίδες ενός κοσμικού ιστορικού βιβλίου που έχει ήδη γραφτεί.

Απόλυτη σ' αυτήν την κάπως σκοτεινή μηχανιστική εικόνα ήταν η πίστη ότι δεν υπάρχουν στην πραγματικότητα αληθινά τυχαίες διαδικασίες στη φύση. Κάποια γεγονότα μπορεί να μας φαίνονται τυχαία, αλλά ήταν δικαιολογημένο, ότι αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί στην ανθρώπινη άγνοια των λεπτομερειών των σχετικών διαδικασιών. Ας πάρουμε για παράδειγμα την κίνηση Brown. Ένα μικροσκοπικό μόριο που αιωρείται σ' ένα υγρό, μπορούμε να το παρατηρήσουμε να εκτελεί μια τυχαία τεθλασμένη κίνηση ως αποτέλεσμα των ελαφρών ακανόνιστων κτυπημάτων που υφίσταται από τα μόρια του υγρού που το βομβαρδίζουν. Η κίνηση Brown είναι μια αρχετυπικά τυχαία και απρόβλεπτη διαδικασία. Όμως, σύμφωνα με το επιχειρήμα, αν μπορούσαμε ν' ακολουθήσουμε λεπτομερώς τις ενέργειες όλων των ατομικών μορίων που παίρνουν μέρος στο φαινόμενο, η κίνηση Brown θα ήταν στο σύνολό της τόσο προβλέψιμη και αιτιοκρατική όσο και η κίνηση του ρολογιού. Η φανερά τυχαία κίνηση του μορίου (στο φαινόμενο του Brown) αποδίδεται αποκλειστικά στην έλλειψη πληροφοριών για τις μυριάδες των συμμετοχόντων μορίων, που προκύπτει από το γεγονός ότι οι αισθήσεις μας δεν είναι τόσο οξείες ώστε να επιτρέπουν τη λεπτομερή παρατήρηση σε μοριακό επίπεδο.

Για ένα διάστημα έγινε ευρέως αποδεκτό ότι τα φανερά "τυχαία" γεγονότα ήταν πάντα αποτέλεσμα των άγνωστων σε μας άπειρων αριθμών κρυμμένων μεταβλητών ή βαθμών ελευθερίας. Το στρίψιμο ενός νομίσματος ή το ρίξιμο ενός ζαριού, το γύρισμα ενός τροχού ρουλέττας – όλα αυτά δεν θα φαίνονται πια τυχαία, αν μπορούσαμε να παρατηρήσουμε τον κόσμο σε μοριακό επίπεδο. Η δουλική συμμόρφωση της κοσμικής μηχανής εξασφάλιζε ότι αυτή η νομοτέλεια ήταν παρούσα ακόμα και στο πιο τυχαίο γεγονός αν και μέσα από μια τρομερά πολύπλοκη κατάσταση.

Δυο μεγάλα επιτεύγματα του 20ου αιώνα έχουν όμως θέσει τελεία και παύλα στην ιδέα ενός Σύμπαντος με κίνηση ρολογιού. Πρώτα η κβαντομηχανική. Στο κέντρο της κβαντομηχανικής βρίσκεται η αρχή της απροσδιοριστίας του Χάϊζενμπεργκ, που ισχυρίζεται ότι κάθε τι μετρήσιμο υπόκειται σε πραγματικά τυχαίες διακυμάνσεις. Οι κβαντικές διακυμάνσεις δεν είναι αποτέλεσμα των ανθρώπινων περιορισμών ή κρυμμένων βαθμών ελευθερίας· είναι σύμφυτες με τις λειτουργίες της φύσης σε μια ατομική κλίμακα. Για παράδειγμα η ακριβής στιγμή της αποσύνθεσης ενός ειδικού ραδιενεργού πυρήνα είναι ουσιαστικά απροσδιόριστη. Ένα στοιχείο αυθεντικής αδυναμίας καθορισμού αποδίδεται έτσι στη φύση.

