

# ΑΙΤΙΟΚΡΑΤΙΚΟ ΧΑΟΣ

ΑΝΑΔΥΟΜΕΝΕΣ ΦΥΣΙΚΕΣ ΔΟΜΕΣ

Ανεστίδης Ιωάννης Σιωπίδης Ιωάννης

# **ΑΙΤΙΟΚΡΑΤΙΚΟ ΧΑΟΣ**

## **ΑΝΑΔΥΟΜΕΝΕΣ ΦΥΣΙΚΕΣ ΔΟΜΕΣ**

Ερευνητική Εργασία  
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Πολυτεχνική Σχολή Τμήμα Αρχιτεκτόνων  
Ακαδημαϊκό Έτος 2010-2011

Επιβλέπων Καθηγητής  
**Αναστάσιος Τέλλιος**

Φοιτητική Ομάδα  
**Ανεστίδης Ιωάννης**  
**Σιωπίδης Ιωάννης**



Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον καθηγητή μας Αναστάσιο Τέλλιο για την πολύτιμη βοήθεια που μας προσέφερε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της ερευνητικής εργασίας και για τη συνεργασία μας κατά τη διάρκεια των σπουδών μας. Ευχαριστούμε τους συμφοιτητές και τους φίλους μας που μας βοήθησαν είτε μέσα από συζητήσεις είτε έμπρακτα για να ολοκληρωθεί το τεύχος. Τέλος, ευχαριστούμε τις οικογένειές μας που στάθηκαν δίπλα στην προσπάθειά μας.

Ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ οφείλουμε σε έναν άγνωστο περιφερόμενο ηλικιωμένο κύριο, ο οποίος πριν 3 χρόνια, μεταξύ τύχης και αναγκαιότητας, μας χάρισε μια σακούλα με βιβλία ανάμεσα στα οποία ήταν το “Χάος και πιθανολογική αιτιότητα: Μεταξύ προκαθορισμού και τύχης” του Θεόδωρου Χρηστίδη, ένα βιβλίο που αποτέλεσε αφετηρία των προβληματισμών μας. Στο σπουδαίο αυτό βιβλίο βρήκαμε τα πρώτα ερεθίσματα που έλκυσαν... παράξενα το ενδιαφέρον μας.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## 7 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 8 ΕΠΙΣΤΗΜΗ

### 1.1 Τύχη και Αναγκαιότητα

### 1.2 Το Χάος ελευθερώνει τη Φύση

1.2.1 Η Επανάσταση του Χάους

1.2.2 Έννοιες και Εργαλεία του Χάους

1.2.3 Fractal: Η Γεωμετρία της Φύσης

### 1.3 Ο Κόσμος δημιουργείται διαρκώς

1.3.1 Το παλιό επιστημονικό κοσμοείδωλο: Η φύση είναι ένα ρομπότ

1.3.2 Θερμοδυναμική μακριά από ισορροπία

1.3.3 Η νέα αντίληψη για τη φύση: Η απελευθέρωση της ύλης

## 58 ΦΙΛΟΣΟΦΙΑ

### 2.1 Δύο κόσμοι: Σκιές και Ιδέες

### 2.2 Ο Κόσμος όπως είναι

### 2.3 Από τον Ηράκλειτο στον Prigogine

## 66 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ

### 3.1 Αρχιτεκτονική & Πολυπλοκότητα

### 3.2 Η Θεωρία της πολυπλοκότητας στο Σχεδιασμό

### 3.3 Emergence & Μορφογένεση

3.3.1 Από την Δομή στην Διαδικασία

3.3.2 Η Αρχιτεκτονική των Φυσικών Συστημάτων

3.3.3 Emergence & Μορφογένεση στην Αρχιτεκτονική

## 106 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

## 110 ΠΗΓΕΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

### 1.1 Τύχη και Αναγκαιότητα

## 1.0 Επιστήμη

1.2.1 Η Επανάσταση του Χάους

1.2 Το Χάος ελευθερώνει τη Φύση

1.2.2 Ένοιες και Εργαλεία του Χάους

1.2.3 Fractal: Η Γεωμετρία της Φύσης

1.3.1 Το παλιό επιστημονικό κοσμοείδωλο: Η φύση είναι ένα ρομπότ

1.3 Ο Κόσμος δημιουργείται συνεχώς

1.3.2 Θερμοδυναμική μακριά από ισορροπία

1.3.3 Η νέα αντίληψη για τη φύση: Η απελευθέρωση της ύλης

# Αιτιοκρατικό χάος αναδυόμενες φυσικές δομές

2.1 Δύο κόσμοι: Σκιές και Ιδέες

3.1 Αρχιτεκτονική & Πολυπλοκότητα

## 2.0 Φιλοσοφία

## 3.0 Αρχιτεκτονική

2.2 Ο Κόσμος όπως είναι

2.3 Από τον Ηράκλειτο στον Prigogine

3.2 Η Θεωρία της Πολυπλοκότητας στον Σχεδιασμό

3.3.1 Από την Διαμύ στην Διαδικασία

3.3 Emergence & Μορφογένεση

3.3.2 Η Αρχιτεκτονική των Φυσικών Συστημάτων

3.3.3 Emergence & Μορφογένεση στην Αρχιτεκτονική

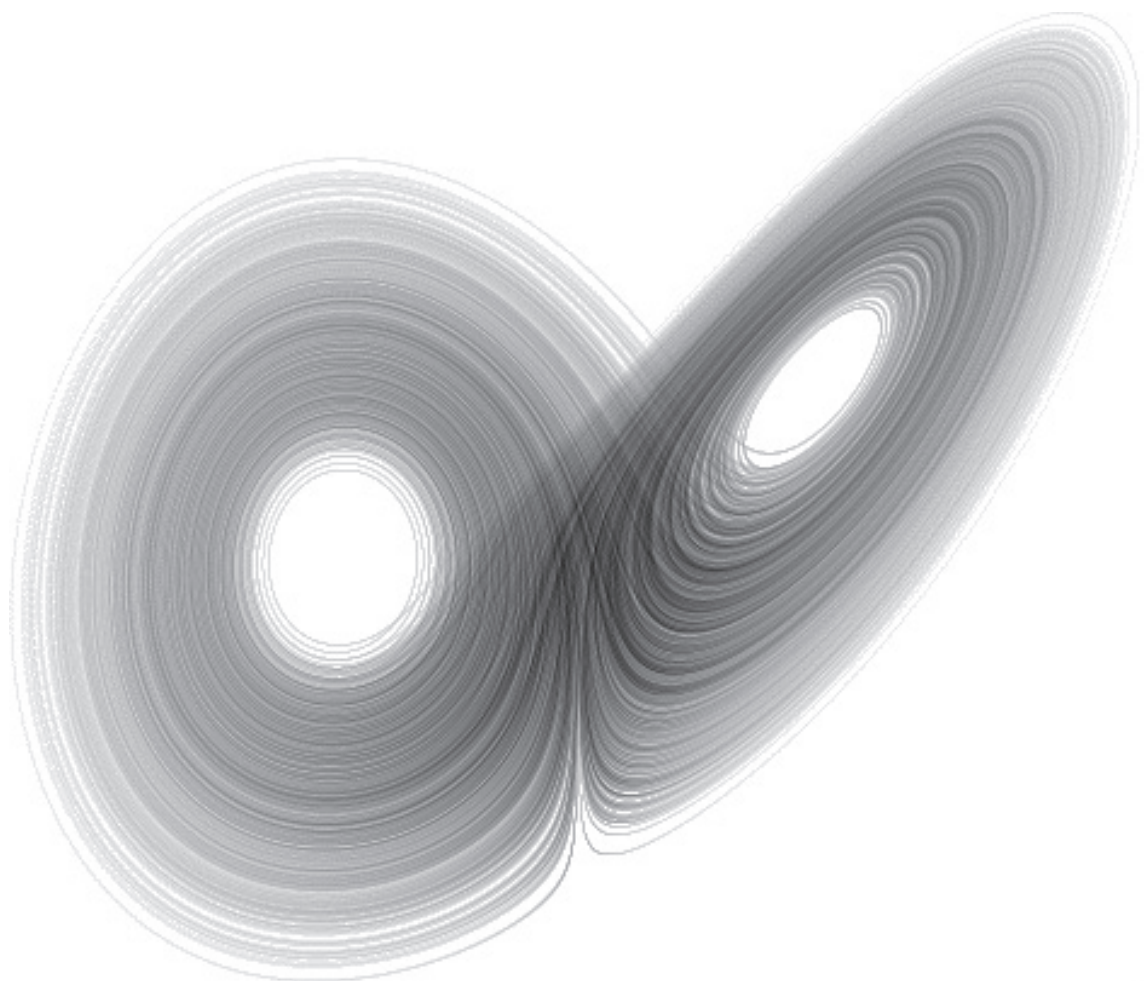
## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η δομή του ερευνητικού ακολουθεί τη λογική μιας fractal δομής, του τριγώνου Sierpinski, ενός τέλειου μαθηματικού fractal (αριστερά) το οποίο επαναλαμβάνει άπειρες φορές την δομή του στο εσωτερικό του. Αυτή η οργάνωση επιτρέπει τον αναγνώστη να εμβαθύνει όσο επιθυμεί σε μια θεματική ενότητα αφού κάθε κεφάλαιο/τρίγωνο (π.χ. 1.0 Επιστήμη) σπάει σε επιμέρους υποκεφάλαια/τρίγωνα (π.χ. 1.1 Τύχη και Αναγκαιότητα, 1.2 Το χάος ελευθερώνει τη φύση κ.ο.κ.). Επίσης όλα τα τρίγωνα κεφάλαια/υποκεφάλαια κατέχουν μια ημιαυτονομία ώστε να μπορούν να διαβαστούν ξεχωριστά για εγκυκλοπαιδικούς λόγους, δηλαδή ο αναγνώστης θα έχει την δυνατότητα να μάθει π.χ. για το φαινόμενο της πεταλούδας (τρίγωνο 1.2.2) ή για τον αναλλοίωτο κόσμο των ιδεών του Πλάτωνα (τρίγωνο 2.1) χωρίς να είναι απαραίτητο να ακολουθήσει όλη τη διαδρομή μέχρι το κεφάλαιο αυτό. Αλλά μόνο αν διαβαστούν όλα τα τρίγωνα αναδύεται η ουσία του ερευνητικού έτσι όπως έχει οριστεί. Ακριβώς όπως και στη σύγχρονη επιστήμη το όλο είναι κάτι πέρα και πάνω από τα μέρη του.

Για να εξεταστεί το φαινόμενο των αναδυόμενων φυσικών δομών επιλέχθηκε μία ολιστική προσέγγιση του ζητήματος μέσω της επιστήμης και της φιλοσοφίας η οποία μας οδήγησε στο αιτιοκρατικό χάος το οποίο έχει άμεσα σχέση με την σύγχρονη αντίληψη του κόσμου όπως υπάρχει. Η σύνδεση με την αρχιτεκτονική έγινε σχεδόν οργανικά.

“Η επιστημονική γνώση και πρακτική έχει ως στόχο να κατανοήσει τον κόσμο όπως υπάρχει, ενώ η σχεδιαστική γνώση και πρακτική έχει ως στόχο να παρέμβει στην πραγματικότητα και να προτείνει έναν κόσμο όπως θα έπρεπε να υπάρχει”. [Θοδωρής Ζαμενόπουλος & Κατερίνα Αλεξίου, Η επιρροή της επιστήμης της πολυπλοκότητας στο σχεδιασμό: Θεωρητικά και μεθοδολογικά εργαλεία, από το συλλογικό έργο: Δανιήλ Μ. (Επιμελητής), Κ. Τσουκαλά (Επιμελητής), Χ. Παντελίδου (Επιμελητής), Μετανεωτερικές επ-όψεις, Επίκεντρο, Θεσσαλονίκη 2010]





1.0 Επιστήμη

# 1.0 ΕΠΙΣΤΗΜΗ

Στο παρόν κεφάλαιο αναπτύσσονται οι κυριότερες έννοιες της αναπτυσσόμενης μη γραμμικής δυναμικής καθώς και οι ιδέες πάνω στις οποίες επιδιώκεται να οικοδομηθεί η νέα θεώρηση του κόσμου. Η επιδιωκόμενη νέα περιγραφή στηρίζεται σε ρεαλιστική βάση, καθώς εξετάζει τη Φύση, όπως αυτή πραγματικά λειτουργεί, χωρίς αφαιρέσεις και εξιδανικεύσεις. Σε αυτό το πρώτο κεφάλαιο πραγματευόμαστε έννοιες όπως η μη αντιστρεπτότητα, η αυτο-οργάνωση, η πολυπλοκότητα, οι σκεδαστικές δομές, η αιτιοκρατία, η τάξη και το χάος, έννοιες που προκύπτουν από το νέο ερευνητικό πρόγραμμα που ανέπτυξε ο Ilya Prigogine πάνω στην εξέλιξη συστημάτων μακριά από την ισορροπία.

Η δομή του τριγώνου της επιστήμης έχει ως εξής: Το κεφάλαιο 1.1 διευκρινίζει μέσα από το παράδειγμα του ηλιακού συστήματος πως η συνδυασμένη δράση της τύχης και της αναγκαιότητας καθορίζει την πραγματικότητα. Το δεύτερο κεφάλαιο 1.2 περιγράφει τη θεωρία του χάους. Παραθέτοντας στιγμιότυπα από την γέννηση και την ανάπτυξη της θεωρίας του χάους, επιχειρούμε μια γνωριμία με τις τεχνικές της μη γραμμικής δυναμικής. Μέσα από παραδείγματα της ουράνιας μηχανικής και της μετεωρολογίας διαπιστώνουμε τον τρόπο με τον οποίο το χάος βοηθά τη φύση να κατασκευάσει την πραγματικότητα. Το τρίτο κεφάλαιο 1.3 διηγείται τη ριζική αλλαγή στον τρόπο με τον οποίο με τον οποίο αντιλαμβανόμαστε τον κόσμο σήμερα. Το κατακερματισμένο, μηχανιστικό και ντετερμινιστικό Σύμπαν του Νεύτωνα δίνει τη θέση του σ' έναν κόσμο ολιστικό, μη ντετερμινιστικό, πλήρους δημιουργικότητας.

Βασική βιβλιογραφία του κεφαλαίου της επιστήμης αποτελεί το βιβλίο «Χάος και Αρμονία» του Tsihn Juan Thuan, όπως επίσης και τα: «Χάος: Μία Νέα Επιστήμη» του James Gleick και «Παίζει ο Θεός ζάρια; Η επιστήμη του χάους» του Ian Stewart. Τέλος, η βιβλιογραφία του Ilya Prigogine και ειδικότερα το «Τάξη μέσα από το χάος» αποτέλεσε οδηγό στην αναζήτηση της νέας αντίληψης για τη Φύση.

## 1.1 ΤΥΧΗ ΚΑΙ ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ: ΤΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Το παράδειγμα του ηλιακού συστήματος εμπειριέχει την τύχη και την αναγκαιότητα, το απρόβλεπτο και το προβλεπόμενο, το ενδεχόμενο και το απαραίτητο. Φυσικές διαδικασίες, όπως η γέννηση του ήλιου μέσα από ένα νέφος αερίων και ο σχηματισμός των αστεροειδών μέσα από το παιχνίδι της συσσωμάτωσης μικρών κόκκων σκόνης, είναι γεγονότα που δεν εξαρτώνται ούτε από τον χρόνο, ούτε από τον χώρο. Οι φυσικές διαδικασίες που περιγράφησαν, συνέβησαν και θα συμβούν πολλές φορές στο άπειρο σύμπαν. Αντίθετα, ο κύκλος των εποχών στη Γη απεικονίζει τη σπουδαιότητα του συμπτωματικού στην καθημερινή μας ζωή και πως τα ενδεχόμενα γεγονότα μπορούν να επηρεάσουν σε βάθος την πραγματικότητα. Η απάντηση στο γιατί υπάρχουν εποχές στη Γη είναι απλή: ο άξονας περιστροφής της δεν είναι κατακόρυφος στο επίπεδο της Εκλειπτικής, αλλά έχει κλίση  $23,5^\circ$ . Η Γη δεν στέκεται όρθια αλλά κατέληξε να γέρνει όταν η τροχιά της διασταυρώθηκε με την τροχιά ενός μεγάλου αστεροειδούς. Αυτή η σύγκρουση πηγάζει από το πεδίο του τυχαίου. Κανένας φυσικός νόμος δεν προόριζε τη Γη να γέρνει, αλλά θα έπρεπε να ήταν όρθια, χωρίς εποχές, με τις καθημερινές θερμοκρασίες της να παραμένουν σχεδόν αναλλοίωτες στη διάρκεια του χρόνου. Η παρέμβαση της Ιστορίας δε σταματά στη δημιουργία των εποχών. Η νεότερη επιστήμη υποστηρίζει ότι και η εμφάνιση των ανθρώπων στη Γη προέρχεται από ένα ενδεχόμενο φαινόμενο. Για εκατομμύρια χρόνια στη Γη κυριαρχούσαν οι δεινόσαυροι, όταν συνέβη κάτι που τα άλλαξε όλα. Ένας μετεωρίτης συγκρούστηκε με τη Γη, προκαλώντας την εξαφάνιση των δεινοσαύρων και επιτρέποντας την ανάπτυξη και την εξέλιξη των θηλαστικών, προγόνων του Homo Sapiens.

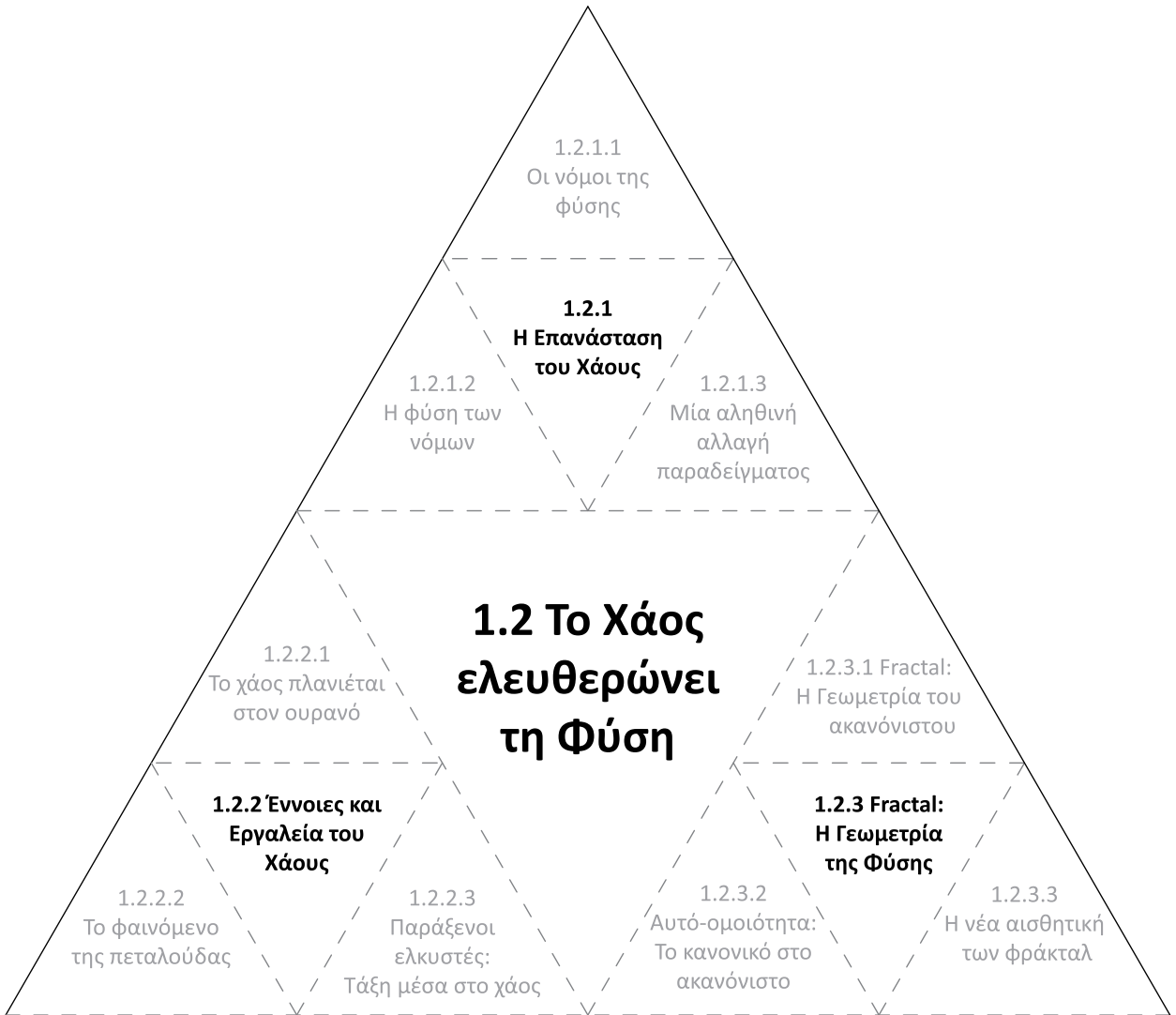
Στο πλαίσιο του ηλιακού συστήματος, η φυσική θεωρία θα μπορούσε να προβλέψει τον σχηματισμό του Ήλιου και των αστεροειδών. Θα μπορούσε να μας πει ότι οι πλανήτες θα κινούνται στο επίπεδο του Ήλιου και θα περιστρέφονται γύρω από τον εαυτό τους και γύρω από τον Ήλιο με φορά ίδια με αυτόν. Αλλά δεν θα ήταν ικανή να προβλέψει την τιμή της κλίσης της Γης. Η πραγματικότητα δομείται από τη συνδυαστική δράση της τύχης και της αναγκαιότητας. Το συμπτωματικό και το αναγκαίο είναι τα δύο συμπληρωματικά εργαλεία της Φύσης. Οι φυσικοί νόμοι ωθούν το Σύμπαν προς μια συνεχώς αυξανόμενη πολυπλοκότητα και το τυχαίο δίνει την ελευθερία στη Φύση να καινοτομήσει. Όλα συνδράμουν: τύχη και αναγκαιότητα, γεγονότα συμπτωματικά και ντετερμινιστικοί νόμοι. Γι' αυτό και η πραγματικότητα δεν θα μπορέσει ποτέ να περιγραφεί απόλυτα μόνο με τους νόμους της φυσικής. Το ενδεχόμενο θα περιορίζει πάντα την πλήρη εξήγηση της πραγματικότητας. Ωστόσο, η παρέμβαση της τύχης δεν είναι η μόνη υπεύθυνη για την απελευθέρωση της Φύσης. Με την ανάπτυξη της θεωρίας του χάους, οι νόμοι της φυσικής έχασαν ένα μέρος από τον ντετερμινισμό τους και η τύχη έκανε μια μεγαλοπρεπή είσοδο στον μακροσκοπικό κόσμο.



### 1.0 Επιστήμη

→ 1.1 Τύχη και Αναγκαιότητα: Το παράδειγμα του ηλιακού συστήματος

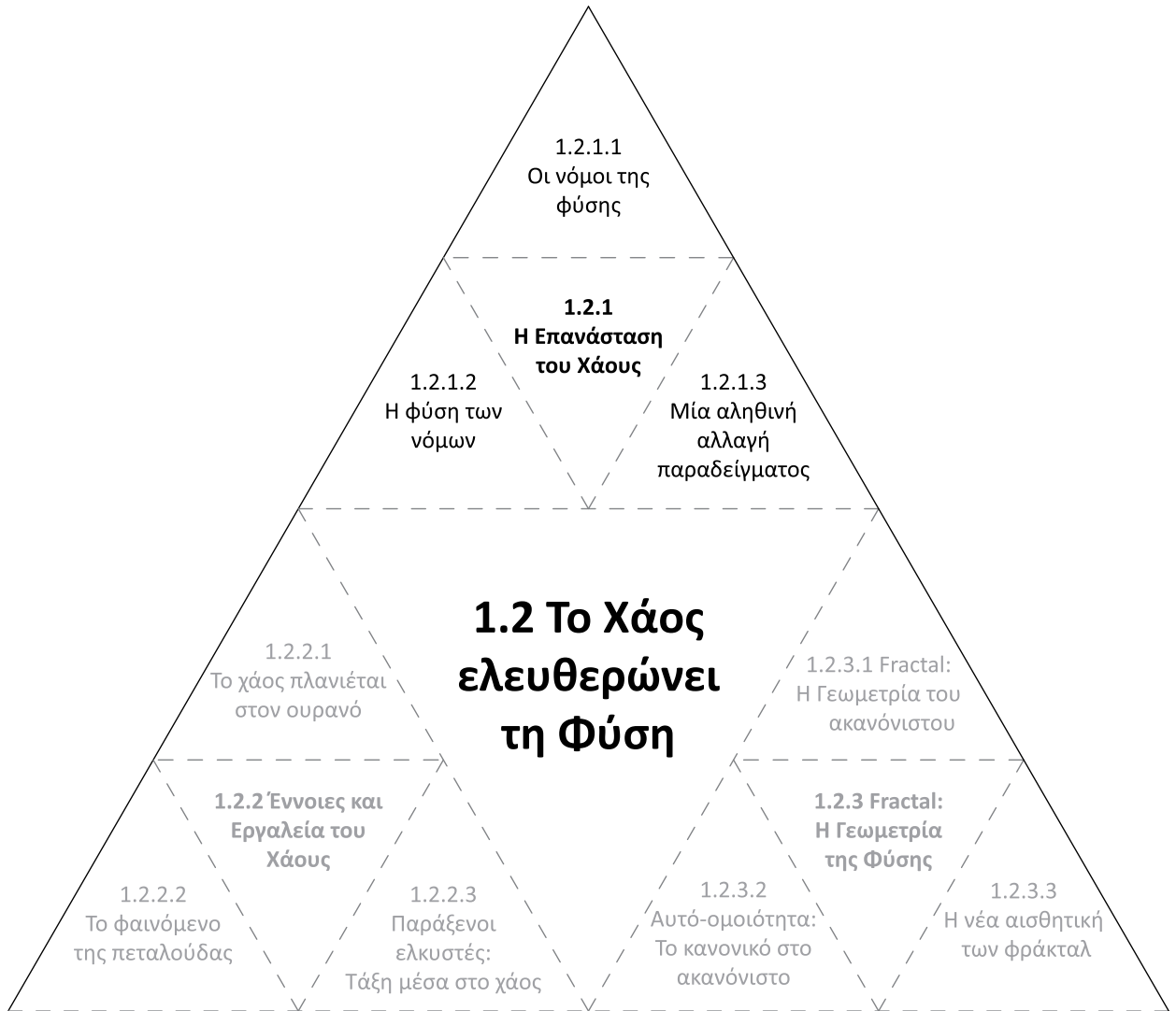
## 1.2 ΤΟ ΧΑΟΣ ΕΛΕΥΘΕΡΩΝΕΙ ΤΗ ΦΥΣΗ



### 1.0 Επιστήμη

→ 1.2 Το Χάος ελευθερώνει τη Φύση

## 1.2.1 Η ΕΠΑΝΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΧΑΟΥΣ



### 1.0 Επιστήμη

→ 1.2 Το Χάος ελευθερώνει τη Φύση

→ 1.2.1 Η Επανάσταση του Χάους

### 1.2.1.1 ΟΙ ΝΟΜΟΙ ΤΗΣ ΦΥΣΗΣ

#### Η ΦΥΣΗ ΕΧΕΙ ΝΟΜΟΥΣ: ΟΙ ΝΟΜΟΙ ΤΗΣ ΦΥΣΗΣ ΕΙΝΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΙ

Ως νόμο μπορούμε να ορίσουμε μια γενική πρόταση που εκθέτει τις κανονικότητες ανάμεσα στα επιστημονικά φαινόμενα ή τη γενίκευση των συμπερασμάτων στα οποία καταλήγουμε έπειτα από παρατηρήσεις και πειράματα που αφορούν τις σχέσεις των φαινομένων μεταξύ τους. Κανονικότητες φαινομένων, όπως τις περιγράψαμε πιο πάνω, είχαν συνειδητοποιήσει οι άνθρωποι ήδη σε ένα μακρινό παρελθόν, όπως μαρτυρούν οι συνθέσεις των ντολμέν και των μενίρ. Όμως πολλά φυσικά φαινόμενα τους φαίνονταν μυστηριώδη και απρόβλεπτα και είχαν αποδοθεί στις μαγικές ιδιότητες πνευμάτων και θεών. Στη μέση αυτού του μυθικού σύμπαντος, κατά τον 6ο αιώνα π.Χ., γεννήθηκε το ελληνικό θαύμα που έβαλε τους σπόρους του επιστημονικού σύμπαντος. Οι αρχαίοι Έλληνες συνέλαβαν την επαναστατική ιδέα ότι τα φυσικά φαινόμενα δεν ήταν αποκλειστικότητα των θεών, αλλά ότι μπορούσε και η ανθρώπινη λογική να τα κατανοήσει. Ωστόσο, η έννοια «φυσικός νόμος», όπως την κατανοούμε σήμερα, δεν είχε κάνει ακόμα την εμφάνισή της. Ο Αριστοτέλης εξήγησε τη συμπεριφορά ενός φυσικού συστήματος με γνώμονα ένα τελικό αίτιο. Κάθε αντικείμενο στη Φύση συμπεριφέρεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να πραγματοποιεί ένα προκαθορισμένο αίτιο, παρουσιάζοντας μια τελεολογική συμπεριφορά. Η έννοια του νόμου εμφανίστηκε με την ανάδυση του χριστιανισμού. Το αίτιο δεν περιεχόταν πλέον στο ίδιο το αντικείμενο, αλλά συνδεόταν με φυσικούς νόμους που εκπορεύονταν από τον Θεό. Διαποτισμένη από τη χριστιανική ιδέα ενός Θεού που εκδηλώνεται μέσα από τον ορθολογισμό της Φύσης και επηρεασμένη από την έννοια του αστικού νόμου, η μεσαιωνική Ευρώπη αποτελούσε ιδιαίτερα γόνιμο έδαφος για την εμφάνιση της ιδέας των φυσικών νόμων.

Δύο απλοί νόμοι του Άγγλου Ισαάκ Νεύτωνα (Isaac Newton, 1642-1727), της βαρύτητας και της κίνησης, μπόρεσαν να ερμηνεύσουν πλείστα αστρονομικά φαινόμενα. Ήταν κάτι απλό και συνάμα ασύλληπτο: τάξη μέσα απ' το χάος. Ο Νεύτων ήταν ο άνθρωπος που είχε ανακαλύψει τη γλώσσα που η Φύση μιλάει. Ήταν ο νέος Μωυσής στον οποίο δόθηκαν οι πίνακες του νόμου. Το μήνυμα που προκύπτει από το έργο του Νεύτωνα, *Μαθηματικές Αρχές της Φυσικής Φιλοσοφίας* (*Philosophiae naturalis principia mathematica*, 1687) είναι ότι η Φύση έχει νόμους, τους οποίους μπορούμε να ανακαλύψουμε. Για περισσότερο από δυο αιώνες οι νόμοι του Νεύτωνα κυριαρχούσαν ως η απόλυτη περιγραφή της φύσης. Μόνο στη μικροσκοπική περιοχή του ατόμου - η κβαντομηχανική- και στην τεράστια έκταση του σύμπαντος -η θεωρία της σχετικότητας- αντικατέστησαν τη θεωρία του Νεύτωνα για τη Φύση. Ενώ όμως η μια θεωρία εκτοπίζει την άλλη, η σπουδαιότητα των μαθηματικών παραμένει σταθερή. Οι νόμοι της φύσης είναι μαθηματικοί. Η αντικειμενική πραγματικότητα δείχνει ότι τα μαθηματικά είναι η περισσότερο αποτελεσματική και αξιόπιστη μέθοδος που γνωρίζουμε για την κατανόηση όσων βλέπουμε γύρω μας.

Η πεποίθηση ότι η κανονικότητα της Φύσης μπορεί να εκφραστεί με μαθηματικούς όρους αποτελεί την ίδια τη βάση της επιστημονικής μεθόδου. Η ιδέα ότι ο φυσικός κόσμος είναι απλώς η αντανάκλαση της μαθηματικής τάξης διατυπώθηκε από τον Πυθαγόρα. Το νόημα της Φύσης βρισκόταν στην αρμονία των αριθμών. Η ιδέα μιας μαθηματικής τάξης του κόσμου βρήκε πλήρη ανάπτυξη στην Ευρώπη της Αναγέννησης με το έργο του Γαλιλαίου, του Νεύτωνα και του Καρτέσιου, οι οποίοι εξέφρασαν τις κανονικότητες της Φύσης με μαθηματικούς νόμους. “Το βιβλίο της Φύσης είναι γραμμένο σε μαθηματική γλώσσα”, διακήρυξε ο Γαλιλαίος.

## ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΟΛΑ: ΤΟ ΣΥΜΠΑΝ ΕΙΝΑΙ ΕΝΑΣ ΩΡΟΛΟΓΙΑΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ

Ο Νεύτων έδωσε στους νόμους του μορφή μαθηματικών εξισώσεων, οι οποίες συσχετίζουν όχι μόνο τα διάφορα μεγέθη, αλλά και τους ρυθμούς με τους οποίους μεταβάλλονταν τα μεγέθη αυτά. Οι εξισώσεις που περιέχουν ρυθμούς μεταβολής είναι γνωστές σαν διαφορικές εξισώσεις και η επίλυσή τους παρουσιάζει υψηλό επίπεδο δυσκολίας. Ο ρυθμός μεταβολής μιας ποσότητας ορίζεται από τη διαφορά μεταξύ των τιμών της σε δύο κοντινές χρονικές στιγμές. Η λύση των εξισώσεων που περιγράφουν την κίνηση ενός δυναμικού συστήματος είναι μοναδική αν οι αρχικές θέσεις και ταχύτητες όλων των συστατικών του συστήματος είναι γνωστές. Αυτή η πρόταση δέχεται ότι οι θέσεις και οι ταχύτητες όλων των υλικών σωματιδίων που υπάρχουν σ’ ολόκληρο το σύμπαν, δεδομένες σε μια ορισμένη χρονική στιγμή, καθορίζουν απόλυτα τη μελλοντική του εξέλιξη. Αν σε κάποια δεδομένη στιγμή γνωρίζουμε τις θέσεις και ταχύτητες κάθε υλικού σωματιδίου στο Ηλιακό Σύστημα, τότε μπορούμε να προσδιορίσουμε με μοναδικό τρόπο όλες τις επακόλουθες κινήσεις αυτών των σωματιδίων. Το σύμπαν ακολουθεί μια μοναδική, προκαθορισμένη πορεία.

Η επανάσταση στην επιστημονική σκέψη που κορυφώθηκε με το Νεύτωνα, οδήγησε στη θεώρηση του σύμπαντος ως ενός μηχανισμού που λειτουργεί σαν ρολόι. Σε μια τέτοια θεώρηση, η λειτουργία μιας τέτοιας μηχανής είναι πέρα για πέρα προβλέψιμη. Ένας μηχανικός που γνωρίζει τα χαρακτηριστικά μιας μηχανής και την κατάστασή της σε κάθε στιγμή, μπορεί να υπολογίζει τη μελλοντική της λειτουργία. Όπως αναφέρει ο Πιερ-Σιμόν ντε Λαπλάς (Pierre-Simon de Laplace, 1749-1827), ένας από τους κορυφαίους μαθηματικούς του 18ου αιώνα, στο βιβλίο του Φιλοσοφικά Δοκίμια επί των πιθανοτήτων (Essai philosophique sur les probabilités, 1814): “Αν υπήρχε μια Νόηση που να γνώριζε σε κάθε στιγμή όλες τις δυνάμεις που δίνουν κίνηση στη Φύση και τις σχετικές θέσεις όλων των πραγμάτων που υπάρχουν σ’ αυτή, κι αν αυτή η Νόηση ήταν τέτοια ώστε να κατορθώσει ν’ αναλύσει τα δεδομένα, θα μπορούσε να συνοψίσει σ’ ένα μοναδικό τύπο την κίνηση των μεγαλύτερων σωμάτων του σύμπαντος μαζί μ’ αυτή των ελαφρύτερων ατόμων: για μια τέτοια Νόηση τίποτα δεν θα ήταν αβέβαιο. Και το μέλλον, όπως επίσης και το παρελθόν, θα γινόταν παρόν μπροστά στα μάτια της”.

Η ρήση αυτή αποτέλεσε την αποθέωση του ντετερμινισμού, αναδεικνύοντας την αιτιοκρατία σε αποφασιστικό παράγοντα ερμηνείας της φύσης και οι διαφορικές εξισώσεις έγιναν το μέσο για τη μοντελοποίησή της. Τα βασικά επιτεύγματα του 18ου αιώνα αφορούσαν το στήσιμο εξισώσεων



### 1.0 Επιστήμη

→ 1.2 Το Χάος ελευθερώνει τη Φύση

→ 1.2.1 Η Επανάσταση του Χάους

για την τυποποίηση των φυσικών φαινομένων. Το μήνυμα του Νεύτωνα ήταν ξεκάθαρο: αν γνωρίζουμε τις μαθηματικές εξισώσεις και τις κατάλληλες αρχικές συνθήκες μπορούμε να περιγράψουμε με ακρίβεια τη κίνηση ενός συστήματος υπολογίζοντας το μέλλον και το παρελθόν του. Η επιτυχία του προτύπου των διαφορικών εξισώσεων ήταν εντυπωσιακή κι εκτεταμένη.

Στο τέλος του 18ου αιώνα, ο Λαπλάς στην Πραγματεία περί ουράνιας μηχανικής (*Traité de mécanique céleste*, 1799), θέλησε να αποδείξει ότι το ηλιακό σύστημα είναι μία καλοκουρδισμένη κοσμική μηχανή, που κινιόταν από τη μία και μοναδική δύναμη της παγκόσμιας έλξης. Ο μεγάλος νόμος της Φύσης, που είχε ανακαλύψει ο Νεύτων, μπορούσε να εξηγήσει με ακρίβεια τις πλέον διαφορετικές κινήσεις, από την πτώση ενός μήλου σε ένα δεντρόκηπο, ως την κίνηση της Σελήνης γύρω από τη Γη. Για τον Λαπλάς το ηλιακό σύστημα ήταν τόσο καλά κουρδισμένο που δούλευε από μόνο του χωρίς να χρειάζεται τη θεϊκή παρέμβαση. Όταν παρουσίασε την Ουράνια μηχανική του στον Ναπολέοντα, εκείνος τον ρώτησε γιατί δεν αναφέρει πουθενά το Μεγάλο Αρχιτέκτονα. Τότε, ο Λαπλάς δήλωσε: “Μεγαλειότατε, δεν χρειάζομαι την υπόθεση του Θεού”.

### **ΟΙ ΝΟΜΟΙ ΤΩΝ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΩΝ**

Παρά τις εντυπωσιακές κατακτήσεις που σημειώθηκαν από την κλασική φυσική, ολόκληρα πεδία του φυσικού κόσμου παρέμειναν ανέγγιχτα. Παρά τις αποδείξεις ότι ένας μικρός αριθμός νόμων προδιαγράφει ολόκληρο το μέλλον του σύμπαντος, κάποιες έννοιες δεν μπορούσαν να καθοριστούν από τους ήδη γνωστούς νόμους. Οι μαθηματικοί κατάφεραν τελικά να καθυποτάξουν ένα μικρό μέρος από την τάξη του σύμπαντος, αλλά εξακολουθούσαν να ζουν μέσα σ’ έναν άτακτο κόσμο. Πίστευαν ότι ένα μεγάλο μέρος της αταξίας υπάκουε στους ίδιους θεμελιώδεις νόμους και η αδυναμία τους να εφαρμόσουν αυτούς τους νόμους σ’ οποιοδήποτε φαινόμενο οφειλόταν στην πολυπλοκότητα του φαινομένου. Για παράδειγμα, ένα χιλιοστό του γραμμαρίου ενός αερίου περιέχει τρισεκατομμύρια μόρια. Το να σκεφτεί κανείς να επιλύσει αυτές τις εξισώσεις θα ήταν γελοίο. Ωστόσο, παρά την πολυπλοκότητά τους, τα αέρια συμπεριφέρονται με έναν αρκετά κανονικό τρόπο, και μπορούμε να βρούμε κανονικότητες σε μια μέση συμπεριφορά, χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα μαθηματικά εργαλεία: τη θεωρία των πιθανοτήτων και την στατιστική.

Οι επιστήμονες γνώριζαν ότι είναι πιθανόν ένα ντετερμινιστικό σύστημα να συμπεριφερθεί μ’ έναν φαινομενικά τυχαίο τρόπο. Αλλά πίστευαν ότι δεν ήταν αληθινά τυχαίος, απλώς έδειχνε έτσι, λόγω έλλειψης στοιχείων. Γνώριζαν ακόμα ότι αυτό συνέβαινε μόνο σε πολύ μεγάλα και σύνθετα συστήματα — συστήματα με εξαιρετικά πολλούς βαθμούς ελευθερίας, με εξαιρετικά πολλές διαφορετικές μεταβλητές και με εξαιρετικά πολλά συστατικά μέρη. Συστήματα των οποίων η λεπτομερειακή συμπεριφορά θα έμενε για πάντα έξω από τις δυνατότητες του ανθρώπινου μυαλού.



Στο τέλος του 19ου αιώνα η επιστήμη είχε αποκτήσει δύο εντελώς διαφορετικά πρότυπα για την κατασκευή μαθηματικών μοντέλων. Το πρώτο, και παλιότερο, ήταν η ανάλυση υψηλής ακρίβειας με τη χρήση των διαφορικών εξισώσεων. Η ανάλυση αυτή θεωρητικά καθορίζει ολόκληρη την εξέλιξη του σύμπαντος, αλλά στην πράξη εφαρμόζεται μόνο σε σχετικά απλά προβλήματα. Το δεύτερο πρότυπο ήταν η στατιστική ανάλυση των μέσων τιμών των μεγεθών, που αναπαριστά τα χονδρικά χαρακτηριστικά της κίνησης των πολύ σύνθετων συστημάτων. Κατά την διάρκεια του 20ου αιώνα, η στατιστική μεθοδολογία πήρε τη θέση της, σαν ισάξιος συμβαλλόμενος, δίπλα στη ντετερμινιστική προτυποποίηση. Η τάξη δεν ήταν πια συνώνυμη με το νόμο, ούτε και η αταξία συνώνυμη με την απουσία νόμου. Και η τάξη και η αταξία είχαν νόμους. Αλλά νόμους που ήταν δύο διαφορετικοί κώδικες συμπεριφοράς. Άλλος νόμος για το τακτικό, άλλος για το άτακτο. Δύο πρότυπα, δύο τεχνικές. Ο ντετερμινισμός γι' απλά συστήματα με λίγους βαθμούς ελευθερίας, η στατιστική για πολύπλοκα συστήματα με πολλούς βαθμούς ελευθερίας. Ενα σύστημα ή ήταν τυχαίο, ή δεν ήταν. Τα δύο πρότυπα ήταν εξίσου αποδεκτά και χρήσιμα στον επιστημονικό κόσμο. Αλλά διαφορετικά. Τα απλά συστήματα έπρεπε να συμπεριφέρονται με απλούς τρόπους, ενώ τα πολύπλοκα συστήματα με πολύπλοκους. Μεταξύ απλότητας και πολυπλοκότητας δεν μπορεί να υπάρχει κοινό έδαφος. Όμως, μήπως είναι δυνατόν ένα απλό ντετερμινιστικό σύστημα να λειτουργήσει σαν τυχαίο σύστημα;



## 1.0 Επιστήμη

→ 1.2 Το Χάος ελευθερώνει τη Φύση

→ 1.2.1 Η Επανάσταση του Χάους

### 1.2.1.2 Η ΦΥΣΗ ΤΩΝ ΝΟΜΩΝ

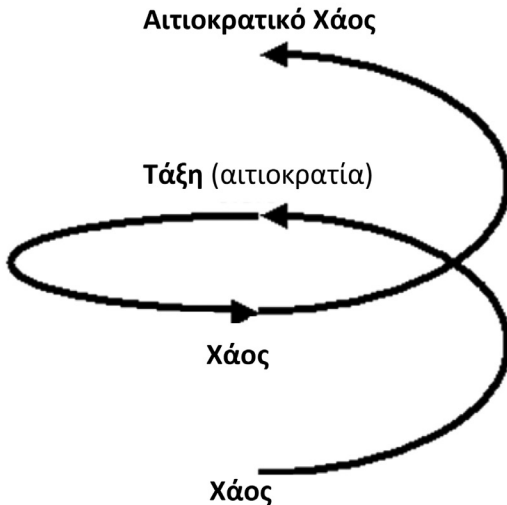
#### Η ΕΛΙΚΟΕΙΔΗΣ ΑΝΕΛΙΞΗ ΑΠΟ ΤΟ ΧΑΟΣ ΣΤΗΝ ΤΑΞΗ ΚΑΙ ΠΑΛΙ ΣΤΟ ΧΑΟΣ

Ο μαθηματικός Ian Stewart υποστηρίζει ότι υπάρχει μια θεωρία σύμφωνα με την οποία η Ιστορία επαναλαμβάνεται. Αλλά επαναλαμβάνεται όπως σε μια ελικοειδή σκάλα. Όταν η πορεία των ανθρώπινων γεγονότων συμπληρώνει έναν πλήρη κύκλο, συνεχίζεται σ' ένα δεύτερο κύκλο αλλά σ' ένα νέο επίπεδο. Η ιστορία του χάους παρουσιάζει ακριβώς μια τέτοια ελικοειδή ανέλιξη: το χάος δίνει γένεση στην τάξη κι αυτή με τη σειρά της αναδεικνύει νέες μορφές χάους. [Ian Stewart, Παίζει ο Θεός ζάρια; Η επιστήμη του χάους, Τραυλός, Αθήνα, 1991]

Όπως είδαμε, στο μακρινό παρελθόν, το ανθρώπινο είδος θεωρούσε τη φύση ιδιόρρυθμο δημιούργημα και η απουσία κάποιου πλαισίου στον φυσικό κόσμο αποδιδόταν στις θεότητες που το εξουσίαζαν. Το χάος βασίλευε και η τάξη ήταν κάτι αδιανόητο. Ύστερα από μια περίοδο πολλών χιλιάδων ετών, η ανθρωπότητα άρχισε να κατανοεί ότι η φύση υπόκειται σε πολλούς κανόνες, οι οποίοι μπορούν ίσως να καταγραφούν ν' αναλυθούν, να προβλεφθούν και ν' αξιοποιηθούν. Τον 18ο αιώνα η επιστήμη σημείωσε τόση επιτυχία στην αποκάλυψη νόμων της φύσης, ώστε το χάος υποχώρησε μπροστά σ' ένα κόσμο που φαινόταν πως λειτουργούσε σαν ωρολογιακός μηχανισμός.