Ανεξάρτητα από την αρχή της απροσδιοριστίας, παραμένει μια αίσθηση ότι η κβαντομηχανική είναι ακόμη μια αιτιοκρατική θεωρία. Παρόλο που το αποτέλεσμα μιας ειδικής κβαντικής διαδικασίας μπορεί να μην είναι αιτιοκρατικό, οι σχετικές πιθανότητες διαφορετικών αποτελεσμάτων αναπτύσσονται μ' ένα αιτιοκρατικό τρόπο. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορούμε να ξέρουμε για κάθε ειδική περίπτωση ποιο θα είναι το αποτέλεσμα "του ριξίματος του κβαντικού ζαριού", αλλά μπορούμε να ξέρουμε με απόλυτη ακρίβεια τους τρόπους με τους οποίους οι πιθανότητες του στοιχήματος ποικίλλουν από στιγμή σε στιγμή. Ως στατιστική θεωρία, η κβαντομηχανική παραμένει αιτιοκρατική. Έτσι, η κβαντομηχανική φέρνει το τυχαίο στο κέντρο του οικοδήματος της πραγματικότητας, αλλά τα ίχνη της κοσμοθεωρίας του Νεύτωνα και του Λαπλάς παραμένουν.

Έπειτα ήρθε το Χάος

Έπειτα ήρθε το χάος. Όπως έχει συζητηθεί σε προηγούμενα άρθρα αυτής της σειράς, οι θεμελιώδεις ιδέες για το χάος έχουν ήδη εκτεθεί στο έργο του μαθηματικού Ανρί Πουανκαρέ, στο τέλος του 19ου αιώνα, αλλά μόνο τα τελευταία χρόνια ειδικά με τη δημιουργία των γρήγορων ηλεκτρονικών υπολογιστών, οι άνθρωποι έχουν εκτιμήσει τη συνολική σπουδαιότητα της θεωρίας του χάους.

Το βασικό χαρακτηριστικό μιας τέτοιας χαώδους διαδικασίας, αφορά στον τρόπο που τα λάθη πρόβλεψης σχετίζονται με το χρόνο. Ας δώσουμε πρώτα ένα παράδειγμα μη-χαώδους συστήματος: η κίνηση ενός απλού εκκρεμούς. Φανταστείτε δυο παρόμοια εκκρεμή να αιωρούνται με τον ίδιο ακριβώς συγχρονισμό. Υποθέστε ότι το ένα εκκρεμές διαταράσσεται ελάχιστα ώστε η κίνησή του να ξεφεύγει λίγο από αυτήν του άλλου εκκρεμούς. Αυτή η ασυμφωνία ή μετατόπιση φάσης, παραμένει μικρή καθώς τα εκκρεμή συνεχίζουν να αιωρούνται.

Αν κάποιος επιχειρήσει να προβλέψει την κίνηση ενός απλού εκκρεμούς, μπορεί να μετρήσει τη θέση και την ταχύτητα του άξονα σε μια δεδομένη στιγμή και να χρησιμοποιήσει τους νόμους του Νεύτωνα για να υπολογίσει τη μετέπειτα συμπεριφορά του εκκρεμούς. Κάθε λάθος στην αρχική μέτρηση πολλαπλασιάζεται μέσα από τον υπολογισμό και παρουσιάζεται ως λάθος στην πρόβλεψη. Για το απλό εκκρεμές, ένα μικρό λάθος στα εισαγόμενα στοιχεία, υποδηλώνει ένα μικρό λάθος στο εξαγόμενο απο-

τέλεσμα σχετικά με τη μελέτη πρόβλεψης. Σ' ένα τυπικό μη-χαώδες σύστημα, τα λάθη συσσωρεύονται με το χρόνο. Ένα αποφασιστικό σημείο όμως, είναι το ότι τα λάθη αυξάνονται μόνο σ' αναλογία με το χρόνο (ή με μια μικρή δύναμη σχετική μ' αυτόν), και έτσι παραμένουν σχετικά εύκολα στη διευθέτησή τους.

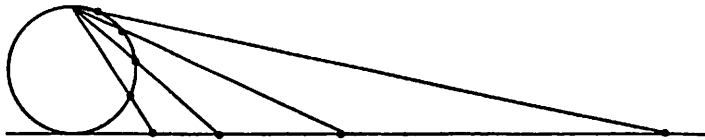
Τώρα ας αντιδιαστείλουμε αυτήν την ιδιότητα μ' εκείνην του χαώδους συστήματος. Εδώ, μια μικρή αρχική διαφοροποίηση ανάμεσα στα δυο παρόμοια συστήματα θα αυξηθεί ταχύτατα. Στην πραγματικότητα το σήμα κατατεθέν του χάους είναι το γεγονός ότι οι κινήσεις αποκλίνουν πάρα πολύ γρήγορα. Αυτό, μεταφρασμένο σε ζήτημα πρόβλεψης, σημαίνει ότι ένα λάθος στο εισαγόμενο στοιχείο πολλαπλασιάζεται μ' έναν κλιμακωτό ρυθμό ως λειτουργία ενός χρόνου πρόβλεψης έτσι, ώστε μέχρι να ενσωματωθεί αρκετά στον υπολογισμό η ικανότητα πρόβλεψης να έχει χαθεί. Έτσι, μικρά λάθη εισαγόμενων δεδομένων αυξάνονται σε μέγεθος ακατάλληλο για υπολογισμό με πολύ περιορισμένη τάξη.

Η διάκριση ανάμεσα στη χαώδη και μη-χαώδη συμπεριφορά απεικονίζεται με επιτυχία στην περίπτωση του σφαιρικού εκκρεμούς – αυτό είναι ένα εκκρεμές ελεύθερο να αιωρείται σε δυο κατευθύνσεις (βλ. *New Scientist*, "Το χάος στην αιώρηση ενός εκκρεμούς", 24 Ιουλίου 1986). Στην πράξη, αυτό μπορεί να είναι μια μπάλλα που κρέμεται στο άκρο ενός σύρματος. Αν το σύστημα κινητοποιηθεί από μια περιοδική κίνηση που εφαρμόζεται στον άξονα, θ' αρχίσει να αιωρείται. Μετά από λίγο θα προσαρμοστεί σ' ένα σταθερό και εξ' ολοκλήρου προβλέψιμο πρότυπο κίνησης, με το οποίο, το άκρο διαγράφει μια ελλειπτική πορεία με τη συχνότητα ώθησης. Εν τούτοις, αν αλλάξουμε τη συχνότητα ώθησης ελαφρά, αυτή η κανονική κίνηση μπορεί να δώσει τη θέση της στο χάος, με το άκρο να αιωρείται πρώτα προς τη μια κατεύθυνση και μετά προς την άλλη, εκτελώντας μερικές στροφές με φορά των δεικτών του ρολογιού, έπειτα μερικές στροφές αντίθετες με τη φορά των δεικτών του ρολογιού, μ' έναν φανερά τυχαίο τρόπο.

Το "τυχαίο" αυτού του συστήματος δεν προκύπτει από την επίδραση των χιλιάδων κρυμμένων βαθμών ελευθερίας. Πράγματι, παριστάνοντας μαθηματικά μόνο τους τρεις βαθμούς ελευθερίας που μπορούμε να παρατηρήσουμε (τις 3 δυνατές κατευθύνσεις της κίνησης), μπορούμε να δείξουμε ότι η συμπεριφορά του εκκρεμούς είναι τυχαία. Και αυτό, σε αντίθεση με το γεγονός ότι η σχετική μαθηματική παράσταση είναι αυστηρά αιτιοκρατική.

Συνηθιζόταν η υπόθεση ότι ο αιτιοκρατισμός πήγαινε χέρι-

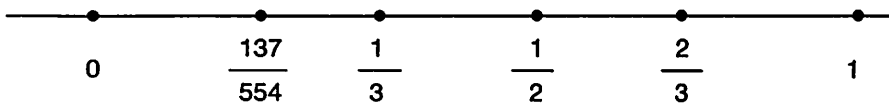
χέρι με την ικανότητα πρόβλεψης, αλλά τώρα μπορούμε να δούμε ότι δεν είναι αυτό το πρόβλημα. Σ' ένα αιτιοκρατικό σύστημα, οι μελλοντικές καταστάσεις είναι απόλυτα καθορισμένες, μέσα από κάποιο δυναμικό νόμο, από προηγούμενες καταστάσεις. Υπάρχει, λοιπόν, μια ένα-προς-ένα σχέση ανάμεσα σε προηγούμενες και υστερότερες καταστάσεις. Με όρους υπολογισμού, αυτό, προτείνει μια ένα-προς-ένα σχέση ανάμεσα στο εισαγόμενο και το εξαγόμενο ενός υπολογισμού πρόβλεψης. Αλλά τώρα πρέπει να θυμηθούμε ότι κάθε προβλεπτική μελέτη θα περιέχει κάποια λάθη εισαγόμενου επειδή δεν μπορούμε να μετρήσουμε τις φυσικές ποσότητες με απεριόριστη ακρίβεια. Επιπλέον, οι κομπιούτερς μπορούν να χειριστούν μόνο ορισμένες ποσότητες δεδομένων.