Ο κόσμος, όμως, συνέχισε την εξέλιξή του και μαζί του εξελίχτηκε και η άποψη μας για το σύμπαν. Με την εμφάνιση της κβαντομηχανικής, έγινε γνωστό ότι θεμελιώδη φαινόμενα καθορίζονται από τυφλή τυχαιότητα και όχι από αυστηρή νομοτέλεια. Παράλληλα, ανέκυψαν ορισμένα βασικά ερωτήματα φιλοσοφικού κυρίως περιεχομένου, με αποκορύφωμα τη διαφωνία του Αϊνστάιν με τη σχολή της Κοπεγχάγης σχετικά με την πιθανοκρατική ή όχι θεώρηση της φύσης. Ένα από τα ερωτήματα που απασχόλησαν τους φυσικούς ήταν η σύνδεση ανάμεσα στην ντετερμινιστική και στη στατιστική θεώρηση των φυσικών φαινομένων. Από τη μια μεριά ο Νεύτων, ο Λαπλάς και άλλοι είχαν διατυπώσει συγκεκριμένους νόμους, σύμφωνα με τους οποίους, γνωρίζοντας με μια ορισμένη ακρίβεια τις θέσεις και τις ταχύτητες ενός αριθμού σωμάτων, θα μπορούσαμε να προβλέψουμε, με παρόμοια ακρίβεια, την κίνησή τους μέσα στο χρόνο, λύνοντας τις αντίστοιχες εξισώσεις της κλασικής μηχανικής. Από την άλλη μεριά όμως, οι πατέρες της στατιστικής μηχανικής, όπως ο Αυστριακός φυσικός Μπόλττμαν (Ludwig Boltzmann, 1844-1906), είχαν εισαγάγει νόμους σύμφωνα με τους οποίους, όταν ο αριθμός των σωμάτων είναι πολύ μεγάλος, η κίνησή τους θα πρέπει να μελετηθεί στατιστικά ή πιθανοκρατικά. Ο Μπόλττμαν μελέτησε συστήματα τα οποία ξεχνούν τις αρχικές τους συνθήκες και δεν γυρίζουν ποτέ κοντά σ' αυτές, κάτι που έρχεται σε σαφή αντίθεση με τις αρχές της κλασικής μηχανικής. Αν και η ορθότητα των προβλέψεων του Μπόλττμαν επιβεβαιώνεται πειραματικά από τη θερμοδυναμική συμπεριφορά πολλών συστημάτων, τα επιχειρήματά του συνάντησαν αντιρρήσεις από πολλούς φυσικούς της εποχής του, καθώς οι εξισώσεις της Κλασικής Μηχανικής είναι αναλλοίωτες υπό την αντιστροφή του χρόνου.

Πώς μπορούν να συμβιβαστούν και να συνυπάρξουν αυτές οι δυο θεωρήσεις της φύσης; Πως μπορούν να συμβιβαστούν οι νόμοι της Θερμοδυναμικής με τους νόμους της Κλασικής Μηχανικής; Πού τελειώνει ο ντετερμινισμός και πού αρχίζουν οι «τυχαίες» ή οι στατιστικές ιδιότητες των φυσικών φαινομένων; Την απάντηση στα ερωτήματα αυτά ήρθε να δώσει μια νέα επιστήμη, η μη γραμμική δυναμική και το χάος, που θεμελιώθηκε, αναπτύχθηκε και καθιερώθηκε τις δεκαετίες 1970 και 1980, ως μια επαναστατική εξέλιξη στην πρόοδο όλων γενικά των θετικών επιστημών. Μία απο τις πιο ενδιαφέρουσες διαπιστώσεις της νέας αυτής επιστήμης ήταν η ύπαρξη απρόβλεπτης ή, όπως λέμε καλύτερα, χαοτικής συμπεριφοράς σε μικρά συστήματα δύο ή τριών σωμάτων. Δε χρειάζεται δηλαδή απαραίτητα να έχει κανείς εκατομμύρια σώματα για να παρατηρήσει κινήσεις που μπορούν να μελετηθούν στατιστικά με μεθόδους παρόμοιες με αυτές που εισήγαγε ο Μπόλτζμαν. Χάος μπορεί να εμφανιστεί και στην κίνηση ενός μόνο σώματος, αρκεί αυτό να περιγράφεται το λιγότερο από τρεις μεταβλητές που να είναι συζευγμένες μεταξύ τους με μη γραμμικές δυνάμεις. Χάος είναι η εξαιρετικά ευαίσθητη εξάρτηση της κίνησης από τις αρχικές συνθήκες. Χαοτικές περιοχές κίνησης είναι εκείνες στις οποίες δύο τροχιές, που αρχικά βρίσκονται πολύ κοντά, απομακρύνονται εκθετικά (πολύ γρήγορα) η μια από την άλλη και σύντομα βρίσκονται σε εντελώς διαφορετικά σημεία του χώρου. Στις περιοχές αυτές, μικρές αλλαγές στα αίτια οδηγούν σε μεγάλες αλλαγές στα αποτελέσματα.



Η ελικοειδής ανέλιξη από το χάος στην τάξη και πάλι στο χάος→ Από το χάος γεννήθηκε η τάξη και από αυτήν αναδείχτηκαν νέες μορφές χάους.



## 1.0 Επιστήμη

→ 1.2 Το Χάος ελευθερώνει τη Φύση

→ 1.2.1 Η Επανάσταση του Χάους

Ο κύκλος ολοκλήρωσε την περίοδο του, αλλά σ' ένα υψηλότερο επίπεδο. Πλέον, γνωρίζουμε ότι συστήματα που υπακούουν σε σταθερούς και ακριβείς νόμους δεν δρουν πάντα με κανονικό τρόπο, που μπορεί να προβλεφθεί. Απλοί νόμοι μπορεί να μην οδηγούν σε απλή συμπεριφορά. Ντετερμινιστικοί νόμοι μπορούν και παράγουν συμπεριφορά που να μοιάζει τυχαία. Η τάξη μπορεί να γεννά ένα δικό της είδος χάους. Αυτό που νομίζαμε απλό, γίνεται περίπλοκο. Σαν αντιστάθμισμα, αυτό που θεωρήθηκε περίπλοκο μπορεί να καταστεί απλό. Φαινόμενα που μοιάζουν τυχαία και χωρίς δομή, μπορεί τελικά να υπακούουν σε απλούς νόμους. Το ντετερμινιστικό χάος έχει κι αυτό τους δικούς του νόμους. Υπάρχει πλήθος αταξιών στη φύση, ορισμένες από τις οποίες μπορεί ν' αποδειχθούν φυσιολογικές εκδηλώσεις των μαθηματικών του χάους, ένα νέο είδος μαθηματικών, μια θεμελιώδης καινοτομία στην κατανόηση της αταξίας στη φύση.

### **ΤΟ ΤΕΛΟΣ ΤΗΣ ΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ: ΜΙΚΡΟ ΑΙΤΙΟ ΚΑΙ ΜΕΓΑΛΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ**

Στον 20ό αιώνα, έπεσαν τα τείχη της βεβαιότητας που περιέβαλαν το σχυρό της νευτώνειας φυσικής. Ο Einstein, με τη θεωρία της Σχετικότητας διέγραψε τη νευτώνεια βεβαιότητα του απόλυτου χωροχρόνου, ενώ η κβαντομηχανική διέλυσε τη βεβαιότητα ότι όλα μπορούσαν να μετρηθούν με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια. Η ταχύτητα και η θέση ενός στοιχειώδους σωματιδίου ύλης δεν ήταν πλέον δυνατό να μετρηθούν ταυτόχρονα με απεριόριστη ακρίβεια. Το τελευταίο σχυρό βεβαιότητας έπεσε στα τέλη του αιώνα: η επιστήμη του χάους ήρθε να εξαλείψει τη βεβαιότητα του Νεύτωνα και του Λαπλάς περί απόλυτου ντετερμινισμού της Φύσης.

Αντίθετα με την κοινή έννοια του χάους ως σύγχυση και απουσία τάξης, στην επιστήμη το χάος σχετίζεται με την έννοια του απρόβλεπτου, του αδύνατου να προβλεφθεί μακροπρόθεσμα. Η τελική κατάσταση επηρεάζεται τόσο πολύ από την αρχική κατάσταση, ώστε η πρόβλεψη αυτής της τελικής κατάστασης περιορίζεται σημαντικά. Στην πραγματικότητα, η γνώση της τελικής κατάστασης στιγματίζεται πάντα από μια ορισμένη, έστω και μικρή, ανακρίβεια λόγω της φύσης των αριθμών που συναντιούνται στη Φύση. Αντίθετα με τους ρητούς αριθμούς, οι οποίοι περιγράφονται από ένα κλάσμα δύο ακεραίων, για την περιγραφή των άρρητων αριθμών χρειάζεται ένα άπειρο πλήθος μη επαναλαμβανόμενων δεκαδικών ψηφίων. Επειδή μάλιστα οι πραγματικοί αριθμοί στη συντριπτική τους πλειοψηφία είναι άρρητοι, είναι πολύ πιθανότερο οι αρχικές συνθήκες (θέσεις, ταχύτητες κτλ.) ενός συστήματος να μας δίνονται με τη μορφή άρρητων αριθμών. Γενικά λοιπόν, οι αρχικές αυτές συνθήκες μας είναι γνωστές μόνο προσεγγιστικά, αφού είναι αδύνατον να γνωρίζουμε πάντα το άπειρο πλήθος των δεκαδικών ψηφίων. Μέσα στις χαοτικές περιοχές, ακόμα και ο πιο σύγχρονος ηλεκτρονικός υπολογιστής είναι καταδικασμένος μετά από λίγο χρόνο να αποτύχει στην ακριβή παρακολούθηση της κίνησης, καθώς θα παρακολουθήσει μια γειτονική τροχιά, η οποία, αφού θα αποκλίνει εκθετικά από τη ζητούμενη, μετά από λίγο χρόνο, θα οδηγήσει μοιραία σε εντελώς λανθασμένους υπολογισμούς.

Υπάρχουν πολλές καταστάσεις στη Φύση που είναι εξαιρετικά ευαίσθητες στις αρχικές συνθήκες. Μια μικρή αλλαγή στην αρχική κατάσταση του συστήματος προκαλεί μια τεράστια επακόλουθη αλλαγή. Υπάρχουν φυσικά συστήματα που είναι εξαιρετικά ευαίσθητα στις αρχικές συνθήκες. Μια μικρή διαταραχή και το αποτέλεσμα αλλάζει εντελώς. Στο τέλος του 19ου αιώνα, ο Γάλλος μαθηματικός Ανρί Πουανκαρέ (Henri Poincare, 1854-1912) ήταν ο πρώτος που στοχάστηκε γύρω από το πρόβλημα της εξάρτησης της συμπεριφοράς ορισμένων συστημάτων από τις αρχικές τους συνθήκες και αντιλήφθηκε ότι, για τα συστήματα αυτά, μια μικρή αλλαγή στην αρχή άλλαζε τόσο την περαιτέρω εξέλιξη, που το μέλλον δεν μπορούσε πλέον να προβλεφθεί. Παρά την προειδοποίηση του Πουανκαρέ, επιστήμη του χάους άρχισε να αναπτύσσεται τη δεκαετία του 1970, χάρη στη βοήθεια του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Έγινε τόσο απαραίτητος στη μελέτη των χαοτικών συστημάτων, όσο το μικροσκόπιο στη μελέτη των μικροβίων και το τηλεσκόπιο στην παρατήρηση του διαστήματος.

## ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ: Η ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΤΟΥ ΧΑΟΥΣ

Στην εποχή της κλασικής επιστήμης, εξαιτίας της έλλειψης τεχνικής για την αντιμετώπιση μη γραμμικοτήτων, εμφανιζόταν η διαδικασία της γραμμικοποίησης των μη γραμμικών εξισώσεων με την απομάκρυνση όλων των μη γραμμικών όρων της εξίσωσης, καθώς είναι συνήθως ευκολότερο να λυθούν οι γραμμικές εξισώσεις απ' ό,τι οι μη γραμμικές. Τα κλασικά μαθηματικά επικεντρώθηκαν στις γραμμικές εξισώσεις. Απέναντι σε ένα μη γραμμικό σύστημα, οι επιστήμονες υιοθετούσαν κάποιες γραμμικές προσεγγίσεις. Λίγοι ήταν σε θέση να θυμούνται πως παρεκκλίσεις είναι τα κανονικά, γραμμικά συστήματα που μπορούν να λυθούν. Η τάση για εξιδανίκευση και η πεποίθηση ότι οι νόμοι της Φύσης πρέπει να είναι απλοί, οδήγησαν στην άποψη ότι ένα σύστημα εξελίσσεται σύμφωνα με νόμους που εμφανίζουν μια απλή αναλογική σχέση ανάμεσα στα μεγέθη, τα οποία εμπλέκονται σε αυτούς, δηλαδή μια γραμμική σχέση. Σε ένα γραμμικό σύστημα, εάν δράσουν ταυτόχρονα δύο δυνάμεις, τότε το αποτέλεσμα θα είναι μία κίνηση που προκύπτει ως το άθροισμα των δύο κινήσεων που θα έκανε το σώμα, εάν οι δυνάμεις δρούσαν χωριστά. Αυτή η επαλληλία των δυνάμεων είναι μια χαρακτηριστική ιδιότητα των γραμμικών συστημάτων. Απεδείχθη όμως ότι στη φύση κυριαρχεί η μη γραμμικότητα. Σε ένα μη γραμμικό σύστημα δύο δράσεις μπορούν να γεννήσουν μη αναμενόμενες δομές και συμπεριφορές, των οποίων οι ιδιότητες μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικές από εκείνες που προδίκάζαν οι υποκείμενοι νόμοι. Η μη γραμμική επιστήμη είναι η επιστήμη της πολυπλοκότητας.

Τον 20ό αιώνα οι φυσικοί άρχισαν να συμπεριλαμβάνουν στις εξισώσεις ορισμένες διαδικασίες απωλειών, όπως η τριβή και πίστευαν ότι τα μη γραμμικά συστήματα συνήθως δεν μπορούν να λυθούν, κάτι που ήταν αλήθεια, και ότι έτειναν να αποτελούν εξαιρέσεις, κάτι που δεν ήταν αλήθεια. Αλλά σχεδόν κανένας δεν υποπτευόταν το χάος που μπορούσε να κρύβεται μέσα στα δυναμικά συστήματα όταν θα αποδιδόταν στη μη γραμμικότητα η σημασία που της έπρεπε. Γιατί, όσον καιρό οι φυσικοί της κλασικής επιστήμης ερευνούσαν τους νόμους της φύσης,



### 1.0 Επιστήμη

→ 1.2 Το Χάος ελευθερώνει τη Φύση

→ 1.2.1 Η Επανάσταση του Χάους

αγνοούσαν την αταξία και τη μη κανονική πλευρά της φύσης. Κατά τη δεκαετία του 1970 όμως, μερικοί επιστήμονες στις ΗΠΑ και στην Ευρώπη άρχισαν να προσεγγίζουν την έννοια της αταξίας. Ήταν μαθηματικοί, φυσικοί, βιολόγοι, χημικοί και όλοι αναζητούσαν συνδέσεις ανάμεσα σε διαφορετικά είδη μη κανονικότητας. Μια δεκαετία αργότερα, το χάος έγινε το συντομευμένο όνομα ενός ταχύτατα αναπτυσσόμενου κινήματος που αναμορφώνει τη σύγχρονη επιστημονική πραγματικότητα. Το χάος έχει δημιουργήσει ειδικές τεχνικές στη χρήση των υπολογιστών και έχει δημιουργήσει τη δική του γλώσσα, με λέξεις όπως φράκταλ (fractals), διακλαδώσεις (bifurcations) και περιοδικότητες (periodicities).

Από παράδοση, όταν οι φυσικοί έβλεπαν πολύπλοκα αποτελέσματα, αναζητούσαν πολύπλοκες αιτίες. Η σύγχρονη μελέτη του χάους άρχισε με τη βαθμιαία συνειδητοποίηση, στη δεκαετία του 1960, ότι πολύ απλές μαθηματικές εξισώσεις μπορούσαν να απεικονίζουν συστήματα βίαια. Ελάχιστες διαφορές στην είσοδο μπορούσαν γρήγορα να μετατραπούν σε τεράστιες διαφορές στην έξοδο — ένα φαινόμενο που πήρε το όνομα “ευαίσθητη εξάρτηση από τις αρχικές συνθήκες”.

Τώρα που η επιστήμη άρχισε να το αναζητά, το χάος φαίνεται να υπάρχει παντού. Το χάος διαπερνά τις διαχωριστικές γραμμές που χωρίζουν τους επιστημονικούς κλάδους. Επειδή είναι μια επιστήμη της γενικής φύσης των συστημάτων, έχει φέρει κοντά στοχαστές από πεδία που απείχαν πολύ το ένα από το άλλο. Η επιστήμη οδηγούνται σε μια κρίση αυξανόμενης εξειδίκευσης, αυτή η κατεύθυνση έχει αντιστραφεί εντυπωσιακά εξαιτίας του χάους. Οι πρώτοι θεωρητικοί του χάους, οι επιστήμονες που θεμελίωσαν το πεδίο αυτό, αναζητούσαν το όλο, αναστρέφοντας την τάση της επιστήμης για αναγωγή, την ανάλυση των συστημάτων στα συστατικά τους μέρη. Οι πιο φλογεροί συνήγοροι της νέας επιστήμης λένε ότι η επιστήμη του 20ού αιώνα θα παραμείνει στη μνήμη των ανθρώπων για τρία πράγματα: τη σχετικότητα, την κβαντομηχανική και το χάος. Από αυτές τις τρεις επαναστάσεις στο χώρο των φυσικών επιστημών, η επανάσταση του χάους ισχύει για το σύμπαν που βλέπουμε και αγγίζουμε, για τα αντικείμενα σε ανθρώπινη κλίμακα. Η καθημερινή εμπειρία και οι πραγματικές εικόνες του κόσμου έχουν γίνει αποδεκτοί στόχοι της επιστημονικής έρευνας.

Στην καθημερινή ζωή, η ευαίσθητη εξάρτηση από τις αρχικές συνθήκες βρίσκεται κρυμμένη παντού. Πρόκειται για καταστάσεις όπου κάποιες πολύ μικρές αλλαγές στη ζωή μας μπορούν να την αλλάξουν ανεπανόρθωτα. Αν τροποποιήσετε, έστω και λίγο, τις αρχικές συνθήκες, το πεπρωμένο σας θα αλλάξει ολοκληρωτικά. Ο Αμερικανός δημοσιογράφος James Gleick χρησιμοποιεί την ακόλουθη εικόνα: “Για ένα καρφί, χάθηκε το πέταλο. Για ένα πέταλο, χάθηκε το άλογο. Για ένα άλογο, χάθηκε ο καβαλάρης. Για έναν καβαλάρη, χάθηκε η μάχη. Για μια μάχη, χάθηκε η αυτοκρατορία!” [James Gleick, Χάος: Μία Νέα Επιστήμη, Κάτοπτρο, Αθήνα, 1990].

### 1.2.1.3 ΜΙΑ ΑΛΗΘΙΝΗ ΑΛΛΑΓΗ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΟΣ

Σύμφωνα με τον Αμερικανό ιστορικό της επιστήμης Τόμας Κουν (Thomas S. Kuhn, 1922-1996), η επιστημονική πρόοδος δεν αποτελεί μια συνεχή και γραμμική διαδικασία συσσώρευσης νέων γνώσεων. Η ιστορία της επιστήμης σημαδεύεται αντίθετα από ασυνέχειες, τομές και άλματα, που αποτελούν αληθινές επιστημονικές επαναστάσεις. Οι επαναστάσεις δεν έρχονται σιγά σιγά. Οι ιδέες του Κουν για το πώς εργάζονται οι επιστήμονες και πώς γίνονται οι επαναστάσεις, τόνισαν την αντίθεση ανάμεσα σ' αυτό που κάνει η μεγάλη μάζα των επιστημόνων που δουλεύουν πάνω σε συνηθισμένα, κατανοητά προβλήματα, και στην ανορθόδοξη εργασία που προκαλεί επαναστάσεις. Μια νέα θεωρία δεν είναι απλώς μια προσθήκη σε αυτό που μας είναι ήδη γνωστό. Είναι το προϊόν μιας ρήξης με την επιστημονική παράδοση, το αποτέλεσμα μιας επαναστατικής διαδικασίας που τροποποιεί ριζικά το θεωρητικό πλέγμα μέσα από το οποίο η επιστημονική κοινότητα αντιλαμβάνεται τον κόσμο. Μια περιγραφή της φύσης αντικαθιστά μιαν άλλη. Η νεότερη θεωρία δεν συνεχίζει αλλά αντίθετα απορρίπτει την προηγούμενη. Αυτό υποστηρίζει ο Κουν και αυτό διδάσκει η ιστορία του χάους. Τα νέα για το χάος ήρθαν τη δεκαετία του 1970 σαν ηλεκτρικό σοκ. Ήταν μια αληθινή αλλαγή Παραδείγματος, ένας μετασχηματισμός του τρόπου σκέψης. Αρχικά, οι απόψεις που υποστηρίχτηκαν σχετικά με το χάος ηχούσαν εξωπραγματικές και καθόλου επιστημονικές. Και το χάος βασιζόταν σε μαθηματικά που φαίνονταν δύσκολα και καθόλου συμβατικά. Κάθε επιστήμονας από αυτούς που ασχολήθηκαν πρώιμα με το χάος έχει να διηγηθεί κάποια ιστορία αποθάρρυνσης. Καθώς όμως οι επιστήμονες του χάους πολλαπλασιάζονταν, στα μέσα της δεκαετίας του 1980 μια διαδικασία ακαδημαϊκής εξάπλωσης είχε φέρει τους ειδικούς του χάους σε σημαντικές θέσεις στα πανεπιστήμια. Νέα κέντρα και ινστιτούτα ιδρύονταν για να ειδικευτούν στη μη γραμμική δυναμική και στα πολύπλοκα συστήματα. Το χάος έγινε όχι μόνο θεωρία αλλά και μέθοδος. Το χάος απέκτησε κύρος επιστημονικού αντικειμένου και διάφορα ερευνητικά ινστιτούτα ιδρύονται σ' ολόκληρο τον πλανήτη για να προωθήσουν τη μελέτη του. Έτσι, πέρασε τα όρια του τομέα των φυσικών επιστημών και εισέβαλε σε πολλούς και ποικίλους κλάδους όπως η βιολογία, η οικονομία, η αρχιτεκτονική και η πολεοδομία.

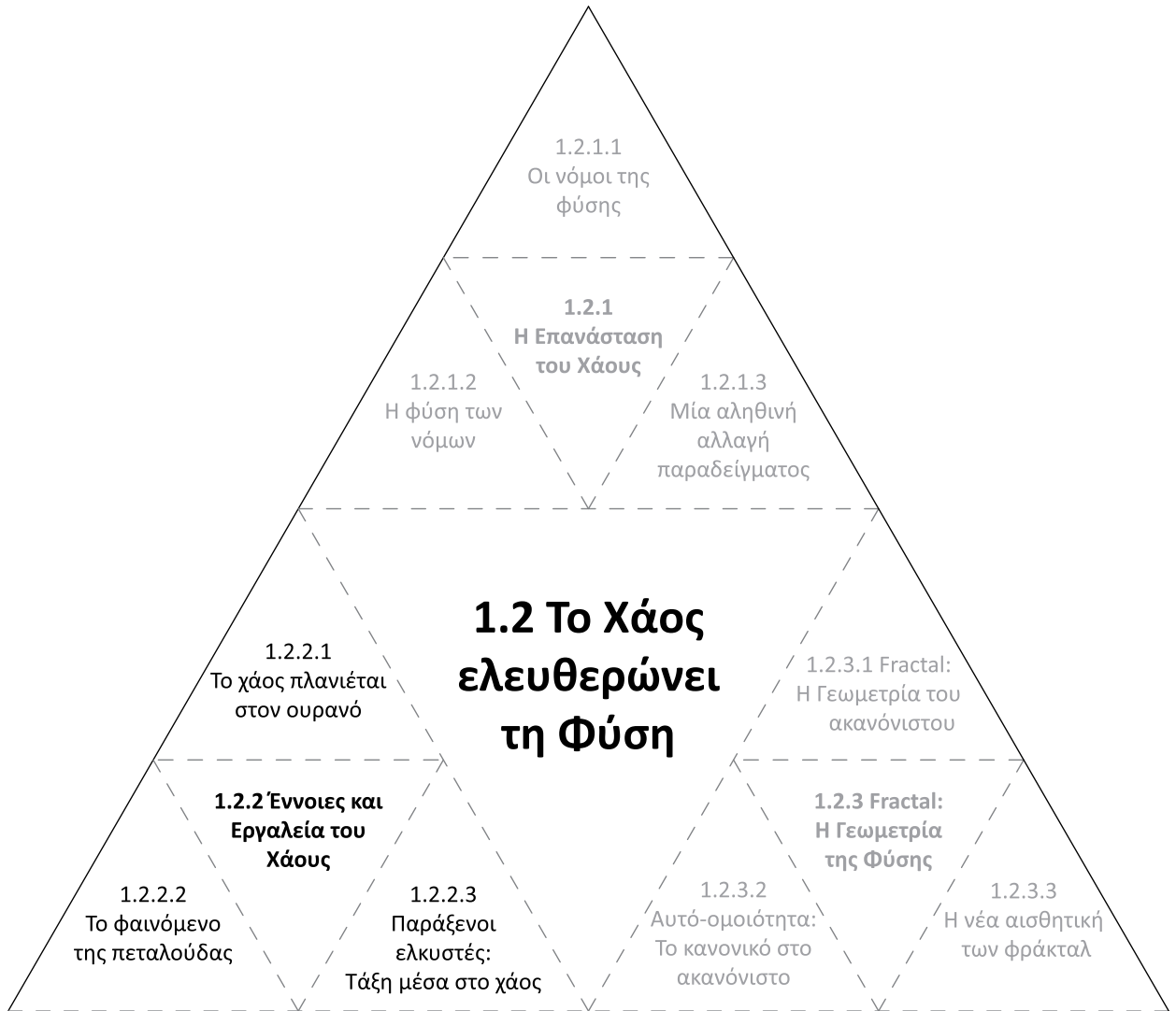


#### 1.0 Επιστήμη

→ 1.2 Το Χάος ελευθερώνει τη Φύση

→ 1.2.1 Η Επανάσταση του Χάους

## 1.2.2 ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΤΟΥ ΧΑΟΥΣ



### 1.0 Επιστήμη

→ 1.2 Το Χάος ελευθερώνει τη Φύση

→ 1.2.2 Έννοιες και Εργαλεία του Χάους



### 1.2.2.1 ΤΟ ΧΑΟΣ ΠΛΑΝΙΕΤΑΙ ΣΤΟΝ ΟΥΡΑΝΟ

#### ΩΡΟΛΟΓΙΑΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ Ή ΧΑΟΣ;

##### ΤΑΞΗ ΑΠΟ ΤΟ ΧΑΟΣ: Ο ΟΥΡΑΝΟΣ ΕΙΝΑΙ ΟΡΘΟΛΟΓΙΚΟΣ

Η αιώνια πάλη μεταξύ τάξης και αταξίας, αρμονίας και χάους, συναντιέται σε πολλούς μύθους για τη δημιουργία του κόσμου και αντιπροσωπεύει μια βαθιά ριζωμένη αντίληψη του ανθρώπου για το σύμπαν. Το χάος εμφανίζεται ως η αρχέγονη άμορφη μάζα από την οποία ο δημιουργός έπλασε την τάξη και το σύμπαν. Η τάξη ισοδυναμεί με το καλό, και η αταξία με το κακό. Η τάξη και το χάος φαίνονται σαν δύο αντίθετα πράγματα, σαν δύο πόλοι γύρω απ' τους οποίους περιστρέφουμε τις ερμηνείες μας σχετικά με τον κόσμο.

Το Χάος αποτέλεσε το πρώτο στοιχείο της κοσμογονίας των ποιητών και φιλοσόφων της αρχαίας Ελλάδας. Για πρώτη φορά παρουσιάζεται στην Ησιόδεια Θεογονία, όπου και προηγείται όλης της υπόλοιπης δημιουργίας:

«Πρώτα-πρώτα το Χάος έγινε. Κι ύστερα  
η πλατύστερνη η Γη, η σταθερή πάντοτε έδρα όλων των αθανάτων,  
που την κορυφή κατέχουνε του χιονισμένου Ολύμπου,  
και τα ζοφώδη Τάρταρα στο μυχό της γης με τους πλατιούς τους δρόμους.  
Αλλά κι ο Έρωτας, που ο πιο ωραίος είναι ανάμεσα στους αθάνατους θεούς...  
Κι από το Χάος έγινε το Έρεβος κι η μαύρη η Νύχτα.  
Κι από τη Νύχτα πάλι έγιναν ο Αιθέρας και η Ημέρα,  
αυτούς τους γέννησε αφού συνέλαβε σμίγοντας ερωτικά με το Έρεβος...»  
[Ησιόδος, Έργα και ημέρες, Θεογονία, Η ασπίδα του Ηρακλή, Εισαγωγή, μετάφραση, σχόλια: Σταύρος Γκιργκένης, Ζήτρος, Θεσσαλονίκη, 2001]

Κάποια έμφυτη παρόρμηση κάνει την ανθρωπότητα να προσπαθεί να κατανοήσει την κανονικότητα στη φύση, να ερευνήσει τους νόμους που κρύβονται πίσω από την παράξενη πολυπλοκότητα του σύμπαντος, να βγάλει κάποια τάξη μέσα απ' το χάος. Ακόμα και οι αρχαιότεροι πολιτισμοί είχαν επινοήσει ημερολόγια για να προβλέπουν τις εποχές και αστρονομικούς κανόνες για να προβλέπουν τις εκλείψεις. Τα άστρα που επαναλαμβάνουν τις κινήσεις τους κάθε βράδυ, η κανονικότητα της πορείας του Ήλιου στη διάρκεια της μέρας, η Σελήνη που αλλάζει όψη σε τακτικά διαστήματα στη διάρκεια του μήνα, η κανονικότητα της ουράνιας μηχανής αποτελούσε για τους ανθρώπους απόδειξη ότι το σύμπαν ήταν ορθολογικό. Αναγνώριζαν μορφές μέσα στους αστέρες του ουρανού και έπλεκαν μύθους γι' αυτές. Επινόησαν ένα πλήθος θεοτήτων για να εξηγήσουν τις παραξενιές του κόσμου. Τέλος, επινόησαν κύκλους, σχήματα, αριθμούς. Μαθηματικά. Η Πυθαγόρεια θεωρία για τη μουσικιστική σημασία των αριθμών ενέπνευσε τον Πλάτωνα την πεποίθηση ότι όλα, ακόμα και η κίνηση του ουρανού, ήταν φαινόμενα με μαθηματική κανονικότητα, κάτι που αργότερα άσκησε μεγάλη επιρροή.



#### 1.0 Επιστήμη

→ 1.2 Το Χάος ελευθερώνει τη Φύση

→ 1.2.2 Έννοιες και Εργαλεία του Χάους

Στο τέλος της διαδρομής που ήθελε τη Γη στο κέντρο του κόσμου, ο Πτολεμαίος συνέχισε και βελτίωσε το μοντέλο του Εύδοξου και των διαδόχων του, ώσπου αυτό συνταίριαξε τόσο αρμονικά με τις παρατηρήσεις, ώστε τίποτε δεν το υποσκέλιζε για 1.500 χρόνια.

### **Η ΣΕΛΗΝΗ ΚΑΙ ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΣΩΜΑΤΩΝ: Ο ΣΠΟΡΟΣ ΤΟΥ ΧΑΟΥΣ**

Το μοντέλο του Πτολεμαίου καταρρίφθηκε το 1543, όταν ο Πολωνός κληρικός Νικόλαος Κοπέρνικος (Nicolas Copernic, 1473-1543) εκτόπισε τη Γη από το κέντρο κι έβαλε στη θέση της τον Ήλιο. Ο Γερμανός Γιοχάνες Κέπλερ (Johannes Kepler, 1571-1630), ανακάλυψε ότι οι πλανήτες ακολουθούν ελλειπτικές και όχι κυκλικές τροχιές, τοποθετώντας τη Σελήνη σε ελλειπτική τροχιά γύρω από τη Γη. Αν και οι υπολογισμοί του ήταν πολύ ακριβείς, η Σελήνη παρέμενε ανυπότακτη, αφού πάντα, μετά από ένα διάστημα, οι υπολογισμοί ήταν ανακόλουθοι της πορείας της. Με το πρόβλημα της τροχιάς της Σελήνης καταπιάστηκε και ο Ισαάκ Νεύτων θεωρώντας υπεύθυνους για την κίνησή της, τη βαρύτητα της Γης και την ελκτική επιρροή του Ήλιου. Ήδη ο Νεύτων, με το νόμο της παγκόσμιας έλξης, είχε απαντήσει στο ερώτημα σχετικά με την αιτία της κίνησης των πλανητών: οι πλανήτες κινούνται γύρω από τον Ήλιο, επειδή υφίστανται την ελκτική επιρροή του. Στο μοντέλο του Νεύτωνα, η Γη, η Σελήνη και ο Ήλιος έλκονται αναμεταξύ τους από μια βαρυτική δύναμη που εξαρτάται από τις μάζες και τις αποστάσεις τους. Ο Νεύτων ήλπιζε έτσι να εξηγήσει την περίπλοκη κίνηση της Σελήνης με βάση την επιρροή που είχε ο Ήλιος στην ελλειπτική τροχιά της Σελήνης γύρω από τη Γη. Στο σημαντικότερο έργο του, Μαθηματικές Αρχές της Φυσικής Φιλοσοφίας το 1687, είχε επιλύσει το πρόβλημα των δύο σωμάτων. Ωστόσο, το πέρασμα από τα δύο στα τρία σώματα ήταν πολύ πιο δύσκολο. Οι τροχιές των τριών σωμάτων δεν μπορούν να περιγραφούν από έναν απλό μαθηματικό τύπο, όπως στην περίπτωση των δύο σωμάτων. Τελικά, ούτε ο Νεύτων βρήκε ακριβή λύση στο πρόβλημα της κίνησης της Σελήνης καθώς οι θέσεις που υπολόγιζε με βάση τη θεωρία του εξακολουθούσαν να διαφέρουν από τις θέσεις που έβλεπε στον ουρανό. Με το πρόβλημα της Σελήνης ασχολήθηκαν οι μεγαλύτεροι μαθηματικοί του 18ου και του 19ου αιώνα. Ωστόσο, η Σελήνη δεν ακολουθούσε τους υπολογισμούς τους.

Για να προχωρήσει η έρευνα, χρειαζόταν μια εντελώς καινούρια προσέγγιση. Τη νέα αυτή πορεία ανακάλυψε ο Γάλλος μαθηματικός Ανρί Πουανκαρέ, ο οποίος απέδειξε ότι οι εξισώσεις του Νεύτωνα στην περίπτωση των τριών σωμάτων περιείχαν όχι μόνο το κανονικό και το προβλέψιμο, αλλά και το ακανόνιστο και το απρόβλεπτο. Η κίνηση της Σελήνης δεν συμφωνούσε με τους υπολογισμούς των μαθηματικών γιατί στη συμπεριφορά της υπήρχε ένα μη προβλεπόμενο στοιχείο. Στην πορεία των ερευνών του, ο Πουανκαρέ έβγαλε από το σκοτάδι έναν εντελώς απρόσμενο πρωταγωνιστή, που επρόκειτο να παίξει σημαντικότερο ρόλο στην κατασκευή της πραγματικότητας: το χάος.

## Η ΤΑΞΗ ΚΑΙ ΤΟ ΧΑΟΣ ΣΤΙΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΝΕΥΤΩΝΑ

Η επιστήμη είναι ένα σύστημα ανοιχτό, ενταγμένο στην κοινωνία και συνδεδεμένο μαζί της με πάρα πολλά κυκλώματα ανάδρασης. Επηρεάζεται έντονα από το εξωτερικό της περιβάλλον και, η ανάπτυξη της διαμορφώνεται από την κοινωνική αποδοχή των βασικών ιδεών της. Το σύστημα ιδεών της κλασικής επιστήμης απεικόνιζε έναν κόσμο, όπου κάθε περιστατικό είχε καθοριστεί από κάποιες αρχικές συνθήκες. Στον κόσμο αυτό η τύχη δεν έπαιζε κανένα ρόλο και όλα τα τμήματα του συνταιριάζονταν σαν γρανάζια μιας παγκόσμιας μηχανής. Η αποδοχή αυτής της μηχανιστικής άποψης συνέπεσε με τον πολιτισμό του εργοστασίου. Ο Αιώνας της Μηχανικής αγκάλιασε μ' ενθουσιασμό τις επιστημονικές θεωρίες που παράσταναν το σύμπαν σαν μηχανή. Απ' αυτήν την αντίληψη για τον κόσμο οδηγήθηκε ο Λαπλάς στον περίφημο ισχυρισμό του πως, αν μας δοθούν αρκετά στοιχεία, μπορούμε, όχι μόνο να προβλέψουμε το μέλλον, αλλά και να αναπαραστήσουμε το παρελθόν. Και η εικόνα του μηχανικού σύμπαντος δε διαμόρφωσε μόνο την εξέλιξη της επιστήμης, μα διαδόθηκε και σε πολλούς άλλους τομείς. Η αβεβαιότητα πλανιόταν στις εξισώσεις του Νεύτωνα. Δεν τη διέκρινε επειδή αυτό που αναζητούσε ήταν η αρμονία και η τάξη. Η λύση του προβλήματος της κίνησης των πλανητών στο σημαντικότερο έργο του, τις Μαθηματικές αρχές της φυσικής φιλοσοφίας, που δημοσιεύτηκε το 1687, υπήρξε τόσο πλήρης, που το σύμπαν μεταμορφώθηκε από μυστηριώδες κι αβέβαιο σε καλοκουρδισμένο μηχανικό ρολόι, που εξοβέλιζε κάθε αμφιβολία. Το μήνυμα των υπολογισμών του είναι το ίδιο με αυτό που είχαν διακηρύξει οι Έλληνες: η Φύση διέπεται από παγκόσμιους νόμους, που μπορούσε να συλλάβει η ανθρώπινη λογική. Αυτή η εμπιστοσύνη στην ορθολογικότητα του κόσμου βγήκε από τα όρια της φυσικής και εισέβαλε σε όλες τις σφαίρες της ανθρώπινης δραστηριότητας. Βασιζόμενος στη λογική του, ο άνθρωπος μπορούσε να τελειοποιήσει τους κοινωνικούς και πολιτικούς θεσμούς του. Η βιομηχανική επανάσταση, όπως η Αμερικανική και η Γαλλική Επανάσταση, ήταν αποτελέσματα αυτής της απεριόριστης εμπιστοσύνης στη λογική του ανθρώπου.

Ο Νεύτων στο μεγάλο έργο θεωρητικό του οικοδόμημα επέλεξε και απομόνωσε τα προβλήματα που, ανάμεσα στις αναρίθμητες προκλήσεις της Φύσης, μπορούσαν να υποταχθούν στην ανθρώπινη λογική και ενείχαν μια καθορισμένη λύση. Ωστόσο, γνώριζε ότι η θεωρία του δεν μπορούσε να τα εξηγήσει όλα, καθώς η κίνηση της Σελήνης δεν υπακούσε στους υπολογισμούς. Ο Νεύτων μπόρεσε να εξηγήσει με νόμους τον κόσμο γιατί στο ηλιακό σύστημα κυριαρχεί η μάζα του Ήλιου με αποτέλεσμα να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της τροχιάς κάθε πλανήτη γύρω από τον ήλιο σαν ένα πρόβλημα δύο σωμάτων: του Ήλιου και του πλανήτη.



### 1.0 Επιστήμη

→ 1.2 Το Χάος ελευθερώνει τη Φύση

→ 1.2.2 Έννοιες και Εργαλεία του Χάους

## ΑΝΡΙ ΠΟΥΑΝΚΑΡΕ: Ο ΠΡΟΦΗΤΗΣ ΤΟΥ ΧΑΟΥΣ

### ΤΟ ΗΛΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΙΝΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟ;

Ο Πουανκαρέ καταπιάστηκε με το πρόβλημα των τριών σωμάτων με αφορμή ένα μαθηματικό διαγωνισμό που οργάνωσε το Πανεπιστήμιο της Στοκχόλμης για να γιορτάσει τα εξηκοστά γενέθλια του Όσκαρ Β' (1829-1907), βασιλιά τη Σουηδίας. Ένα από τα θέματα του διαγωνισμού αφορούσε τη σταθερότητα του ηλιακού συστήματος: ή οι πλανήτες θ' ακολουθούν τις τροχιές τους γύρω από τον Ήλιο, επαναλαμβάνοντας την ίδια κίνηση, οπότε το ηλιακό σύστημα είναι σταθερό, ή οι πλανητικές τροχιές θα αλλάξουν ριζικά σ' ένα μακρινό μέλλον, αλλοιώνοντας εντελώς τη διάταξη του ηλιακού συστήματος, οπότε το ηλιακό σύστημα είναι ασταθές. Σήμερα ξέρουμε ότι αυτό ήταν ένα πολύ σημαντικό σημείο καμπής στην εξέλιξη της μαθηματικής φυσικής. Πριν από τον Πουανκαρέ, οι μαθηματικοί νόμιζαν ότι μπορούσαν ν' απαντήσουν στο ερώτημα της σταθερότητας του ηλιακού συστήματος εξετάζοντας τη φύση των λύσεων στις νευτώνειες εξισώσεις. Οι λύσεις αυτές βασιζόνταν στην ιδέα ότι η θέση και η ταχύτητα ενός σώματος σε μια δεδομένη στιγμή καθορίζουν όλες τις μελλοντικές θέσεις και ταχύτητες του σώματος αυτού, αλλά και ότι είναι αποτέλεσμα των θέσεων και των ταχυτήτων του σώματος αυτού στο παρελθόν. Οι νόμοι του Νεύτωνα συνδέουν την παρούσα κατάσταση του κόσμου με την αμέσως προηγούμενη ή αμέσως επόμενη.