Η κατάσταση παριστάνεται γεωμετρικά στο παραπάνω σχήμα. Η δέσμη από ευθείες γραμμές θεμελιώνει μια ένα-προς-ένα ανταπόκριση ανάμεσα στα σημεία του τόξου του κύκλου και στα σημεία της οριζόντιας γραμμής. Σε μια εξιδανικευμένη περίπτωση τέλειων γεωμετρικών μορφών που ν' αποτελούν απειροελάχιστα λεπτές συνεχόμενες γραμμές και σημεία μηδενικού μεγέθους, αυτή η ανταπόκριση έχει νόημα. Αλλά καμιά αληθινή γεωμετρική μορφή δεν μπορεί να είναι έτσι. Όσο πλησιάζουν την κορυφή του κύκλου, τόσο τα σημεία ενός όλο και μικρότερου τόξου συσχετίζονται με όλο και μεγαλύτερο τμήμα της οριζόντιας γραμμής.

(Ας σκεφτούμε τα σημεία κοντά στην κορυφή του τόξου ως ανάλογα στις αρχικές συνθήκες ενός χαώδους συστήματος και τα σημεία προς τα δεξιά της οριζόντιας γραμμής ως προβλεπόμενες τιμές σε όλο και πιο κατοπινούς χρόνους). Η ελάχιστη αβεβαιότητα για τη θέση ενός σημείου στο τόξο οδηγεί σε μια μέγιστη αβεβαιότητα για το αντίστοιχο σημείο στο τμήμα της ευθείας. Η ένα-προς-ένα συσχέτιση καταλήγει να στερείται νοήματος.

Αυτό θα μπορούσαμε να το ονομάσουμε, ο μύθος της πραγματικής γραμμής.



Οι αρχαίοι Έλληνες κατάλαβαν ότι μπορούσαν να ονομάσουν τα σημεία σε μια γραμμή με αριθμούς, σύμφωνα με την απόστασή τους από το ένα άκρο. Το παραπάνω σχήμα δείχνει ένα τμήμα από το 0 μέχρι το 1. Τα κλάσματα όπως $\frac{2}{3}$ και $\frac{137}{554}$ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ονομάσουν τα ενδιάμεσα σημεία. Οι Έλληνες ονομάζουν αυτούς τους αριθμούς "ρητούς". Χρησιμοποιώντας αρκετά ψηφία στους αριθμητές και παρονομαστές μπορούμε να διαλέξουμε ένα κλάσμα που να σημειώνει μια θέση πολύ κοντά σε κάθε καθορισμένο σημείο της γραμμής. Ωστόσο γρήγορα φαίνεται ότι τα συνεχόμενα τμήματα της γραμμής δεν μπορούν να έχουν όλα τα σημεία τους με τέτοιες ονομασίες. Αυτό απαιτεί όχι μόνο όλους τους δυνατούς ρητούς αριθμούς, αλλά και όλους τους άρρητους. Ένας άρρητος αριθμός δεν μπορεί να εκφραστεί σαν ένας ολόκληρος αριθμός διαιρεμένος από κάποιον άλλον. Μπορεί όμως να εκφραστεί ως δεκαδικός, μ' έναν απεριόριστο αριθμό ψηφίων.

Το σύνολο όλων των ρητών και άρρητων αριθμών σχηματίζει αυτό που οι μαθηματικοί ονομάζουν «σύνολο πραγματικών αριθμών» και υπογραμμίζει σχεδόν όλες τις σύγχρονες θεωρίες της φυσικής. Η ιδέα των συνεχών μηχανικών διαδικασιών, όπως συνοψίστηκε με τους υπολογισμούς του Νεύτωνα, που τους διαμόρφωσε για να περιγράψει αυτές τις διαδικασίες, στηρίζεται στην έννοια των πραγματικών αριθμών. Μερικοί πραγματικοί αριθμοί, όπως $\frac{1}{2} = 0,5$ ή το $\frac{1}{3} = 0,333\dots$ μπορούν να εκφραστούν συνεπτυγμένα. Αλλά ένας τυπικός πραγματικός αριθμός έχει μια δεκαδική έκταση που αποτελείται από μια άπειρη σειρά ψηφίων, χωρίς ένα πρότυπο συστηματοποίησης, μ' άλλα λόγια, είναι μια τυχαία ακολουθία. (New Scientist «ένας τυχαίος περίπατος στην αριθμητική», 24 Μαρτίου 1990). Επόμενο είναι, ότι για να καθοριστεί ένας τέτοιος αριθμός απαιτείται μια άπειρη ποσότητα πληροφοριών. Αυτό είναι καθαρά αδύνατον ακόμη και ως ιδέα. Ακόμη κι αν επρόκειτο να επιτάξουμε το σύνολο του παρατηρήσιμου Σύμπαντος και να το χρησιμοποιήσουμε ως ψηφιακό κομπιούτερ, η ικανότητα αποθήκευσης πληροφοριών θα ήταν πεπερασμένη. Έτσι, η ιδέα μιας συνεχούς γραμμής που να αντιστοιχεί σε πραγματικούς αριθμούς εκτίθεται ως μαθηματικός μύθος.