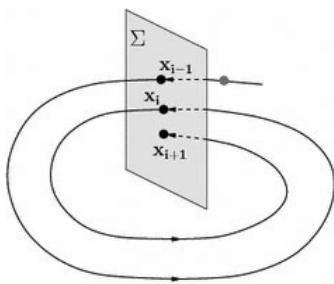
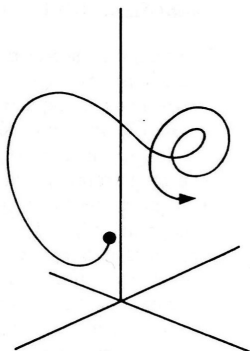
### Η ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΟ ΣΥΝΟΛΟ ΤΗΣ: Ο ΧΩΡΟΣ ΤΩΝ ΦΑΣΕΩΝ

Η παραδοσιακή μέθοδος των διαφορικών εξισώσεων απομόνωνε μόνο κομμάτια της πραγματικότητας και στη συνέχεια αποκαθιστούσε τη συνολική πραγματικότητα βάζοντας τα κομμάτια αυτά το ένα πλάι στο άλλο. Ο Ανρί Πουανκαρέ, αντίθετα, ήθελε να εξετάσει την προσοδευτική εξέλιξη ενός φαινομένου στο σύνολό του. Για να δει τα πράγματα σφαιρικά, ο Πουανκαρέ εφήυρε νέες τεχνικές, που μέχρι και σήμερα αποτελούν τη βάση για τη μελέτη του χάους. Εγκατέλειψε τον χώρο των τριών διαστάσεων και μεταφέρθηκε σε ένα χώρο αφηρημένο, με πολλές διαστάσεις, που ονόμασε «χώρο φάσεων». Μέσα σε αυτόν τον πολυδιάστατο χώρο, ολόκληρο το ηλιακό σύστημα αντιπροσωπεύεται από ένα μόνο σημείο, αντί για δέκα σημεία μέσα σε ένα συμβατικό τρισδιάστατο διάστημα. Όσο περίπλοκο κι αν είναι το σύστημα που μελετάται, όσο πολλοί κι αν είναι οι πρωταγωνιστές, ένα μόνο σημείο αρκεί για να αντιπροσωπεύει το σύστημα στο σύνολό του. Όμως αυτό που ενδιέφερε τον Πουανκαρέ δεν ήταν η στατική και ακίνητη όψη ενός συστήματος, αλλά η δυναμική και εξελικτική όψη του. Ήθελε να μελετήσει πως η Σελήνη κινιόταν και το πώς η τροχιά της άλλαζε στη διάρκεια εκατομμυρίων χρόνων. Όταν το σύστημα αλλάζει και εξελίσσεται, το σημείο που το αντιπροσωπεύει μέσα στον χώρο φάσεων κινείται διαγράφοντας μια καμπύλη. Αν αλλάξετε τις αρχικές του συνθήκες, τότε θα διαγράψει μιαν άλλη πορεία. Οι κινήσεις ενός σημείου παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον, αφού μας ενημερώνουν σχετικά με τις κινήσεις του συστήματος μέσα στον πραγματικό χώρο. Έτσι, για να διαπιστώσουμε αν η εξέλιξη ενός συστήματος στον πραγματικό χώρο επηρεάζεται έντονα από τις αρχικές συνθήκες, αρκεί να μελετήσουμε τις κινήσεις δύο σημείων, με παρόμοιες

πορείες. Αν οι πορείες τους αποκλίνουν, το σύστημα επηρεάζεται έντονα από τις αρχικές συνθήκες. Αντιθέτως, αν οι πορείες τους συμπίπτουν και μοιάζουν, τότε δεν επηρεάζεται έντονα.

## ΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΟΥ ΠΟΥΑΝΚΑΡΕ

Για να αναλύσει την κίνηση των τροχιών στο χώρο φάσεων, ο Πουανκαρέ φαντάστηκε μία επίπεδη επιφάνεια, που θα τρυπούσαν οι τροχιές και θα κατέγραφε το ακριβές σημείο όπου θα τη διαπερνούσαν. Το μεγάλο της προτέρημα είναι ότι απλοποιεί το πρόβλημα της παρατήρησης. Αν ένας πλανήτης ακολουθεί αδιάκοπα την ίδια τροχιά στον ουρανό, όπως πίστευε ο Νεύτων, τότε ο ίδιος κύκλος θα παρατηρείται και στον χώρο φάσεων. Αυτός ο κύκλος θα διαπερνά το επίπεδο του Πουανκαρέ σε ένα και μοναδικό σημείο. Μια πιο περίπλοκη κίνηση, που επαναλαμβάνεται μετά από τέσσερα περάσματα, μεταφράζεται σε τέσσερα σημεία του επιπέδου αυτού. Μια κίνηση που δεν επαναλαμβάνεται ποτέ, γεννά άπειρα σημεία. Τα σημεία του επιπέδου του Πουανκαρέ εμφανίζουν σχέδια των οποίων η πολυπλοκότητα αντικατοπτρίζει άμεσα την πολυπλοκότητα της κίνησης στον πραγματικό χώρο. Εξετάζοντας τα σχέδια αυτά, ο Πουανκαρέ συνάντησε το χάος. Ιδιοφυώς διέβλεψε μέσα από τα σχέδια αυτού του κατακόρυφου επιπέδου ότι υπήρχαν καταστάσεις όπου μια πολύ μικρή αλλαγή στην αρχική θέση ή ταχύτητα ενός από τα τρία σώματα μπορούσε να αλλοιώσει εντελώς την τροχιά του. Η μικρή αυτή αλλαγή μπορούσε να το κάνει να μεταπηδήσει από τη σταθερότητα στο χάος. Ο Πουανκαρέ συνειδητοποίησε ότι η κανονικότητα και το χάος συνδέονταν στενά κι ότι το απρόβλεπτο ποτέ δεν απείχε πολύ από το προβλέψιμο. Στο επίπεδο του Πουανκαρέ, εν μέσω ζωνών κανονικότητας μπορεί να βρίσκονταν και νησίδες αναταραχής, όπως εν μέσω χαστικών περιοχών μπορούσαν να εμφανιστούν νησίδες τάξης. Έτσι, ο Πουανκαρέ ανακάλυψε ότι ένα σύστημα φαινομενικά απλό, που διέπεται από ένα νόμο τόσο ακριβή και περιοριστικό, όσο ο νόμος της παγκόσμιας έλξης του Νεύτωνα, μπορούσε να περιλάβει το απρόβλεπτο και το απροσδιόριστο.



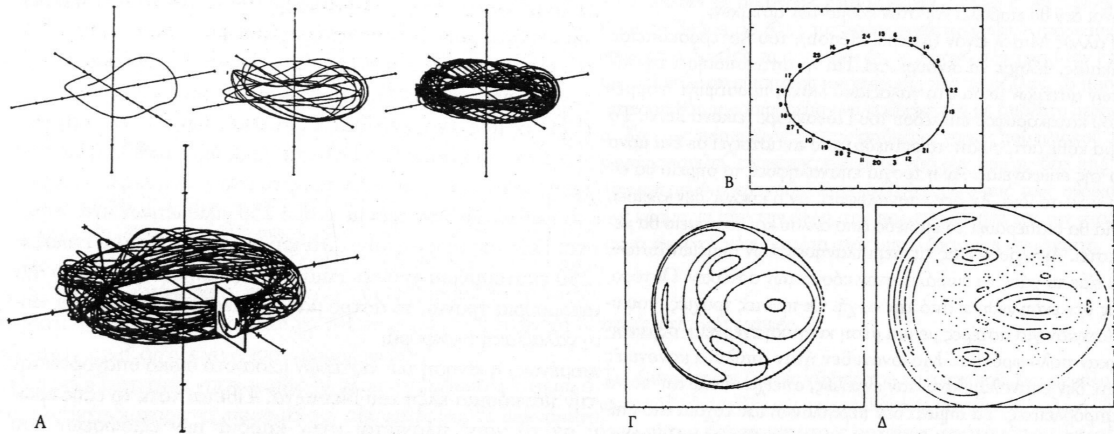
**Ο χώρος φάσεων και το επίπεδο Πουανκαρέ**→ Στον πολυδιάστατο χώρο φάσεων, καθώς το σύστημα εξελίσσεται με το χρόνο, το σημείο που αντιπροσωπεύει το σύστημα κινείται, διαγράφει μια καμπύλη. Τα σημεία της τομής της τροχιάς με το κάθετο επίπεδο του Πουανκαρέ, αποτυπώνουν σε αυτό τη συμπεριφορά του συστήματος.



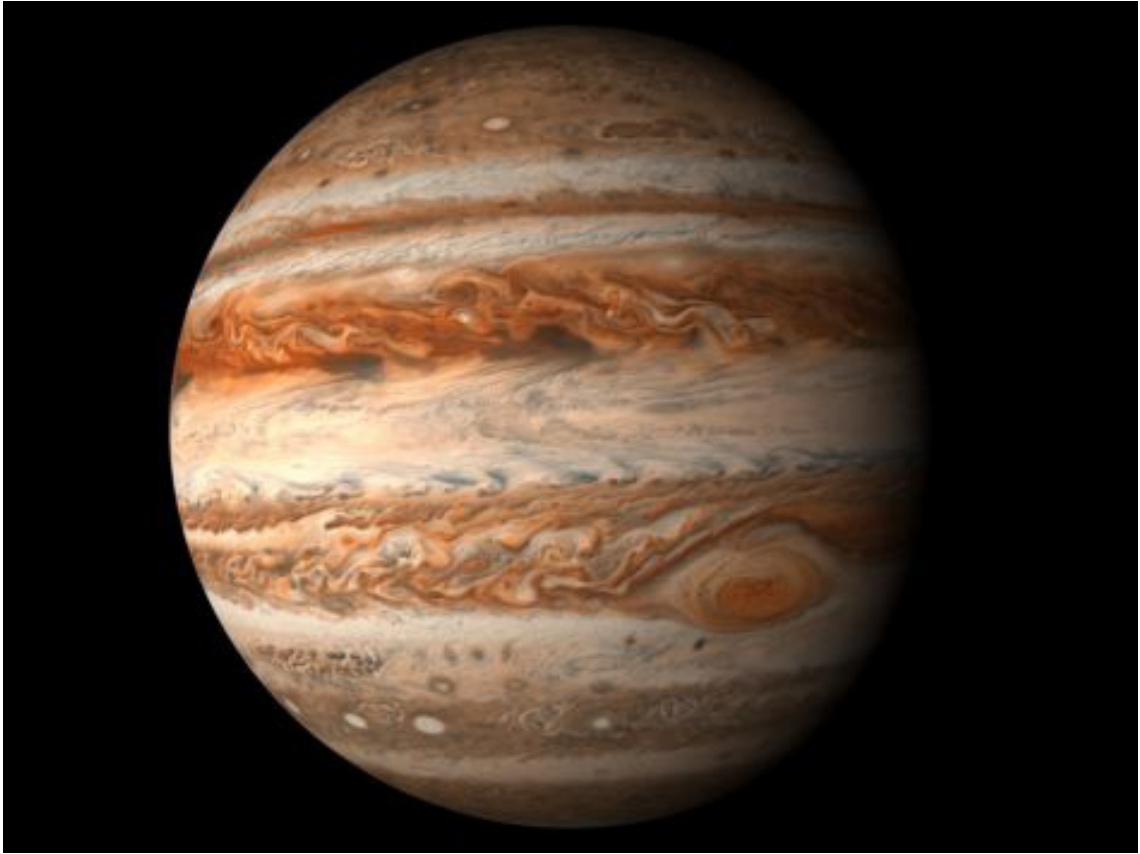
### 1.0 Επιστήμη

→ 1.2 Το Χάος ελευθερώνει τη Φύση

→ 1.2.2 Έννοιες και Εργαλεία του Χάους



**Κόμικς για το Χάος** → Ο Γάλλος αστρονόμος Μισέλ Ενόν (Michel Hénon) από το Αστεροσκοπείο της Νίκαιας, με στόχο να εξετάσει την παρουσία του χάους στις τροχιές των αστερών του γαλαξιακού δίσκου, παρατήρησε την τροχιά τους στο χώρο φάσεων. Οι αστέρες μετακινούνταν μέσα σ' ένα χώρο, που έχει το σχήμα τόρου. Για να οπτικοποιήσει την κίνηση των αστερών, χρησιμοποίησε τη μέθοδο του κατακόρυφου επιπέδου του Πουανκαρέ (Α). Η διαδικασία απεικόνισης του Ενόν ήταν μια κάθετη τομή αυτού του τόρου. Τα σημεία δεν περιπλανιόνταν τυχαία στο επίπεδο του Πουανκαρέ, αλλά διέγραφαν μια καμπύλη με καθορισμένο σχήμα, που έμοιαζε με αυγό (Β). Μια τυπική τροχιά αρχίζει με ένα σημείο κάτω αριστερά στη σελίδα. Μετά, στο επόμενο πέρασμα, ένα σημείο εμφανίζεται λίγα εκατοστά πιο δεξιά. Μετά ένα άλλο, πιο δεξιά και λίγο πιο πάνω, κ.ο.κ. Μετά από δέκα περάσματα, τα σημεία σχηματίζουν μια καμπύλη σαν αυγό. Τα διαδοχικά σημεία δημιουργούν στην πραγματικότητα μια κλειστή καμπύλη που όμως μόνο μετά από μερικά περάσματα διαγράφεται καθαρά. Τέτοιου είδους τροχιές δεν είναι εντελώς κανονικές, αφού ποτέ δεν επαναλαμβάνονται με ακρίβεια, αλλά ασφαλώς μπορούν να προβλεφτούν και δεν είναι καθόλου χαοτικές. Ποτέ σημεία δεν καταλήγουν μέσα ή έξω από την καμπύλη. Συνέχιζε να υπολογίζει διαφορετικές τροχιές, αυξάνοντας σταθερά το επίπεδο ενέργειας στο δυναμικό τους σύστημα. Η αυγόσχημη καμπύλη απόκτησε πιο περίπλοκο περίγραμμα, που διαιρούνταν σε ξεχωριστούς κύκλους (Γ). Όμως οι τροχιές παρέμεναν σταθερές και το χάος απόν. Ο Ενόν αύξησε κι άλλο την ενέργεια των αστερών και εμφανίστηκε το χάος. Τα σημεία στο επίπεδο του Πουανκαρέ άρχισαν να περιπλανιούνται. Νησίδες τάξης εμφανίζονταν εδώ κι εκεί, χαμένες όμως σ' έναν απέραντο ωκεανό αταξίας (Δ). Σε μερικές περιοχές, διαγράφονταν καμπύλες, αλλά σε άλλες καμία καμπύλη δεν μπορούσε να προσαρμοστεί στα σημεία. Οι αστρικές τροχιές είχαν γίνει ασταθείς και το χάος είχε εισβάλει στο γαλαξία. Δύο σημεία κοντινά το ένα στο άλλο στο επίπεδο του Πουανκαρέ μπορεί να ανήκαν σε εντελώς διαφορετικές τροχιές.



**Αναταραχή στον Δία**→ Ο Δίας είναι ένα εξ ολοκλήρου ρευστό σε κίνηση και η μεγάλη κόκκινη κηλίδα στο νότιο ημισφαίριο είναι μια τεράστια δίνη από αέρια, φυλακισμένη μέσα σε τεράστιες, οριζόντιες λωρίδες νέφους. Η κηλίδα μπορεί να νοηθεί ως ένα σύστημα που οργανώνεται μόνο του, μια σταθερή περιοχή που δημιουργήθηκε και συντηρήθηκε από το χάος που ήταν υπεύθυνο για όλη την αναταραχή που την περιέβαλε. Μια νησίδα σταθερότητας με δομές σε έναν ωκεανό αστάθειας από μη δομές.



### 1.0 Επιστήμη

→ 1.2 Το Χάος ελευθερώνει τη Φύση

→ 1.2.2 Έννοιες και Εργαλεία του Χάους

## ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΗΣ ΤΥΧΗΣ

### ΤΟ ΑΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΤΟ ΜΕΛΛΟΝ ΤΟΥ ΗΛΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Ο Πουανκαρέ όταν καταπιάστηκε με το πρόβλημα των τριών σωμάτων ανακάλυψε ότι υπήρχαν ζώνες αταξίας ανάμεικτες και διαδοχικές με τις ζώνες της τάξης, καθιστώντας πολύ πιο αποδεκτή την πιθανότητα ότι το ηλιακό σύστημα μπορούσε ξαφνικά να μεταπηδήσει από την τάξη στην αταξία. Τη δεκαετία του 1980 ο Γάλλος Ζακ Λασκάρ (Jacques Laskar) εξέτασε τη μέση συμπεριφορά των πλανητών στις τροχιές τους γύρω από τον Ήλιο, τροποποιώντας ελάχιστα τις αρχικές συνθήκες και εντόπισε το χάος. Το ερώτημα ήταν το εξής: μέσα στον αφηρημένο χώρο φάσεων, δύο πορείες ενός πλανήτη με ελαφρώς διαφορετικές αρχικές συνθήκες παραμένουν κοντά η μία στην άλλη, με την απόκλισή τους να αυξάνεται αναλογικά με το χρόνο, ή αποκλίνουν εκθετικά, με την απόκλισή τους να διπλασιάζεται, να ξαναδιπλασιάζεται κι έπειτα να ξαναδιπλασιάζεται σε ένα δεδομένο χρόνο, που θα είναι τόσο μικρότερος, όσο πιο χαοτικό θα είναι το σύστημα; Η απάντηση που έδωσε ο υπολογιστής είναι ότι ολόκληρο το ηλιακό σύστημα είναι χαοτικό. Οι μικροσκοπικές αλλαγές της θέσης αυξάνονται με τόσο υπερβολικό τρόπο, που οι πορείες που προκύπτουν τελικά είναι εντελώς αποκλίνουσες. Αυτή η ακραία εξάρτηση από τις αρχικές συνθήκες σημαίνει ότι το παρόν αποσυνδέεται από το παρελθόν και το μέλλον. Ως εκ τούτου, οι πλανητικές τροχιές έχουν ένα ακαθόριστο παρελθόν κι ένα αβέβαιο μέλλον, αφού οι μετρήσεις των θέσεων των πλανητών ποτέ δεν είναι απόλυτα ακριβείς. Όμως, ούτε η τύχη μπορεί να κάνει ό,τι θέλει. Το ακαθόριστο μέλλον των τροχιών δεν σημαίνει ότι αύριο κιάλας οι πλανήτες θα εγκαταλείψουν τις συνηθισμένες τους τροχιές. Το πιθανότερο είναι ότι θα συνεχίσουν την κανονική τροχιά τους γύρω από τον Ήλιο. Ωστόσο, πάντα θα υπάρχει μια μικρή πιθανότητα να μην το κάνουν. Το όνειρο του απόλυτου ντετερμινισμού του Λαπλάς είχε χαθεί για πάντα.

### Ο ΘΕΟΣ ΠΑΙΖΕΙ ΖΑΡΙΑ ΜΕ ΤΟΥΣ ΠΛΑΝΗΤΕΣ

Η τύχη, που είχε εξοβελιστεί από τον ντετερμινισμό του Νεύτωνα και του Λαπλάς, εμφανίζεται ξανά στο μακροσκοπικό κόσμο. Είχε ήδη εισβάλει στον κόσμο των ατόμων, χάρη στην εμφάνιση της κβαντομηχανικής, στις αρχές του 20ού αιώνα. Οι Μπορ, Χάιζενμπεργκ και Πάουλι (Bohr, Heisenberg, Pauli) μας είπαν ότι δεν θα μπορέσουμε ποτέ να καθορίσουμε με ακρίβεια τη θέση και την ταχύτητά του ηλεκτρονίου ταυτόχρονα. Το ηλεκτρόνιο ξεφεύγει από το ζυγό του ντετερμινιστικού κόσμου. Δεν θα μπορέσουμε ποτέ να προβλέψουμε πού θα βρίσκεται σε μία δεδομένη στιγμή. Το πολύ πολύ να μπορέσουμε να εκτιμήσουμε την πιθανότητα να βρεθεί εδώ ή εκεί. Ο κόσμος των ατόμων τέθηκε υπό την επιρροή της τύχης. Οι άνθρωποι νόμιζαν ότι ο μακροσκοπικός κόσμος, και κυρίως το οχυρό της ουράνιας μηχανικής, ήταν απόρθητα, ότι δεν υπέκυπταν ποτέ στις επιθέσεις της τυχαιότητας. Ο Ανρί Πουανκαρέ βρήκε τα αδύνατα σημεία του ντετερμινισμού ήδη στα τέλη του 19ου αιώνα. Το χάος εμφανίσθηκε στο ηλιακό σύστημα,



που είχε γεννήσει τον ντετερμινισμό. “Δεν μπορώ να πιστέψω ότι ο Θεός παίζει ζάρια με τον Κόσμο”, έλεγε ο Αϊνστάιν, αμετάπειστος ντετερμινιστής, σχολιάζοντας την κβαντομηχανική. Δεν μπορούσε να πιστέψει ότι η τύχη ήταν αυτή που βασίλευε στον κόσμο των ατόμων. Παρόλ’ αυτά, το ηλιακό σύστημα που είχε γεννήσει το ντετερμινισμό υπέκυπτε στην τυχαιότητα. Το ηλιακό σύστημα παρουσίαζε χαοτική συμπεριφορά. Μια απειροελάχιστη διαφοροποίηση των αρχικών συνθηκών σήμαινε τροχιές εκθετικά αποκλίνουσες μετά από κάποιο διάστημα.

## ΤΟ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΟ ΧΑΟΣ

Όμως, όπως είδαμε, το χάος δεν είναι απαραίτητα συνώνυμο της αταξίας. Το χάος είναι περιορισμένο, ωστόσο, υπάρχει πάντα μια μικρή πιθανότητα το ηλιακό σύστημα να αποσυντεθεί και οι πλανήτες να φύγουν ο καθένας προς άλλη κατεύθυνση μέσα σε μερικά εκατομμύρια χρόνια. Επειδή ακριβώς η τύχη είναι περιορισμένη μέσα στο ηλιακό σύστημα, μπόρεσαν ο Νεύτων και ο Λαπλάς να σκεφτούν ότι το ηλιακό σύστημα ήταν ένας εξαιρετικά καλοκουρδισμένος μηχανισμός, που το μέλλον, το παρόν και το παρελθόν του μπορούσαν να καθοριστούν με απόλυτη βεβαιότητα. Το χάος αποτελεί, επομένως, ένα είδος γέφυρας που συνδέει από τη μια τον εξιδανικευμένο από τους φυσικούς νόμους κόσμο, κι από την άλλη, την πολυπλοκότητα και την αταξία του συγκεκριμένου κόσμου μέσα στον οποίο ζούμε και κινούμαστε.



### 1.0 Επιστήμη

→ 1.2 Το Χάος ελευθερώνει τη Φύση

→ 1.2.2 Έννοιες και Εργαλεία του Χάους

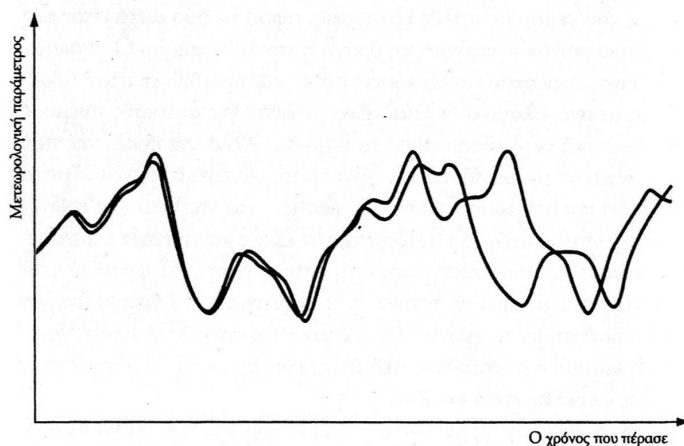
### 1.2.2.2 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΠΕΤΑΛΟΥΔΑΣ

Για τους περισσότερους μετεωρολόγους, τη δεκαετία του 1960, η πρόγνωση του καιρού ήταν κάτι λιγότερο από επιστήμη. Ήταν μια εμπειρική δουλειά για την οποία χρειαζόταν κάποια διαίσθηση. Ωστόσο, οι κανόνες για την πρόγνωση του καιρού ήταν οι εξισώσεις της κίνησης της ατμόσφαιρας, που είχαν ανακαλυφθεί ήδη τον 18ο αιώνα. Αν θεωρήσουμε ότι ο χρόνος κυλά με πολύ μικρό συγκεκριμένα βήματα, μεγέθους ας πούμε ενός δευτερολέπτου, μπορούμε να δούμε τις εξισώσεις σαν κανόνες που μας λένε πώς θα πάμε από την τωρινή θέση στην επόμενη του ενός δευτερολέπτου. Επαναλαμβάνοντας τον υπολογισμό θα πάρουμε τον καιρό για τα μελλοντικά δευτερόλεπτα. Μετά από χιλιάδες επαναλήψεις θα ξέρουμε τον καιρό για μια ολόκληρη μέρα. Η πρόγνωση του καιρού περίμενε δύο αιώνες για να δημιουργηθεί μια μηχανή που θα μπορούσε να επαναλαμβάνει χιλιάδες υπολογισμούς. Ίσως ένας αρκετά ισχυρός υπολογιστής να ήταν η υπέρτατη νόηση που φαντάστηκε ο Λαπλάς. Ωστόσο, υπήρχε πάντα ένας μικρός συμβιβασμός. Οι μετρήσεις δεν μπορούσαν να είναι ποτέ τέλειες. Αν γνωρίζουμε προσεγγιστικά τις αρχικές συνθήκες ενός συστήματος και κατανοούμε τους φυσικούς νόμους, τότε μπορούμε να υπολογίσουμε προσεγγιστικά τη συμπεριφορά του συστήματος, καθώς οι τυχαίες μικρές επιδράσεις δεν μπορούσαν να δώσουν μεγάλα τυχαία αποτελέσματα.

Ο Εντουαρντ Λόρεντζ (Edward Lorenz, 1917-2008), εργαζόμενος στο MIT (Τεχνολογικό Ινστιτούτο της Μασαχουσέτης) τη δεκαετία του 1960, σκεφτόταν πάνω στο πρόβλημα της πρόγνωσης του καιρού. Το 1960, με τον πρωτόγονο υπολογιστή του, είχε δημιουργήσει ένα απλό μοντέλο της ατμόσφαιρας. Ο Λόρεντζ γνώριζε ότι με τη δημιουργία ενός μοντέλου του καιρού σ' έναν υπολογιστή, έβαζε σε εφαρμογή τους νόμους του Νεύτωνα, προσφέροντας μια γέφυρα μαθηματικής βεβαιότητας από το παρόν ως το μέλλον. Ήταν ο θεός αυτού του συστήματος, κι ήταν ελεύθερος να διαλέγει τους νόμους της φύσης όπως ήθελε. Ο Λόρεντζ είχε καταφέρει να αναλύσει τη μετεωρολογία περιγράφοντας τις κινήσεις του αέρα και του νερού με απλές εξισώσεις. Ο υπολογιστής επεξεργαζόταν τις εξισώσεις αυτές και προμήθευε τα μετεωρολογικά δελτία. Για να θέσει ένα ερώτημα στον υπολογιστή του ο Λόρεντζ τον έβαζε να τυπώνει κυματοειδείς καμπύλες που περιέγραφαν τη διακύμανση ενός φυσικού φαινομένου, που μπορεί να ήταν για παράδειγμα η ταχύτητα του ανέμου σε συνάρτηση με τον χρόνο. Έτσι, όταν επικρατούσε απόλυτη νηνεμία, η καμπύλη αποτύπωνε πεδιάδες, ενώ σχεδίαζε λόφους όταν ο άνεμος φυσούσε κατά κύματα.

Μια μέρα του χειμώνα του 1961, ο Λόρεντζ, θέλοντας να συνεχίσει την πρόβλεψη ενός μετεωρολογικού δελτίου, για να κερδίσει χρόνο, αντί να αρχίσει από την αρχή, άρχισε από τη μέση. Για να δώσει στη μηχανή τις αρχικές συνθήκες, πληκτρολόγησε τους αριθμούς από τη προηγούμενη τυπωμένη σελίδα και έφυγε. Όταν γύρισε, είδε κάτι απρόσμενο. Ο Λόρεντζ περίμενε ότι η νέα καμπύλη, ξεκινώντας από τη μέση της προηγούμενης, θα ταυτιζόταν μαζί της με απόκλιση το πολύ ενός χιλιοστού. Όμως, προς μεγάλη του έκπληξη, διαπίστωσε ότι αυτό δεν ίσχυε. Οι δυο καμπύλες ακολουθούσαν η μια την άλλη στην αρχή, αλλά γρήγορα απέκλιναν τόσο πολύ, που οποιαδήποτε συγγένεια εξαφανιζόταν στο μοντέλο λίγους μήνες

αργότερα. Η αιτία της διαφοράς ανάμεσα στις δυο καμπύλες βρισκόταν στους αριθμούς που είχε πληκτρολογήσει στον υπολογιστή ως αρχικές συνθήκες του νέου μοντέλου. Όταν έθεσε το ερώτημα στον υπολογιστή, αυτός του έδωσε έναν εξαψήφιο αριθμό για το μοντέλο που είχε διακοπεί, αφού η μνήμη της μηχανής μπορούσε να αποθηκεύσει μόνο 6 δεκαδικά ψηφία (0,506127). Όμως, όταν εισήγαγε ξανά τον αριθμό αυτόν σαν αρχική συνθήκη του νέου μοντέλου, τον στρογγυλοποίησε, πληκτρολογώντας μόνο τα τρία πρώτα ψηφία (0,506), υποθέτοντας ότι μια ελάχιστη διαφορά δε θα είχε συνέπειες. Η υπόθεση αυτή ήταν λογική. Ο Royal McBee του Λόρεντζ χρησιμοποιούσε ένα καθαρά ντετερμινιστικό σύστημα εξισώσεων. Με δεδομένο ένα συγκεκριμένο σημείο εκκίνησης, ο καιρός αποκαλυπτόταν ακριβώς ο ίδιος. Με δεδομένο ένα λίγο διαφορετικό σημείο εκκίνησης, ο καιρός θα αποκαλυπτόταν λίγο διαφορετικός. Ένα μικρό αριθμητικό σφάλμα ήταν σαν ένα μικρό φύσημα του ανέμου — και βέβαια τα μικρά φυσήματα εξασθενίζουν ή αλληλοεξουδετερώνονται πριν να μπορέσουν να αλλάξουν σε μεγάλη κλίμακα τα χαρακτηριστικά του καιρού. Αλλά στο συγκεκριμένο σύστημα εξισώσεων του Λόρεντζ, τα μικρά σφάλματα αποδείχθηκαν καταστροφικά. Μια μικρή αρχική αλλαγή είχε επιφέρει μια τεράστια τελική αλλαγή.



**Το φαινόμενο της πεταλούδας** → Τα δύο μοντέλα με σχεδόν πανομοιότυπες αρχικές συνθήκες, αποκλίνουν όλο και περισσότερο στο πέρασμα του χρόνου. Αυτή η εξαιρετικά ευαίσθητη εξάρτηση από τις αρχικές συνθήκες, καθιστά αδύνατη την μακροπρόθεσμη πρόβλεψη του καιρού.

Επομένως, το χάος περιορίζει σημαντικά την ικανότητά μας να προβλέπουμε τον καιρό. Χάρη στα μετεωρολογικά και τα γεωγραφικά δεδομένα και τους φυσικούς νόμους ο μετεωρολόγος μπορεί να προβλέψει με αξιοπιστία τον καιρό τις επόμενες ημέρες. Ωστόσο, μετά από 6-7 ημέρες ο καιρός που προβλέφθηκε δεν έχει καμία σχέση με τον πραγματικό καιρό. Το όριο της γνώσης είναι ανυπέρβλητο. Ο σπόρος της άγνοιας είναι αδιαχώριστος από την ίδια τη λειτουργία της Φύσης. Πάντα θα υπάρχουν μικρές διακυμάνσεις στην ατμόσφαιρα, τόσο μικροσκοπικές που δεν θα μπορούν να ανιχνευθούν και που στη συνέχεια θα μεγεθύνονται, τροποποιώντας το κλίμα ολόκληρου του πλανήτη. Γι' αυτό και το χάος εκφράζεται συχνά με το αποκαλούμενο φαινόμενο της πεταλούδας (butterfly effect): το φτερούγισμα μιας πεταλούδας στο δάσος



## 1.0 Επιστήμη

→ 1.2 Το Χάος ελευθερώνει τη Φύση

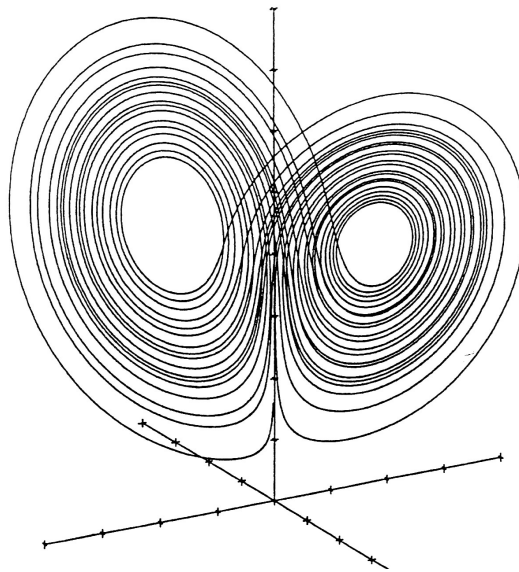
→ 1.2.2 Έννοιες και Εργαλεία του Χάους

του Αμαζονίου μπορεί να προκαλέσει βροχή στη Θεσσαλονίκη. Το Φαινόμενο της Πεταλούδας πήρε ένα τεχνικό όνομα: ευαίσθητη εξάρτηση από τις αρχικές συνθήκες. Ωστόσο, η γνώση μας δεν περιορίζεται μόνο από τη λειτουργία της Φύσης. Οριοθετείται όπως είδαμε και από τις δυνατότητες του ηλεκτρονικού υπολογιστή, ο οποίος δεν διαθέτει απεριόριστη μνήμη για να αποθηκεύουμε άπειρους αριθμούς. Η δυνατότητα μακροσκοπικής πρόβλεψης του καιρού είναι καταδικασμένη.

Η ανακάλυψη του Λόρεντζ ήταν ένα τυχαίο γεγονός. Ωστόσο, ο Λόρεντζ δε στάθηκε στην αδυναμία, αλλά διερεύνησε τις συνέπειες της ανακάλυψής του, μελετώντας συστήματα που δεν έβρισκαν ποτέ μια σταθερή κατάσταση, συστήματα που σχεδόν επαναλαμβάνονταν αλλά ποτέ απόλυτα. Κάθε φυσικό σύστημα που συμπεριφερόταν με μη περιοδικό τρόπο δεν ήταν προβλέψιμο. Ο καιρός ήταν ένα τέτοιο μη περιοδικό σύστημα. Αν ο καιρός έφτανε ποτέ σε μια κατάσταση ακριβώς ίδια με μια προηγούμενη, τότε πιθανόν θα άρχιζε από εκείνη τη στιγμή και μετά να επαναλαμβάνεται για πάντα, οπότε το πρόβλημα της πρόγνωσης θα γινόταν ασήμαντο. Ο Λόρεντζ διέκρινε ότι θα πρέπει να υπήρχε μια σύνδεση ανάμεσα στην απροθυμία του καιρού να επαναλαμβάνεται και στην αδυναμία των ανθρώπων να τον προβλέπουν — μια σύνδεση ανάμεσα στη μη περιοδικότητα και στην αδυναμία για πρόβλεψη. Το μοντέλο του Λόρεντζ για τον καιρό είχε μμηθεί και την απουσία περιοδικότητας και την ευαίσθητη εξάρτηση από τις αρχικές συνθήκες. Από το απλό ντετερμινιστικό σύστημα του Λόρεντζ προέκυπτε το χάος.

Ο Λόρεντζ αναζήτησε ακόμα πιο απλούς τρόπους για να παραγάγει αυτή την πολύπλοκη συμπεριφορά. Βρήκε τελικά ένα σύστημα με τρεις μόλις εξισώσεις. Οι εξισώσεις αυτές ήταν μη γραμμικές, που σημαίνει ότι εκφράζουν σχέσεις που δεν είναι αυστηρής αναλογίας. Οι γραμμικές σχέσεις μπορούν να παρασταθούν με μια ευθεία γραμμή σε ένα διάγραμμα. Τα γραμμικά συστήματα, εκτός ότι λύνονται, έχουν ένα σημαντικό δομικό πλεονέκτημα: μπορούμε να τα πάρουμε χωριστά και μετά να αθροίσουμε τα τμήματά τους. Τα μη γραμμικά συστήματα γενικά δεν λύνονται και δεν αποτελούν αθροίσματα επί μέρους τμημάτων. Στα συστήματα ρευστών και στα μηχανικά συστήματα, οι μη γραμμικοί όροι είναι εκείνοι που οι άνθρωποι θέλουν να αγνοούν, όταν προσπαθούν να καταλάβουν καλά τις απλές περιπτώσεις. Ένα παράδειγμα είναι η τριβή σε ένα αντικείμενο που κινείται. Με τριβή, η σχέση γίνεται πολύπλοκη. Μη γραμμικότητα σημαίνει ότι οι κανόνες μεταβάλλονται. Δεν μπορούμε να αποδώσουμε μια σταθερή σπουδαιότητα στην τριβή, γιατί η σπουδαιότητά της εξαρτάται από την ταχύτητα του αντικειμένου. Η ταχύτητα, με τη σειρά της, εξαρτάται από την τριβή. Αυτή η συστρεφόμενη δυνατότητα μεταβολής κάνει δύσκολο να υπολογιστεί η μη γραμμικότητα. Στη δυναμική των ρευστών, καθετί ανάγεται στη μη γραμμική εξίσωση Νάβιερ-Στόουκς (Navier-Stokes), που συσχετίζει την ταχύτητα ενός ρευστού, την πίεση, την πυκνότητα και την εσωτερική τριβή. Έτσι η φύση αυτών των σχέσεων συχνά είναι αδύνατο να σταθεροποιηθεί. Η ανάλυση της συμπεριφοράς μιας μη γραμμικής εξίσωσης, μοιάζει σαν να περπατάς σ' ένα λαβύρινθο, που οι τοίχοι του αναδιατάσσονται μόνοι τους σε κάθε σου βήμα.

Τρεις εξισώσεις, με τρεις μεταβλητές, περιέγραφαν πλήρως την κίνηση του συστήματος που ήθελε να μελετήσει ο Λόρεντζ. Για να δημιουργήσει ένα σχεδιάγραμμα από τα δεδομένα, ο Λόρεντζ χρησιμοποίησε κάθε τριάδα αριθμών σαν συντεταγμένες που ορίζουν ένα σημείο στον τρισδιάστατο χώρο. Στο άρθρο που είχε γράψει το 1963, «Deterministic NonPeriodic Flow» (Ντετερμινιστική Μη Περιοδική Ροή, είχε συμπεριλάβει μια εικόνα με δυο καμπύλες δεξιά, τη μία μέσα στην άλλη, και πέντε αριστερά ένα είδος διπλής σπείρας, σαν τα φτερά πεταλούδας που είχαν μπλεχτεί μεταξύ τους. Για να σχεδιαστούν αυτές οι εφτά καμπύλες χρειαζόνταν 500 διαδοχικοί υπολογισμοί στον υπολογιστή. Το σύστημα του Λόρεντζ εμφάνιζε ένα είδος άπειρης πολυπλοκότητας. Το σχήμα παρέμενε πάντα μέσα σε συγκεκριμένα όρια, αλλά και ποτέ δεν επαναλαμβανόταν. Το σχήμα της διπλής έλικας σήμαινε καθαρή αταξία, αφού κανένα σημείο ή ομάδα σημείων δεν επαναλαμβανόταν. Σήμαινε επίσης μια τάξη νέου είδους. Ο Λόρεντζ στο μοντέλο του για τον καιρό είδε κάτι περισσότερο από το τυχαίο. Είδε μια θαυμάσια γεωμετρική δομή, μια τάξη μεταμφιεσμένη σε τυχαία.



**Ο ελκυστής του Λόρεντζ**→ Ο Λόρεντζ ανακάλυψε ότι το σημείο που αντιπροσωπεύει το μετεωρολογικό σύστημα στο χώρο φάσεων δεν επαναλάμβανε ποτέ την κίνησή του, αλλά διέγραφε νέες καμπύλες, που το έλκυαν. Αυτή η εικόνα, που μοιάζει με φτερά πεταλούδας, έγινε το σύμβολο των ερευνητών του χάους. Η κίνηση του σημείου ήταν χαοτική γιατί δεν ήταν δυνατό να προβλέψουμε σε ποια από τις καμπύλες θα βρισκόταν. Το σημείο μπορούσε να διαγράψει συνεχόμενα μια καμπύλη στο αριστερό φτερό, έπειτα στο δεξί κι έπειτα να επιστρέψει στο αριστερό.



## 1.0 Επιστήμη

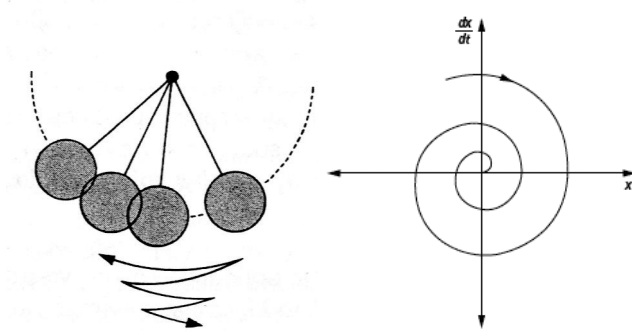
→ 1.2 Το Χάος ελευθερώνει τη Φύση

→ 1.2.2 Έννοιες και Εργαλεία του Χάους

### 1.2.2.3 ΠΑΡΑΞΕΝΟΙ ΕΛΚΥΣΤΕΣ: ΤΑΞΗ ΜΕΣΑ ΣΤΟ ΧΑΟΣ

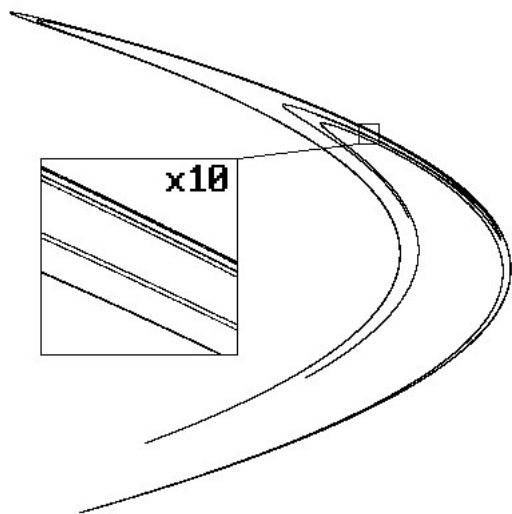
Το 1971 ο Βέλγος φυσικός Νταβίντ Ρουέλ (David Ruelle) σε συνεργασία με τον Ολλανδό μαθηματικό, Φλόρις Τάκενς (Floris Takens), δημοσίευσαν το άρθρο: “On the Nature of Turbulence” (Για τη Φύση του Στροβιλισμού). Η σπουδαιότερη συνεισφορά της εργασίας τους ήταν μια εικόνα που οι συγγραφείς ονόμασαν παράξενο ελκυστή. Η συμβολή της στη μελέτη του χάους ήταν τεράστια. Ο παράξενος ελκυστής ζει στο χώρο των φάσεων, που όπως είδαμε προσφέρει έναν τρόπο μετατροπής των αριθμών σε εικόνες, παρουσιάζοντας τις ουσιαστικές πληροφορίες ενός κινούμενου συστήματος.

Δύο απλά είδη ελκυστών είναι τα σημεία και οι κύκλοι, που παριστάνουν τη συμπεριφορά που καταλήγει σε ευσταθή κατάσταση ή επαναλαμβάνεται συνεχώς. Στο χώρο των φάσεων, η πλήρης γνώση ενός δυναμικού συστήματος μία μοναδική στιγμή του χρόνου παριστάνεται με ένα σημείο. Αυτό το σημείο είναι το δυναμικό σύστημα εκείνη τη στιγμή. Την επόμενη στιγμή όμως, το σύστημα θα έχει αλλάξει, έστω και πολύ λίγο. έτσι το σημείο κινείται. Η ιστορία του χρόνου του συστήματος σχεδιάζεται από το κινούμενο σημείο, από την τροχιά του μέσα στο χώρο των φάσεων με το πέρασμα του χρόνου. Αν το σύστημα έχει δύο μόνο μεταβλητές, η πληροφορία βρίσκεται στην καρτεσιανή γεωμετρία της, η μια μεταβλητή στον οριζόντιο άξονα και η άλλη στον κατακόρυφο. Όμως, οι δυο διαστάσεις δεν κάλυπταν τα είδη των συστημάτων που χρειαζόνταν να μελετήσουν οι φυσικοί. Έπρεπε να εμφανίζον περισσότερες από δυο μεταβλητές κι αυτό σήμαινε περισσότερες διαστάσεις. Το απογυμνωμένο σύστημα του Λόρεντζ για τη μεταφορά θερμότητας είχε τρεις διαστάσεις, γιατί χρειαζόνταν τρεις αριθμοί για να προσδιορίσει κανείς την κατάσταση του ρευστού κάθε στιγμή. Τα πολύπλοκα συστήματα όμως έχουν πολλές ανεξάρτητες μεταβλητές. Συστήματα με άπειρους βαθμούς ελευθερίας απαιτούσαν ένα χώρο φάσεων με άπειρες διαστάσεις.



**Σημειακός μαγνήτης** → Για ένα απλό σύστημα σαν το εκκρεμές με τριβή, ο χώρος των φάσεων είναι απλώς ένα επίπεδο. Οι δύο μεταβλητές (η θέση και η ταχύτητα) καθώς μεταβάλλονται συνέχεια, δημιουργούν μια γραμμή από σημεία. Η τροχιά του εκκρεμούς λόγω της τριβής, καταλήγει σε ένα σημείο, στο κέντρο: θέση 0, ταχύτητα 0. Αυτό το κεντρικό σταθερό σημείο έλκει τις τροχιές. Η τριβή καταναλώνει την ενέργεια του συστήματος μέχρι να ακινητοποιηθεί, και στο χώρο των φάσεων η κατανάλωση φαίνεται σαν έλξη προς το κέντρο.

Οι παράξενοι ελκυστές χαρακτηρίζονται από δύο ιδιότητες: την ευστάθεια και τη μη περιοδικότητα. Ευστάθεια σημαίνει ότι, βραχυπρόθεσμα, λόγω κάποιου εξωτερικού θορύβου, κάθε σημείο του χώρου των φάσεων μπορεί να παριστάνει μια πιθανή συμπεριφορά του δυναμικού συστήματος. Μακροπρόθεσμα όμως, οι μόνες δυνατές συμπεριφορές είναι οι ίδιοι οι ελκυστές, καθώς η κίνηση τείνει να επιστρέφει σ' αυτούς. Επιπλέον, οι παράξενοι ελκυστές είναι μη περιοδικοί, δεν επαναλαμβάνεται ποτέ. Από γεωμετρική άποψη, η τροχιά κινούμενη σε έναν πεπερασμένο χώρο δεν επαναλαμβάνεται ποτέ τον εαυτό της και δεν τέμνει ποτέ τον εαυτό της (από τη στιγμή που ένα σύστημα επιστρέφει σε μια κατάσταση στην οποία είχε βρεθεί πριν, πρέπει πάντα να ακολουθεί την ίδια πορεία). Οι γραμμές της τροχιάς δεν διασταυρώνονται ποτέ, γιατί έχουν απεριόριστο βάθος. Με άλλα λόγια είναι φράκταλ. Ωστόσο, πριν την εμφάνιση της φράκταλ γεωμετρίας του Μάντελμπροτ, ήταν δύσκολο να φανταστεί κανείς πώς άπειρες τροχιές μπορούσαν να βρίσκονται σε έναν πεπερασμένο χώρο.



**Ο παράξενος ελκυστής του Ενόν**→ Ο παράξενος ελκυστής των αστρικών τροχιών του Ενόν έχει το σχήμα μπανάνας (σε προβολή). Μέσα στον αφηρημένο χώρο φάσεων, τα σημεία δεν διασκορπίζονται κακώς, αλλά έλκονται από τον παράξενο ελκυστή. Το χάος δεν σημαίνει γενική αταξία. Είναι ντετερμινιστικό και η αταξία περιορισμένη. Αν μεγεθύνουμε ένα τμήμα του παράξενου ελκυστή θα διαπιστώσουμε ότι υπάρχουν τα ίδια σχέδια, μόνο που είναι πολύ μικρότερα. Αν μεγεθύνουμε πάλι ένα τμήμα αυτών των σχεδίων θα εντοπίσουμε και πάλι τις ίδιες γραμμές. Τα ίδια μοτίβα επαναλαμβάνονται επ' άπειρον. Οι γραμμές που αποτελούν το καμπυλωτό αυτό σχήμα είναι αρκετά παχιές κι αποκαλύπτουν την αξιοπερίεργη ιδιότητά τους, να μπορούν να διχοτομούνται επ' άπειρον. Καθεμία από τις γραμμές χωρίζεται στα δύο. Σε μικρότερη κλίμακα, καθεμία από τις δύο καινούριες γραμμές χωρίζεται κι αυτή με τη σειρά της σε άλλες δύο. Οι γραμμές διχοτομούνται επ' άπειρον. Ένα σημείο που αντιστοιχεί σε μια αστρική τροχιά θα βρίσκεται πάντα σε μία από τις γραμμές αυτές, αλλά θα είναι αδύνατον να μαντέψουμε πού θα βρίσκεται το σημείο που θα αντιστοιχεί στην επόμενη τροχιά, ξέροντας μόνο ότι θα είναι σε κάποιο τμήμα του παράξενου ελκυστή.

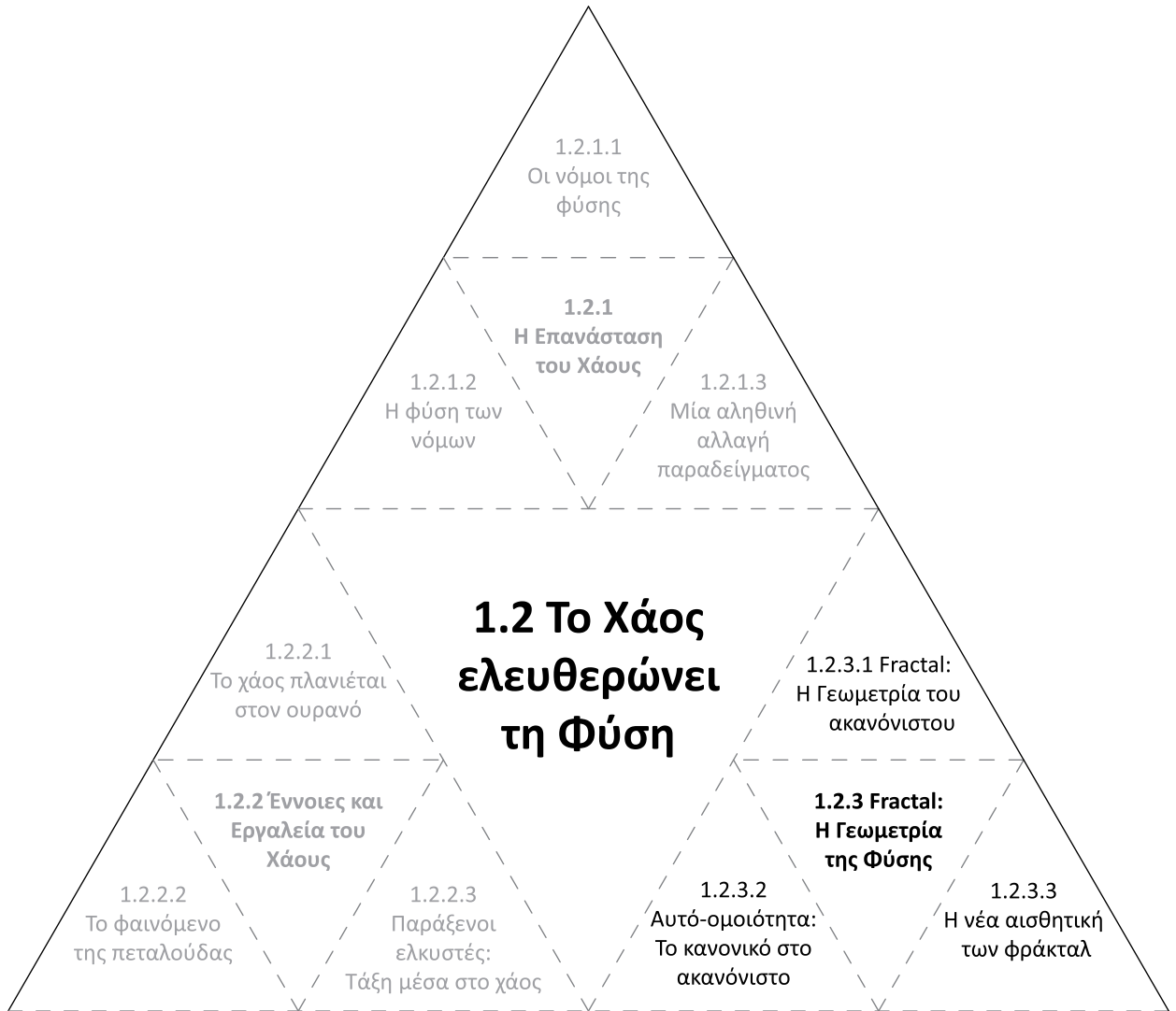


## 1.0 Επιστήμη

→ 1.2 Το Χάος ελευθερώνει τη Φύση

→ 1.2.2 Έννοιες και Εργαλεία του Χάους

## 1.2.3 FRACTAL: Η ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΗΣ ΦΥΣΗΣ



### 1.0 Επιστήμη

→ 1.2 Το Χάος ελευθερώνει τη Φύση

→ 1.2.3 Fractal: Η Γεωμετρία της Φύσης



Στην ιστορία του χάους, ο Γαλλοαμερικανός μαθηματικός Μπενουά Μάντελμπροτ (Benoit Mandelbrot, 1924-2010) άνοιξε το δικό του δρόμο. Αντίθετα στα αντικείμενα της ευκλείδειας γεωμετρίας που χαρακτηρίζονται από έναν αριθμό διαστάσεων ακέραιων αριθμών: η ευθεία γραμμή έχει μια διάσταση, μια επίπεδη επιφάνεια έχει δύο διαστάσεις, ο χώρος στον οποίο κινούμαστε έχει τρεις διαστάσεις, ο Μάντελμπροτ στις αρχές της δεκαετίας του 1970, εισήγαγε μια κατηγορία αντικειμένων που ο αριθμός των διαστάσεων τους μπορεί να εκφραστεί μόνο με τη μορφή κλάσματος, για παράδειγμα  $9/5$ . Τα αντικείμενα αυτά, «φράκταλ» (αντικείμενα μορφοκλασματικής δομής) όπως τα ονόμασε, είναι αντικείμενα πολύ οικεία, αφού τα συναντάμε στην καθημερινή μας ζωή. Πρόκειται για αντικείμενα που έχουν ακανόνιστα σχήματα και το ακανόνιστο του σχήματός τους επαναλαμβάνεται σε όλες τις κλίμακες. Για τους ερευνητές του χάους, οι τεχνικές και η γλώσσα της γεωμετρίας, που εισήγαγε ο Μάντελμπροτ στο πλούσια εικονογραφημένο βιβλίο, *Fractals: Form, Chance and Dimension* (Φράκταλ: Μορφή, Τύχη και Διάσταση), αλλά και στον πιο εκτεταμένο και επεξεργασμένο τόμο που το αντικατέστησε, *The Fractal Geometry of Nature* (Η Φράκταλ Γεωμετρία της Φύσης), έγινε αναπόσπαστο μέρος της νέας τους επιστήμης. Τα αντικείμενα φράκταλ και το χάος συνδέονται στενά και ακατάλυτα. Όπως είδαμε, οι παράξενοι ελκυστές έχουν δομή φράκταλ, επαναλαμβάνοντας το ίδιο μοτίβο σε όλες τις κλίμακες.

### 1.2.3.1 FRACTAL: Η ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΟΥ ΑΚΑΝΟΝΙΣΤΟΥ

Τα σχήματα της κλασικής ευκλείδειας γεωμετρίας είναι οι γραμμές και τα επίπεδα, οι κύκλοι και οι σφαίρες, τα τρίγωνα και οι κώνοι και παριστάνουν μια σημαντική αφαίρεση της πραγματικότητας. Η γεωμετρία αυτή υπήρξε πάρα πολύ χρήσιμη και επηρέασε την άποψη που έχουμε για τον κόσμο για περισσότερο από δύο χιλιετίες. Αυτή ενέπνευσε τον Πλάτωνα, για τον οποίο ο πραγματικός κόσμος ήταν μια ατελής αντανάκλαση του τέλει κόσμου των ιδανικών ευκλείδειων σχημάτων. Αυτή η αναπαράσταση του κόσμου κυριάρχησε για περισσότερο από είκοσι αιώνες. Οι καλλιτέχνες βρήκαν σ' αυτά μια ιδανική ομορφιά. Αλλά στην κατανόηση της πολυπλοκότητας η γεωμετρία αυτή αποδειχνεται ένα λαθεμένο είδος αφαίρεσης. Η ευκλείδεια γεωμετρία χάνει έδαφος όταν πρέπει να περιγράψει οτιδήποτε είναι ακανόνιστο, ασυνεχές ή τραχύ. Όμως η πλειονότητα των πραγμάτων της ζωής δεν χαρακτηρίζεται από κανονικότητα. Όπως τονίζει και ο Μάντελμπροτ, “τα σύννεφα δεν είναι σφαίρες, τα βουνά δεν είναι κώνοι, οι παραλίες δεν είναι κύκλοι και οι αστραπές δεν είναι ευθείες γραμμές”. Οι ευκλείδειες μετρήσεις —το μήκος, το ύψος, το πλάτος— δεν κατάφεραν να συλλάβουν την ουσία των μη κανονικών σχημάτων. Για να περιγραφεί η πολυπλοκότητα του κόσμου, έπρεπε να εφευρεθεί μια καινούρια γλώσσα, η γλώσσα του ακανόνιστου. Ο Μάντελμπροτ οραματίστηκε μια καινούρια έννοια, που θα περιέγραφε το ακανόνιστο: την έννοια της «διάστασης». Σύμφωνα με την ευκλείδεια γεωμετρία ο χώρος έχει τρεις διαστάσεις, το επίπεδο δύο, η γραμμή μία και το σημείο καμία. Ωστόσο, στην ερώτηση “Πόσες διαστάσεις έχει ένα κουβάρι σπάγκου” ο Μάντελμπροτ απαντά ότι αυτό εξαρτάται από ποια οπτική γωνία το κοιτάζουμε. Από μεγάλη απόσταση, το κουβάρι είναι ένα σημείο, χωρίς διάσταση. Από πιο κοντά, το κουβάρι φαίνεται να γεμίζει ένα σφαιρικό χώρο και συνεπώς έχει τρεις διαστάσεις. Όταν το παρατηρούμε από ακόμα πιο κοντά, διακρίνεται ο σπάγκος και συνεπώς το αντικείμενο έχει ουσιαστικά μία διάσταση, η οποία είναι τυλιγμένη γύρω απ' τον εαυτό της. Η ιδέα του πόσοι αριθμοί χρειάζονται για να χαρακτηρίσουμε ένα



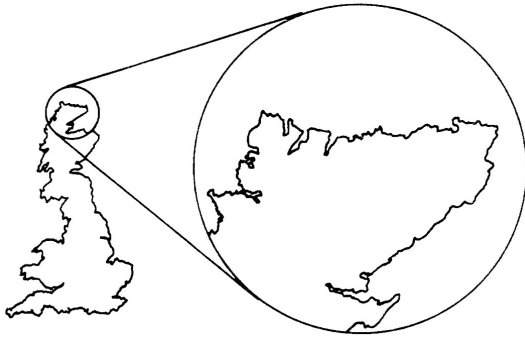
#### 1.0 Επιστήμη

→ 1.2 Το Χάος ελευθερώνει τη Φύση

→ 1.2.3 Fractal: Η Γεωμετρία της Φύσης

σημείο παραμένει χρήσιμη. Από μακριά δε χρειάζεται κανένας. Από πιο κοντά, χρειάζονται τρεις αριθμοί. Από ακόμα πιο κοντά, ένας αριθμός είναι αρκετός. Ο αριθμός των διαστάσεων ενός αντικειμένου αποδειχνεται διαφορετικός από τις συνηθισμένες τρεις διαστάσεις. Ο Μάντελμπροτ πρόβαλε έναν ισχυρισμό σχετικά με τα αντικείμενα που παρουσιάζουν διαφορετικές διαστάσεις ανάλογα από την απόσταση που τα εξετάζουμε, προχωρώντας, πέρα από τις διαστάσεις 0,1,2,3, στις κλασματικές διαστάσεις δηλαδή των διαστάσεων εκείνων που δεν εκφράζονται με ακέραιους αριθμούς, αλλά με κλάσματα. Η κλασματική διάσταση μετρά την απουσία κανονικότητας σ' ένα αντικείμενο, δηλαδή την αποτελεσματικότητά του στο να καταλαμβάνει όσο το δυνατόν περισσότερο χώρο. Ο Μάντελμπροτ αποκάλεσε φράκταλ (fractal) αυτά τα αντικείμενα με το ακανόνιστο σχήμα, από τη λατινική λέξη fractus που σημαίνει «σπασμένο», «τμήμα».

Ο Μάντελμπροτ προσδιόρισε τρόπους υπολογισμού της κλασματικής διάστασης πραγματικών αντικειμένων, προτείνοντας ότι ο βαθμός ανωμαλίας παραμένει σταθερός στις διαφορετικές κλίμακες. Μια δαντελωτή ακτή, για παράδειγμα, ενώ δεν μπορεί να μετρηθεί με όρους μήκους, έχει ωστόσο έναν ορισμένο χαρακτηριστικό βαθμό ανωμαλίας. Το μήκος της βρετανικής ακτής δεν είναι, όπως είδαμε, και πολύ καθορισμένο. Αντίθετα, η απουσία κανονικότητας μπορεί να μετρηθεί με μια κλασματική διάσταση. Η διάσταση της ακτής της Βρετανίας θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το 1, αφού δεν ακολουθεί μια κανονική καμπύλη. Από την άλλη, θα πρέπει να είναι μικρότερη από το 2, αφού δεν καλύπτει μια ολόκληρη επιφάνεια. Επομένως, βρίσκεται ανάμεσα στο 1 και το 2, όντας τόσο πιο κοντά στο 1, όσο πιο λεία και λιγότερο ακανόνιστη είναι η ακτή, και τόσο πιο κοντά στο 2, όσο πιο ανομοιόμορφη και δαντελωτή είναι η ακτή για να καλύψει μεγαλύτερη επιφάνεια.



**Η ακτή της Βρετανίας είναι ένα φράκταλ**→ Ο Μάντελμπροτ διατύπωσε το εξής ερώτημα σε ένα άρθρο του: How Long is the Coast of Britain? (Πόσο μήκος έχει η Παραλία της Βρετανίας;). Η απάντησή του ήταν ότι το μήκος εξαρτάται από την απόσταση από την οποία κάνετε τον υπολογισμό σας. Παρατηρώντας την ακτή από ένα αεροπλάνο, θα δούμε το γενικό ακανόνιστο σχήμα της, παραβλέποντας παραλίες και κολπίσκους. Συνεπώς το μήκος που θα μετρήσουμε θα είναι κατώτερο απ' το πραγματικό μήκος της ακτής. Αντιθέτως, αν διατρέξουμε με το αυτοκίνητο τη βρετανική ακτή, θα δούμε τις παραλίες και τους κολπίσκους της, αλλά θα μας διαφύγουν οι εσοχές και οι εξοχές της ακτής. Το μήκος που θα υπολογίσουμε θα είναι μεγαλύτερο, αλλά θα εξακολουθεί να είναι κατώτερο από το πραγματικό. Περιπατώντας την ακτή, θα αντιληφθούμε και θα μετρήσουμε περισσότερες λεπτομέρειες. Όμως και πάλι θα μας διαφύγουν οι πολύ μικρές λεπτομέρειες, όπως οι κόκκοι της άμμου. Τέλος, ένα μυρμήγκι, που διασχίζει την ακτή χιλιοστό-χιλιοστό θα δει από κοντά τις πιο ανεπαίσθητες ανομοιομορφίες του εδάφους, μετρώντας και τον παραμικρό κόκκο άμμου. Ο Μάντελμπροτ καταλήγει ότι το αποτέλεσμα εξαρτάται από τις σχέσεις ανάμεσα στο αντικείμενο της μέτρησης και τον παρατηρητή. Το μήκος της ακτής εξαρτάται ανάλογα με το αν ο παρατηρητής εξετάζει το αντικείμενο από κοντά ή από μακριά. Αν η ακτή είχε κάποιο ευκλείδειο σχήμα, με τη μέθοδο της πρόσθεσης όλο και μικρότερων γραμμικών αποστάσεων, η μέτρηση θα συγκλίνει σε μια τελική τιμή, που θα είναι το πραγματικό μήκος της ακτής. Αυτό, όμως, δεν ισχύει στην περίπτωση του μήκους σχημάτων όπως η ακτή της Βρετανίας, γιατί το ακανόνιστο εκδηλώνεται σε κάθε κλίμακα και τα μοτίβα επαναλαμβάνονται από τη μια κλίμακα στην άλλη. Οι κολπίσκοι, οι όρμοι και οι παραλίες κρύβουν υπο-κολπίσκους, υπο-όρμους και υπο-παραλίες, που, με τη σειρά τους, κρύβουν υπο-υπο-κολπίσκους, υπο-υπο-όρμους και υπο-υπο-παραλίες. Ο Μάντελμπροτ ανακάλυψε ότι όσο μικραίνει η κλίμακα της μέτρησης, τόσο αυξάνεται το μετρημένο μήκος της ακτής, ώσπου να γίνει άπειρο.

### 1.2.3.2 ΑΥΤΟ-ΟΜΟΙΟΤΗΤΑ: ΤΟ ΚΑΝΟΝΙΚΟ ΣΤΟ ΑΚΑΝΟΝΙΣΤΟ

Τα φράκταλ έχουν μια ασυνήθιστη ιδιότητα: η έλλειψη κανονικότητας που τα διακρίνει δεν είναι τυχαία, καθώς υπάρχει κανονικότητα στον ακανόνιστο χαρακτήρα τους. Ο βαθμός της μη κανονικότητας παραμένει σταθερός σε διαφορετικές κλίμακες. Ένα αντικείμενο φράκταλ έχει την ίδια εμφάνιση και από μακριά και από κοντά. Τα φράκταλ έχουν αυτό που ονομάζουμε «αυτο-ομοιότητα»: παρουσιάζουν την ίδια όψη, όποια κι αν είναι η μεγέθυνση τους. Ένα μοτίβο επαναλαμβάνεται στο εσωτερικό ενός μεγαλύτερου, ίδιου μοτίβου, που κι αυτό με τη σειρά του περιλαμβάνεται σε ένα παρόμοιο μοτίβο ακόμα πιο μεγάλο. Η ίδια μη κανονικότητα επαναλαμβάνεται σε όλες τις κλίμακες.

Στην πορεία των ερευνών του, ο Μάντελμπροτ ήρθε αντιμέτωπος με πολύπλοκα σχήματα. όπως η καμπύλη Κοχ, οι καμπύλες του Πεάνο (Peano), τα χαλιά και τα κόσκινα Σιερπίνσκι (Sierpinski), που χαρακτηρίζονται από άπειρη επανάληψη της πολυπλοκότητάς τους μέσα στον εαυτό τους.

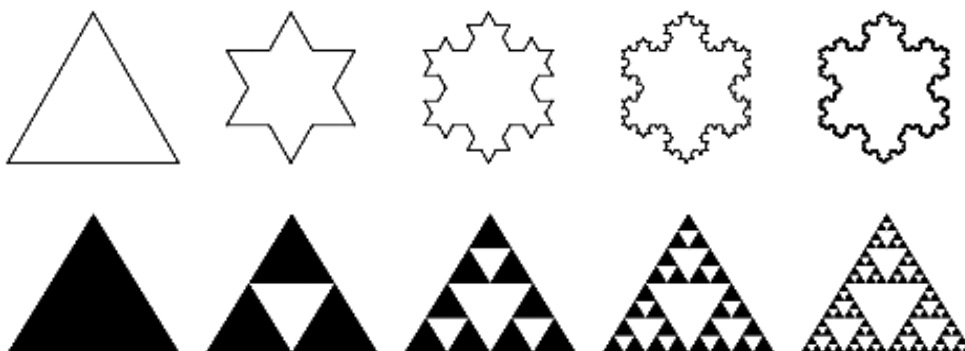


#### 1.0 Επιστήμη

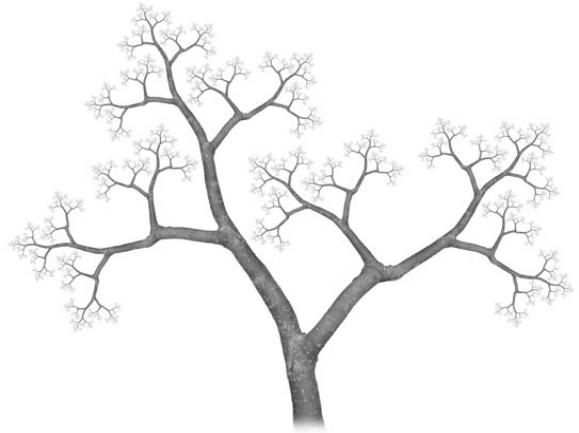
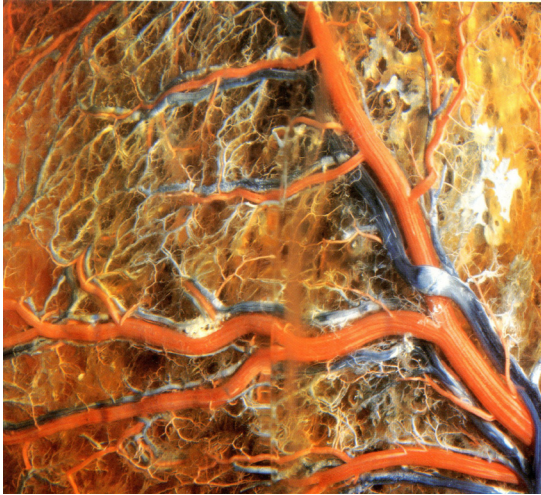
→ 1.2 Το Χάος ελευθερώνει τη Φύση

→ 1.2.3 Fractal: Η Γεωμετρία της Φύσης

Η καμπύλη Κοχ, από το όνομα του Χέλγκε Φον Κοχ (Helge Von Koch), του Σουηδού μαθηματικού που το περιέγραψε πρώτος το 1904, είναι αποτέλεσμα ενός επαναλαμβανόμενου μετασχηματισμού. Στο μεσαίο τρίτο κάθε πλευράς, και εξωτερικά του αρχικού ισόπλευρου τριγώνου, προστίθεται ένα νέο ισόπλευρο τρίγωνο. Αυτά είναι όμοια με το αρχικό, αλλά οι πλευρές τους θα έχουν μήκος το ένα τρίτο του μήκους της πλευράς του αρχικού. Στη συνέχεια, σε καθεμιά από τις δώδεκα πλευρές επαναλαμβάνεται ο ίδιος μετασχηματισμός: ένα μικρότερο τρίγωνο προστίθεται σε κάθε μεσαίο ένα τρίτο. Και πάλι το ίδιο, μέχρι το άπειρο. Ο ίδιος μετασχηματισμός επαναλαμβάνεται σε όλο και μικρότερες κλίμακες. Η καμπύλη Κοχ έχει μερικά ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά. Δεν τέμνει ποτέ τον εαυτό της, αφού τα νέα τρίγωνα σε κάθε πλευρά είναι πάντα αρκετά μικρά ώστε να μην τέμνονται μεταξύ τους. Κάθε μετασχηματισμός προσθέτει ένα μικρό εμβαδόν στο εσωτερικό της καμπύλης, αλλά το ολικό εμβαδόν παραμένει πεπερασμένο, στην πραγματικότητα όχι πολύ μεγαλύτερο από του αρχικού τριγώνου. Αν σχεδιάσετε έναν κύκλο γύρω από το αρχικό τρίγωνο, η καμπύλη Κοχ δε θα ξεφύγει ποτέ έξω απ' αυτόν. Ακόμα, η καμπύλη έχει άπειρο μήκος σε έναν πεπερασμένο χώρο. Η κλασματική διάσταση αποδείχτηκε το σωστό μέτρο για τη μέτρηση αυτών των σχημάτων. Ήταν ο βαθμός μη κανονικότητας που αντιστοιχούσε στη δυνατότητα ενός αντικειμένου να καταλαμβάνει χώρο. Μια απλή ευκλείδεια και μονοδιάστατη γραμμή δεν καταλαμβάνει καθόλου χώρο. Αλλά το σχεδιάγραμμα της καμπύλης Κοχ, με το άπειρο μήκος της που συνωστίζεται σε μια πεπερασμένη επιφάνεια, καταλαμβάνει χώρο. Είναι κάτι περισσότερο από γραμμή αλλά και κάτι λιγότερο από επίπεδο. Έχει κάτι περισσότερο από μία διάσταση και κάτι λιγότερο από δύο διαστάσεις. Ο Μάντελμπροτ υπολόγισε την κλασματική διάσταση της καμπύλης Κοχ ότι είναι 1,2618. Η εξερεύνηση αυτών των απεριόριστα πολύπλοκων σχημάτων βασίζονταν στη σταθερότητα κλίμακας, στην ιδιότητα της αυτο-ομοιότητας (self-similarity). Πάνω από όλα, φράκταλ σήμαινε κάτι όμοιο με τον εαυτό του. Η αυτο-ομοιότητα είναι συμμετρία που συναντάμε σε όλες τις κλίμακες. Σημαίνει μορφή μέσα στη μορφή. Αυτά τα μαθηματικά σχήματα εμφανίζουν ομοιότητα με τον εαυτό τους γιατί φαίνονται ακριβώς ίδια, ακόμα και σε μεγάλη μεγέθυνση.



**Τέλεια μαθηματικά φράκταλ** → Σχήματα σαν την καμπύλη Κόχ (πάνω) και το κόσκινο Σιερίπινσκι (κάτω) χαρακτηρίζονται από άπειρη επανάληψη της πολύπλοκότητάς τους μέσα στον εαυτό τους.



**Η Φύση αγαπά τα φράκταλ**→ Η Φύση φαίνεται να τρέφει ιδιαίτερη συμπάθεια στις δομές φράκταλ. Δομές φράκταλ υπάρχουν και στο ανθρώπινο σώμα. Τα αιμοφόρα αγγεία, από την αορτή μέχρι τα τριχοειδή, σχηματίζουν ένα είδος συνεχούς. Η διακλαδωμένη δομή των αιμοφόρων αγγείων είναι ένα φράκταλ. Οι μεγάλες αρτηρίες διακλαδώνονται σε μεσαίες αρτηρίες, που με τη σειρά τους διακλαδώνονται σε αρτηρίδια. Από κάποια αναγκαιότητα της φυσιολογίας, τα αιμοφόρα αγγεία πρέπει να κάνουν κάτι ανάλογο με την καμπύλη του Κοχ: όπως το ιδιόρρυθμο σχήμα περιορίζει μια γραμμή άπειρου μήκους σε μια μικρή επιφάνεια, το κυκλοφορικό σύστημα συμπιέζει μια μεγάλη επιφάνεια σε έναν περιορισμένο όγκο. Μολονότι το σύστημα των αιμοφόρων αγγείων καταλαμβάνει μόλις το 5% περίπου του όγκου του ανθρώπινου σώματος, η φράκταλ δομή του έχει ως αποτέλεσμα, στην πλειονότητα των ιστών, ποτέ κανένα κύτταρο να μην είναι πολύ απομακρυσμένο από ένα αγγείο. Είναι η πιο αποτελεσματική λύση που βρήκε η Φύση για να αποθήκευσει την τεράστια επιφάνεια των αιμοφόρων αγγείων στο εσωτερικό του πολύ περιορισμένου όγκου ενός ανθρώπινου σώματος. Η δομή φράκταλ χαρακτηρίζει κι άλλα μέρη του σώματος, πάντα με στόχο να συσκευαστεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη επιφάνεια σε όσο το δυνατόν μικρότερο όγκο. Το σώμα είναι γεμάτο με τέτοιου είδους πολυπλοκότητα: δομές, που διακλαδώνονται σε υπο-δομές, που διακλαδώνονται σε υπο-υπο-δομές, ένα μοτίβο που επαναλαμβάνεται από τη μια κλίμακα στην άλλη. Πώς μπόρεσε η φύση να δημιουργήσει μια τέτοια πολύπλοκη αρχιτεκτονική; Η άποψη του Μάντελμπροτ είναι ότι ως φράκταλ, οι διακλαδωνόμενες δομές μπορούν να περιγραφούν με λίγες πληροφορίες. Η επαναλαμβανόμενη διαδικασία διακλαδώσεων και ανάπτυξης με την οποία προέκυψαν τα σχήματα των Κοχ και Σιερπίνσκι ίσως να έχουν το ανάλογό τους στις κωδικοποιημένες εντολές των γονιδίων ενός οργανισμού. Ο Μάντελμπροτ πέρασε από τα τα αγγειακά δέντρα στα πραγματικά δέντρα του φυσικού κόσμου.

### 1.2.3.3 Η ΝΕΑ ΑΙΣΘΗΤΙΚΗ ΤΩΝ ΦΡΑΚΤΑΛ

Συχνά οι επιστήμονες που κατέφευγαν στη φράκταλ γεωμετρία αισθάνονταν κάποιες αναλογίες ανάμεσα στη νέα μαθηματική αισθητική τους και στις αλλαγές στο χώρο της τέχνης κατά το δεύτερο μισό του αιώνα. Για τον Μάντελμπροτ, η έκφραση της ευκλείδειας αισθητικής ήταν η γεωμετρική αρχιτεκτονική του Μπαουχάους. Τα κτίρια που αποκαλούνται γεωμετρικά αποτελούνται από απλά σχήματα και περιγράφονται με λίγους αριθμούς. Για τον Μάντελμπροτ, η αιτία της αποτυχίας της γεωμετρικής αρχιτεκτονικής και τέχνης ήταν ότι τα



#### 1.0 Επιστήμη

→ 1.2 Το Χάος ελευθερώνει τη Φύση

→ 1.2.3 Fractal: Η Γεωμετρία της Φύσης

απλά σχήματα δεν απηχούν τον τρόπο που η φύση οργανώνει τον εαυτό της. Την αίσθησή μας για την ομορφιά μας την εμπνέει η αρμονική συνύπαρξη της τάξης και της αταξίας, όπως υπάρχουν στα φυσικά αντικείμενα — όπως στους κρυστάλλους του χιονιού. Τα σχήματα αυτά είναι δυναμικές διαδικασίες που έχουν αποκρυσταλλωθεί σε φυσικές μορφές, και σ' αυτά ενυπάρχουν συγκεκριμένοι συνδυασμοί τάξης και αταξίας. Ένα γεωμετρικό σχήμα έχει μια κλίμακα, ένα χαρακτηριστικό μέγεθος. Για τον Μάντελμπροτ, η τέχνη που ικανοποιεί δεν έχει κλίμακα, με την έννοια ότι περιέχει σημαντικά στοιχεία σε όλα τα μεγέθη. Στο κτίριο Σίγκραμ αντιπαραθέτει την αρχιτεκτονική της παρισινής Σχολής των Καλών Τεχνών, με τα γλυπτά και τις διακοσμητικές λεπτομέρειες της όψης. Ένας παρατηρητής που κοιτάζει το κτίριο από οποιαδήποτε απόσταση διαπιστώνει διαφορετικές λεπτομέρειες. Η σύνθεση μεταβάλλεται καθώς ο παρατηρητής πλησιάζει και αρχίζουν να γίνονται ορατά νέα στοιχεία της όψης.

## 1.3 Ο ΚΟΣΜΟΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΕΙΤΑΙ ΔΙΑΡΚΩΣ

### 1.3.1 ΤΟ ΠΑΛΙΟ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΚΟΣΜΟΕΙΔΩΛΟ: Η ΦΥΣΗ ΕΙΝΑΙ ΕΝΑ ΡΟΜΠΟΤ

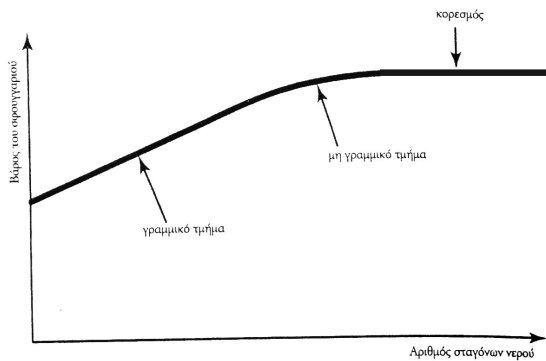
Ο χώρος και ο χρόνος στο νευτωνικό μοντέλο μένουν ως απόλυτες οντότητες-παράμετροι έξω από κάθε φυσική λειτουργία, καθιστώντας αυτό το κοσμοείδωλο ντετερμινιστικό, στατικό, ανιστορικό, αχρονικό και αναγωγικό. Η κατάσταση ενός φυσικού συστήματος είναι καθορισμένη κάθε στιγμή από το παρελθόν, έτσι ώστε τίποτε το νέο δεν γίνεται. Οι φυσικοί νόμοι μας επιτρέπουν να προσδιορίσουμε επακριβώς τη συνολική τροχιά από το παρελθόν στο μέλλον, αρκεί να γνωρίζουμε μια αρχική κατάσταση. Ο ντετερμινισμός αυτός ισοδυναμεί με τη δυνατότητα αντίστροφης εξέλιξης της ροής των καταστάσεων από το μέλλον προς το παρελθόν. Αυτό υποδηλώνουν οι όροι αχρονικότητα και ανιστορικότητα του κόσμου, ότι δηλαδή η πραγματικότητα είναι στατική και αναλλοίωτη. Η αναγωγικότητα της κλασικής θεωρίας σημαίνει ότι κάθε ιδιότητα, ποιοτική ή ποσοτική, του φυσικού κόσμου θα πρέπει να ανάγεται και να παράγεται ως συνάρτηση των θεμελιωδών ιδιοτήτων που συνδέονται με τη θεμελιώδη κατάσταση του συστήματος. Η γενική νευτωνική τακτική συνίσταται στο να απομονώσουμε ένα δεδομένο και έπειτα να βασίσουμε σ' αυτό όλα τα περαιτέρω συμπεράσματα για ορισμένο σύνολο φαινομένων. Στη δυτική κουλτούρα είχε ιδιαίτερα αναπτυχθεί η ικανότητα στην κατάτμηση, στον κατακερματισμό των προβλημάτων σε όσο γίνεται μικρότερα συστατικά. Η Φύση μπορεί να αποτελείται από διάφορα μέρη και κάθε μέρος να μελετάται ανεξάρτητα από το άλλο, μια ιδέα που βρίσκεται στη βάση της αναγωγικής μεθόδου και επέτρεψε τη θεμελίωση μεγάλου μέρους της δυτικής επιστήμης. Είναι βέβαιο ότι η αναγωγική προσέγγιση βοήθησε πολύ στην κατανόηση του κόσμου, δίνοντας τη δυνατότητα να προσδεύουμε βήμα-βήμα, να συναρμολογούμε το ένα μετά το άλλο τα κομμάτια του παζλ, χωρίς να πρέπει να ξέρουμε πώς είναι το παζλ συμπληρωμένο. Ο αναγωγισμός βασίζεται κυρίως στη γραμμικότητα. Σ' ένα γραμμικό σύστημα, το αποτέλεσμα είναι πάντα ανάλογο με την αιτία και το σύνολο ισοδυναμεί απόλυτα με το άθροισμα των μερών του. Το άθροισμα των αιτίων παράγει ένα αντίστοιχο άθροισμα αποτελεσμάτων και αρκεί να μελετήσει κανείς χωριστά τις μεμονωμένες συμπεριφορές των συστατικών και έπειτα να τις προσθέσει, για να συνάγει τη συμπεριφορά του συνόλου. Κάθε φυσικό φαινόμενο εξηγείται από την κίνηση στο χώρο διακριτών υλικών σωματιδίων. Όσο τα φυσικά φαινόμενα παρουσιάζουν γραμμική συμπεριφορά, γίνονται κατανοητά στο σύνολό τους, με βάση την ανάλυση και τη μελέτη των συστατικών τους. Οι επιτυχίες της αναγωγικής και γραμμικής φυσικής ήταν τόσο θεαματικές, που δημιούργησαν τη λανθασμένη εντύπωση ότι ο κόσμος αποτελούνταν κυρίως από γραμμικά συστήματα. Ωστόσο, τα φυσικά συστήματα όταν ξεπεράσουν ένα όριο αντοχής γίνονται μη γραμμικά και δεν μπορούν να αναλυθούν, αφού το σύνολο γίνεται ανώτερο από το άθροισμα των συστατικών του. Το αποτέλεσμα δεν είναι πλέον ανάλογο προς το αίτιο. Τα χαστικά συστήματα είναι κατεξοχήν μη γραμμικά. Όπως είδαμε, τα συστήματα αυτά είναι εξαιρετικά ευαίσθητα στην παραμικρή διαταραχή. Το αποτέλεσμα είναι υπερβολικό σε σχέση με το αίτιο και δεν είναι πια προβλέψιμο.



#### 1.0 Επιστήμη

→ 1.3 Ο Κόσμος δημιουργείται διαρκώς

→ 1.3.1 Το παλιό επιστημονικό κοσμοείδωλο: Η φύση είναι ένα ρομπότ



**Γραμμική και μη γραμμική συμπεριφορά**→ Αν βρέξουμε ένα σφουγγάρι κάτω από μια βρύση, στην αρχή, το βάρος του σφουγγαριού είναι ανάλογο με τον αριθμό των σταγόνων νερού που απορροφά. Η σχέση ανάμεσα στο βάρος και τον αριθμό των σταγόνων είναι γραμμική, καθώς διπλασιάζεται όταν απορροφά τις διπλάσιες σταγόνες. Όμως η συμπεριφορά του σφουγγαριού αλλάζει όταν έχει απορροφήσει πολύ νερό. Η ικανότητα απορρόφησης του νερού μειώνεται σταδιακά, ώσπου να γίνει ίση με μηδέν (κορεσμός). Το βάρος του σφουγγαριού παύει να αυξάνεται αναλογικά με τον αριθμό των σταγόνων νερού που πέφτουν πάνω του. Από γραμμική, η συμπεριφορά του σφουγγαριού γίνεται μη γραμμική.

Ο αναγωγισμός επηρέασε βαθιά τη δυτική επιστημονική σκέψη. Ο αντίκτυπος της αναγωγικής προσέγγισης επηρέασε την ίδια την εικόνα της φύσης, καθώς δέχεται ότι η πολυπλοκότητα του κόσμου μπορεί να εξηγηθεί από τους νόμους της φυσικής. Κάθε φυσικό σύστημα μπορεί να αναλυθεί στα βασικά συστατικά του και η συμπεριφορά του μπορεί να γίνει κατανοητή και να εξηγηθεί με βάση τη συμπεριφορά των θεμελιωδών συστατικών του. Επειδή η Φύση είναι πολύπλοκη, μόνο αναλύοντάς την στα πιο απλά της στοιχεία μπόρεσε η επιστήμη να σημειώσει πρόοδο. Η φυσική, όπως την ξέρουμε σήμερα, δεν θα μπορούσε να υπάρξει χωρίς αυτήν την απλουστευτική διαδικασία. Υπό το πρίσμα του αναγωγισμού, τα έμβια όντα είναι απλά σύνολα ατόμων και μορίων που λειτουργούν σύμφωνα με τους συνήθεις νόμους της φυσικής. Η εξήγηση της ζωής θα απλουστευόταν και θα γινόταν εξήγηση της συμπεριφοράς και της αλληλεπίδρασης των μοριακών συστατικών των έμβιων όντων. Στο νευτώνειο κόσμο, η ύλη ήταν απλώς μια αδρανής ουσία που υπάκουε τυφλά σε εξωτερικές δυνάμεις, στερούμενη δημιουργικότητας. Το Σύμπαν ήταν ένας καλοκουρδισμένος μηχανισμός, ένα ρολόι που μόλις κουρδιζόταν, λειτουργούσε από μόνο του με βάση αυστηρά καθορισμένους νόμους. Η ελευθερία και η φαντασία καταργούνταν. Η συμπεριφορά και του παραμικρού ατόμου καθοριζόταν εκ των προτέρων. Η επιστήμη παρουσίασε τη φύση σαν ένα αυτόματο, ένα ρομπότ. Η κλασική επιστήμη αποκάλυψε στον άνθρωπο μια φύση νεκρή και πάθητική, η οποία συμπεριφέρεται σαν ένα ρομπότ, που ακολουθεί τις επιταγές του προγραμματισμού του.

Η παρόρμηση να αναχθεί η πολυμορφία της φύσης στα απλά συστατικά της ενυπήρχε στη δυτική σκέψη από την εποχή των Ελλήνων ατομικών. Σύμφωνα με τους ατομικούς, όλες οι δομές και οι μορφές του κόσμου ήταν απλώς διαφορετικές διατάξεις ατόμων και κάθε αλλαγή ή εξέλιξη αντανάκλούσε απλώς την αναδιάταξη των ατόμων αυτών. Το Σύμπαν ήταν μια τεράστια μηχανή όπου κάθε άτομο απαντούσε τυφλά στην επιρροή των γειτόνων του.