Τώρα ας θεωρήσουμε τις συνθήκες ενός χαώδους συστήματος. Η αιτιοκρατία υποδηλώνει μια προβλεπτικότητα μόνο στο εξιδανικευμένο όριο μιας απεριόριστης ακρίβειας. Στην περίπτωση ενός εκκρεμούς για παράδειγμα, η συμπεριφορά θα καθορίζεται απαράμιλλα από τις αρχικές συνθήκες. Τα αρχικά δεδομένα περιλαμβάνουν τη θέση του άκρου, ώστε η ακριβής προβλεπτικότητα να απαιτεί να προσδιορίσουμε τον ακριβή αριθμό στη θέση που περιγράφει σωστά την απόσταση του κέντρου του άκρου από ένα συγκεκριμένο σημείο. Και αυτή η άπειρη ακρίβεια είναι, όπως έχουμε δει, αδύνατη.

Σ' ένα μη-χαώδες σύστημα αυτός ο περιορισμός δεν είναι τόσο σοβαρός επειδή τα λάθη εκτείνονται μόνο αργά. Αλλά σ' ένα χαώδες σύστημα τα λάθη μεγαλώνουν μ' ένα αυξητικό ρυθμό. Ας υποθέσουμε ότι υπάρχει μια αβεβαιότητα, ας πούμε, στον πέμπτο σημαντικό αριθμό και ότι αυτό επηρεάζει την πρόβλεψη του τρόπου με τον οποίο συμπεριφέρεται το σύστημα μετά από ένα χρόνο t . Μια πιο ακριβής ανάλυση μπορεί να μειώσει την αβεβαιότητα στο 10ο σημαντικό αριθμό. Αλλά η ενισχυτική φύση της ανάπτυξης του λάθους υποδηλώνει ότι η αβεβαιότητα τώρα παρουσιάζεται μετά από χρόνο $2t$. Έτσι μια θελιώση της τάξης των εκατό χιλιάδων στην αρχική ακρίβεια επιτυγχάνει έναν απλό διπλασιασμό του πεδίου προβλεπτικότητας. Είναι αυτή η "ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες" που οδηγεί σε γνωστές απόψεις για το χτύπημα των φτερών των πεταλούδων στη ζούγκλα του Αμαζονίου που προκαλεί ανεμοστρόβιλο στο Τέξας.

Το χάος φανερά μας παρέχει μια γέφυρα ανάμεσα στους νόμους της φυσικής και στους νόμους της τύχης. Κατά μια άποψη, τα τυχαία γεγονότα μπορούν πράγματι πάντα να συνδέονται με την άγνοια των λεπτομερειών, αλλά ενώ η κίνηση Brown φαίνεται τυχαία, εξαιτίας του τεράστιου αριθμού βαθμών ελευθερίας που θεληματικά παραβλέπουμε, το αιτιοκρατικό χάος φαίνεται τυχαίο επειδή αναγκαστικά αγνοούμε την πολυσύνθετη λεπτομέρεια των λίγων μόνο βαθμών ελευθερίας. Και ενώ το χάος του Brown είναι περίπλοκο επειδή το μοριακό βομβάρδισμα είναι από μόνο του μια περίπλοκη διαδικασία, η κίνηση, ας πούμε, του σφαιρικού εκκρεμούς είναι περίπλοκη παρόλο που το σύστημα είναι πολύ απλό. Έτσι, η περίπλοκη συμπεριφορά δεν υποδηλώνει απαραίτητα περίπλοκες δυνάμεις ή νόμους. Άρα, η μελέτη του χάους έχει αποκαλύψει ότι είναι δυνατόν να συμφιλιωθεί η πολυπλοκότητα ενός φυσικού κόσμου που επιδεικνύει τυχαία και άστατη συμπεριφορά, με την τάξη και την απλότητα των άδηλων νόμων της φύσης.