### 1.3.2 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΑΚΡΙΑ ΑΠΟ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ

Στον Αιώνα της Μηχανής η παραδοσιακή επιστήμη έδινε τη μεγαλύτερη σημασία στη σταθερότητα, στην τάξη, στην ομοιομορφία και στην ισορροπία. Την απασχολούσαν κυρίως τα κλειστά συστήματα και οι γραμμικές σχέσεις. Όμως, η αλήθεια είναι ότι στο μεγαλύτερο μέρος της η πραγματικότητα δεν έχει τάξη, σταθερότητα και ισορροπία, αλλά αταξία. Τον 19ο αιώνα, δύο κόσμοι βρέθηκαν αντιμέτωποι: ο στατικός κόσμος της δυναμικής και η εξελικτική άποψη του κόσμου που εκφράζεται με τη βιολογία του Δαρβίνου και τη θερμοδυναμική. Αν λάβει κανείς υπόψη, αφενός ότι η επιστήμη του Νεύτωνα αρνιόταν το βέλος του χρόνου και αφετέρου ότι η έννοια της μη αναστρεψιμότητας είναι ουσιαστική τόσο για τη θερμοδυναμική όσο για τη βιολογία, τότε αναμφισβήτητα τα εξελικτικά παραδείγματα συνέβαλαν κατά πολύ στην ανάδειξη του παράδοξου του χρόνου στην περιοχή των επιστημών. Ο πρώτος επιστήμονας που διαπίστωσε το πρόβλημα της μη αναστρεψιμότητας, δηλαδή το παράδοξο του χρόνου ήταν ο Μπόλτ兹μαν. Η θερμοδυναμική χαρακτηρίζεται από μια μονόπλευρη μη αντιστρεπτή ροή που συνοψίζεται στο 2ο θερμοδυναμικό νόμο μονότονης αύξησης της εντροπίας. Αυτός ο δεύτερος νόμος λέει ότι, μέσα σε ένα κλειστό και απομονωμένο σύστημα, η αταξία (που μετριέται με μια ποσότητα που οι φυσικοί ονομάζουν εντροπία) θα πρέπει να αυξηθεί (ή τουλάχιστον να μη μειωθεί) με το πέρασμα του χρόνου. Η αδυναμία της κλασικής επιστήμης να περιγράψει πολύπλοκα προβλήματα οδήγησε στην εισαγωγή της θεωρίας πιθανοτήτων και την ανάπτυξη της στατιστικής φυσικής. Ωστόσο, στο επίκεντρο της επιστημονικής έρευνας βρισκόταν η τελική κατάσταση της θερμοδυναμικής εξέλιξης, δηλαδή η κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας. Η σημασία των μη αντιστρεπτών φαινομένων θα φανερωθεί αργότερα όταν η μη Γραμμική Θερμοδυναμική θα δείξει τη δυνατότητα αυτο-οργάνωσης (ελάττωση της εντροπίας) στα ανοικτά θερμοδυναμικά συστήματα.

Σήμερα έχει αλλάξει τελείως η κατάσταση. Ο κόσμος δεν διέπεται από χρονικά αναστρέψιμους θεμελιώδεις νόμους. Παρατηρούμε ότι στον κόσμο μας η αναστρεψιμότητα και ο ντετερμινισμός εφαρμόζονται μόνο σε οριακές, απλές περιπτώσεις, ενώ το μη αναστρέψιμο και το τυχαίο αποτελούν τον κανόνα. Το τεχνητό μπορεί να είναι ντετερμινιστικό και αναστρέψιμο. Η φύση όμως περιέχει ουσιαστικά στοιχεία του τυχαίου και μη αναστρέψιμου. Ξεχωριστό ενδιαφέρον αποκτά το παράδειγμα του Βέλγου χημικού ρωσικής καταγωγής Ίλια Πριγκοζίν (Ilya Prigogine, 1917-2003, βραβείο Nobel Χημείας 1977), επειδή στρέφει την προσοχή στις πλευρές της πραγματικότητας που χαρακτηρίζονται από αταξία, έλλειψη ισορροπίας και μη γραμμικές σχέσεις. Το έργο του Πριγκοζίν και των συνεργατών του στη «Σχολή των Βρυξελλών», αντιπροσωπεύει τη νέα επιστημονική επανάσταση, αφού προχωρεί σ' ένα νέο διάλογο με τη φύση, όπου η ύλη δεν αποτελεί παθητική ουσία, όπως την περιγράφει η μηχανιστική κοσμοθεωρία. Τα ανοιχτά συστήματα βρίσκονται μακριά από την κατάσταση ισορροπίας και ανταλλάσσουν αδιάκοπα ύλη και ενέργεια με το περιβάλλον τους. Στην ισορροπία η ύλη είναι τυφλή, αλλά σε μακριά από την ισορροπία συνθήκες αρχίζει να αποκτά την ικανότητα να αντιλαμβάνεται. Τα ανοιχτά χημικά συστήματα σε μη ισορροπία διαθέτουν μια δύναμη αυτο-οργάνωσης και δημιουργίας τάξης από το χάος, που τα κλειστά χημικά συστήματα σε ισορροπία δεν διαθέτουν. Χαρακτηριστικό



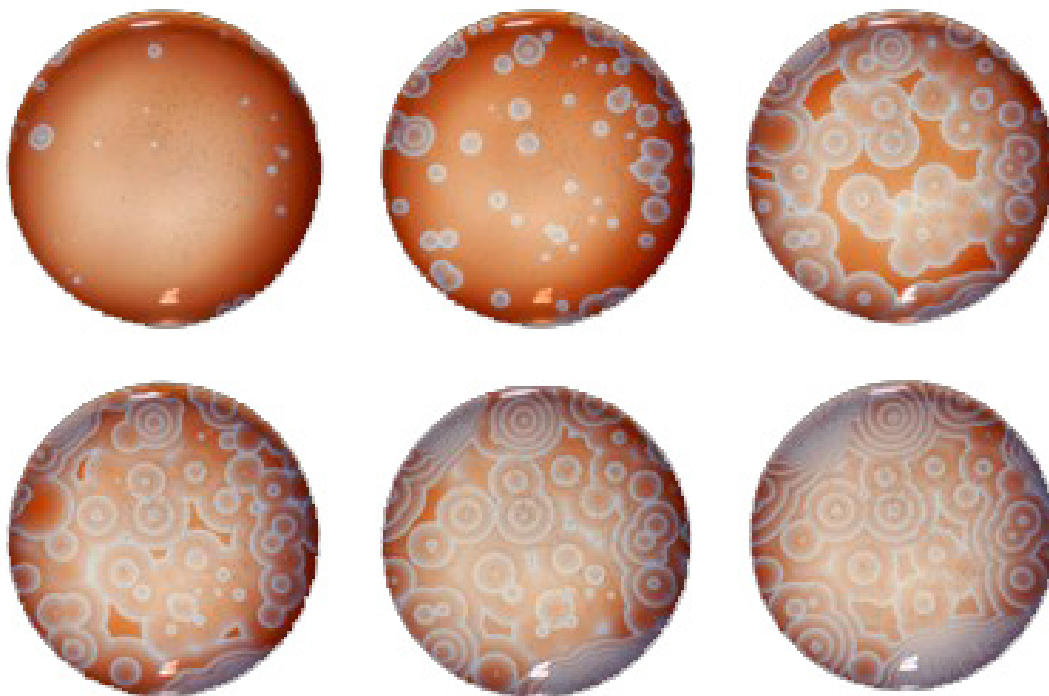
#### 1.0 Επιστήμη

→ 1.3 Ο Κόσμος δημιουργείται διαρκώς

→ 1.3.2 Θερμοδυναμική μακριά από ισορροπία

και θεαματικό παράδειγμα αυτής της συμπεριφοράς είναι τα χημικά ρολόγια, που περιγράφει ο Πριγκοζίν στη χημική αντίδραση των Μπελούσοφ-Ζαμποτίνσκι (Belousov-Zhabotinsky), από το όνομα των δυο ρώσων επιστημόνων που τη μελέτησαν για πρώτη φορά. Αυτή η χημική αντίδραση λαμβάνει χώρα μέσα σε ένα μείγμα θειικού δημητρίου, μηλονικού οξέος και βρωμικού καλίου, διαλυμένων μέσα σε θειικό οξύ. Για να μελετηθεί, χρησιμοποιήθηκαν χρωστικές ουσίες που θα σημάδευαν κάθε ιόν. Έτσι, το μπλε θα έδειχνε τα ιόντα οξέος, ενώ το κόκκινο τα ιόντα βάσης. Χρησιμοποιήθηκε μια αντλία για να εγχύσει τα χημικά στοιχεία μέσα στο μείγμα. Όσο ο ρυθμός της έγχυσης παραμένει αργός, το σύστημα βρίσκεται κοντά στην κατάσταση της ισορροπίας και δεν συμβαίνει τίποτα το ασυνήθιστο. Όλα τα χρώματα παραμένουν ανακατεμένα. Όμως, όταν ο ρυθμός της έγχυσης ξεπεράσει μια ορισμένη τιμή, το χημικό σύστημα περνά σε μια κατάσταση μη ισορροπίας και δημιουργείται ένα εκπληκτικό θέαμα: ολόκληρο το μείγμα γίνεται ξαφνικά κόκκινο. Δυο λεπτά αργότερα, το χρώμα ολόκληρου του μείγματος γίνεται μπλε. Περνούν άλλα δυο λεπτά και το κόκκινο επανέρχεται και ούτω καθεξής. Η αλλαγή του χρώματος είναι περιοδική, γι' αυτό και το σύστημα έχει χαρακτηριστεί ως «χημικό ρολόι». Ο ρυθμικός παλμός και η ολιστική συμπεριφορά που παρουσιάζει το χημικό μείγμα είναι στοιχεία εκπληκτικά αν σκεφτούμε ότι υπάρχουν δισεκατομμύρια σωματιδίων μέσα στο χημικό μείγμα. Η αρχική κατάσταση, όπου δεν υπήρχε οργάνωση, ήταν συμμετρική ως προς το χρόνο. Η συμμετρία σπάει από τη στιγμή που αρχίζουν οι ταλαντώσεις, αφού οι καταστάσεις που ακολουθούν δεν παραμένουν πια αναλλοίωτες σε συνάρτηση με το χρόνο. Όταν το σύστημα ωθείται πέρα από ένα κρίσιμο όριο, μπορεί να βγει από την κατάσταση της ισορροπίας για να διακλαδωθεί προς μια αυστηρά δομημένη κατάσταση αυτο-οργάνωσης. Ο Ίλια Πριγκοζίν ονομάζει αυτό το είδος χημικού μείγματος «dissipative structure» (στα ελληνικά ο όρος αποδίδεται ως Δομή Έκλυσης, Εκλυτογενής Δομή ή Σκεδαστική Δομή, επειδή οι νέες δομές χρειάζονται και καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια για να διατηρηθούν, σε σύγκριση με τις απλούστερες που αντικαθιστούν). Το σύστημα μπορεί επίσης να διακλαδωθεί προς μια εντελώς χαοτική κατάσταση, καθώς αν ο ρυθμός άντλησης εξακολουθήσει να αυξάνεται, η ρυθμική συμπεριφορά του χημικού ρολογιού δίνει τη θέση της σε διακυμάνσεις όλο και πιο περίπλοκες, που γίνονται εντελώς χαοτικές.

Η σύμφωνη δράση των σωματιδίων είναι ανάλογη με την ακόλουθη κατάσταση. Ας φανταστούμε ότι 50.000 δισεκατομμύρια μαύρες μπάλες κι άλλες τόσες άσπρες μπάλες χοροπηδάνε άτακτα και τυχαία, ανακατεμένα μέσα σε μια γυάλα. Τις περισσότερες φορές θα βλέπουμε ένα γκριζο χρώμα, αφού θα είναι ορατές τόσες άσπρες μπάλες όσες και μαύρες. Για να συναντήσουμε το αντίστοιχο του ρυθμικού παλμού που αναφέρθηκε πιο πάνω θα έπρεπε, ξαφνικά, να βλέπουμε μόνο μαύρες μπάλες, ύστερα από δυο λεπτά μόνο άσπρες και πάει λέγοντας.



**Η οργάνωση της χημικής αντίδρασης των Μπελούσοφ-Ζαμποτίνσκι στο χώρο** → Η οργάνωση της χημικής αντίδρασης των Μπελούσοφ-Ζαμποτίνσκι δεν επιτελείται μόνο στο χρόνο, αλλά και στο χώρο. Δυο είδη εκπληκτικών δομών στο χώρο εμφανίζονται: είτε ομόκεντρα κυκλικά κύματα χρώματος μπλε, που διαδίδονται πάνω σ' ένα κόκκινο φόντο, ξεκινώντας από μια κεντρική πηγή προς τα έξω, είτε μπλε σπειροειδείς δομές που γυρίζουν γύρω από ένα κέντρο, επίσης πάνω σε κόκκινο φόντο. Ενώ σε συνθήκες ισορροπίας τα μόρια αλληλοαγνοούνται, στο σημείο μετάβασης από την ισορροπία στη μη ισορροπία εμφανίζονται συσχετισμοί μεγάλης εμβέλειας μεταξύ των μορίων.

Μια από τις θεωρίες, που μας επιτρέπουν να περιγράψουμε το σχηματισμό σκεδαστικών δομών, είναι η θεωρία των διακλαδώσεων, δηλαδή των ξαφνικών αλλαγών που επιτρέπουν κάτι καινούργιο να εμφανιστεί. Αυτό συμβαίνει επειδή οι σκεδαστικές δομές είναι μη γραμμικά συστήματα, η τάξη των οποίων αναδύεται από το χάος. Μια και μόνο διακύμανση προστιθέμενη σε άλλες θα μπορούσε να γίνει αρκετά ισχυρή ώστε να επαναοργανώσει το όλο σύστημα σε ένα νέο πρότυπο. Στα σημεία αυτά, καταρρέει η ντετερμινιστική περιγραφή και το σύστημα ακολουθεί μία από τις πολλές πιθανές διακλαδώσεις του δρόμου. Δεν μπορούμε να καθορίσουμε εκ των προτέρων ποια από τις δυο διακλαδώσεις θα ακολουθήσει το σύστημα. Είναι σαν η ύλη να είχε τη δική της βούληση. Στο σημείο διακλάδωσης είναι από τη φύση των πραγμάτων αδύνατο να καθορίσουμε από πριν την κατεύθυνση της αλλαγής: αν το σύστημα θα αποσυντεθεί φτάνοντας σε κατάσταση χάους ή θα μεταπηδήσει σε ένα ανώτερο επίπεδο οργάνωσης. Ο Πριγκοζίν και η Στέντζερς (Isabelle Stengers) στο βιβλίο «Τάξη μέσα από το Χάος», όχι μόνο δεν αντιπαραθέτουν την τύχη και την αναγκαιότητα, αλλά τις θεωρούν ουσιώδεις για την περιγραφή των μη γραμμικών



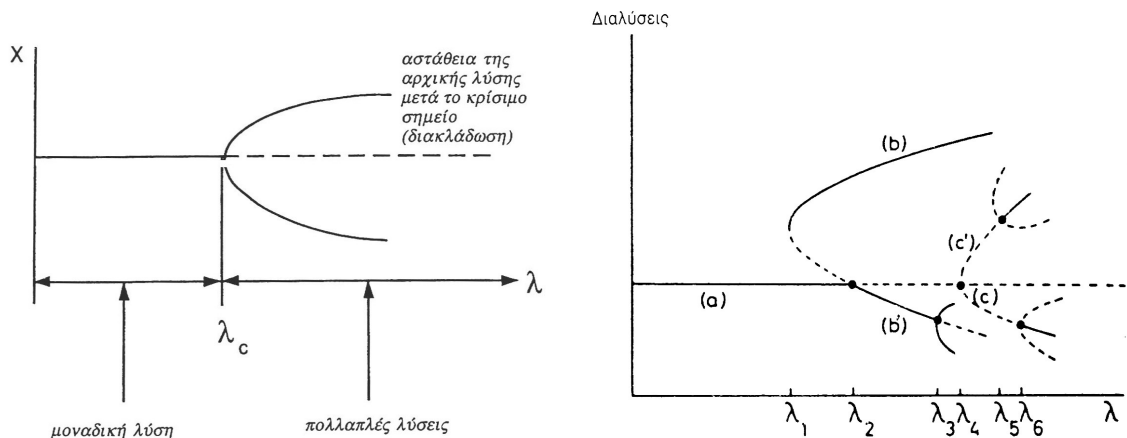
### 1.0 Επιστήμη

→ 1.3 Ο Κόσμος δημιουργείται διαρκώς

→ 1.3.2 Θερμοδυναμική μακριά από ισορροπία

συστημάτων που βρίσκονται μακριά από την ισορροπία. Οι δύο συγγραφείς προτείνουν μια νέα σχέση ανάμεσα στην τύχη και στην αναγκαιότητα. Όταν ένα σύστημα εξωθείται από διακυμάνσεις σε κατάσταση μακριά από την ισορροπία και κινδυνεύει η δομή του, πλησιάζει στο σημείο διακλάδωσης. Στο σημείο αυτό η επόμενη κατάσταση του συστήματος ωθείται από την τύχη. Η τύχη παίζει το ρόλο της στο σημείο της διακλάδωσης, έπειτα από το οποίο αρχίζουν πάλι να επενεργούν ντετερμινιστικές διεργασίες μέχρι την επόμενη διακλάδωση.

Στο νευτωνικό μοντέλο του κόσμου, ο χρόνος θεωρείται αναστρέψιμος καθώς κάθε στιγμή στο παρόν, στο παρελθόν ή στο μέλλον ήταν όμοια με κάθε άλλη. Η θερμοδυναμική όμως, ήδη από τα μέσα περίπου του 19ου αιώνα, είχε θέσει το πρόβλημα των μη αντιστρεπτών διαδικασιών και του βέλους του χρόνου. Το γεγονός ότι δεν έγινε κατορθωτό να συνειδητοποιηθεί το πρόβλημα αυτό και οι πραγματικές του διαστάσεις, οφείλεται στο ότι δεν είχε αναγνωρισθεί ο θεμελιωδώς μη γραμμικός χαρακτήρας των φυσικών διαδικασιών και η διαφορετική συμπεριφορά των φυσικών συστημάτων, όταν βρίσκονται μακριά από την κατάσταση ισορροπίας. Το αποτέλεσμα της εργασίας του Prigogine έχει πολλές επιστημολογικές και φιλοσοφικές επιπτώσεις, καθώς υποδεικνύει έναν άλλο τρόπο θεώρησης του κόσμου. Κεντρική θέση του Πριγκοζίν είναι ότι οι φυσικοί νόμοι πρέπει να διευρυνθούν ώστε να συμπεριλάβουν τις έννοιες της πιθανότητας και της μη αναστρεψιμότητας. Μια τέτοια περιγραφή, τονίζει ο Πριγκοζίν, μας παρέχει τις αρχές που μας επιτρέπουν να ανιχνεύσουμε την δομή του Σύμπαντος στο μέλλον. Αλλά αυτό το Σύμπαν δεν είναι δεδομένο, όπως πίστευε οι ντετερμινιστές, στηριζόμενοι στην μοναδικότητα των λύσεων των διαφορικών εξισώσεων της κλασικής φυσικής. Πρόκειται για μια καθαρώς ρεαλιστική αντιμετώπιση της δημιουργικής Φύσης, η οποία δημιουργείται κάτω από την επίδραση δύο παραγόντων: των αιτιοκρατικών νόμων και της τύχης.



**Διαγράμματα διακλαδώσεων** → Στα σημεία διακλαδώσεων προκύπτουν διάφορες λύσεις μεταξύ των οποίων γίνεται επιλογή με μια διαδικασία πιθανοκρατική. Την πρώτη διακλάδωση ακολουθούν άλλες διακλαδώσεις και η εξέλιξη πραγματώνεται με διαδοχή σταδίων, που περιγράφονται με αιτιοκρατικούς και πιθανοκρατικούς νόμους.

### 1.3.3 Η ΝΕΑ ΑΝΤΙΛΗΨΗ ΓΙΑ ΤΗ ΦΥΣΗ: Η ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗ ΤΗΣ ΎΛΗΣ

Στο τέλος του 20ού αιώνα άλλαξε ριζικά ο τρόπος με τον οποίο αντιλαμβανόμαστε τον κόσμο. Αφού κυριάρχησε στη δυτική σκεψη για 300 χρόνια το κατακερματισμένο, μηχανιστικό και ντετερμινιστικό Σύμπαν του Νεύτωνα έδωσε τη θέση του σε έναν κόσμο ολιστικό, μη ντετερμινιστικό, πλήρους δημιουργικότητας. Για τον Νεύτωνα, το Σύμπαν ήταν μια τεράστια μηχανή φτιαγμένη από αδρανή σωματίδια ύλης, που υπάκουαν σε κάποιες δυνάμεις. Ο ντετερμινισμός και ο αναγωγισμός επικράτησαν ως το τέλος του 19ου αιώνα. Αμφισβητήθηκαν, διαμορφώθηκαν εκ νέου, ενωστη διάρκεια του 20ου αιώνα εκμηδενίστηκαν από μια νέα θεώρηση των πραγμάτων. Η κβαντομηχανική άλλαξε ολοκληρωτικά τον τρόπο που αντιλαμβανόμαστε την ύλη. Η ντετερμινιστική μηχανή του Νεύτωνα αντικαταστάθηκε σε υποατομικό επίπεδο από έναν κόσμο κυμάτων και σωματιδίων, που δεν διέπεται πλέον από τους αυστηρούς νόμους της αιτιότητας, αλλά από την τύχη. Κατά έναν τρόπο, όμως, εξακολουθούσαν να υπάρχουν κατάλοιπα ντετερμινισμού. Αν και δεν μπορούμε να υπολογίσουμε την ακριβή πορεία ενός ηλεκτρονίου, μπορούμε να υπολογίσουμε την πιθανότητα να βρεθεί στο ένα ή το άλλο σημείο. Αυτά τα κατάλοιπα ντετερμινισμού εξοβελίστηκαν με τον ερχομό του χάους. Το χάος είναι παρόν όταν μια ελάχιστη αλλαγή των αρχικών αιτίων ενός συστήματος προκαλεί μια πολύ μεγαλύτερη αλλαγή των αποτελεσμάτων. Το αποτέλεσμα δεν είναι πλέον ανάλογο προς το αίτιο. Αυτή η ακραία ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες καθιστά τη συμπεριφορά ενός χαοτικού συστήματος μη προβλέψιμη, όσο αδυνατούμε να μάθουμε ποιες ακριβώς είναι οι αρχικές αυτές συνθήκες. Όπως συμβαίνει και με τον κβαντικό ντετερμινισμό, η αδυναμία αυτή δεν οφείλεται σε έναν ανθρώπινο περιορισμό, αλλά εμπεριέχεται στην ίδια τη Φύση. Το χάος ελευθερώνει την ύλη από τον ντετερμινισμό και επιτρέπει στη Φύση να αφήνεται σε ένα δημιουργικό παιχνίδι, να παράγει νέα στοιχεία που δεν περιέχονταν εν δυνάμει στις προηγούμενες καταστάσεις της.

Κατά το παρελθόν μεγάλη έμφαση είχε δοθεί στην μελέτη των ευσταθών συστημάτων. Το αιτιοκρατικό χάος όμως έδειξε την μεγάλη σημασία της δυναμικής των ασταθών συστημάτων. Η αστάθεια οδηγεί στην δυνατότητα πολλαπλών επιλογών στην εξέλιξη ενός συστήματος, καταφεύγοντας στην στατιστική περιγραφή. Οι εξισώσεις μας πλέον δεν περιέχουν βεβαιότητες, αλλά δυνατότητες. Αυτή η εξέλιξη φαίνεται αρχικά ότι είναι μια άσχημη εξέλιξη, με την έννοια ότι μας απομακρύνει από το κλασικό ιδανικό της αιτιοκρατικής περιγραφής, η οποία συνοδεύεται από την προσδοκία της βέβαιης γνώσης. Εν τούτοις, επειδή οφείλουμε να κατανοήσουμε ότι πλέον έχουμε να κάνουμε με την Φύση όπως στην πραγματικότητα λειτουργεί και όχι με εξιδανικεύσεις της. Ο Πριγκοζίν με το επαναστατικό του έργο έφερε στο προσκήνιο του επιστημονικού ενδιαφέροντος τα ανοιχτά συστήματα που ανταλλάσσουν ενέργεια, ύλη και πληροφορίες με το περιβάλλον τους. Οι σύγχρονες φυσικές θεωρίες του 20ού αιώνα, της Σχετικότητας, της Κβαντομηχανικής και του Χάους απομάκρυναν την κλασική θεωρία και έφεραν την εικόνα ενός διαρκώς δημιουργούμενου κόσμου. Το χάος, απαιτεί διεύρυνση της έννοιας του φυσικού νόμου με παράλληλη εισαγωγή της πιθανότητας και της μη αναστρεψιμότητας. Αυτή είναι μια ριζοσπαστική αλλαγή που μας αναγκάζει να σκεφθούμε εξ αρχής για τη θεμελιώδη περιγραφή που έχουμε κάνει για τη φύση. Η Φύση για



#### 1.0 Επιστήμη

→ 1.3 Ο Κόσμος δημιουργείται διαρκώς

→ 1.3.3 Η νέα αντίληψη για τη φύση: Η απελευθέρωση της ύλης

να δημιουργήσει και να κατασκευάσει την πολυπλοκότητα θα βασιστεί στην ανισορροπία. Η απόλυτη τάξη είναι στείρα, ενώ η ελεγχόμενη αταξία είναι δημιουργική, το ντετερμινιστικό χάος είναι φορέας καινοτομιών. Η ύλη οργανώνεται σύμφωνα με τις αρχές της πολυπλοκότητας και αποκτά ιδιότητες που δεν μπορούν να συναχθούν από τη μελέτη των συστατικών της. Στο νέο επιστημονικό κοσμοείδωλο, η ύλη έχασε τον κεντρικό της ρόλο. Τώρα σε πρώτο πλάνο εμφανίζονται οι αρχές που την οργανώνουν και την οδηγούν στην πολυπλοκότητα. Το λεξιλόγιο άλλαξε. Αντί για εικόνες όπως μηχανή ή ρολόι, επανέρχονται τώρα λέξεις που σχετίζονται περισσότερο με τη βιολογία, όπως προσαρμογή, πληροφορία και οργάνωση.

Όπως είδαμε, ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής ορίζει ότι η αταξία στο Σύμπαν τείνει να μεγαλώνει, με άλλα λόγια, η συνολική εντροπία του Σύμπαντος μπορεί μόνο να αυξάνει με το πέρασμα του χρόνου. Αν όμως ισχύει αυτός ο αδυσώπητος νόμος της συμπαντικής υποβάθμισης της ενέργειας και άρα της μεγιστοποίησης της αταξίας, τότε πώς εξηγείται η ανάδυση και η εξέλιξη μέσα στο Σύμπαν εξαιρετικά πολύπλοκων φαινομένων; Η κλασική θερμοδυναμική περιόρισε το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής στη μελέτη καταστάσεων ισορροπίας, σε κλειστά και απομονωμένα συστήματα, σε ιδανικά δηλαδή συστήματα που δεν ανταλλάσσουν ύλη και ενέργεια με το περιβάλλον τους. Προφανώς, μέσα στο γνωστό μας Σύμπαν τέτοια συστήματα σε κατάσταση απόλυτης θερμικής ισορροπίας αποτελούν μόνο θεωρητικές αφαιρέσεις. Ο Πριγκοζίν και η Στέντζερς στο βιβλίο «Τάξη μέσα από το Χάος» δίνουν μια νέα ερμηνεία στο δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής, καθώς όπως διαπίστωσαν, ο νόμος αυτός αφήνει ανοικτό το δρόμο για τη δημιουργία πολύπλοκων δομών. Μακριά από τη θερμοδυναμική ισορροπία, η φύση μπορεί να αυτο-οργανώνεται και να αναδύονται νέες πολύπλοκες φυσικές δομές, οι οποίες εξάγουν αταξία στο περιβάλλον τους.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ

Bak Per, Πώς λειτουργεί η φύση, Η επιστήμη της αυτο-οργανούμενης κρισιμότητας, Κάτοπτρο, Αθήνα, 2008

Briggs John, Peat David, Ο ταραγμένος καθρέπτης: μια περιήγηση στη θεωρία του χάους και την επιστήμη της ολότητας, Κάτοπτρο, Αθήνα, 2001

Briggs John, Peat David, Μια αιρετική άποψη για το χάος στην καθημερινή μας ζωή, Τραυλός, Αθήνα, 2001

Briggs John, Fractals: the patterns of chaos: discovering a new aesthetic of art, science, and nature, London, 1992

Gleick James, Χάος: Μία Νέα Επιστήμη, Κάτοπτρο, Αθήνα, 1990

Mandelbrot Benoit, The fractal geometry of nature, W. H. Freeman, San Francisco, 1982

Peitgen, Jurgens, Saupe, Chaos and fractals: new frontiers of science, Springer-Verlag, New York, 1992

Prigogine Ilya, Οι νόμοι του χάους, Τραυλός, Αθήνα, 2003

Prigogine Ilya, Το τέλος της βεβαιότητας, Χρόνος, χάος και οι νόμοι της φύσης, Κάτοπτρο, Αθήνα, 2003

Prigogine Ilya, Isabelle Stengers, Τάξη μέσα από το χάος, Ο νέος διάλογος του ανθρώπου με τη φύση, Κέδρος, Αθήνα, 2008

Prigogine Ilya, Είναι το μέλλον δεδομένο;, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα, 2003

Ruelle David, Τύχη και χάος, Τραυλός, Αθήνα, 1999

Schrodinger Erwin, Τι είναι η ζωή, Πνεύμα και ύλη, Τραυλός, Αθήνα, 1995

Stewart Ian, Παίζει ο Θεός ζάρια; Η επιστήμη του χάους, Τραυλός, Αθήνα, 1991

Stewart Ian, Είναι ο Θεός γεωμέτρης, Η τρομερή συμμετρία, Τραυλός, Αθήνα, 2008

Szpiro George, Η εικασία του Πουανκαρέ, Τραυλός, Αθήνα, 2009



Thuan Trihn Xuan, Χάος και Αρμονία, Η κατασκευή της Πραγματικότητας, Τραυλός, Αθήνα, 2004

Μπούντης Αναστάσιος, Δυναμικά συστήματα και χάος, Τόμος Α', Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1995

Μπούντης Αναστάσιος, Δυναμικά συστήματα και χάος, Τόμος Β', Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 1997

Χρηστίδης Θεόδωρος, Χάος και πιθανολογική αιτιότητα: Μεταξύ προκαθορισμού και τύχης, Εκδόσεις Βάνιας, Θεσσαλονίκη, 1997

## ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΑΡΘΡΟΓΡΑΦΙΑ

Μπούντης Τάσος, Τύχη ή Βεβαιότητα; Η διαλεκτική της θεωρίας του Χάους, <http://sciencearchives.wordpress.com/2009/12/24/%CF%8D-%CE%AE-%CF%8C-%CE%AE-epsilon/>

Σκορδούλης Κώστας, Θεωρία του χάους και διαλεκτική, [http://www.theseis.com/index.php?option=com\\_content&task=view&id=571&Itemid=29](http://www.theseis.com/index.php?option=com_content&task=view&id=571&Itemid=29)

Πλάνας Γεώργιος, Η αισθητική του χάους, [http://www.nea-acropoli.gr/index.php?option=com\\_content&view=article&catid=68:2008-03-23-17-34-43&id=260:2008-03-24-17-53-12&Itemid=104](http://www.nea-acropoli.gr/index.php?option=com_content&view=article&catid=68:2008-03-23-17-34-43&id=260:2008-03-24-17-53-12&Itemid=104)

Μεντζενιώτης Διονύσης, Η αλλαγή των επιστημονικών αντιλήψεων και ο Thomas Kuhn, <http://sciencearchives.wordpress.com/2010/09/02/%CE%AE-%CF%8E-%CE%AE-omega/>

### Ηλεκτρονική αρθρογραφία από την Ελευθεροτυπία:

Καββαθάς Διονύσης, Η φύση και η θεωρία του χάους, <http://www.enet.gr/?i=news.el.article&id=111867>

Μανουσέλης Σπύρος, Χάος: μια εναλλακτική προσέγγιση στην παραλυτική πολυπλοκότητα του Κόσμου, <http://www.enet.gr/?i=news.el.article&id=51487>

Μανουσέλης Σπύρος, Δημιουργώντας τάξη μέσα από το χάος, <http://www.enet.gr/?i=news.el.article&id=85968>

Μανουσέλης Σπύρος, Η πρόκληση της πολυπλοκότητας στην επιστημονική σκέψη, <http://www.enet.gr/?i=news.el.article&id=85968>



Μανουσέλης Σπύρος, Η αρχιτεκτονική του χάους, <http://www.enet.gr/?i=news.el.article&id=260729>

Μανουσέλης Σπύρος, Η πρώτη «ντροπαλή» εμφάνιση του χάους, <http://www.enet.gr/?i=news.el.article&id=262525>

Μανουσέλης Σπύρος, Αυτοοργάνωση: η απάντηση στην αβεβαιότητα, <http://www.enet.gr/?i=news.el.article&id=264570>

Μπακόπουλος Αλέξης, Φράκταλ και γεωμετρία του Χάους, <http://www.enet.gr/?i=news.el.article&id=51488>

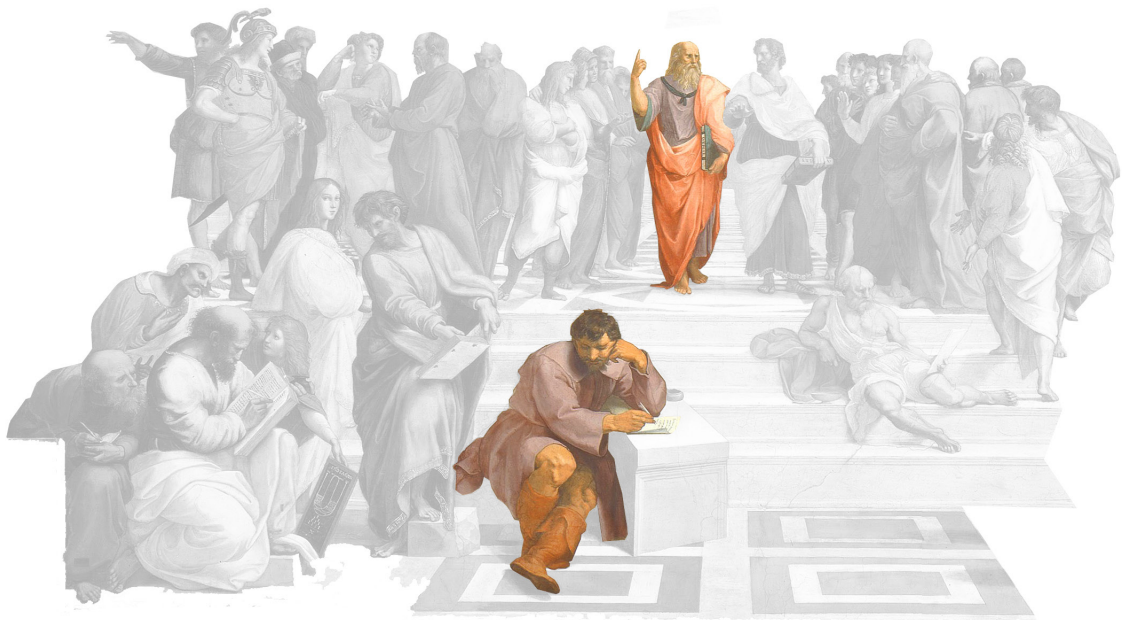
### **Ηλεκτρονική αρθρογραφία από το Βήμα:**

Σφενδόνη-Μέντζου Δήμητρα, Ο Πριγκοζίν, ο Αριστοτέλης και ο χρόνος, [http://www.theseis.com/index.php?option=com\\_content&task=view&id=571&Itemid=29](http://www.theseis.com/index.php?option=com_content&task=view&id=571&Itemid=29)

Βάρβογλης Χάρης, Η πολυπλοκότητα στην επιστήμη, <http://www.tovima.gr/science/article/?aid=352444>







2.0 Φιλοσοφία

## 2.0 ΦΙΛΟΣΟΦΙΑ

Πολλές από τις έννοιες και τις αρχές της σύγχρονης επιστήμης διαμορφώθηκαν από τους αρχαίους Έλληνες φιλόσοφους και επιστήμονες και επέδρασαν βαθιά στην εξέλιξη της δυτικής επιστήμης. Στα πλαίσια της γέφυρας που επιχειρούμε μεταξύ της επιστήμης και της αρχιτεκτονικής, επιχειρούμε να περιγράψουμε την τομή στη αρχαία φιλοσοφική σκέψη με κύριους εκφραστές τον Ηράκλειτο και τον Πλάτωνα, όπως την ορίζει ο Θεόδωρος Χρηστίδης στο βιβλίο “Χάος και πιθανολογική αιτιότητα: Μεταξύ προκαθορισμού και τύχης”, για να αναδείξουμε την επιρροή της στη μετέπειτα δυτική επιστημονική σκέψη. “Ο Ηράκλειτος αντιπροσωπεύει εκείνη την πλευρά, η οποία στηρίζεται στα δεδομένα της εμπειρίας και με λογικές και εννοιακές διαδικασίες προσπαθεί να συλλάβει την λειτουργία της Φύσης, όπως η ως τότε εμπειρία και η διαίσθηση των φιλοσόφων-επιστημόνων τους υπαγορεύει ότι αυτή η λειτουργία γίνεται. Ο Πλάτων, από την άλλη, αντιπροσωπεύει εκείνη την μεθοδολογία, η οποία στηρίζεται στην πεποίθηση ότι αυτός ο κόσμος των αισθήσεων και της εμπειρίας είναι μία προσέγγιση του πραγματικού κόσμου, ο οποίος συνίσταται από το άθροισμα των τελείων όντων, τα οποία ο άνθρωπος μπορεί να πλησιάσει ύστερα από μία εργώδη πνευματική προσπάθεια”. [Χρηστίδης Θεόδωρος, Χάος και πιθανολογική αιτιότητα: Μεταξύ προκαθορισμού και τύχης, Εκδόσεις Βάνιας, Θεσσαλονίκη, 1997, σελίδες 286-287]

## 2.1 ΔΥΟ ΚΟΣΜΟΙ: ΣΚΙΕΣ ΚΑΙ ΙΔΕΕΣ

Ο Πλάτων (427 π.Χ. - 347 π.Χ.) ήταν από τους πρώτους που στοχάστηκαν πάνω στο θεμελιώδες παράδοξο της ύπαρξης που είναι η διχοτομία ανάμεσα στο πρόσκαιρο και το αιώνιο, το γίνεσθαι και το είναι, την προσωρινότητα και τη μονιμότητα. Λόγω της διχοτομίας αυτής, πίστευε ότι υπήρχαν δύο επίπεδα πραγματικότητας: ο μεταβαλλόμενος και ψευδαισθητικός κόσμος που αντιλαμβάνονται οι αισθήσεις μας και ο αληθινός κόσμος των αιώνιων και αναλλοίωτων Ιδεών, όπου κυριαρχούν οι μαθηματικές σχέσεις και οι τέλει γεωμετρικές δομές. Σύμφωνα με τον Πλάτωνα, ο αισθητός και πρόσκαιρος κόσμος είναι απλά αντανάκλαση του αληθινού κόσμου και τα έμβια όντα του αισθητού κόσμου είναι ατελή αντίγραφα αιώνιων μορφών που κατοικούν στον κόσμο των Ιδεών. Για να απεικονίσει τη διχοτομία ανάμεσα στον αισθητό κόσμο και τον κόσμο των Ιδεών, ο Πλάτων εισήγαγε το μύθο του σπηλαίου στο διάλογο της Πολιτείας: κάποιοι άνθρωποι βρίσκονται σιδηροδέσμιοι στο βάθος ενός σπηλαίου, έχοντας την πλάτη τους γυρισμένη προς την είσοδο και το μόνο που μπορούν να δουν είναι οι σκιές των αντικειμένων του εξωτερικού κόσμου, όπως αυτές προβάλλονται πάνω στα τοιχώματα της σπηλιάς. Γι' αυτούς, ο κόσμος των σκιών είναι η μοναδική πραγματικότητα που ισχύει. Δεν μπορούν να ξέρουν ότι οι σκιές αποτελούν απλώς ωχρή ανάκλαση της πραγματικότητας που υπάρχει έξω από τη σπηλιά. Κάποιος που θα ξέφευγε από τα δεσμά του και θα περιπλανιόταν στον εξωτερικό κόσμο, θα αντίκρυζε τη λάμψη του Ήλιου και την ομορφιά του κόσμου. Τα ασαφή περιγράμματα των σκιών θα έδιναν τη θέση τους στην καθαρότητα των μορφών του πραγματικού κόσμου. Για τον Πλάτωνα, ο κόσμος που μπορούν να αντιληφθούν οι αισθήσεις μας είναι παρόμοιος με τον κόσμο των σκιών, μια ατελής εκδήλωση του τέλει κόσμου των Ιδεών. Οι άνθρωποι βλέπουν τα αισθητά και πλανώνται νομίζοντας ότι αυτά πραγματικά υπάρχουν. Στην πραγματικότητα όμως, αυτές που υπάρχουν πραγματικά είναι οι Ιδέες.

Επειδή υπάρχουν δύο επίπεδα πραγματικότητας, ο άνθρωπος διαθέτει διττή φύση. Έχει ένα υλικό σώμα, που αλλάζει με το πέρασμα του χρόνου, χάρη στο οποίο έρχεται σε επαφή με τον κόσμο των αισθήσεων, και μια αθάνατη ψυχή προικισμένη με το χάρισμα της λογικής, η οποία μπορεί να έχει πρόσβαση στον κόσμο των Ιδεών. Οι Ιδέες γίνονται αντιληπτές μόνο με τη λογική και όχι με τις αισθήσεις. Η ψυχή υπήρχε πριν από το σώμα, αλλά, από τη στιγμή που μπαίνει μέσα στο σάρκινο χιτώνα της, ξεχνά ότι κάποτε είχε σχέση με τον κόσμο των Ιδεών. Καθώς ανακαλύπτει τον κόσμο των αισθήσεων, θυμάται τις Ιδέες που είδε στον αληθινό κόσμο, γι' αυτό η μάθηση είναι ανάμνηση μιας γνώσης που είχε η ψυχή πριν σαρκωθεί.

Όπως είδαμε πιο πάνω, ο Πλάτων αναγνωρίζει δύο διαφορετικούς κόσμους, τον αισθητό, ο οποίος διαρκώς μεταβάλλεται και βρίσκεται σε ασταμάτητη ροή, και τον νοητό και αναλλοίωτο κόσμο των Ιδεών. Ο Πλάτων για να προαγάγει τη δική του θέση στηρίχθηκε στην άποψη του Ηράκλειτου για τη διαρκή μεταβολή, εκείνη που διατυπώθηκε με την γνωστή μεταφορική εικόνα του ποταμού: “ποταμοῖς τοῖς αὐτοῖς ἐμβαίνομέν τε καὶ οὐκ ἐμβαίνομεν, εἶμέν τε καὶ οὐκ εἶμεν” (στα ίδια ποτάμια και μπαίνουμε και δεν μπαίνουμε, και είμαστε και δεν είμαστε, απ.



### 2.0 Φιλοσοφία

→ 2.1 Δύο κόσμοι: Σκιές και Ιδέες

49a) και εκφράζεται με την φράση “τὰ πάντα ρεῖ, μηδέποτε κατὰ τ’αὐτὸ μένειν” (όλα αλλάζουν, τίποτα δεν μένει ποτέ ίδιο). Ο Πλάτων ερμηνεύει την ηρακλείτεια ρήση, παραφράζοντάς την ως εξής: “δὶς ἐς τὸν αὐτὸν ποταμὸν οὐκ ἂν ἐμβαίης” (δεν είναι δυνατό να μπεις δύο φορές στον ίδιο ποταμό), αποδίδοντας σ’ αυτήν το νόημα της διαρκούς αλλαγής. Αφού τα πάντα στον κόσμο της εμπειρίας μεταβάλλονται συνεχώς, υπάρχει αδυναμία να διατυπώσουμε προτάσεις που να έχουν διάρκεια και εγκυρότητα. Ο Πλάτων θεωρεί ότι πραγματική γνώση μπορούμε να έχουμε μόνον για τον κόσμο των Ιδεών. Συνεπώς, ο κόσμος που αξίζει να αποτελεί αντικείμενο ενασχόλησης, είναι ο κόσμος των Ιδεών, ο οποίος όμως δεν είναι δυνατό να προσεγγιστεί παρά μόνον με το πνεύμα.

## 2.2 Ο ΚΟΣΜΟΣ ΟΠΩΣ ΕΙΝΑΙ

Ο Ηράκλειτος (περίπου 540-480 π.Χ.) αποτελεί κορυφαία μορφή της προσωκρατικής φιλοσοφίας. Από τα λιγοστά αποσπάσματα που έχουν διασωθεί, φαίνεται πως ο λόγος του είναι ποιητικός, υπαινικτικός και πολυσήμαντος. Στην ιστορία της φιλοσοφίας ο Ηράκλειτος είναι ο πρώτος που παρουσίασε μια ολοκληρωμένη θεωρία της μεταβολής: “τα πάντα ρεῖ, μηδέποτε κατὰ τ’αὐτὸ μένειν” (όλα αλλάζουν, τίποτα δεν μένει ποτέ ίδιο). Η διαρκής κίνηση και μεταβολή αποτελεί το θεμελιώδες χαρακτηριστικό της πραγματικότητας, το οποίο εξέφρασε ο φιλόσοφος με την εικόνα ενός ποταμού που παραμένει ίδιος, ενώ το νερό που κυλάει μέσα του αλλάζει διαρκώς: “ποταμοῖς τοῖς αὐτοῖς ἐμβαίνομέν τε καὶ οὐκ ἐμβαίνομεν, εἶμέν τε καὶ οὐκ εἶμεν (στα ίδια ποτάμια και μπαίνουμε και δεν μπαίνουμε, και είμαστε και δεν είμαστε, απ. 49a) και “ποταμοῖσι τοῖσιν αὐτοῖσιν ἐμβαίνουσιν ἕτερα καὶ ἕτερα ὕδατα ἐπιρρεῖ” (αυτοί που μπαίνουν στα ίδια ποτάμια δέχονται συνέχεια άλλα κι άλλα νερά, απ. 12). Ωστόσο, ο Ηράκλειτος δεν πίστευε σε μια καθολική ροή και μεταβολή, αλλά επέμενε στην ενότητα και το αναλλοίωτο υπό το πρίσμα της ενοποιού δράσης του λόγου: “Ἐν τὸ σοφὸν ἐπίστασθαι γνῶμην ὅκη κυβερνᾶται πάντα διὰ πάντων” (ένα είναι το σοφό, να γνωρίζεις το σχέδιο για το πώς κυβερνώνται όλα από όλα, απ. 41) και με το απόσπασμα 50 “...Ἐν πάντα εἶναι” μας λέει ότι όλα είναι ένα. Σήμερα γνωρίζουμε ότι όλα αλληλεπιδρούν με όλα, ενώ η Θεωρία των Πάντων επιδιώκει να βρει ένα γενικό νόμο της φύσης, όπου όλα είναι ένα, ένα νόμο που περιγράφει το σύνολο των φυσικών διαδικασιών.

Ο Ηράκλειτος υποστηρίζει ότι μπορούμε να γνωρίσουμε τον κόσμο συνδυάζοντας τα δεδομένα των αισθήσεων με τη λογική επεξεργασία, με την εμβάθυνση στις εικόνες και στις έννοιες που σχηματίζουμε για την περιγραφή των φαινομένων και με τη διατύπωση υποθέσεων για τη βαθύτερη πραγματικότητα, η οποία δεν είναι προσιτή στις αισθήσεις. Ο Χρηστίδης συνδυάζοντας καταλλήλως τα αποσπάσματα του Ηράκλειτου δίνει μια εικόνα αυτής της προσέγγισης. Ξεκινώντας από τις μαρτυρίες των αισθήσεων, θα διαμορφώσουμε αρχές με τη βοήθεια των οποίων θα ανακαλύψουμε την κρυμμένη αρμονία που κρύβεται στο βάθος των πραγμάτων. Ο Ηράκλειτος υιοθετεί τη μοναδική ιδέα ότι ο κόσμος κυβερνάται από ένα γενικό νόμο, το λόγο, τον οποίο οι άνθρωποι δεν μπορούν να αντιληφθούν και σχηματίζουν δικές τους λανθασμένες γνώμες. Ο Ηράκλειτος επιχειρεί να ενοποιήσει όλα τα στοιχεία του κόσμου, τα



### 2.0 Φιλοσοφία

→ 2.2 Ο Κόσμος όπως είναι

οποία προκύπτουν από την αλληλεπίδραση όλων των στοιχείων μεταξύ τους. Ο λόγος είναι η ρυθμιστική αρχή που διέπει το σύνολο της πραγματικότητας και συνδέει με σχέσεις αναλογίας τα πάντα. Στο δύσκολο ερώτημα πώς μπορούμε να γνωρίσουμε τον κόσμο, ο Ηράκλειτος απαντά αρχικά με τις αισθήσεις και την εμπειρική γνώση: “ὀκόσων ὄψις ἀκοή μάθησις, ταῦτα ἐγὼ προτιμῶ” (ὅσα πράγματα αντιλαμβάνομαι με την ὄραση, την ἀκοή και τη μάθηση αὐτά ἐγὼ τα προτιμῶ, απ. 55). Ωστόσο, ο Ηράκλειτος θα μας πει: “κακοὶ μάρτυρες ἀνθρώποισιν ὀφθαλμοὶ καὶ ὤτα βαρβάρους ψυχὰς ἔχόντων” (για τους ἀνθρώπους οἱ οφθαλμοὶ καὶ τὰ ὠτα εἶναι κακοὶ μάρτυρες, εἴν το μυαλό τους εἶναι ἀκαλλιέργητο, απ. 107). Με ἄλλα λόγια, ἀν δὲν ἔχουμε τις κατάλληλες ἀρχές, οἱ δυνατότητες της ἐμπειρίας μπορεῖ νὰ μας ξεπατήσουν, καθὼς ἡ “φύσις κρύπτεσθαι φιλεῖ” (ἡ φύση ἀγαπᾷ νὰ κρύβεται, απ. 123). Ἀν συνδυάσουμε το τελευταῖο ἀπόσπασμα με το “ἀρμονία ἀφανῆς φανερῆς κρέσσων” (ἡ ἀφανῆς ἀρμονία εἶναι καλύτερη ἀπὸ τὴν φανερή, απ. 54), τότε καταλαβαίνουμε ὅτι ο κόσμος τῶν φαινομένων μας παρέχει κάποιες πληροφορίες, βάσει τῶν ὁποίων θὰ ἀναζητήσουμε τις ἀρχές της θεωρίας μας γιὰ νὰ τὴν επαληθεύσουμε με τὰ δεδομένα της ἐμπειρίας. Γιὰ νὰ ἀνακαλύψουμε τὴν κρυμμένη ἀρμονία τοῦ κόσμου θὰ πρέπει νὰ ψάξουμε το ἀνέλπιστο, καθὼς δὲν ὑπάρχει ἀνοιχτός δρόμος πρὸς τὰ ἐκεῖ: “ἐὰν μὴ ἔλπηται ἀνέλπιστον οὐκ ἐξευρήσει, ἀνεξερεύνητον ἐὼν καὶ ἄπορον” (εἴν δὲν ἐλπίζει κανεῖς, δὲν θὰ βρεῖ το ἀνέλπιστο, γιὰτὶ αὐτό εἶναι ἀνεξερεύνητο καὶ δὲν ὑπάρχει χαραγμένος δρόμος, απ. 18). Ωστόσο, πρὶν ξεκινήσει κανεῖς τὴν ἐρευνα, θὰ πρέπει νὰ ἐρευνήσῃ τὸν εαυτό του, ἔτσι ὥστε νὰ γνωρίσει τις δυνατότητες που ἔχει γιὰ τὴν ἀναζήτηση τῶν ἀρχῶν: “ἐδιζήσάμην ἐμευτόν” (ἐρεύνησα τὸν εαυτό μου, απ. 101), ὅπως προτρέπει το Δελφικὸ “γνῶθι σαυτόν”. Ξεκινώντας κανεῖς ἀπὸ τὰ δεδομένα της ἐμπειρίας, μπορεῖ νὰ ἀποκτήσῃ κάποιες γνώσεις, ἀλλὰ γιὰ νὰ φτάσῃ στη βαθύτερη ἀλήθεια θὰ πρέπει νὰ υπερβῆ τὴν κοινὴ ἐμπειρία καὶ νὰ χρησιμοποιήσῃ τὴ διαίσθηση καὶ τὴ φαντασία του. Αὐτές οἱ υποδείξεις τοῦ Ηράκλειτου ἐπιβεβαιώθηκαν ἀπὸ τις θεωρίες της Σχετικότητας καὶ της Κβαντομηχανικῆς. Αὐτές οἱ θεωρίες, ὅπως καὶ ἡ σύγχρονη Θεωρία τῶν Πάντων, που ἀποβλέπει στὴν ἐνοποίηση τῶν θεμελιωδῶν δυνάμεων της Φύσης, ἀπαιτοῦν πρᾶγματι μιὰ υπέρβαση της ἐμπειρίας.

## 2.3 ΑΠΟ ΤΟΝ ΗΡΑΚΛΕΙΤΟ ΣΤΟΝ PRIGOGINE

Ὅπως εἶδαμε, ἡ θεώρηση τοῦ Πλάτωνα ἐπιβάλλει νὰ υπερβούμε τὴν φαινομενικὴ πραγματικότητα της ἐμπειρίας καὶ νὰ συλλάβουμε τὴν οὐσία τοῦ κόσμου μέσα ἀπὸ τὴν προσέγγιση τοῦ ἀναλλοίωτου κόσμου τῶν ἰδεῶν. Προϋπόθεση γιὰ νὰ προσεγγίσουμε τὸν ἀληθῆ κόσμο τῶν ἰδεῶν εἶναι νὰ ξεκινήσουμε ἀπὸ τὸν κόσμο τῶν αισθητῶν, κάνοντας κάποιες ἐξιδανικεύσεις. Σὲ ἀντίθεση με τὴ φράκταλ δομὴ τοῦ αισθητοῦ κόσμου (ἡ περιγραφή της Γῆς που ἐπιχειρεῖ ο Σωκράτης στὸ διάλογο Φαῖδων, ἔχει ἐκπληκτικὲς ὁμοιότητες με τις μὴ κανονικὲς δομές που περιγράφει ο Μάντελμπροτ), ο Πλάτων υιοθετεῖ τὴν εὐκλείδεια γεωμετρία με τὰ ἰδανικὰ σχήματα που παριστάνουν μιὰ σημαντικὴ ἀφαίρεση της πραγματικότητας. Ἀντιθέτως, ἡ θεώρηση τοῦ Ηράκλειτου καλεῖ τους ἐρευνητές νὰ συλλάβουν τις φυσικὲς διαδικασίες, ἀλλὰ με τὴν προϋπόθεση ὅτι αὐτοὶ ἔχουν κατανοήσῃ μερικὲς βασικὲς ἀρχές, που διέπουν τὴν λειτουργία της Φύσης, ὅπως αὐτὴ ἐκτυλίσσεται καὶ γίνεται μπροστὰ στα μάτια τους, ἀφού



### 2.0 Φιλοσοφία

→ 2.3 Ἀπὸ τὸν Ηράκλειτο στὸν Prigogine

δηλαδή μελετήσουν τον κόσμο όπως είναι και όχι όπως φαντάζονται ότι όφειλε να είναι.

Η πλατωνική θεώρηση επέδρασε καταλυτικά στην εξέλιξη της επιστημονικής σκέψης και μεθοδολογίας, από τον Γαλιλαίο και μετά, καθώς στηρίχθηκε στην προσέγγιση της Φύσης μέσω εξιδανικεύσεων. Οι νόμοι του Νεύτωνα και όλη η μετέπειτα φυσική στηρίχθηκε σε εξιδανικεύσεις της φυσικής πραγματικότητας, με εξαίρεση την θερμοδυναμική. Αντίθετος σε αυτήν την πρακτική ο Ίλυα Πριγκοζίν θα ερευνήσει τη Φύση με τον τρόπο που είχε υποδείξει ο Ηράκλειτος, στηριζόμενος δηλαδή στις υποδείξεις της ίδιας της Φύσης. Ο Ηράκλειτος με την εικόνα του ποταμού που συνεχώς αλλάζει, είχε εισάγει την έννοια του χρόνου: ο χρόνος κυλά αδιαλείπτως και η ροή του συνδέεται με τις διαδικασίες και τις μεταβολές. Ο Πασχάλης Χριστοδούλου, δρ. Χημικός Μηχανικός, στην εισαγωγή του βιβλίου “Οι νόμοι του χάους” αναφέρει μία συζήτηση που είχε με τον Ilya Prigogine στη Θεσσαλονίκη το 1996, μετά από μια ομιλία του. Στην ερώτηση του Χριστοδούλου, αν γνώριζε ότι ο Ηράκλειτος είχε διατυπώσει ήδη εν σπέρματι τον δεύτερο νόμο της Θερμοδυναμικής με τη μη αντιστρεπτή ροή του ποταμού, ο Πριγκοζίν απάντησε ότι, μαζί με τους συνεργάτες του, επιδιώκει να εκφράσει με μαθηματικό τρόπο αυτά που είπε ο Ηράκλειτος. [Ilya Prigogine, Οι νόμοι του χάους, Τραυλός, Αθήνα, 2003]



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΦΙΛΟΣΟΦΙΑΣ

Ηράκλειτος, Άπαντα, Πρόλογος-Μετάφραση: Τάσος Φάλκος-Αρβανιτάκης, Επίμετρο: Άνθρωπος, ζωή, σύμπαν, Θ. Χρηστίδης, Ζήτηρος, Θεσσαλονίκη, 2010

Ησίοδος, Έργα και ημέρες, Θεογονία, Η ασπίδα του Ηρακλή, Εισαγωγή, μετάφραση, σχόλια: Σταύρος Γκιργκένης, Ζήτηρος, Θεσσαλονίκη, 2001

Πλάτων, Τίμαιος, Εισαγωγή, μετάφραση, σχόλια: Θεόδωρος Γ. Μαυρόπουλος, Ζήτηρος, Θεσσαλονίκη, 2010

Πλάτων, Φαίδων, Εισαγωγή, μετάφραση, σχόλια: Θεόδωρος Γ. Μαυρόπουλος, Ζήτηρος, Θεσσαλονίκη, 2007

Συλλογικό έργο, επιμέλεια Δήμητρα Σφενδόνη-Μέντζου, Φιλοσοφία των επιστημών, Τόμος Ι, Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2008

Συλλογικό έργο, επιμέλεια Δήμητρα Σφενδόνη-Μέντζου, Φιλοσοφία των επιστημών, Τόμος ΙΙ, Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2008

Χρηστίδης Θεόδωρος, Ο Ηράκλειτος, ο κόσμος και ο Θεός, Εξάντας, Αθήνα, 2009

Χρηστίδης Θεόδωρος, Χάος και πιθανολογική αιτιότητα: Μεταξύ προκαθορισμού και τύχης, Εκδόσεις Βάνιας, Θεσσαλονίκη, 1997







3.0 Αρχιτεκτονική

### 3.0 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ

Το είδος της αρχιτεκτονικής με το οποίο θα ασχοληθούμε, στο τρίτο και τελευταίο τμήμα του ερευνητικού, αφορά την επιστημονική μελέτη της φύσης και την μεταφορά φυσικών δομών στην αρχιτεκτονική, όχι με τη βιομιμητική έννοια της μεταφοράς της μορφής ή της λειτουργίας της δομής, αλλά με την μεταφορά της διαδικασίας ανάπτυξης της μορφής. Διαδικασία η οποία περιγράφεται μαθηματικά σε όλα τα φυσικά συστήματα και προσομοιώνεται σε υπολογιστικά περιβάλλοντα για την παραγωγή αρχιτεκτονικών μορφών και δομών που εκπληρώνουν συγχρόνως δομικά κριτήρια μορφολογικής, στατικής και λειτουργικής φύσεως, ενώ παράλληλα παρουσιάζουν προσαρμοστικότητα με το άμεσο δομικό και φυσικό τους περιβάλλον.

Το είδος της αρχιτεκτονικής που θα αναλυθεί στην συνέχεια δεν αποτελεί μία γραμμική συνέχεια της ίδιας της αρχιτεκτονικής, αλλά ένα είδος διακλάδωσης. Ο λόγος είναι απλός. **Η σχεδιαστική γνώση και πρακτική έχει ως στόχο να παρέμβει στην πραγματικότητα και να προτείνει έναν κόσμο (δηλαδή μία πραγματικότητα) όπως θα έπρεπε να υπάρχει.** Η αρχιτεκτονική έως σήμερα π.χ. βασίζεται κατά κύριο λόγο στην πλατωνική πραγματικότητα, δηλαδή σε έναν ιδεατό κόσμο ιδανικών μορφών και σχημάτων. Ο Ηράκλειτος από την άλλη πίστευε, όπως ήδη αναφέραμε, ότι η πραγματικότητα βρίσκεται μπροστά μας και όχι σε κάποιον ιδεατό κόσμο, αρκεί να την ερμηνεύαμε σωστά. Από αυτήν την οπτική ξεκίνησε τις εργασίες του και ο Ilya Prigogine, ο οποίος με καθαρά επιστημονικές μεθόδους πλέον, επεκτείνοντας τον 2ο νόμο της θερμοδυναμικής, άρχισε να εξάγει κάποια άκρως ενδιαφέροντα συμπεράσματα γύρω από το πώς δομείται η πραγματικότητα ή αλλιώς η φύση. Οφείλουμε να κατανοήσουμε ότι πλέον έχουμε να κάνουμε με τη φύση όπως στην πραγματικότητα λειτουργεί και όχι με εξιδανικεύσεις της. Οπότε η αρχιτεκτονική, τεχνουργήμα ενός βιολογικού όντος, του ανθρώπου, ο οποίος αποτελεί μέρος της φυσικής διαδικασίας θα έπρεπε να βρίσκεται σε αρμονία με τη φύση, άρα και να παράγεται σύμφωνα με τις αρχές που δομεί η ίδια η φύση, όπως συμβαίνει και με όλα τα τεχνουργήματα των υπόλοιπων όντων σε αυτόν τον πλανήτη. Πράγματι έντομα όπως οι μέλισσες και οι τερμίτες χτίζουν πολύπλοκα τεχνουργήματα τα οποία παρουσιάζουν εξαιρετική οργάνωση και ενεργειακή απόδοση, (π.χ. ρυθμίζουν την θερμοκρασία και την υγρασία μέσα στη φωλιά), χωρίς κεντρικό σχέδιο και υπό την απουσία οδηγιών.

**Για να κατανοήσουμε τις αρχές οργάνωσης τέτοιων πολύπλοκων δομών αλλά και για να εξάγουμε ρητή γνώση χρήσιμη για την αρχιτεκτονική από αυτά θα πρέπει να εμβαθύνουμε στο πώς δομείται η πολυπλοκότητα, το τι είναι το φαινόμενο της ανάδυσης και ποιες είναι οι διαδικασίες της μορφογένεσης.** Στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι να διερευνήσει αν και κατά πόσο η τεχνολογία και τα υλικά του σήμερα μας επιτρέπουν να χτίσουμε τέτοιου είδους αρχιτεκτονική και να εντοπιστούν τα όρια.

## 3.1 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ & ΠΟΛΥΠΛΟΚΟΤΗΤΑ

Ο χαρακτηρισμός της σχεδιαστικής δραστηριότητας ως πολύπλοκης συνήθως προέρχεται από την αδυναμία μας να μετατρέψουμε, να κωδικοποιήσουμε ή να απλοποιήσουμε τη δημιουργική αυτή δραστηριότητα σε ένα καλά προσδιορισμένο σύνολο από μεθόδους ή επιμέρους διαδικασίες. Τα σχεδιαστικά προβλήματα επιδέχονται πολλαπλές ερμηνείες και η σχεδιαστική διαδικασία μπορεί να χαρακτηριστεί ως μία ανοικτή ερμηνευτική πράξη. Κάθε σχεδιαστικό πρόβλημα επιδέχεται πολλές διαφορετικές επιλύσεις και κάθε μία σχεδιαστική πρόταση μπορεί να θεωρηθεί επιτυχημένη για διαφορετικούς λόγους. Τα σχεδιαστικά προβλήματα δημιουργούνται μαζί με τις ιδέες επίλυσής τους. Έτσι, η πολυπλοκότητα φαίνεται πως προέρχεται από την ίδια τη φύση του σχεδιασμού, που απαιτεί τον προσδιορισμό ενός προβλήματος-ιδέας ταυτόχρονα με τον προσδιορισμό της λύσης που θα υλοποιήσει αυτή την ιδέα. [Δανιήλ Μ. (Επιμελητής), Κ. Τσουκαλά (Επιμελητής), Χ. Παντελίδου (Επιμελητής), *Μετανεωτερικές επ-όψεις, Επίκεντρο, Θεσσαλονίκη 2010*]

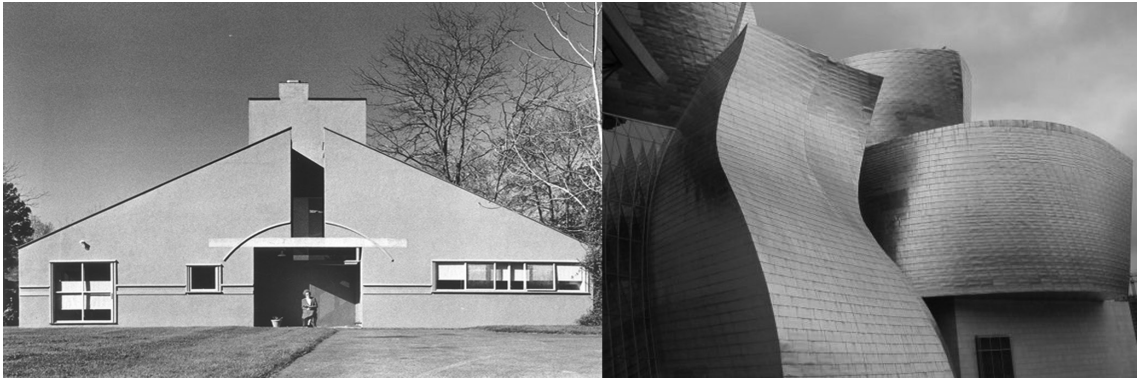
**Βέβαια, η πολυπλοκότητα μπορεί να αναφέρεται όχι μόνο στη σχεδιαστική διαδικασία, αλλά και στα αντικείμενα του σχεδιασμού.** Ο χαρακτηρισμός των αντικειμένων ως πολύπλοκων αναφέρεται σε πολλά διαφορετικά επίπεδα: τη μορφή, τον τρόπο διεπαφής με το χρήστη ή τη λειτουργία και τη συμπεριφορά του αντικειμένου. Επιπλέον, η πολυπλοκότητα ενός αντικειμένου, όπως ένα κτίριο, μπορεί να προέλθει και από τη διαδικασία κατασκευής ή υλοποίησης. Στη θεωρία του σχεδιασμού, αυτές οι διαφορετικές πλευρές της πολυπλοκότητας γίνονται βάση για τη συζήτηση επιθυμητών ή μη επιθυμητών ιδιοτήτων του αντικειμένου: η απλότητα και η πολυπλοκότητα γίνονται αρχές σχεδιασμού. Σε αυτό το πλαίσιο, αξίζει να δούμε το αρχιτεκτονικό μανιφέστο του Robert Venturi (1977) με τίτλο *Complexity and Contradiction in Architecture*. Ο Venturi ήταν από τους πρώτους που εισήγαγαν την έννοια της πολυπλοκότητας στην αρχιτεκτονική. Στο βιβλίο εξέφρασε την απογοήτευση της εποχής του για το μοντερνισμό, που η αναζήτησή του για τάξη, απλότητα και τεχνικό ορθολογισμό οδήγησε συχνά σε αυστηρά, άψυχα κτίρια και χώρους. Η επίκληση για πολυπλοκότητα και αντίθεση ήταν μια επίκληση για ασάφεια και ποικιλία, για τη δημιουργία μιας πιο πλούσιας, πιο πολύπλοκης μορφής τάξης. Η ίδια η ζωή περιέχει και προβάλλει στο χώρο την πολυπλοκότητα και την αντίφαση που ο Venturi δέχεται χωρίς ωραιοποίηση. [R. Venturi, *Complexity and Contradiction in Architecture, The Museum of Modern Art Press, New York 1967*] Ο Venturi εισήγαγε την έννοια της πολυπλοκότητας ως ένα επιθυμητό, ελκυστικό φαινόμενο, ως ένα χαρακτηριστικό του καλού σχεδιασμού και ως ένα εργαλείο για τη δημιουργία νοηματοφόρων χώρων. «Ο Venturi ήταν το πρώτο στάδιο της πολυπλοκότητας στην αρχιτεκτονική. Η πολυπλοκότητα ως κολάζ προϋπαρχόντων, γνωστών λύσεων, η πολυπλοκότητα ως χειραγώγηση του κλασικισμού, του μοντερνισμού, ή οποιοδήποτε γνώριμου ρεύματος. Ασχολείται περισσότερο με την παράθεση στατικών, προϋπαρχόντων στοιχείων, παρά με την ανάδυση πρωτότυπων νέων συνόλων.» [C. Jencks, *The Architecture of the Jumping Universe, Academy Editions, London 1997*]



### 3.0 Αρχιτεκτονική

→ 3.1 Αρχιτεκτονική & πολυπλοκότητα

Το πρώιμο ενδιαφέρον για την επιστήμη της πολυπλοκότητας από καλλιτεχνικούς και τεχνικούς χώρους του σχεδιασμού προήλθε από την εκλαΐκευση κάποιων ιδεών όπως το χάος, τα φράκταλ κ.ά. Αυτές οι εξελίξεις έγιναν αντιληπτές και χρησιμοποιήθηκαν ως έναυσμα από τον Charles Jencks για το βιβλίο του *The Architecture of the Jumping Universe* (1997). Για τον Jencks, η γνώση που προήλθε από την επιστήμη της πολυπλοκότητας αποκάλυψε μία διαφορετική όψη του κόσμου, ένα δυναμικό, δημιουργικό, απρόβλεπτο και εκρηκτικό σύμπαν. Εκτίμησε ότι αυτή η 'κοσμοθεωρία' μπορούσε να προσφέρει μία νέα γλώσσα και μία νέα αισθητική για την αρχιτεκτονική. [C. Jencks, *The Architecture of the Jumping Universe*, Academy Editions London 1997] Αυτή η νέα αισθητική χαρακτηριζόταν από πολύπλοκες μορφές, αναδιπλούμενες επιφάνειες, λοξές γωνίες και στρεφόμενες, ροϊκές φόρμες, όπως αυτές που βρίσκει κανείς στα έργα αρχιτεκτόνων όπως ο Peter Eisenman, ο Daniel Libeskind και ο Frank Gehry.



**Η πολυπλοκότητα στην αρχιτεκτονική** → Στα αριστερά απεικονίζεται το κτίριο Vanna Venturi House του R.Venturi, ενώ δεξιά το Guggenheim Museum του F.Gehry στο Bilbao.

## 3.2 Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΠΟΛΥΠΛΟΚΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ

Η έννοια της πολυπλοκότητας, όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και όπως ερμηνεύτηκε στην αρχιτεκτονική μέσω του θεωρητικού έργου των Robert Venturi και Charles Jencks έχει, παρ' όλα αυτά, μία χαλαρή σύνδεση με την επιστημονική έννοια του όρου. Η επιστημονική γνώση και πρακτική είναι πολύ διαφορετική από τη σχεδιαστική γνώση και πρακτική. **Η επιστημονική γνώση και πρακτική έχει ως στόχο να κατανοήσει τον κόσμο όπως υπάρχει [την πραγματικότητα], ενώ η σχεδιαστική γνώση και πρακτική έχει ως στόχο να παρέμβει στην πραγματικότητα και να προτείνει έναν κόσμο [δηλαδή μία πραγματικότητα], όπως θα έπρεπε να υπάρχει.** [K. Alexiou, J. Johnson, T. Zamencopoulos; *Embracing Complexity in Design*, Routledge, London 2009] Παρ' όλα αυτά είναι δυνατό να μελετήσει κανείς επιστημονικά διάφορες πλευρές του σχεδιασμού: τη φύση της σχεδιαστικής διαδικασίας, το περιβάλλον του σχεδιασμού, τις ιδιότητες των σχεδιαστικών αντικειμένων ή τις αξίες και τις συμπεριφορές των ανθρώπων που τα χρησιμοποιούν. Η επιστήμη μπορεί πιο συγκεκριμένα να χρησιμοποιηθεί ως μέρος του σχεδιασμού με σκοπό την ανάλυση, τη μοντελοποίηση και την επίλυση σχεδιαστικών προβλημάτων.

Η επιστημονική μελέτη της πολυπλοκότητας έχει μια μακροχρόνια ιστορία, οι ρίζες της οποίας μπορεί να βρεθούν στην κυβερνητική, στη θεωρία συστημάτων και στη θεωρία της πληροφορίας, και σχετίζεται στενά με εξελίξεις πάνω σε τομείς όπως η θερμοδυναμική, η θεωρία της εξέλιξης, η τεχνητή νοημοσύνη. Γενικά, η πολυπλοκότητα θεωρείται χαρακτηριστικό ενός συστήματος που περιγράφεται με βάση έννοιες όπως μέγεθος, ποικιλία, τάξη-αταξία ή οργάνωση. Η πολυπλοκότητα έχει επίσης συνδεθεί με έννοιες όπως η εντροπία (η μέτρηση της αταξίας ενός συστήματος), η τυχαιότητα, η ανάδυση (emergence) και η αυτο-οργάνωση.

Στη βάση του, ο όρος εκφράζει ταυτόχρονα μία επιστημολογική και μία μεθοδολογική θέση πάνω στις δυνατότητες και τον τρόπο κατανόησης της πραγματικότητας. Μία από τις θεμελιώδεις λίθους της επιστήμης της πολυπλοκότητας είναι η αναγνώριση της σημασίας της αλληλοσυσχέτισης και της διαντίδρασης ως βάση για την κατανόηση ενός πλήθους φυσικών, κοινωνικών ή τεχνικών συστημάτων και φαινομένων. Αλληλοσυσχετίσεις και διαντιδράσεις μπορεί να υπάρχουν ανάμεσα στα μέλη ενός συστήματος (για παράδειγμα, μεταξύ τμημάτων μιας μηχανής, μεταξύ δραστηριοτήτων που λαμβάνουν χώρα σε ένα κτίριο), αλλά και ανάμεσα σε συστήματα (για παράδειγμα, ανάμεσα σε ένα αντικείμενο και το χρήστη του, ανάμεσα σε κτίρια ή ανάμεσα σε διαφορετικές πόλεις). **Καθώς η αναγωγή δεν είναι εφαρμόσιμη στην κατανόηση της οργάνωσης ενός συστήματος, η επιστήμη της πολυπλοκότητας συχνά ακολουθεί μία μεθοδολογία, η οποία επιχειρεί να ανακατασκευάσει τα ζητούμενα φαινόμενα και την οργάνωσή τους. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, επειδή έχει άμεση σχέση με τη σχεδιαστική πράξη, η οποία, επίσης, ασχολείται με τη δημιουργία οργάνωσης.** [Δανιήλ Μ. (Επιμελητής), Κ. Τσουκαλά (Επιμελητής), Χ. Παντελίδου (Επιμελητής), *Μετανεωτερικές απόψεις, Επίκεντρο, Θεσσαλονίκη 2010*]

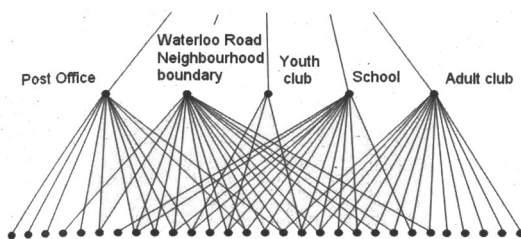


### 3.0 Αρχιτεκτονική

→ 3.2 Η θεωρία της πολυπλοκότητας στον σχεδιασμό

Ο Herbert Simon ήταν από τους πρώτους επιστήμονες της πολυπλοκότητας που εισήγαγε αυτό το είδος σκέψης, συμβάλλοντας σε διαφορετικά πεδία όπως η οικονομία, η διοίκηση, η τεχνητή νοημοσύνη, αλλά και στις γνωστικές επιστήμες και την υπολογιστική. Η συμβολή του είναι σημαντική, γιατί αναγνώριζε το σχεδιασμό ως πρακτική και τομέα γνώσης που αφορά σε περισσότερα επαγγέλματα και επιστημονικούς χώρους. Ο Simon όρισε τα πολύπλοκα συστήματα ως εξής: «με τον όρο πολύπλοκο σύστημα εννοώ το σύστημα εκείνο που αποτελείται από έναν μεγάλο αριθμό μερών που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με έναν μη απλό τρόπο. Σε αυτά τα συστήματα, το όλο είναι περισσότερο από το άθροισμα των μερών όχι με έναν έσχατο, μεταφυσικό τρόπο, αλλά με την πραγματιστική έννοια ότι, δεδομένων των ιδιοτήτων των μερών και των νόμων που διέπουν την αλληλεπίδρασή τους, δεν είναι καθόλου απλό να συμπεράνουμε τις ιδιότητες του όλου». [H. Simon, *The Architecture of Complexity*, Στο *Proceedings of the American Philosophical Society*, 106(6):467-482, 1962]

Με βάση αυτόν τον ορισμό, ο Simon προχώρησε δίνοντας έμφαση στις ιεραρχικές δομές που συχνά χαρακτηρίζουν τέτοια συστήματα. Με τον όρο ιεραρχία εννοούσε την οργάνωση των συστημάτων σε αλληλοσυσχετισμένα υποσυστήματα όπου το ένα δεν είναι οπωσδήποτε υφιστάμενο του άλλου, αλλά που μεταξύ τους σχηματίζουν ένα σύνολο εξαιτίας των περίπλοκων σχέσεων που τα διέπουν. Επομένως, υπάρχουν εξαιρετικές ιδιότητες που απορρέουν από την ομαδοποίηση και αλληλεπίδραση μεταξύ των μερών, η κατανόηση των οποίων δεν είναι δυνατή σε μία θεώρηση των μερών ως ανεξάρτητων μεταξύ τους. Αυτή είναι κατά βάση και η αρχή πίσω από την επίκληση του Christopher Alexander για φυσικές ή φυσικά σχεδιασμένες πόλεις, στο άρθρο του *A City is not a Tree*. [C. Alexander, *A City is not a Tree*, Στο *Design* 206:46-55, 1966] Σε αυτό το άρθρο, ο Alexander υποστηρίζει ότι οι οργανικές πόλεις είναι επιτυχημένες και έχουν διαχρονική αξία εξαιτίας του ότι αποτελούν σύνολα από συστήματα που αλληλεπικαλύπτονται χωρικά και λειτουργικά.



**A City is not a Tree** → Διάγραμμα της δομής που χαρακτηρίζει μια αστική γειτονιά (επανασχεδιασμένο από το πρωτότυπο άρθρο του Alexander, 1966)

Είναι σημαντικό να υπογραμμίσουμε ότι ο Simon και ο Alexander χρησιμοποιούσαν απλές έννοιες, όπως αλληλεξάρτηση ή ιεραρχία, για να αναγνωρίσουν το είδος των δομών που χαρακτηρίζουν πολύπλοκα συστήματα. Η σημασία του προσδιορισμού τέτοιων αναγνωριστικών στοιχείων σχετίζεται με τη δυνατότητα αναδημιουργίας ή διαχείρισης της πολυπλοκότητας



σε διάφορα συστήματα: η γνώση, για παράδειγμα, των δομών εκείνων που καθιστούν τα δίκτυα ευέλικτα, σταθερά ή ανθεκτικά σε εξωτερικές δυνάμεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον ανασχεδιασμό ή την ενίσχυση ενός υπάρχοντος δικτύου. Ένα από τα βασικά εργαλεία αναπαράστασης πολύπλοκων συστημάτων είναι η θεωρία γραφημάτων (graph theory) με την οποία μπορούμε να περιγράψουμε συστηματικά το ρόλο κάθε αντικειμένου σε σχέση με τα άλλα γύρω του. Αυτό που έχει όμως πραγματικά ενδιαφέρον είναι η ανακατασκευή ή αλλιώς η προσομοίωση της πραγματικότητας, δηλαδή των φυσικών συστημάτων.

## ΤΑ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΕΙΝΑΙ Η ΓΛΩΣΣΑ ΤΗΣ ΦΥΣΗΣ

Η επιστήμη της πολυπλοκότητας χρησιμοποιεί την προσομοίωση ως μια μεθοδολογία για την ανάλυση των πολύπλοκων συστημάτων μέσω μιας διαδικασίας ανακατασκευής. Η προσομοίωση μοντέλων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή μπορεί να βοηθήσει στο να κατανοήσουμε και να αναλύσουμε την πραγματικότητα, χωρίς να την κατακερματίσουμε, αλλά ακολουθώντας πάντα μια διαδικασία ανακατασκευής. Η επιστημονική έρευνα επιχειρεί να κατανοήσει την πραγματικότητα και μία από τις βασικές υποθέσεις που την κινούν είναι ότι τα συστήματα που υπάρχουν στον κόσμο (οικολογικά, κοινωνικά κ.τ.λ.) λειτουργούν με βάση κάποιους νόμους ή, πιο γενικά, τηρούν κάποιες σχέσεις και διαδικασίες αιτιότητας. Το ζητούμενο είναι πώς εξάγεται ρητή γνώση από την πραγματικότητα ή αλλιώς από την φύση για την προσομοίωση του εκάστοτε φαινομένου σε υπολογιστικό περιβάλλον.

Με τον όρο ρητή γνώση (explicit knowledge) εννοούμε τη γνώση που μπορεί να περιγραφεί σε κάποια γλώσσα (για παράδειγμα, σε μια φυσική γλώσσα όπως τα Ελληνικά ή σε μια μαθηματική γλώσσα ή σε ένα υπολογιστικό πρόγραμμα). Αξίζει να σημειωθεί ότι η ρητή γνώση μπορεί να συγκριθεί με την άρρητη ή λανθάνουσα γνώση (tacit knowledge), δηλαδή τη γνώση που προέρχεται από την πρακτική εμπειρία μας και δεν μπορεί να εκφραστεί άμεσα με λόγια ή κάποια άλλη μορφή αναπαράστασης.

Ήδη η θεωρία των συστημάτων είχε επισημάνει ότι όλα στον φυσικό κόσμο μπορούν να ερμηνευτούν ως συστήματα και ότι οι αρχές οργάνωσης των φυσικών συστημάτων, δηλαδή η μελέτη των αρχών της δομής και της λειτουργίας τους (από την κλίμακα των πλανητικών συστημάτων έως και την κλίμακα των οργανισμών και των τεχνουργημάτων που παράγουν) είναι ανεξάρτητες από ένα οποιοδήποτε συγκεκριμένο σύστημα. Η επιστήμη της πολυπλοκότητας πρόσθεσε ότι όλα τα συστήματα είναι ανοιχτά και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους παράγοντας πολύπλοκες δομές οργάνωσης (όπως π.χ. το οικοσύστημα της γης) τυποποιώντας την μαθηματική δομή αυτής της διαδικασίας, προσφέροντας έτσι τα κατάλληλα εργαλεία μοντελοποίησης φυσικών συστημάτων σε υπολογιστικά περιβάλλοντα. Τα μαθηματικά είναι η γλώσσα της φύσης και ο τρόπος με τον οποίο εξάγουμε ρητή γνώση από αυτήν.



### 3.0 Αρχιτεκτονική

→ 3.2 Η θεωρία της πολυπλοκότητας στον σχεδιασμό

## 3.3 EMERGENCE & ΜΟΡΦΟΓΕΝΕΣΗ

### 3.3.1 ΑΠΟ ΤΗ ΔΟΜΗ ΣΤΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Η ανάδυση (με τον όρο αυτόν αποδίδεται το λατινικό emergence) σχετίζεται με τη μελέτη και την ανάλυση της συμπεριφοράς πολύπλοκων συστημάτων και ως τέτοια μπορούν να θεωρηθούν τα κτίρια ή τα αρχιτεκτονικά έργα εν γένει, δηλαδή ως συστήματα τα οποία παρουσιάζουν διάταξη ύλης στον χώρο και τα οποία καταναλώνουν ενέργεια, όπως και τα φυσικά, ενώ διαντιδρούν με το άμεσο δομικό και φυσικό τους περιβάλλον καθώς και με την συμπεριφορά των χρηστών τους. Με τον όρο διαντίδραση, εισέρχεται στην οπτική του αναγνώστη η έννοια της οργανικότητας, του ζωντανού, του μεταβαλλόμενου. Αυτή η θεώρηση οδήγησε αρκετούς αρχιτέκτονες που ασχολούνται με την έρευνα, στη μελέτη του όρου emergence και τις προοπτικές που υπάρχουν για την αρχιτεκτονική σύνθεση [*Michael Weinstock, Morphogenesis and the Mathematics of Emergence, AD Emergence: Morphogenesis design Strategies, 2004*]. Είναι σαφές πως η προβληματική γύρω από την οργανικότητα (όχι μορφολογικά) της αρχιτεκτονικής δεν επικρατεί μόνο τα τελευταία χρόνια. Η μελέτη της φύσης και η προσπάθεια μεταφοράς φυσικών δομών στην αρχιτεκτονική αποτελεί εδώ και δεκαετίες σημαντικό βοήθημα ή και πηγή έμπνευσης για πολλούς αρχιτέκτονες. Η έννοια όμως του emergence και ο προβληματισμός γύρω από αυτήν, στην αρχιτεκτονική, παρουσιάζει μια σαφή διαφοροποίηση σε σχέση με την κλασική προσέγγιση των φυσικών συστημάτων, όπου απώτερος στόχος είναι η εύρεση σχέσεων αιτιότητας. Η έννοια του emergence σχετίζεται άμεσα με την σχέση που έχουν τα στοιχειώδη μέρη ενός συστήματος με το σύστημα ως ολότητα. Το κεντρικό σημείο όμως της προβληματικής του emergence είναι η ποιοτική διαφορά των ιδιοτήτων των μερών από τις ιδιότητες του όλου. **Το βασικό στοιχείο της μελέτης ενός συστήματος δεν είναι η δομή του, αλλά οι σχέσεις των στοιχείων που το απαρτίζουν. Το πεδίο ενδιαφέροντος μεταφέρεται από τη δομή στην διαδικασία.** Πέρα από τους εσωτερικούς μηχανισμούς και τις επιμέρους πρωτογενείς ιδιότητες που ορίζουν τα είδη, υπάρχει και η συνεχής επίδραση του εξωτερικού περιβάλλοντος, το οποίο συνθέτει το σύνολο των εξωγενών επιδράσεων, που καθορίζουν τις ανάγκες των φυσικών οργανισμών στην μάχη για την επιβίωση. Οι φυσικές δομές λοιπόν, αποτελούν την εικόνα των μηχανισμών που έλαβαν χώρα κατά τη διαντίδραση με το περιβάλλον. Η μορφή και οι λειτουργίες των οργανισμών προκύπτουν μέσα από την διαντίδραση αυτή, παρέχοντας την τελική εικόνα που φτάνει στον παρατηρητή. Η αλληλεξάρτηση των παραγόντων (ιδιότητες, μηχανισμοί, ζητούμενα, τελική μορφή) είναι συνεχής και ταυτόχρονη. Η διαδικασία της μορφογένεσης είναι οι διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα και η μορφή αποτελεί ένα μέρος αυτών των διαδικασιών. Βασικό στόχο αποτελεί πλέον η εύρεση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των δομικών στοιχείων, το δίκτυο δηλαδή των μικρο-κανόνων μέσα στο οποίο λαμβάνουν χώρα οι συνεχείς διαντιδράσεις. Υπάρχει δηλαδή μια σαφής μετατόπιση του ενδιαφέροντος από το προκύπτον στο παράγωγο.

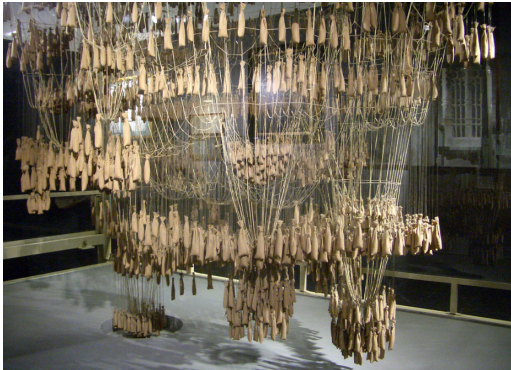


#### 3.0 Αρχιτεκτονική

→ 3.3 Emergence & Μορφογένεση

→ 3.3.1 Από την δομή στην διαδικασία

Οι μαθηματικές θεωρίες των συστημάτων και του χάους, προσέφεραν τα κατάλληλα εργαλεία ανάλυσης της πολυπλοκότητας, ενώ οι εξελίξεις στο χώρο της βιολογίας, σε συνδυασμό με τα νέα θεωρητικά εργαλεία και τη χρήση του υπολογιστή, έδωσαν νέα ώθηση στη μελέτη των φυσικών δομών και διαδικασιών, όπως της μορφογένεσης. [Stephen Johnson, “Emergence. The Connected lives of Ants, Brains, Cities and Softwares”, 2001] Έννοιες όπως pattern, feedback, inner loop, self organization, cellular automata, dynamic differentiation, evolving forms, generative design, genetic algorithms, εισχώρησαν στην επιστημονική σκέψη και πρακτική και άνοιξαν νέους δρόμους αντίληψης. Η σύνδεση των εξελίξεων αυτών, δεν άφησε ανεπηρέαστη την αρχιτεκτονική σκέψη. Το νέο παράδειγμα των φυσικών συστημάτων, δεν αναφέρεται σε μορφολογικές ή λειτουργικές αναζητήσεις δομών. Το ζητούμενο είναι η μελέτη και μεταφορά φυσικών διαδικασιών στην πορεία του σχεδιασμού μέσω της λογικής του emergence και της μορφογένεσης. Πρωτοπόρος σε αυτών τον τομέα υπήρξε ο Antoni Gaudí, ο οποίος με τη χρήση των φυσικών μοντέλων προσομοίωσης, αναζητούσε την μορφή μέσω φυσικών διαδικασιών. Η ιδέα ήταν απλή. Τοποθετώντας το μοντέλο σε ανεστραμμένη θέση, θα έχει συμπεριληφθεί αυτόματα η στατική μελέτη που μας δίδαξε η ίδια η ύλη με την αυθόρμητη συμπεριφορά της μέσα στο πεδίο βαρύτητας. Η φόρμα προέκυπτε (αναδύονταν) ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη συστήματος. Όπως και στα φυσικά συστήματα, έτσι και στην αρχιτεκτονική είχε δεχτεί, ότι η μορφή δεν είναι γενετικά προσδιορισμένη. [Michael Weinstock, Morphogenesis and the Mathematics of Emergence, AD Emergence: Morphogenetic design Strategies, 2004] Φυσικά τα μέσα προσομοίωσης έχουν εξελιχθεί από τότε. Πλέον η προσομοίωση συντελείται σε υπολογιστικό περιβάλλον παράλληλα με την χρησιμοποίηση κατάλληλων προγραμμάτων (π.χ. αλγόριθμων) για την παραγωγή και την εξέλιξη μορφών και δομών μέσω μαθηματικοποιημένων μορφογενετικών διαδικασιών.