Αν και η ύπαρξη του ατιοκρατικού χάους έρχεται ως έκπληξη, δεν θα πρέπει να ξεχνάμε ότι η φύση δεν είναι πραγματικά αιτιοκρατική. Η μη-αιτιοκρατία που σχετίζεται με τα κβαντικά αποτελέσματα θα εισχωρεί στα δυναμικά όλων των συστημάτων, χαωδών ή μη, σε ατομικό επίπεδο. Μπορεί να υποθεθεί ότι η κβαντική απροσδιοριστία θα μπορούσε να συδυναστεί με το χάος για να επεκτείνει την αδυναμία πρόβλεψης στο Σύμπαν.

Περιέργως όμως η κβαντομηχανική φαίνεται να έχει μια επίδραση υποταγής στο χάος (*New Scientist*, "Η κβαντομηχανική στο άκρο του χάους", 19 Νοέμβρη 1987). Ένας αριθμός συστημάτων μοντέλων που είναι χαώδη στο κλασσικό επίπεδο, φαίνονται να μην είναι χαώδη όταν υφίστανται κβαντισμό. Σ' αυτό το επίπεδο οι ειδικοί διαφωνούν για το αν το κβαντικό χάος είναι δυνατό να υπάρξει ή για το πώς θα μπορούσε να φανερί η ύπαρξή του. Αν και το θέμα θα αποδειχτεί, αναμφισβότως, σημαντικό για την ατομική και μοριακή φυσική, όμως, έχει λίγη σχέση με τη συμπεριφορά των αντικειμένων του μακρόκοσμου ή του Σύμπαντος ως συνόλου.

Πώς μπορούμε να κλείσουμε το θέμα για την εικόνα του Λαπλάς για ένα σύμπαν που λειτουργεί σαν ρολόι; Ο φυσικός κόσμος περιέχει μια μεγάλη αχτίνα και χαωδών και μη-χαωδών συστημάτων. Εκείνα που είναι χαώδη έχουν αυστηρά περιορισμένη προβλεπτικότητα και ακόμη ένα τέτοιο σύστημα θα μπορούσε γρήγορα να εξουδετερώσει την ικανότητα ολόκληρου του σύμπαντος να υπολογίσει τη συμπεριφορά του. Φαίνεται έπειτα ότι το σύμπαν είναι ανίκανο για ψηφιακό υπολόγισμό της μελλοντικής συμπεριφοράς ακόμη και ενός μικρού μέρους του, για να μην πούμε του ίδιου (του σύμπαντος) ολόκληρου. Για να το εκφράσουμε πιο δραματικά, το σύμπαν μιμείται ταχύτατα τον εαυτό του.

Αυτό το συμπέρασμα είναι σίγουρα σημαντικό. Σημαίνει ότι ακόμα κι αν δεχτούμε μια αυστηρά αιτιοκρατική λειτουργία της φύσης, οι μελλοντικές καταστάσεις του σύμπαντος είναι κατά κάποιο τρόπο "ανοιχτές". Κάποιοι άνθρωποι έχουν χρησιμοποιήσει αυτό το άνοιγμα για να συζητήσουν για την πραγματικότητα της ανθρώπινης ελεύθερης βούλησης. Άλλοι ισχυρίζονται ότι αποδίδεται στη φύση ένα στοιχείο δημιουργικότητας, μια ικανότητα να φέρνει στο προσκήνιο ό,τι κατεξοχήν είναι νέο, κάτι που δεν είναι ήδη υπονοούμενο σε προηγούμενες καταστάσεις του Σύμπαντος με ασφάλεια τον εξιδανικευμένο μύθο των πραγματικών αριθμών. Όποια κι αν είναι τα οφέλη από τέτοιες ενθουσιώδεις διακηρύξεις, φαίνεται ασφαλές να καταλήξουμε μέσα από

τη μελέτη του χάους, ότι το μέλλον του Σύμπαντος δεν είναι μη-μεταστρέψιμα καθορισμένο. Για να παραφράσουμε την Πριγκο-νίνα, το τελευταίο κεφάλαιο του μεγάλου κοσμικού βιβλίου δεν έχει ολοκληρωθεί ακόμα.

Απόδοση στα Ελληνικά: Μαριάννα Παπαστεφάνου