**Sagrada Familia** → Ενδιαφέρον παρουσιάζει το πώς ο Antoni Gaudí συνέλαβε την βασική ιδέα για την δομή της Sagrada Familia αλλά και των άλλων έργων του. Επρόκειτο για κατασκευές φυσικών μοντέλων από νήματα που κρέμονταν από σταθερά σημεία στο ταβάνι και σε σταθερές αποστάσεις πάνω σε αυτά τα νήματα συνδέονταν μικρά βάρη. Αν κρεμάσουμε μια αλυσίδα από τα δύο της άκρα αυτή θα ισορροπήσει αναγκασμένη, από την βαρύτητα, να πάρει το σχήμα που όλοι ξέρουμε. Η ιδέα ήταν απλή. Οικοδομώντας τα κτήρια σε σχήμα ανεστραμμένο, θα έχουμε συμπεριλάβει στο οικοδόμημά μας την αυτόματη στατική μελέτη που μας δίδαξε η ίδια η ύλη με την αυθόρμητη συμπεριφορά της μέσα στο πεδίο βαρύτητας.

Η δουλειά του σύγχρονου αρχιτεκτονικού γραφείου, FOA, παρουσιάζει επίσης αντίστοιχο ενδιαφέρον. Οι FOA δίνουν μεγαλύτερη βαρύτητα στη διαδικασία σχεδιασμού ενός project παρά στο τελικό αποτέλεσμα. Σύμφωνα με τον Alejandro Zaera Polo: «Οι διαδικασίες είναι πολύ πιο ενδιαφέρουσες από τις ιδέες. Μια διαδικασία είναι η παραγωγή μιας μικρο-ιστορίας για ένα project, ένα είδος συγκεκριμένης αφήγησης. Γράφουμε ένα σενάριο για ένα project, όπως ο Peter Eisenman εισήγαγε τη λογική μιας συνεχούς

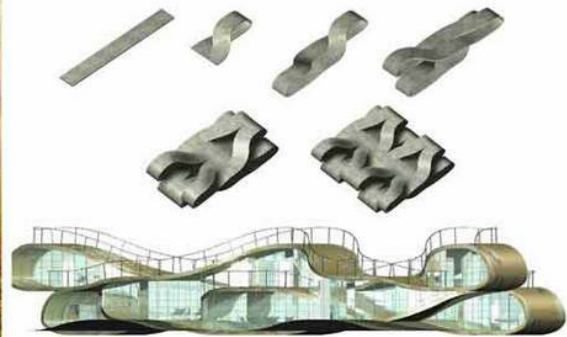


### 3.0 Αρχιτεκτονική

→ 3.3 Emergence & Μορφογένεση

→ 3.3.1 Από την δομή στην διαδικασία

ανάπτυξης αντί να αποδίδει απλώς μια φόρμα. Ο σχεδιασμός, αντί να είναι συσσώρευση εμπειρίας, μετατρέπεται σε ερευνητική εργασία όπου κατά την παραγωγή του project παράγεται αδιαλείπτως γνώση και πληροφορία.» [A. ZAERA POLO, "Rollercoaster construction". *Verb, architecture boogazine, Barcelona: Actar, pp. 14-15, 2001*] Θεωρούν δηλαδή ότι οι μορφολογικές ανησυχίες δεν παρουσιάζουν ενδιαφέρον, ούτε και η εκ των προτέρων σύλληψη των μορφικών αποτελεσμάτων. «Δεν ελέγχουμε το τελικό αποτέλεσμα από την αρχή. Ενδιαφερόμαστε για το project προκειμένου να επιστραφεί σε μας κάτι που δεν περιμέναμε, αλλά έχουμε πάντα τον έλεγχο του project. Αυτό που κάνουμε είναι να κατασκευάσουμε το σύστημα που παράγει το project». Παράλληλα όμως επισημαίνουν ότι αυτό δε συνεπάγεται ότι η αρχιτεκτονική μετατρέπεται σε μια υπηρεσία βιομηχανίας. Μια τέτοια αντίληψη θα οδηγούσε σε ολέθρια αποτελέσματα. «Πρέπει να υπάρχει μια συγχώνευση μεταξύ αρχιτεκτονικής τεχνικής και αποτελέσματος: ένας καλός επαγγελματίας πρέπει να είναι σε θέση να χρησιμοποιεί τις σωστές τεχνικές για να παράγει τα σωστά αποτελέσματα.» [A. ZAERA POL, F. MOUSSAVI, "Complexity and Consistency", CECILIA F. LEVENE R. (eds), *El Croquis, vol. 115/116[I]*. Madrid: Premio COAM Publications, p.18, 2003]



**Virtual House** → Το 1997 οι FOA έλαβαν μέρος στο διαγωνισμό για το Virtual House. Δεν είχαν στο μυαλό τους μία συγκεκριμένη μορφή ξεκινώντας το project, δεν ανέπτυξαν μία ιδέα για να την εξελίσουν, αλλά είχαν ως στόχο να δημιουργήσουν μια κατοικία που να ξεφεύγει από τη συνηθισμένη οργάνωση όπου οι έννοιες μέσα\έξω, εμπρός\πίσω... επαναπροσδιορίζονται. Αναμιγνύοντας αυτές τις απαιτήσεις, τα συγκεκριμένα υλικά οδηγούνται στη συγκεκριμένη μορφή. Δεν τους ενδιαφέρει το αποτέλεσμα, αλλά η διαδικασία.

## TO EMERGENCE ΩΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ & ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Το emergence μπορεί να εισχωρήσει στην αρχιτεκτονική πρακτική ως εργαλείο, είτε ανάλυσης, είτε σχεδιασμού. Στο επόμενο κεφάλαιο (3.3.2) περιγράφεται η συνεισφορά του emergence (έμμεση σχέση), όχι ως προς τη διαδικασία του σχεδιασμού αλλά ως ένα εργαλείο, χρήσιμο στο σχεδιαστή, ανάγνωσης και μελέτης, φυσικών και μη, συστημάτων. Πρόκειται για την προσπάθεια μεταφοράς στην αρχιτεκτονική σκέψη, των βαθύτερων δομών του φυσικού κόσμου και της δυνατότητας εκμετάλλευσης αυτών από την αρχιτεκτονική. Αντίθετα στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο (3.3.3) το emergence (άμεση σχέση) αντιμετωπίζεται ως ένα άμεσο εργαλείο σύνθεσης που μπορεί να οδηγήσει στον τελικό σχεδιασμό ή σε κάποιο μέρος αυτού.

### 3.3.2 Η ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Όπως έχει αναφερθεί, η «φύση» έχει αποτελέσει και συνεχίζει να αποτελεί ένα πεδίο μελέτης και μια πηγή έμπνευσης για την αρχιτεκτονική. Η διαδικασία της μορφογένεσης στα φυσικά συστήματα, δεν απέχει πολύ από την αρχιτεκτονική σύνθεση. Και στις δύο περιπτώσεις υπάρχουν συγκεκριμένες ιδιότητες, μηχανισμοί και ζητούμενα, τα οποία το τελικό παράγωγο οφείλει να ικανοποιεί ως ένα βαθμό. Το emergence, ως αντιληπτικό πλαίσιο (έμμεση σχέση) σχετίζεται με τον τρόπο μελέτης και αντίληψης των φυσικών διαδικασιών, αποτελεί δηλαδή έναν τρόπο προσέγγισης των φυσικών (ή μη) συστημάτων και διεργασιών. Σε αντιδιαστολή με την κλασική ανάλυση, όπου κυριαρχούσε η διακριτή ανάλυση των μερών ενός φυσικού συστήματος, κατά το emergence το πεδίο ενδιαφέροντος μετατοπίζεται στις διεργασίες των δομικών στοιχείων και όχι στη μακροσκοπική ανάλυση των προκυπτόντων συστημάτων. Η έμμεση σχέση, δηλαδή η μελέτη και όχι απαραίτητα η μεταφορά δομών ή διαδικασιών στη συνθετική διαδικασία, αφορά στην βαθύτερη κατανόηση των φυσικών μηχανισμών. Θέματα όπως η μορφή, η λειτουργική οργάνωση, η στατικότητα, η κατασκευαστική τεχνοτροπία, η σχέση με τα βιοκλιματικά στοιχεία (ήλιος, νερό, άνεμος), ακόμα και η αισθητική και η σχέση της με τις λειτουργικές απαιτήσεις όπως συναντάται στη φύση, απασχολούσαν και συνεχίζουν να απασχολούν τους αρχιτέκτονες. Το emergence μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό εργαλείο ανάλυσης και μελέτης αυτών των θεμάτων, δίνοντας νέες κατευθύνσεις στον τρόπο αντίληψης και διαχείρισης των φυσικών δεδομένων.

Παρ' όλο που η λέξη "emergence" γίνεται συνήθως αντιληπτή στην καθομιλουμένη ως ένας αντιληπτικός όρος, συνώνυμος της "εμφάνισης", στον χώρο των επιστημών η λέξη παραπέμπει στην παραγωγή μορφών και στην συμπεριφορά τους, σε συστήματα που χαρακτηρίζονται από αμείωτη πολυπλοκότητα. Στον απλούστερο και γενικότερα αποδεκτό ορισμό, το emergence εφαρμόζεται στις ιδιότητες ενός συστήματος που δεν μπορεί να συναχθεί από τα συστατικά του στοιχεία. Αναδύονται ιδιότητες που είναι κάτι περισσότερο από το άθροισμα των μερών. Αυτή είναι η αρχαιότερη κατανόηση της λέξης emergence, η οποία προέρχεται από τον Αριστοτέλη, [*"Το όλο είναι κάτι πέρα και πάνω από τα μέρη του και όχι μόνο το άθροισμά τους."*, Αριστοτέλης, *Μεταφυσικά*] το ότι δηλαδή το όλο έχει διαφορετικές ιδιότητες οι οποίες αναδύονται από διαδικασίες διαδοχικών αλληλεπιδράσεων μέσα σε διαφορετικά επίπεδα οργάνωσης και ενσωμάτωσης. Οι ιδιότητες του όλου είναι το ίδιο σημαντικές με αυτές των επιμέρους στοιχείων στον καθορισμό της δυναμικής του συστήματος. Αυτή είναι μια πολύ γενική περιγραφή και γι αυτό κρίνεται απαραίτητο να οριοθετηθούν οι διαδικασίες του emergence, οι αρχές και οι δυναμικές της οργάνωσης και της αλληλεπίδρασης που απαντώνται σε αλληλεπικαλυπτόμενα επιστημονικά πεδία, όπως και ο προσδιορισμός των αναδράσεων (feedback) και των κρίσιμων ορίων που οδηγούν στην ανάδυση μορφών στα φυσικά και πολιτισμικά συστήματα.



#### 3.0 Αρχιτεκτονική

→ 3.3 Emergence & Μορφογένεση

→ 3.3.2 Η αρχιτεκτονική των φυσικών συστημάτων

Το κεντρικό δόγμα της θεωρίας των συστημάτων είναι ότι οι έννοιες και οι διαδικασίες των πολύπλοκων συστημάτων μπορούν να θεωρηθούν ως ανεξάρτητες από οποιοδήποτε συγκεκριμένο σύστημα. Από αυτή την άποψη μπορούμε να πούμε ότι τα φυσικά και τα πολιτισμικά συστήματα του πολιτισμού είναι έντονα συνδεδεμένα. Ωστόσο υπάρχουν, όπως θα ήταν αναμενόμενο, διαφορές καθώς και ομοιότητες μεταξύ των βιβλιογραφιών των πολλών διαφορετικών πεδίων μελέτης σε αυτούς τους δύο μεγάλους τομείς. Κάποιες από αυτές τις διαφορές θα μπορούσαμε να υποθέσουμε ότι προκύπτουν από τις απαιτήσεις της εργασίας σε ένα συγκεκριμένο πεδίο, αλλά μιας και τα όρια και οι επαγγελματικοί φραγμοί μεταξύ επιστημονικών κλάδων εξανεμίζονται, είναι λογικό να αναμένει κανείς ότι οι ανταλλαγές μεταξύ των κλάδων που χαρακτήρισαν την ιστορική εξέλιξη των εννοιών και των μέσων της ανάδυσης θα συνεχιστεί. Η σύγκλιση ωστόσο, σε μία ιδιότυπη θεωρητική συναίνεση είναι απίθανη, καθώς θα ήταν δυσκίνητη και ίσως περιττή. Η ανάπτυξη των εννοιών της ανάδυσης, τα κοινά ενδιαφέροντα και αναζητήσεις σε διαφορετικά επιστημονικά πεδία και η ανταλλαγή εννοιών και αναλυτικών τεχνικών μεταξύ τους, καθρεφτίζουν κάποια από τα χαρακτηριστικά που είναι κοινά τόσο στη φυσική όσο και στην πολιτισμική εξέλιξη.

Τι είναι όμως αυτό που αναδύεται; από τι αναδύεται; και πώς δημιουργείται αυτή η ανάδυση; Οι διαδικασίες των πολύπλοκων συστημάτων παράγουν, επεξεργάζονται και διατηρούν όλες τις μορφές των φυσικών και πολιτισμικών συστημάτων και αυτές οι διαδικασίες περιλαμβάνουν ανταλλαγές ενέργειας και ύλης με το περιβάλλον τους. Οι ζωντανές μορφές διατηρούν τη συνέχεια και την ακεραιότητα τους αλλάζοντας, είτε πτυχές της συμπεριφορά τους, είτε τη γεωμετρία τους, είτε μέσω της επαναλήψης τους κατά το πέρας των γενεών. Ζούσες μορφές υπάρχουν σε διάφορους πληθυσμούς, και όπου η επικοινωνία μεταξύ των μορφών είναι αποτελεσματική, η συλλογική συμπεριφορά, η ευφυΐα και ο πολιτισμός αναδύονται. Όλα τα συστήματα από τα οποία αναδύονται μορφές καθώς και τα συστήματα τα οποία βρίσκονται τα ίδια μέσα σε πολύπλοκες μορφές, διατηρούνται από τη ροή ενέργειας και πληροφορίας μέσα στο σύστημα. Τα πάττερν (pattern) της ροής παρουσιάζουν συνεχείς μεταβολές και ρυθμίζονται από αρνητικές και θετικές αναδράσεις (feedback) του περιβάλλοντος.

Η μορφή ως ολότητα μπορεί να περιλαμβάνεται ως στοιχείο ενός συστήματος με υψηλότερο επίπεδο οργάνωσης και πολυπλοκότητας. Το τι είναι «σύστημα» για μια διαδικασία μπορεί να είναι «περιβάλλον» για μια άλλη. Η ζωή είναι ένα αναδύομενο φαινόμενο, τόσο στην ανάπτυξη της ζωής απ' την προβιοτική κατάσταση που υπήρχε στις αρχές της ιστορίας της γης, όσο και στην ανάπτυξη του κάθε ξεχωριστού οργανισμού. Αυτό μπορούμε να το αντιληφθούμε διαισθητικά σε σχέση με το ίδιο το σώμα μας. Τα άτομα που απαρτίζουν τα μόρια στα σώματα μας δεν είναι ζωντανά, πράγματι δεν μπορούμε να πούμε ότι ένα άτομο ζει. Η ύλη από την οποία είναι κατασκευασμένα τα ανθρώπινα σώματα έχει μια δική της πολύπλοκη αρχιτεκτονική. Η γεωμετρική οργάνωση και σύνδεση των ατόμων στις περίπλοκες δομές των μορίων και η διάταξη των μορίων αυτών στην πιο περίπλοκη αρχιτεκτονική των πρωτεϊνών, είναι το ξεκίνημα μιας σειράς ιεραρχικών δομών με αενάως αυξανόμενη πολυπλοκότητα που

εμφανίζει τελικά, τα χαρακτηριστικά της ζωής. Η ανθρώπινη ζωή εξαρτάται από τις διαδικασίες όλων των συστατικών μερών μας, ωστόσο τα μέρη μας δεν μπορούν να προσδιορίσουν από μόνα τους ανθρώπινη συμπεριφορά, ούτε καν τη συμπεριφορά οποιουδήποτε οργανισμού. Δε φαίνεται δυνατό να μπορεί να συναχθεί η ανατομική και μεταβολική οργάνωση μιας οποιασδήποτε μορφής ζωής από τα ατομικά και μοριακά της στοιχεία. Το ξεδίπλωμα της διαδικασίας της εξέλιξης, η ανάδυση διαφόρων ειδών και ζωντανών μορφών σε παρατεταμένο χρόνο, περιορίζεται και επηρεάζεται από τις σχέσεις της κάθε μορφής ζωής με άλλες μορφές ζωής, καθώς και από κλιματικές συνθήκες και τη τοπογραφία της επιφάνειας της γης. Με τη σειρά της, η ζωή επιδρά στις διαδικασίες της ατμόσφαιρας, των ωκεανών και στα γεωγραφικά συστήματα της επιφάνειας της γης.

Η μορφή των ανατομικά σύγχρονων ανθρώπων συνεξελίχθηκε μαζί με τον υλικό πολιτισμό τους, με την κάθε μία να επιταχύνει την άλλη κατάσταση σε μια σειρά δυναμικών ανταλλαγών μέσα στα διαφοροποιημένα κλίματα και οικολογικά συστήματα από τα οποία οι άνθρωποι αναδύθηκαν. Τα διανύσματα των ενεργειακών και υλικών ροών καθόρισαν τη χωρική διαμόρφωση (patterning) και τις στρατηγικές κινητικότητας των ανθρώπινων περιοχών σε ποικίλες οικολογίες, καθώς και τις μεταναστεύσεις και τη ροή ανθρώπων από την Αφρική ώστε να καλύψουν την επιφάνεια της γης. Η σταδιακή ανάπτυξη της γλώσσας, της τέχνης και των ημερολογίων, κατά την εξέλιξη του ανθρώπινου είδους, εντάχθηκε σε πληροφοριακά συστήματα για τη μετάδοση της οικολογικά και κοινωνικά πλαισιωμένης γνώσης, μέσα στο χώρο και το χρόνο. (Το ιδρυτικό πολιτισμικό σύστημα της κοινωνίας ήταν πλήρως δομημένο και ευρέως καταναμημένο περίπου 35.000 χρόνια πριν.)

Υπάρχουν πολλές πρόσφατες προτάσεις κατηγοριοποίησης του emergence, το μεγαλύτερο μέρος του οποίου περιλαμβάνει τόσο δυνατές όσο και αδύναμες μορφές emergence, καθώς και διάφορες υποδιαίρεσεις που βρίσκονται στο ενδιάμεσο των δύο αυτών θέσεων. [Fromm Jochen, *Types and Forms of Emergence*, Kassel University Press, 2005] Δεν είναι άμεσα σαφές το τι μπορεί να αποκτηθεί κάνοντας τη διάκριση μεταξύ ισχυρού (strong) και αδύναμου (weak) emergence. Είναι προφανές ότι η θεμελιώδης φυσική του κόσμου καθορίζει τη συμπεριφορά των ατόμων και των μορίων, αλλά είναι επίσης σαφές ότι οι αλληλεπιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε ένα πλήθος κλιμάκων μεταξύ των μερών, μεταξύ συναθροίσεων στοιχείων καθώς και μεταξύ ολόκληρων συστημάτων και του περιβάλλοντος, είναι καίριας σημασίας για την ανάπτυξη και εξέλιξη όλων των μορφών. Αν όλα τα συστήματα της φύσης και του πολιτισμού αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, και αν αυτές οι αλληλεπιδράσεις έχουν επιπτώσεις σε κάθε σύστημα, προκύπτει ότι μέσα από την αυξημένη γνώση των διαδικασιών του κάθε συστήματος θα κατανοηθεί η ανάδυση και η εξελικτική ανάπτυξη όλων των παραλλαγών των μορφών και οι επιπτώσεις που επιφέρει η μία μορφή επάνω στην άλλη. **Έτσι η προτιμώμενη προσέγγιση αυτού του κεφαλαίου είναι να διερευνήσει κάθε σύστημα σύμφωνα με τη δυναμική των ανταλλαγών του σε υλικά, ενέργεια και πληροφορία με το περιβάλλον μέσα στο οποίο ενυπάρχει.**

Όλα τα φυσικά και πολιτισμικά συστήματα συνυπάρχουν μέσα σε ένα φυσικό πλαίσιο, ένα



### 3.0 Αρχιτεκτονική

→ 3.3 Emergence & Μορφογένεση

→ 3.3.2 Η αρχιτεκτονική των φυσικών συστημάτων

περιβάλλον που εμπεριέχει πολλές διαφορετικές έμβιες και μη έμβιες μορφές μέσα σε αυτό, και έτσι το περιβάλλον του κάθε συστήματος αποτελείται από άλλα συστήματα. Η ανταλλαγή ενέργειας και ύλης μεταξύ του περιβάλλοντος και των συστημάτων από τα οποία αποτελείται καθορίζει τις αρχικές συνθήκες βάσει των οποίων ένα μεμονωμένο σύστημα προκύπτει, αλλά και τη δυναμική της ανάπτυξης του κατά την πάροδο του χρόνου. [S. Camazine, J.L. Deneubourg, N. Franks, J. Sneyd, G. Theraulaz and E. Bonabeau, *Self-Organisation in Biological Systems, Princeton Studies in Complexity, Princeton University Press, Princeton, 2001*] Το περιβάλλον επιδρά σε όλα τα συστήματα μέσα σε αυτό, ενώ η ροή της ενέργειας και της ύλης μεταξύ συστήματος και περιβάλλοντος, τροποποιεί με τη σειρά της το ίδιο το περιβάλλον. Οι ανταλλαγές αυτές εμφανίζονται σε πολλές διαφορετικές κλίμακες χρόνου και διαστάσεων, έτσι ώστε οι αλληλεπιδράσεις που προκύπτουν μεταξύ των συστημάτων να γίνονται πολύπλοκες και να υπόκεινται σε διακυμάνσεις και παραλλαγές. Αυτές οι διακυμάνσεις μπορεί να ενισχύονται μέσω θετικής ανάδρασης (positive feedback) ή να αναστέλλονται μέσω αρνητικής ανάδρασης (negative feedback) από άλλα συστήματα. Η δομή και η οργάνωση όλων των μορφών καθώς και η συμπεριφορά τους, τόσο των έμβιων όσο και των μη-έμβιων, συνδέονται και εξαρτώνται από τη ροή της ενέργειας και της ύλης μεταξύ τους.

Η ανάπτυξη ενός συστήματος, από ένα αρχικά απλό σε πολυπλοκότητα επίπεδο σε ένα υψηλότερο επίπεδο πολυπλοκότητας παρουσιάζει συχνά σημαντικές μεταβολές ή μετατροπές που ενεργοποιούνται όταν ένα «κρίσιμο όριο» έχει ξεπεραστεί. Η αυτο-οργάνωση συχνά συνδέεται με το emergence και την ανάπτυξη των μορφών κατά την πάροδο του χρόνου, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις απλώς χρησιμοποιείται ως περιγραφή της ξαφνικής εμφάνισης της τάξης. Όταν ένας παρατηρητής δεν αναγνωρίζει τη διαδικασία ενός φυσικού συστήματος και είναι προφανές ότι δεν υπάρχει εξωτερικός έλεγχος (νοημοσύνη) για να κατευθύνει τις διαδικασίες του συστήματος, τότε φαίνεται ότι η ανάπτυξη της οργάνωσης θα πρέπει με κάποιο τρόπο να παράγεται μέσα από το ίδιο το σύστημα. Η αναζήτηση για ένα οριστικό μοντέλο της αυτο-οργάνωσης ήταν το επίκεντρο εντατικών μελετών και μαθηματικών προσομοιώσεων τις τελευταίες δεκαετίες. Οι όροι «self-generated», «self-assembled» ή «self-replicating», είναι κοινά συνώνυμα της αυτο-οργάνωσης, όπου κάθε όρος παρουσιάζει ένα ελαφρώς διαφοροποιημένο νόημα αλλά και χρήση ανάλογα με τον επιστημονικό κλάδο από τον οποίο υιοθετείται. Αυτό που είναι κοινό μεταξύ τους είναι η κατανόηση ότι η οργάνωση αναδύεται ως συνέπεια των πολλαπλών και πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων μεταξύ των στοιχείων ενός συστήματος. Δεν υπάρχει σύστημα στη φύση ή τον πολιτισμό που να είναι κλειστό, δηλαδή υπάρχει πάντα μια συνεχής ανταλλαγή ενέργειας και ύλης κατά μήκος του «ορίου» του συστήματος. Η ενέργεια και τα υλικά αποσπώνται από τον φυσικό κόσμο και στη συνέχεια συνδυάζονται για την κατασκευή και τη διατήρηση του συστήματος. **Έτσι προκύπτει το συμπέρασμα ότι κανένα σύστημα δεν είναι αποκλειστικά αυτο-οργανωμένο εκ των έσω.**

Εάν όλα τα συστήματα επηρεάζουν το ένα το άλλο, είτε άμεσα είτε έμμεσα, τίθεται το ερώτημα πώς και σε ποια σειρά πρέπει να εξεταστούν. Μπορούμε να ξεκινήσουμε ξεδιπλώνοντας τις σχέσεις μεταξύ των πολλαπλών συστημάτων της φύσης και του πολιτισμού από τον εντοπισμό



της ροής της ενέργειας και της ύλης, την στιγμή κατά την οποία το σύστημα παράγει ή αλλάζει μορφή και συμπεριφορά. Οι ιδιότητες προκύπτουν από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ της ενέργειας και της χωρικής δομής της ύλης. Για παράδειγμα, η μοριακή δομή του πάγου παράγεται από τη γεωμετρία των δεσμών υδρογόνου μεταξύ των μορίων του νερού. Η τρισδιάστατη γεωμετρία της εν λόγω δομής περιλαμβάνει ένα υψηλό ποσοστό του ανοιχτού χώρου, έτσι ώστε ο πάγος να καταλαμβάνει μεγαλύτερο όγκο από το νερό ενώ έχει μικρότερη πυκνότητα. Αυτός είναι και ο λόγος που ο πάγος επιπλέει στο νερό. Όταν ο πάγος απορροφάει την ενέργεια της θερμότητας, και πιο συγκεκριμένα την επιπλέον ενέργεια που είναι σε θέση να σπάσει τους δεσμούς υδρογόνου, ο πάγος υποβάλλεται σε μια αλλαγή φάσης (phase transition) από στερεό σε υγρό νερό. Μια σημαντικά μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας θα προκαλέσει μια περαιτέρω αλλαγή φάσης από υγρό σε αέριο, όπου το νερό εξατμίζεται. (Η ενέργεια που απαιτείται για να μετατραπεί ο πάγος σε νερό ονομάζεται λανθάνουσα θερμότητα τήξης. 80 θερμίδες (cal) απαιτούνται για να μετατραπεί ένα γραμμάριο πάγου στο νερό. Επιπλέον άλλες 600 θερμίδες (cal) απαιτούνται ώστε ένα γραμμάριο νερού να εξατμιστεί στον αέρα. Το τελευταίο ονομάζεται λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης). Με περαιτέρω συναλλαγές ενέργειας οι αλλαγές αυτές είναι αναστρέψιμες, έτσι ώστε όταν αποβάλλεται θερμική ενέργεια το νερό να παγώνει και τα επιμέρους μόρια του εξατμισμένου νερού να συμπυκνώνονται στη ρευστή μορφή του νερού. Στερεά, υγρά και αέρια έχουν διαφορετικές μορφές και ιδιότητες, αλλά κάθε μόριο εξακολουθεί να αποτελείται από δύο άτομα υδρογόνου και ένα άτομο οξυγόνου. Η ενέργεια καθορίζει την αλλαγή στα γεωμετρικά πρότυπα (patterns) που δημιουργούν οι δεσμοί μεταξύ των μορίων και έτσι αναδύονται διαφορετικές μορφές και συμπεριφορές.

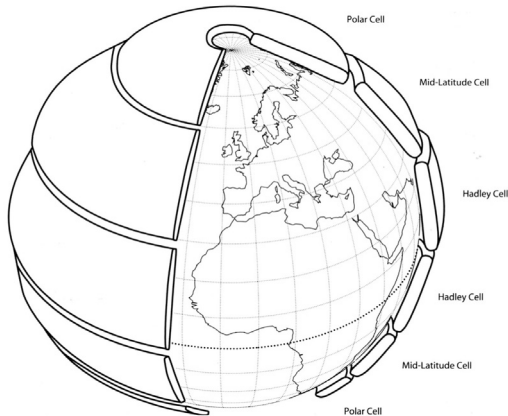
Ο χρόνος είναι μια σημαντική διάσταση για όλα τα συστήματα, π.χ. στον βαθμό που η αλληλουχία των μεταβολών της ατμοσφαιρικής πίεσης και θερμοκρασίας διαμορφώνουν τη μορφή και τη συμπεριφορά των καταιγίδων. Σύννεφα και καταιγίδες αναδύονται από την πολυπλοκότητα του παγκόσμιου κλίματος, ένα «μετα-σύστημα» που οδηγείται από τη θερμική ενέργεια που προέρχεται από το φως του ήλιου που πέφτει πάνω στη γη. Οι μορφές του παράγονται από την αλληλεπίδραση των πρότυπων (patterns) της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας (Hadley cells) και τη δυναμική των ωκεάνιων ρευμάτων, καθώς και των χημικών διεργασιών και τη μορφολογία του εδάφους. Καθένα από αυτά τα δυναμικά συστήματα έχει δικούς του μεταβολικούς κύκλους που λειτουργούν σε διαφορετικές κλίμακες της διάστασης και του χρόνου. Μερικές μορφές αναδύονται και εξαφανίζονται γρήγορα σε σύντομες χρονικές κλίμακες ωρών και ημερών, ενώ άλλες, όπως η κυκλοφορία των βαθέων ωκεάνιων ρευμάτων, δρουν για περισσότερα από χίλια χρόνια. Οι μορφές της ατμόσφαιρας αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και με το τοπικό περιβάλλον τους, ανέρχονται και απέρχονται, δημιουργώντας συνεχείς τοπικές διακυμάνσεις στην πίεση του αέρα, τον άνεμο και τη θερμοκρασία. Με τον τρόπο αυτό τροποποιούν το τοπικό περιβάλλον και το τοπικό περιβάλλον αυτό, με τη σειρά του, μπορεί να αλλάξει τόσο ώστε να προκαλέσει περαιτέρω αμοιβαίες τροποποιήσεις. Οι μορφές των σύννεφων και των καταιγίδων είναι τρισδιάστατα δυναμικά πρότυπα (patterns), που παράγονται από συνεχείς θερμικά παρακινούμενες διαδικασίες του συστήματος του «μετα-κλίματος», ενώ βρίσκονται σε μία κατάσταση συνεχούς αλλαγής αφού αποσυντίθενται και ανανεώνονται σε μια περίπλοκη σειρά ανταλλαγών ενέργειας.



### 3.0 Αρχιτεκτονική

→ 3.3 Emergence & Μορφογένεση

→ 3.3.2 Η αρχιτεκτονική των φυσικών συστημάτων



**Hadley cell**→ Το Hadley cell, το οποίο ονομάστηκε έτσι από τον George Hadley, είναι ένα πάττερν (pattern) της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας. Τρία είναι τα βασικά και είναι γνωστά ως: Hadley cell, Ferrel cell ή Mid Latitude cell και Polar cell. Η βασική κινητήρια δύναμη της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας είναι η θερμότητα που προέρχεται από τον ήλιο, η οποία κατά μέσο όρο είναι μεγαλύτερη κοντά στον ισημερινό και μικρότερη στους πόλους. Η ατμοσφαιρική κυκλοφορία μεταφέρει ενέργεια προς τους πόλους, μειώνοντας έτσι τη βαθμίδα θερμοκρασίας ισημερινού-πόλων.

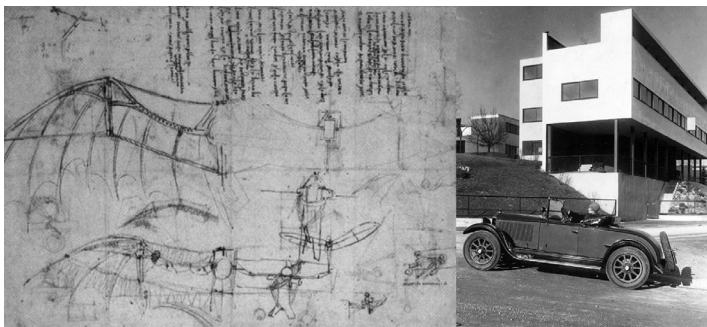
Η ενέργεια και η πληροφορία επενεργούν πάνω στην αρχιτεκτονική διάταξη του υλικού στον χώρο και στον χρόνο και η αλληλεπίδραση μεταξύ τους δεν είναι ποτέ αποκλειστικά “bottom up” αλλά ούτε «top down». Οι πληροφορίες που διέρχονται κάτω μέσω των γενεών τροποποιούν τις αλληλεπιδράσεις των έμβιων μορφών με το περιβάλλον τους και τους τρόπους με τους οποίους εξάγουν υλικά και ενέργεια από αυτό. Καθώς κάθε γενιά έμβιων μορφών υπερέχει των προγόνων της, οι πληροφορίες ενημερώνονται και μεταδίδονται κατά το πέρασμα του χρόνου. Αλλαγές ή τροποποιήσεις σε έμβιες μορφές προκύπτουν τόσο λόγω μετάλλαξης, «λάθη αντιγραφής», καθώς και από τον ανασυνδυασμό των υφιστάμενων πληροφοριών σε νέες ακολουθίες και πάττερν (pattern). Αυτό παρατηρείται γενικότερα στην εξέλιξη, από την ανάδυση νέων ειδών και την ανάδυση της κοινωνικής ή συλλογικής συμπεριφοράς, μέχρι και τα υλικά κατασκευάσματα εντόμων, ζώων και ανθρώπων. Είναι σαφές ότι όλες οι μη-έμβιες φυσικές μορφές αναδύονται από την αλληλεπίδραση της ενέργειας και της ύλης μέσα σε πολύπλοκα συστήματα που εξελίσσονται κατά το πέρασμα του χρόνου και ότι τόσο οι έμβιες μορφές της φύσης όσο και του πολιτισμού αναδύονται από πολύπλοκες διαδικασίες που συνδέονται με τη μετάδοση πληροφορίας.

Ως Top-down («από πάνω προς τα κάτω») και Bottom-up («από κάτω προς τα επάνω») χαρακτηρίζονται δύο αντίθετες κατευθύνσεις εργασίας μίας διαδικασίας μοντελοποίησης και οι οποίες χρησιμοποιούνται είτε για ανάλυση είτε για σύνθεση στη σχεδιαστική πρακτική. Μία Top-down προσέγγιση είναι ουσιαστικά η κατάτμηση ενός υπέρ-συστήματος προκειμένου να κατανοηθεί καλύτερα η σύνθεση των υπό-συστημάτων από τα οποία αποτελείται. Μια Bottom-up προσέγγιση από την άλλη είναι η συναρμολόγηση συστημάτων με σκοπό την ανάδυση ενός συστήματος μεγαλύτερης πολυπλοκότητας, καθιστώντας έτσι τα αρχικά συστήματα, υπό-συστήματα του αναδυόμενου υπέρ-συστήματος.

### 3.3.3 ΤΟ EMERGENCE & Η ΜΟΡΦΟΓΕΝΕΣΗ ΣΤΗΝ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ

Κατά την χρησιμοποίηση emergent (άμεση σχέση) διαδικασιών στη συνθετική διαδικασία, το τελικό αποτέλεσμα (όχι απαραίτητα το τελικό προϊόν-κτίριο), προκύπτει μέσα από την αυτόνομη αλληλεπίδραση των δομικών στοιχείων, ενώ ο ρόλος του αρχιτέκτονα παραμένει το ίδιο σημαντικός χωρίς ωστόσο να διατηρεί τις ίδιες, ποιοτικά, αρχές. Το βασικό στοιχείο των emergent διαδικασιών είναι η παρουσία της ανάδρασης (feedback). Της συνεχόμενης δηλαδή ροής πληροφοριών μεταξύ του συστήματος ως σύνολο και των επιμέρους στοιχείων. Στον κλασικό σχεδιασμό, ο αρχιτέκτονας μέσα από ένα κύκλο δοκιμών, βελτιστοποιεί το αντικείμενο του σχεδιασμού. Ο κύκλος των δοκιμών όμως είναι πεπερασμένος και οι φάσεις διακριτές. Κάθε λύση, μελετάται, ελέγχεται και προκύπτουν κάθε φορά κάποια συμπεράσματα. Όταν η λύση αυτή, πληρεί τα στάνταρ του σχεδιαστή ο κύκλος των δοκιμών λαμβάνει τέλος. Στην περίπτωση όμως της ανάδρασης (feedback) στο emergence ο έλεγχος και επανασχεδιασμός κάθε λύσης είναι συνεχής και η διαδικασία σχεδόν οργανική. Το σύστημα δεν ελέγχει κάθε φορά κάποιους διακριτούς συνδυασμούς, αλλά προσαρμόζεται και οργανώνεται ψάχνοντας την βέλτιστη λύση.

Ιστορικά, ένα πλήθος φυσικών συστημάτων έχει εμπνεύσει επιστήμονες και σχεδιαστές. Για παράδειγμα, οι μελέτες του Leonardo da Vinci επάνω στην ανατομία και την βοτανική αποτέλεσαν τη βάση τόσο για την τέχνη όσο και για τις εφευρέσεις του. Σε αντίθεση, το πρώτο μισό του 20ου αιώνα, το μηχανοκίνητο μηχανήμα (είτε στην αεροναυτική, είτε στο ναυτικό, είτε ως οδικό όχημα) έγινε το μοντέλο για την αρχιτεκτονική, όπως ευαγγελίζεται και απεικονίζεται από το Le Corbusier στα γραπτά του. [Castle Helen, *Editorial in Architectural Design, Vol. 74, No.3, Wiley Academy, pp 5, May/June 2004*]



**Φύση Vs Μηχανή**→ Ο Leonardo da Vinci μελετούσε και παρατηρούσε σχολαστικά την αεροδυναμική και το πέταγμα των πουλιών για τις υπάμενες μηχανές του, σε αντίθεση με τον Le Corbusier για τον οποίο το μηχανοκίνητο μηχανήμα αποτέλεσε το μοντέλο για την αρχιτεκτονική.

Από την άλλη, σήμερα, το emergence αποτελεί μια επιστημονική μέθοδο κατά την οποία τα φυσικά συστήματα μπορούν να διερευνηθούν και να εξηγηθούν σε ένα σύγχρονο πλαίσιο.

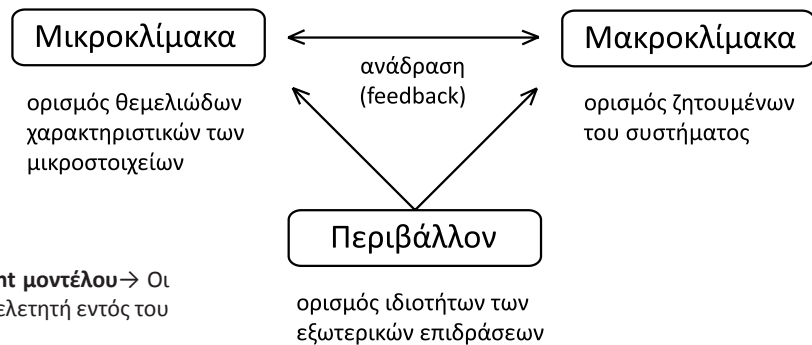


#### 3.0 Αρχιτεκτονική

→ 3.3 Emergence & Μορφογένεση

→ 3.3.3 Το emergence & η μορφογένεση στην αρχιτεκτονική

Παρέχει μοντέλα και διαδικασίες για τη δημιουργία τεχνητών συστημάτων που είναι σχεδιασμένα να παράγουν μορφές και πολύπλοκες συμπεριφορές, και ίσως ακόμη και τεχνητή νοημοσύνη. [Emergence and Design Group, *Emergence in Architecture, AD, Vol. 74, No.3, Wiley Academy, pp 7, May/June 2004*] Οι τεχνικές και οι διαδικασίες του emergence είναι έντονα μαθηματικές και έχουν εξαπλωθεί σε διάφορους επιστημονικούς τομείς, όπου η ανάλυση και η παραγωγή πολύπλοκων μορφών και συμπεριφορών είναι θεμελιώδεις. **Τα μαθηματικά μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή σχεδίων και για την εξέλιξη μορφών και δομών μέσω μορφογενετικών διαδικασιών εντός του περιβάλλοντος του υπολογιστή.** Υπάρχει ένα κενό στο θεωρητικό σώμα της αρχιτεκτονικής, μια απουσία που χαρακτηρίζεται από τον δανεισμό φαινομενικών επιστημονικών μεθόδων στην σχεδιαστική διαδικασία από τους οποίους όμως απουσιάζει η σαφήνεια του σκοπού τους, τα κατάλληλα μαθηματικά εργαλεία και η θεωρητική ακεραιότητά τους. [Weinstock, *Morphogenesis and the Mathematics of Emergence, AD, Vol.74, No.3, Wiley Academy, pp 11, May/June 2004*] Το emergence απαιτεί την αναγνώριση των κτιρίων όχι ως αυτόνομα και σταθερά σώματα, αλλά ως πολύπλοκα συστήματα ενέργειας και ύλης που έχουν διάρκεια ζωής και που υφίστανται ως μέρος του περιβάλλοντος των άλλων κτιρίων καθώς και του φυσικού περιβάλλοντος. [Emergence and Design Group, *Emergence in Architecture, AD, Vol. 74, No.3, Wiley Academy, pp 7, May/June 2004*] **Η ανάλυση του emergence στην αρχιτεκτονική μπορεί να χωριστεί σε τρία μέρη: emergence και μορφογένεση, δεδομένα γονίδια και ειδογένεση, και συμπεριφορά, υλικά και περιβάλλον.**



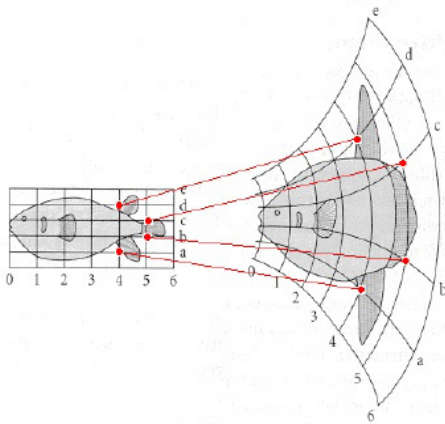
**Δομή κατασκευής ενός emergent μοντέλου** → Οι παράμετροι ορίζονται από τον μελετητή εντός του υπολογιστικού περιβάλλοντος.

## EMERGENCE ΚΑΙ ΜΟΡΦΟΓΕΝΕΣΗ

### ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΜΟΡΦΗΣ

Το 1859 ο Charles Darwin υποστήριξε στο *The Origin of Species* ότι οι περισσότερες πολύπλοκες βιολογικές μορφές προέρχονταν από απλούστερες και ότι μέσω της φυσικής επιλογής προσαρμόζονταν κάθε φορά και τελειότερα στο περιβάλλον τους. [Charles Darwin, *On the Origin of Species, (Chapter X111), first published 1859*] Στις αρχές του 20ου αιώνα και ενώ

επιχειρούνταν η σύνδεση των μαθηματικών με την βιολογία, ο D'Arcy Thompson ανέφερε πώς οι ζούσες μορφές αποτελούνταν από φυσικά υλικά και υπόκεινται στις ίδιες δυνάμεις στις οποίες υπόκεινται και η μη έμβια ύλη, βγάζοντας έτσι το συμπέρασμα ότι οι φυσικοί νόμοι και η γεωμετρία παίζουν εξ ίσου σημαντικό ρόλο με την φυσική επιλογή του Darwin. [Thompson D'Arcy, *On Growth and Form*, Cambridge University Press, Cambridge, 1920, first published 1917] Η μορφή μπορεί να περιγραφεί μέσω μαθηματικών δεδομένων, χαρτογραφώντας σημεία σε τρισδιάστατο χώρο συντεταγμένων, με διαστάσεις, γωνίες και ακτίνες καμπυλότητας. Επίσης οι μορφές συσχετίζονται όταν η μία μπορεί να παραμορφωθεί σε μία άλλη, μετασχηματίζοντας τις καρτεσιανές συντεταγμένες.



**Μετασχηματιστικό διάγραμμα (D'Arcy Thompson)**→ Η μορφές των δύο είδη ψαριών έχουν αποτυπωθεί σε καρτεσιανό σύστημα. Το δεξί ψάρι θα μπορούσε να έχει εξελιχθεί από το αριστερό ψάρι μέσω αλλαγών των pattern ανάπτυξης του που αντιστοιχούν σε στρέβλωση των αξόνων.

Οι γενετικές πληροφορίες δεν περιγράφουν πλήρως την γεωμετρία μιας μορφής, καθώς οι φυσικές δυνάμεις του περιβάλλοντος και οι μαθηματικές αρχές θα καθορίσουν την ακριβή γεωμετρία κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης της μορφής. Έτσι προκύπτει ότι δεν είναι η μορφή του οργανισμού που είναι κωδικοποιημένη, αλλά η διαδικασία μέσω της οποίας μία μορφή αυτό-παράγεται μέσα σε ένα περιβάλλον. Την ίδια περίπου χρονική περίοδο ο Alfred North Whitehead υποστήριζε ότι η διαδικασία παρά η ουσία είναι το θεμελιώδες συστατικό του κόσμου και ότι η φύση αποτελείται από πάτερν (pattern) δραστηριότητας τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. [Whitehead Alfred North, *The Concept of Nature*, Cambridge University Press, Cambridge, 1920] Οι οργανισμοί ήταν κατά τον Whitehead δέσμες σχέσεων που διατηρούσαν τους εαυτούς τους, προσαρμόζοντας την συμπεριφορά τους σύμφωνα με τις αλλαγές των πάτερν (pattern) δραστηριότητας γύρω τους. Η ένωση αυτών των δύο ιδεών συνετέλεσε στην σύγχρονη αντίληψη περί μορφογένεσης: **η μορφή και η συμπεριφορά αναδύονται από την διαδικασία**. Η διαδικασία είναι που παράγει, επεξεργάζεται και διατηρεί τη μορφή ή τη δομή των βιολογικών οργανισμών (και των μη βιολογικών μορφών ή δομών). Η διαδικασία αυτή αποτελείται από μια πολύπλοκη σειρά ανταλλαγών μεταξύ του οργανισμού και του περιβάλλοντός του. Ο οργανισμός έχει την δυνατότητα να διατηρεί την συνοχή και την



### 3.0 Αρχιτεκτονική

→ 3.3 Emergence & Μορφογένεση

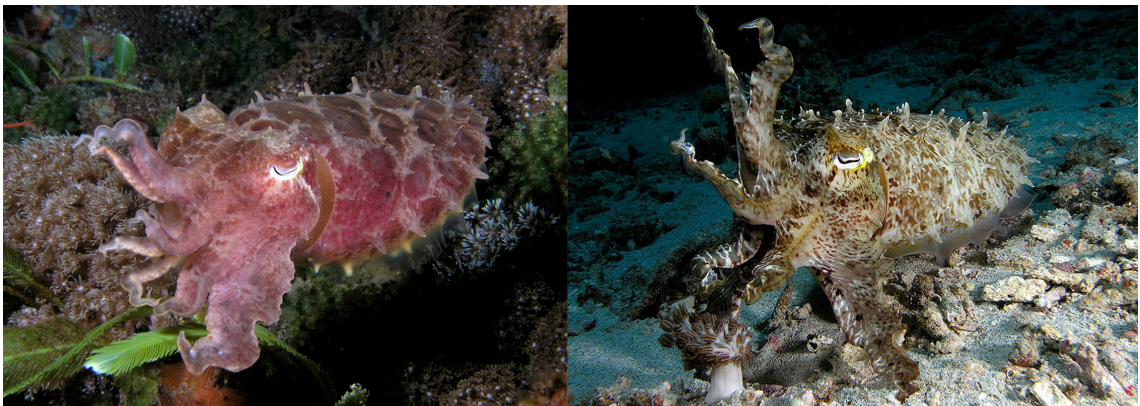
→ 3.3.3 To emergence & η μορφογένεση στην αρχιτεκτονική

ακεραιότητα του, αλλάζοντας συμπεριφορά. Οι μορφές συνδέονται με μορφογενετικές τάσεις και κάποια, αν όχι όλα, από αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούν να μοντελοποιηθούν μαθηματικά και να υιοθετηθούν για την αρχιτεκτονική έρευνα.

Τα πάττερν (patterns) και η ανάδραση (feedback) κατέχουν εξίσου σημαντικό ρόλο κατά την μοντελοποίηση μορφογενετικών διαδικασιών. Η ανάδραση (feedback) δεν είναι μόνο σημαντική για τη διατήρηση της μορφής σε ένα περιβάλλον, είναι επίσης μια χρήσιμη έννοια στη μοντελοποίηση των σχέσεων των γεωμετρικών πάττερν (patterns) και μορφών κατά τη διάρκεια της βιολογικής μορφογένεσης. Η ανάδραση (feedback) οργανώνεται σε δύο λούπες (loops), η μία από μορφή σε πάττερν (patterns) και η άλλη από πάττερν (patterns) σε μορφή. Σε αυτά τα μοντέλα ο αδόμητος σχηματισμός των βιοχημικών πάττερν (patterns) προκαλεί «μορφογενετική κίνηση» και συνεπακόλουθη μεταμόρφωση στη γεωμετρία. Η αλλαγή στη γεωμετρία διαταράσσει το υπάρχον πάττερν (pattern) και ένα νέο πάττερν (pattern) αναδύεται το οποίο με τη σειρά του προκαλεί νέα μορφογενετική κίνηση. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρις ότου η γεωμετρία της εξελισσόμενης μορφής του μοντέλου να βρίσκεται σε ισορροπία (σταματά η μορφογενετική κίνηση). **Οι λούπες (loops) της ανάδρασης (feedback) (από μορφή σε πάττερν (patterns) και από πάττερν (patterns) σε μορφή), κατασκευάζουν ένα μαθηματικό μορφογενετικό μοντέλο, από το οποίο αναδύεται η μορφή μέσω μιας δυναμικής διαδικασίας.**

## ΜΟΡΦΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

Η μορφή και η συμπεριφορά έχουν μια περίπλοκη σχέση. Η μορφή ενός οργανισμού επιδρά στην συμπεριφορά του μέσα στο περιβάλλον. Μια ιδιαίτερη συμπεριφορά παράγει διαφορετικά αποτελέσματα σε διαφορετικά περιβάλλοντα, ή εάν εκτελούνται από διαφορετικές μορφές στο ίδιο περιβάλλον. Έτσι προκύπτει ότι η συμπεριφορά είναι μη γραμμική.



**Sepiida** → Οι σουπιές διαθέτουν την ικανότητα να αλλάζουν το χρώμα τους ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Αυτό το πετυχαίνουν με τη συστολή ή διαστολή των χρωματοφόρων αδένων, που διαθέτουν στο μανδύα τους.

Με τη μαθηματική περιγραφή της συμπεριφοράς ασχολήθηκε πρώτα η κυβερνητική (cybernetics) η οποία οργανώνει τα μαθηματικά της προσαρμοστικής συμπεριφοράς σε μια γενική θεωρία για το πώς μηχανές, οργανισμοί και συστήματα όλων των ειδών αυτοσυντηρούνται κατά την πάροδο του χρόνου. Αξιοποιεί ψηφιακές και αριθμητικές διαδικασίες, όπου τμήματα πληροφοριών αλληλεπιδρούν έτσι ώστε η διαβίβαση των πληροφοριών να βελτιστοποιείται. Στην κυβερνητική η ανάδραση ρυθμίζει τη συμπεριφορά, χρησιμοποιώντας πληροφορίες από το περιβάλλον για τη μέτρηση της πραγματικής απόδοσης σε σχέση με την επιθυμητή ή βέλτιστη απόδοση.

Η εργασία του Ilya Prigogine στο πεδίο της θερμοδυναμικής, προχώρησε το ζήτημα της συμπεριφοράς (και το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής), με τη δημιουργία μίας αυστηρής και καλά τεκμηριωμένης μελέτης του σχηματισμού των πάττερν (pattern) και της αυτο-οργάνωσης, η οποία εξακολουθεί να χρησιμοποιείται για την πειραματική μελέτη και θεωρητική ανάλυση των βιολογικών και μη βιολογικών συστημάτων. [Ilya Prigogine, *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes*, John Wiley, 1967] Ο Prigogine μεταξύ άλλων αναφέρει ότι όλοι οι βιολογικοί οργανισμοί και πολλά φυσικά μη έμβια συστήματα διατηρούνται από τη ροή της ενέργειας μέσω του συστήματος. Η ύλη ανακυκλώνεται, η ενέργεια όμως, οι οποία φτάνει στο οικοσύστημα της γης ως φως από τον ήλιο, καταναλώνεται και έτσι κάθε σύστημα αργά ή γρήγορα τερματίζει χωρίς σταθερή παροχή ενέργειας. Τα πάττερν (patterns) ροής της ενέργειας στα συστήματα, από τις ζώσες μορφές έως τον ανθρώπινο πολιτισμό και τις πόλεις, είναι υποκείμενα πολλών μικρών παραλλαγών και αναπροσαρμόζονται μέσω της ανάδρασης (feedback), δηλαδή της ανατροφοδότησης πληροφοριών από το περιβάλλον για τη διατήρηση της ισορροπίας του συστήματος. Μερικές φορές όμως προκύπτει μια τέτοια ενίσχυση (παραλλαγή) στο σύστημα που πρέπει να αναδιοργανωθεί ή ακόμα και να καταρρεύσει. **Μια νέα τάξη αναδύεται από το χάος του συστήματος στο σημείο της κατάρρευσης.** Η αναδιοργάνωση του συστήματος συνήθως δημιουργεί μια πιο πολύπλοκη δομή με μια υψηλότερη ροή ενέργειας μέσα σε αυτό, ενώ η αναδιοργάνωση ενός συστήματος σε μία δομή μικρότερης πολυπλοκότητας από αυτήν που κατέρρευσε συμβαδίζει με μια μείωση της ροής ενέργειας μέσα σε αυτό. Η τάση αυτή των συστημάτων δείχνει ότι η εξελικτική ανάπτυξη όλων των μορφών ρυθμίζεται από τη δυναμική της ροής ενέργειας.

**Εγκαταλελειμμένη Πόλη** → Η πόλη της Khara-Khoto στην εσωτερική Μογγολία εγκαταλείφθηκε 700 χρόνια πριν αφού εξετράπη ο ποταμός Black River. Το περιφερειακό κλίμα άλλαξε και η τοπική οικολογία κατέρρευσε. Τα αποτελέσματα της κατάρρευσης των αστικών οικολογιών μπορεί να είναι: η πλήρη εγκατάλειψη και είτε διασκορπισμός του λαού, είτε αναδιοργάνωση σε μικρότερους, πιο απλούς και διασκορπισμένους οικισμούς με χαμηλότερο επίπεδο πολυπλοκότητας, η αναδιάταξη του συστήματος σε ένα πιο ολοκληρωμένο συγκρότημα ή η αναδιοργάνωση του συστήματος σε ένα υψηλότερο επίπεδο πολυπλοκότητας.



### 3.0 Αρχιτεκτονική

→ 3.3 Emergence & Μορφογένεση

→ 3.3.3 To emergence & η μορφογένεση στην αρχιτεκτονική

## Η ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΗΣ ΟΡΓΑΝΩΣΗΣ

Αυτό που είναι κοινό στη μελέτη όλων των συστημάτων είναι η ανάλυση της οργάνωσής τους. **Η θεωρία της πολυπλοκότητας τυποποιεί τη μαθηματική δομή της διαδικασίας οργάνωσης των συστημάτων.** [Warren Weaver, *Science and Complexity, American Scientist, 36, 536, 1948*] Πιο συγκεκριμένα, η θεωρία αυτή επικεντρώνεται στις επιπτώσεις που παράγονται από τη συλλογική συμπεριφορά πολλών απλών μονάδων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, όπως κάνουν τα άτομα, τα μόρια ή και τα κύτταρα. Το πολύπλοκο είναι ετερογενές, με πολλά διαφορετικά μέρη τα οποία έχουν πολλαπλές συνδέσεις μεταξύ τους και τα οποία συμπεριφέρονται διαφορετικά παρόλο που δεν είναι ανεξάρτητα. Η πολυπλοκότητα αυξάνεται όταν η ποικιλία (διάκριση) και η εξάρτηση (σύνδεση) των μερών αυξάνεται. Η διαδικασία της ποικιλομορφίας καλείται διαφόριση και η διαδικασία της αύξησης του αριθμού ή της αντοχής των συνδέσεων ονομάζεται ολοκλήρωση. **Η εξέλιξη παράγει διαφόριση και ολοκλήρωση σε πολλά επίπεδα. Κάθε επίπεδο αλληλεπιδρά με άλλα επίπεδα και έτσι αναδύεται ιεραρχική οργάνωση μέσα σε κάθε πολύπλοκο σύστημα.**

Αυτο-οργανωμένες μορφές και τεχνουργήματα παράγονται επίσης από την συλλογική συμπεριφορά μεμονωμένων οργανισμών. Η συλλογική συμπεριφορά των μεμονωμένων οργανισμών εμφανίζεται στο επίπεδο της κοινωνικής ή ομαδικής δυναμικής των πολλών φυσικών ειδών. Σμήνη πουλιών αλλά και κοπάδια ψαριών παράγουν αυτό που φαίνεται να είναι μια συνολική συνεκτική μορφή ή διάταξη, χωρίς κανέναν αρχηγό ή κεντρική κατευθυνόμενη νοημοσύνη (απουσία κεντρικού ελέγχου). Έντομα όπως οι μέλισσες και οι τερμίτες χτίζουν πολύπλοκα τεχνουργήματα τα οποία παρουσιάζουν εξαιρετική οργάνωση, π.χ. ρυθμίζουν την θερμοκρασία και την υγρασία μέσα στην φωλιά, χωρίς κεντρικό σχέδιο και υπό την απουσία οδηγίων. Η συλλογική αυτή συμπεριφορά αναδύεται (emerges) από την επανάληψη απλών κανόνων-δράσεων από πολλά διαφορετικά άτομα, όπου κάθε άτομο δρα ως απάντηση σε ερεθίσματα που δέχεται από τα γειτονικά του άτομα και από το άμεσο περιβάλλον. Έτσι προκύπτει, ότι η μεταβολική απόδοση των ομάδων και των υλικών κατασκευών τους αναδύεται (emerges) από την αλληλεπίδραση μεταξύ μονάδων ή ατόμων και ως απάντηση σε περιβαλλοντικά ερεθίσματα.



**Κοπάδια ψαριών**→ Κάθε ψάρι συγχρονίζεται με τα διπλανά του με αποτέλεσμα όλα τα μέλη της ομάδας να κινούνται με την ίδια ταχύτητα και προς την ίδια κατεύθυνση



Οι προσαρμοστικές ικανότητες της συλλογικής συμπεριφοράς αλλά και οι προσαρμοστικές διαδικασίες γενικότερα στα φυσικά συστήματα που παρατηρήθηκαν, μελετήθηκαν και αναλύθηκαν, αποτέλεσαν την απ' αρχή για τους πρώτους γενετικούς αλγόριθμους που αναπτύχθηκαν από τον J. H. Holland για το σχεδιασμό τεχνητών συστημάτων που βασίζονται σε φυσικά. [John H Holland, *Adaptation in Natural and Artificial systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence*, MIT Press, 1992]

Ο J. H. Holland μελέτησε εις βάθος τα κείμενα του A. Turing και αφιέρωσε την εργασία του στην εξερεύνηση των μεθόδων βάσει των οποίων απλοί κανόνες μπορούν να οδηγήσουν σε πολύπλοκη συμπεριφορά. Στόχος του ήταν η δημιουργία «ανοιχτών» προγραμμάτων, ικανών να διαμορφώνουν τη λειτουργία τους ανάλογα την εμπειρία τους από τη χρήση. Αυτά τα προγράμματα ονομάζονται γενετικά, επειδή έχουν ένα βασικό (γενετικό) κώδικα ο οποίος συνεχώς διαμορφώνεται με στόχο να προσαρμοστεί στις απαιτήσεις του συστήματος. Ο προγραμματιστής συντάσσει αρχικά μια πληθώρα υποπρογραμμάτων, τα οποία λειτουργούν ως γονίδια και με την πάροδο του χρόνου εξελίσσονται και δημιουργούν νέες δομές (προγραμματικές) όπου ανάλογα το επιθυμητό αποτέλεσμα επικρατεί (επιβιώνει) η περισσότερο συμφέρουσα.

## ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΚΑΙ EMERGENCE

Η μορφή και η συμπεριφορά αναδύονται (emerge) από τις διαδικασίες των πολύπλοκων συστημάτων. Οι διαδικασίες παράγουν, επεξεργάζονται και διατηρούν τις μορφές των φυσικών συστημάτων και οι διαδικασίες αυτές περιλαμβάνουν δυναμικές ανταλλαγές με το περιβάλλον. Οι μορφές διατηρούν τη συνοχή και την ακεραιότητάς τους, αλλάζοντας πτυχές της συμπεριφοράς τους, αλλά και μέσω της επανάληψης τους κατά τη διάρκεια πολλών γενεών. Οι πληθυσμοί των μορφών ποικίλουν και όπου η επικοινωνία μεταξύ των μορφών είναι αποτελεσματική, αναδύεται (emerges) συλλογική συμπεριφορά και νοημοσύνη. Τα συστήματα από τα οποία αναδύεται (emerges) η μορφή, καθώς και τα συστήματα μέσα στις ίδιες τις πολύπλοκες μορφές, διατηρούνται από τη ροή της ενέργειας και των πληροφοριών μέσα από αυτά. Το πάττερν (rattern) της ροής έχει συνεχείς διακυμάνσεις, και είναι έτσι προσαρμοσμένο ώστε να διατηρεί την ισορροπία του συστήματος μέσω της ανάδρασης και της ανατροφοδότησης από το περιβάλλον. Η φυσική εξέλιξη δεν είναι ένα ενιαίο σύστημα, αλλά πολλαπλά συστήματα που συν-εξελίσσονται και αλληλεπιδρούν. Επίσης ένα αναδυόμενο σύστημα μπορεί απλά να αποτελεί μέρος ή συστατικό στοιχείο ενός αναδυόμενου συστήματος υψηλότερου επίπεδου και πολυπλοκότητας, και έτσι το τι είναι «σύστημα» για μία διαδικασία μπορεί να είναι «περιβάλλον» για μία άλλη.

Η ανάδυση (emergence) θα μπορούσε να κατέχει σημαντικό ρόλο στην αρχιτεκτονική, απαιτώντας ουσιαστικές αναθεωρήσεις στον τρόπο με τον οποίο παράγουμε σχέδια. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα μαθηματικά μοντέλα που προαναφέρθηκαν για την παραγωγή σχεδίων και για την εξέλιξη μορφών και δομών μέσω μορφογενετικών διαδικασιών εντός του υπολογιστικού περιβάλλοντος. Κριτήρια για την επιλογή του «καταλληλότερου» μπορούν να αναπτυχθούν, μέσω γενετικών αλγορίθμων, ώστε να ανταποκρίνονται στις αρχιτεκτονικές απαιτήσεις της απόδοσης, συμπεριλαμβανομένης της δομικής ακεραιότητας



### 3.0 Αρχιτεκτονική

→ 3.3 Emergence & Μορφογένεση

→ 3.3.3 To emergence & η μορφογένεση στην αρχιτεκτονική

και των τρόπων δόμησης. Αυτές οι στρατηγικές σχεδιασμού δεν είναι όμως αληθινά εξελικτικές εάν δεν συμπεριλαμβάνουν επαναλήψεις των φυσικών (φαινοτυπικών) μοντέλων, οι οποίες θα ενσωματώνουν τις αυτό-οργανωτικές ιδιότητες του υλικού όπως απαντώνται στη φύση κατά την διαδικασία εξεύρεσης μορφής και την βιομηχανική λογική της παραγωγής, μέσω π.χ. CNC και laser cutting μηχανές ή και κάποιες άλλες χρήσιμες τεχνολογίες.

Η λογική της ανάδυσης απαιτεί να αναγνωρίσουμε ότι τα κτήρια έχουν μια διάρκεια ζωής, συχνά πολλών δεκαετιών, και ότι καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους πρέπει να διατηρούν πολύπλοκα ενεργειακά και υλικά συστήματα. Στο τέλος της διάρκειας ζωής τους θα πρέπει να αποσυναρμολογηθούν και τα φυσικά υλικά τους να ανακυκλωθούν. Κάθε κτίριο αποτελεί μέρος του αστικού περιβάλλοντος, δηλαδή των γειτονικών κτιρίων του, και έτσι προκύπτει ότι «αστική περιβαλλοντική νοημοσύνη» μπορεί να επιτευχθεί μέσω της διαβίβασης και της ανταλλαγής δεδομένων που αφορούν την επικοινωνία μεταξύ των γειτονικών κτιρίων. Συνδέοντας τα συστήματα υποδομής της πόλης με ομάδες περιβαλλοντικά «έξυπνων» κτιρίων, είναι δυνατόν να αναδυθεί ένα ακόμα υψηλότερο επίπεδο συμπεριφοράς, το οποίο θα επιτρέπει την πόλη να βρίσκεται σε μία συνεχή αλληλεπίδραση με τους χρήστες της αλλά και το φυσικό περιβάλλον. Βρισκόμαστε εν μέσω μιας συστηματικής αλλαγής, από το σχεδιασμό και την παραγωγή μεμονωμένων κτιρίων με «υπογραφή», σε μια οικολογία στην οποία ο εξελικτικός σχεδιασμός θα κατέχει αρκετή νοημοσύνη ώστε να προσαρμόζεται και να επικοινωνεί, και από τον οποίο θα είναι δυνατόν «ευφυείς» πόλεις να αναδυθούν.

## ΔΕΔΟΜΕΝΑ, ΓΟΝΙΔΙΑ ΚΑΙ ΕΙΔΟΓΕΝΕΣΗ

### ΜΟΡΦΗ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Πολύπλοκες μορφές και συστήματα αναδύονται στη φύση μέσω εξελικτικών διαδικασιών. **Στόχος για τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό είναι η παραγωγή και η εξέλιξη προσαρμοστικών μορφών και δομών μέσα από μορφογενετικές διαδικασίες με βάση μαθηματικών μοντέλων εντός του περιβάλλοντος του υπολογιστή.** Γι' αυτόν τον λόγο διερευνάται η δυνατότητα χρήσης γενετικών αλγορίθμων ως εργαλεία σχεδιασμού για την αρχιτεκτονική.

Όπως είπαμε, πολύπλοκες μορφές και συστήματα στην φύση απορρέουν από εξελικτικές διαδικασίες. Επιπλέον, οι ζωντανοί οργανισμοί αναπτύσσονται, και η ανάπτυξη είναι μια σύνθετη διαδικασία, όπου τα χαρακτηριστικά της μορφής καθορίζονται από τον φαινότυπο ο οποίος είναι αποτέλεσμα αλληλεπίδρασης του γονότυπου με το περιβάλλον.

Το σύνολο των γονιδίων ενός συγκεκριμένου ατόμου αποτελεί το γενότυπο, ενώ η εμφάνιση των χαρακτηριστικών του (π.χ. χρώμα ματιών, ύψος, δομή πρωτεϊνών κ.λπ.) ονομάζεται φαινότυπος. Ο φαινότυπος προέρχεται από τη βασική βιολογική αντίδραση του γενότυπου με την επίδραση του περιβάλλοντος. Τα γονίδια δεν καθορίζουν τα ίδια τα χαρακτηριστικά, αλλά τα φυσιολογικά όρια διακύμανσης του φαινότυπου σε σχέση με τους μεταβαλλόμενους παράγοντες του περιβάλλοντος.



**Donax variabilis**→ Άτομα του είδους *Donax variabilis* παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση στο χρώμα και συνεπώς στην έκφραση των φαινοτύπων τους.

Η πολυπλοκότητα προτείνει μια νέα οργάνωση του χώρου ενώ νέες δομικές δυνατότητες μπορεί να προκύψουν από το φαινότυπο. Η ανάπτυξη του φαινοτύπου οδηγείται από την έκθεση της γεωμετρίας του σε περιβαλλοντικές δυνάμεις, μια διαδικασία που ενθαρρύνει δίδυμα, πολλαπλάσια και την ομαδοποίηση των μορφών που αυξάνουν την δομική τους ικανότητα με την ανταλλαγή και τη διανομή των φορτίων -όχι ειδογένεση, αλλά παραλλαγή μέσα σε ένα πληθυσμό γεωμετρίας.

Σε αυτό το λεπτό σημείο βρίσκεται και το ενδιαφέρον της αρχιτεκτονικής έρευνας, όπου η μελέτη φυσικών και μη συστημάτων μέσα από τη λογική του emergence και τη βοήθεια κατάλληλων αλγορίθμων προσπαθεί να αναλύσει αφενός μορφογενετικές διαδικασίες και αφετέρου να ορίσει νέες συνθετικές μεθόδους μέσα από το πρίσμα της αυτο-οργάνωσης και της εξέλιξης. Ο στόχος είναι το μέσο αυτό να αποτελέσει ένα παραγωγικό εργαλείο σχεδιασμού το οποίο να μπορεί να παράγει πολύπλοκες και προσαρμοστικές αρχιτεκτονικές φόρμες. [Dr Una-May O'Reilly, Martin Hemberg and Achim Menges, *Evolutionary Computation and Artificial Life in Architecture: Exploring the Potential of Generative and Genetic Algorithms as Operative Design Tools*, AD, Vol.74, No.3.; Wiley Academy, pp 49, May/June 2004]

## ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

Ο γενετικός προγραμματισμός συνδέεται στενά με μαθηματικές θεωρίες όπως αυτή των συστημάτων και του χάους. Παράλληλα όμως μελετώνται διεξοδικά μηχανισμοί και δομές φυσικών συστημάτων, δίδοντας πολύτιμο υλικό προς εκμετάλλευση. Η έννοια της βιομιμητικής έχει αποκτήσει νέο πρόσωπο με την καθιέρωση των γενετικών αλγορίθμων.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι ορίζουν και διατηρούν έναν αρχικό πληθυσμό από προγραμματιστικές μονάδες/άτομα μέσα σε ένα προγραμματιστικό περιβάλλον όπου κάθε μονάδα/άτομο κατέχει από έναν γονότυπο και ένα φαινότυπο. Με την τυχαία επιλογή και διασταύρωση δύο ατόμων (“γονέων”) συντελείται η προσομοίωση της αναπαραγωγής παρέχοντας “απογόνους”. Κατά τον ανασυνδυασμό γονιδίων αλλά και μέσω της μετάλλαξης παράγεται



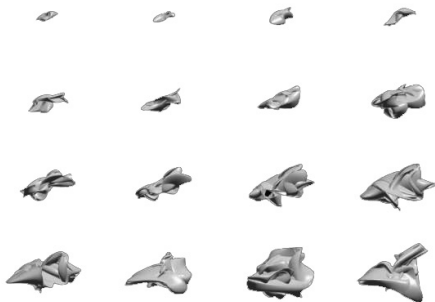
### 3.0 Αρχιτεκτονική

→ 3.3 Emergence & Μορφογένεση

→ 3.3.3 Το emergence & η μορφογένεση στην αρχιτεκτονική

έτσι μία ποικιλία “απογόνων” έως ότου φτάσει ο πληθυσμός σ’ ένα οριακό σημείο. Στην συνέχεια απορρίπτονται όλοι οι “γονείς”, ενώ η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όσες γενιές θεωρούνται απαραίτητες για την παραγωγή ενός πληθυσμού που να εμπεριέχει μια σειρά από κατάλληλα άτομα τα οποία θα πληρούν τα κριτήρια καταλληλότητας (μέτρο ικανότητας)

Οι γενετικοί αλγόριθμοι, αποτελούν ένα μέσο χειρισμού για τη σύγχρονη αρχιτεκτονική. Κριτήρια για την επιλογή του «καταλληλότερου» μπορούν να αναπτυχθούν δια μέσου γενετικών αλγορίθμων, ώστε να ανταποκρίνονται στις αρχιτεκτονικές απαιτήσεις της απόδοσης, συμπεριλαμβανομένης της δομικής ακεραιότητας και των τρόπων δόμησης. Αυτές οι εξελικτικές προσομοιώσεις, αντικαθιστούν το σχέδιο, αφού οι αρχιτέκτονες μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτό το λογισμικό για να δημιουργήσουν νέες μορφές μιμούμενες τη φυσική εξέλιξη. Ο πρώτος αρχιτέκτονας που ενδιαφέρθηκε να αξιοποιήσει τους γενετικούς αλγόριθμους σαν ένα ψηφιακό σχεδιαστικό εργαλείο ήταν ο John Frazer. Ο τελευταίος μελετά γενετικούς αλγόριθμους που επιτρέπουν στον υπολογιστή να μιμηθεί τη φυσική εξέλιξη και να δημιουργήσει δυνητικά (virtual) αρχιτεκτονικά μοντέλα που ανταποκρίνονται σε διαφορετικά περιβάλλοντα. [Δ. ΧΑΤΖΗΣΑΒΒΑ , Α. ΣΙΑΜΠΙΡΗΣ, «Εφημέρες Δυναμικές Δομές & Σύγχρονα Υπολογιστικά Λογισμικά», στο ΜΠΕΛΙΜΠΑΣΑΚΗΣ Κ. (Επιμ.), *Εφημέρες Κατασκευές, Η αρχιτεκτονική ως τέχνη*, τεύχος 7, Θεσσαλονίκη: Περιοδική έκθεση ΣΑΘ, σελ. 15, 2002]



**Interactivator: Networked Evolutionary Design System** → John Frazer, Julia Frazer, Mani Rastogi, Peter Graham, Patrick Janssen, Architectural Association, London, 1995

## ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ, ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Στο υποκεφάλαιο αυτό εξετάζονται φυσικά δυναμικά συστήματα, και πιο συγκεκριμένα η συμπεριφορά του υλικού που επιτρέπει το φαινόμενο της προσαρμογής. Στη φυσική μορφογένεση οι πληροφορίες και τα δεδομένα του γονιδιώματος και οι φυσικές ύλες που αποσπώνται από το περιβάλλον για το φαινότυπο, είναι άρρηκτα συνδεδεμένες έτσι ώστε το ένα να ενεργεί επάνω στο άλλο, και το καθένα με τη σειρά του να παράγει το άλλο. Η λογική της φυσικής παραγωγής όπως εξετάστηκε υπό το πρίσμα της επιστήμης της ανάδυσης (emergence) μας παρέχει ένα μοντέλο συνεχής ολοκλήρωσης για να αντικαταστήσει το συμβατικό διαχωρισμό μεταξύ του σχεδιασμού και της παραγωγής υλικών. Η αναζήτηση κατασκευαστικών λύσεων για την πολύπλοκη

γεωμετρία της σύγχρονης αρχιτεκτονικής απαιτεί την ανάπτυξη νέων μεθόδων και εργαλείων, και αυτό με τη σειρά του απαιτεί την ενσωμάτωση ψηφιακών μοντέλων και της υπολογιστικά κατευθυνόμενης βιομηχανικής παραγωγής (computer aided manufacturing).

Σε φυσικά υλικά συστήματα οι εξελικτικοί προσαρμοστικοί μηχανισμοί εμφανίζονται στα είδη ως απάντηση σε ένα σύνολο εισαχθέντων δεδομένων (inputs) κατά την ανάπτυξη του οργανισμού, όπου τα δεδομένα αυτά περιλαμβάνουν φορτία και περιβαλλοντικές πιέσεις που αλληλεπιδρούν με τις διαθέσιμες γενετικές πληροφορίες. Ο εξελικτικός χρόνος είναι γενικά πολύ μακρύς, αλλά η εξελικτική προσαρμογή μπορεί να επιτευχθεί σε μικρό χρονικό διάστημα μέσω της προσομοίωσης και μέσω κατάλληλων προγραμματιστικών διαδικασιών (πχ. γενετικοί αλγόριθμοι) στο περιβάλλον του υπολογιστή και είναι έτσι χρήσιμη σε στρατηγικές σχεδιασμού για την δημιουργία αρχιτεκτονικής σε τύπους, σειρές και πληθυσμούς.

## Η ΟΜΟΡΦΙΑ ΤΩΝ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Ενώ έχουν εμφανιστεί στην αρχιτεκτονική μια σειρά από ενδιαφέρουσες αρχιτεκτονικές εφαρμογές με υλικά και συστήματα προηγμένης τεχνολογίας, δεν μπορούμε να υποστηρίξουμε ότι υπάρχουν πραγματικά έξυπνα κτίρια. Περιβαλλοντικά ανταποκρινόμενα συστήματα για κτίρια (όπως πχ. περσίδες και μηχανισμοί εξαερισμού) έχουν κάνει σίγουρα ταχεία πρόοδο κατά την τελευταία δεκαετία, αλλά λειτουργούν περισσότερο ως ένα σύνολο συσκευών που ελέγχονται από έναν κεντρικό υπολογιστή ο οποίος λαμβάνει δεδομένα από διάφορους αισθητήρες και στέλνει πίσω οδηγίες στα μηχανικά συστήματα για την ενεργοποίησή τους. Τα φυσικά συστήματα διαφέρουν. Οι περισσότεροι αισθητήρες αλλά και οι λήψεις αποφάσεων καθώς και οι αντιδράσεις βρίσκονται και γίνονται τοπικά, ενώ η συνολική συμπεριφορά είναι προϊόν των τοπικών δράσεων. Αυτό ισχύει σε όλες τις κλίμακες, από τα μικρά φυτά μέχρι και στα μεγάλα θηλαστικά.

Για να αποσπάσουμε μηχανολογικές αρχές χρήσιμες για την αρχιτεκτονική, θα πρέπει πρώτα να αναγνωρίσουμε ότι μελετάμε υλικά συστήματα στα οποία δεν έχει νόημα να γίνεται διάκριση μεταξύ υλικού και δομής. Επιπλέον, θα πρέπει να αναγνωρίσουμε ότι όλα τα φυσικά υλικά συστήματα εμπεριέχουν κίνηση - τόσο σε τοπικό όσο και σε συνολικό επίπεδο - για να υπάρξει προσαρμοστικότητα και ανταπόκριση του συστήματος. Έως σήμερα η συστηματική μελέτη τέτοιων δυναμικών συστημάτων στη φύση προς όφελος του κλάδου της μηχανικής, και ιδιαίτερα ο τρόπος με τον οποίο πολλά βιολογικά υλικά συστήματα επιτυγχάνουν κίνηση χωρίς την παρουσία μυών, είναι ελλιπής.

Τομή σε τμήμα στελέχους του σπαραγγιού μας αποκαλύπτει μικρές κυψελίδες, στενές δέσμες διαφοροποιημένων ιστών και κυττάρων (ένα είδος ελαστικού καψυλλίου, που έχει σχήμα κυβικό, κυλινδρικό ή ατρακτοειδές). Η γεωμετρική διάταξη αυτή παράγει μια πολύπλοκη δομή η οποία είναι ισχυρή αλλά και ευέλικτη ταυτόχρονα, ικανή για κίνηση προς διάφορες κατευθύνσεις. Όλα τα κύτταρα του στελέχους έχουν και δομικό ρόλο πέραν των άλλων λειτουργιών τους και η δομική ικανότητα του

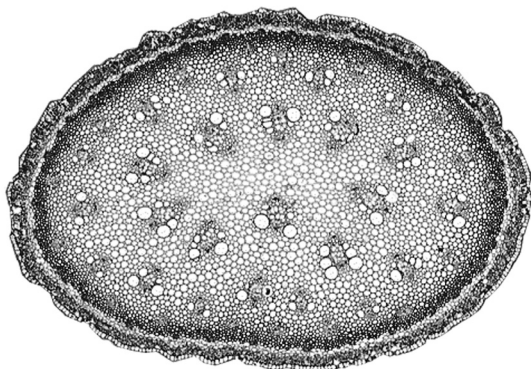


### 3.0 Αρχιτεκτονική

→ 3.3 Emergence & Μορφογένεση

→ 3.3.3 To emergence & η μορφογένεση στην αρχιτεκτονική

φυτού αναδύεται από την αλληλεπίδραση τους. Ο αγωγός ιστός φροντίζει για τη μαζική μεταφορά ουσιών. Το φλοίωμα μεταφέρει προϊόντα της φωτοσύνθεσης στους ιστούς του βλαστού, της ρίζας και στα μεριστώματα, ενώ το ξύλωμα μεταφέρει νερό και ανόργανα στοιχεία από τη ρίζα στα υπόλοιπα φυτικά μέρη. Ο ιστός αυτός ενισχύεται με έλικες από λινίνη, η σπειροειδής γεωμετρία της οποίας επιτρέπει την επιμήκυνση και την ανάπτυξη του φυτού χωρίς παράλληλα να αποδυναμώνεται το φυτό το ίδιο. Τα παρέγχυμα κύτταρα στην περίμετρο μπορεί να αυξηθούν ή να μειωθούν σε μέγεθος με τη λήψη ή την απώλεια νερού. Οι αλλαγές αυτές προκαλούν παραμορφώσεις και είναι η αιτία που ένα φυτό επιτυγχάνει κίνηση καθώς γέρνει προς το φως ή συστρέφεται γύρω από ένα εμπόδιο. Τέλος το στέλεχος περικλείεται από τον επιδερμικό ιστό (ένα διπλό στρώμα κυττάρων), ο οποίος παίζει και τον ρόλο του ρυθμιστή των ουσιών που εισέρχονται ή αποβάλλονται απ' το φυτό και προστατεύει το υπέργειο τμήμα από τις υπεριώδεις ακτίνες, τον άνεμο, τα ζώα και τη σκόνη. [Emergence and Design Group; *Emergence in Architecture, AD, Vol. 74, No.3, Wiley Academy pp 6, May/June 2004*]



**Asparagus officinalis**→ Τομή σε τμήμα στελέχους σπαραγγιού αποκαλύπτει τη γεωμετρική διάταξή του και πώς αυτή παράγει μια πολύπλοκη δομή η οποία είναι ισχυρή αλλά και ευέλικτη ταυτόχρονα. Όλα τα κύτταρα του στελέχους έχουν και δομικό ρόλο πέραν των άλλων λειτουργιών τους και η δομική ικανότητα του φυτού αναδύεται από την αλληλεπίδρασή τους.

## Η ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ Η ΙΕΡΑΡΧΙΑ ΙΝΩΔΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΗ ΒΙΟΛΟΓΙΑ

Η βιολογία κάνει χρήση εξαιρετικά λίγων υλικών και σχεδόν όλα αποτελούνται από σύνθετα ινώδη υλικά. Για την ακρίβεια τέσσερα είναι τα βασικά υλικά της βιολογίας: κυτταρίνη στα φυτά, κολλαγόνο στα ζώα, χιτίνη στα έντομα και τα μαλακόστρακα και μετάνι στους ιστούς της αράχνης. Τα υλικά αυτά έχουν πολύ μικρότερη πυκνότητα από τα περισσότερα υλικά που χρησιμοποιούνται στην μηχανολογία. Είναι επιτυχής όχι τόσο λόγω αυτού που είναι, αλλά λόγω του τρόπου με τον οποίο είναι “συναρμολογημένα”. Η αρχιτεκτονική, ή με άλλα λόγια η γεωμετρική και ιεραρχική οργάνωση των ινών είναι άκρως αξιόλογη. Οι ίδιες ίνες κολλαγόνου χρησιμοποιούνται σε άκρως εύκαμπτες δομές όπως τα αιμοφόρα αγγεία, σε ιστούς όπως οι τένοντες, αλλά και σε άκαμπτα υλικά όπως τα κόκαλα. Οι ίνες κατατάσσονται στα ανισότροπα υλικά, ένα χαρακτηριστικό που μπορεί να προσφέρει υψηλότερα επίπεδα δομικής απόδοσης σε σχέση με τα ισότροπα, ομοιογενή υλικά, διότι η δυσκαμψία και η αντοχή του υλικού προσδιορίζεται και ταυτόχρονα προσαρμόζεται σύμφωνα με την κατεύθυνση και το μέγεθος των εξωτερικών φορτίων που δέχεται. Ανάπτυξη κάτω από συνθήκες πίεσης.

Και για να γίνουμε πιο σαφείς, οι εξωτερικές περιβαλλοντικές δυνάμεις που ο οργανισμός δέχεται κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του παράγουν επιλεκτική εναπόθεση νέου υλικού όπου αυτό είναι αναγκαίο και προς την κατεύθυνση προς την οποία τους είναι απαραίτητο. Στα οστά λόγω χάρη, υλικό αφαιρείται από τα μέρη που δέχονται κατώτερες πιέσεις και εναποτίθεται σε μέρη που δέχονται έντονες πιέσεις. [J.D. Currey, *The Mechanical Adaptation of Bone*, Princeton University Press, 1984] Η βιολογία παράγει μια μεγάλη γκάμα τέτοιων πάττερν (patterns), όπου το καθένα αποτελεί μία συγκεκριμένη απάντηση σε ένα συγκεκριμένο σύνολο μηχανικών συνθηκών και απαιτήσεων. [A.C. Neville, *Biology of Fibrous Composites*, Cambridge University Press, 1986] Τα ινώδη υλικά είναι άκρως αποτελεσματικά στα εφελκόμενα φορτία, αλλά έχουν κακές επιδόσεις σε θλίψη. Στη φύση υπάρχουν πολλές διαθέσιμες λύσεις για το πρόβλημα αυτό: προ-εντείνοντας τις ίνες έτσι ώστε να αποκτήσουν ανθεκτικότητα σε θλιπτικά φορτία, εισάγοντας μεταλλικά στοιχεία, στενά συνδεδεμένα με τις ίνες ώστε να συμβάλουν στην αντοχή κατά την θλίψη, διαστρώνοντας το δίκτυο των ινών για την αύξηση της πλευρικής σταθερότητας και αλλάζοντας τον προσανατολισμό των ινών έτσι ώστε τα θλιπτικά φορτία να μην ενεργήσουν κατά το μήκος των ινών.

Η μελέτη της βιοδυναμικής μπορεί να προσφέρει μοντέλα προσαρμοστικών δυναμικών υλικών συστημάτων. Η κλίμακα θα πρέπει να εξεταστεί προσεκτικά, εάν οι αρχές που αντλούνται από τα βιοδυναμικά συστήματα προορίζονται για χρήση στην αρχιτεκτονική. Οι δυνάμεις αυξάνονται εκθετικά όταν μεγεθύνονται τέτοιου είδους συστήματα. Πάντως η κλίμακα της γεωμετρικής οργάνωσης και των πάττερν των ινών είναι επεκτάσιμη, και τα υλικά συστήματα που επιτυγχάνουν κίνηση χωρίς την παρουσία “μυών” ενώ ταυτόχρονα είναι μεταβλητά και δύσκαμπτα υποδηλώνουν ένα μέσο για την επίτευξη προηγμένων αρχιτεκτονικών υλικών συστημάτων. [George Jeronimidis, *Biodynamics*, AD, Vol.74, No.3, Wiley Academy, pp 95, May/June 2004]

## ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΣΤΙΣ ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Οι ίνες είναι το μυστικό για την κατανόηση των βιολογικών δομών. Από την άλλη όμως η ζωντανή δομή είναι εντελώς διαφορετική από τις απλές γεωμετρικές των τεχνητών δομών. Η δομή της “ζωντανής” φύσης είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη. Στις δομές αυτές κάθε στοιχείο είναι διαφορετικό. Αυτός είναι και ο λόγος που οι ζωντανές δομές δεν σκίζουν εύκολα. Αυτή είναι η ομορφιά και η εκζήτητη της φύσης. Η ανθρωπότητα ανέκαθεν εμπνέονταν από τη φύση για τις εφευρέσεις της. Αν μελετήσουμε λοιπόν προσεκτικά τα φυσικά συστήματα, τις διαδικασίες και τις δομές που απαντώνται σε αυτήν, θα μπορέσουμε να δημιουργήσουμε ένα πιο “έξυπνο”, δυναμικό και προσαρμοστικό αστικό περιβάλλον, το οποίο αφενός μεν θα είναι πιο αποτελεσματικό και ευεργετικό για τον άνθρωπο τον ίδιο και αφετέρου δε, θα συνυπάρχει αρμονικά με το φυσικό περιβάλλον. Κάτι τέτοιο απαιτεί ταυτόχρονη εργασία σε δύο μέτωπα, τον σχεδιασμό και την κατασκευή. Έχει αποδειχτεί μέσου πειραματισμού και κωδικοποίησης, ότι ο σχεδιασμός υπό



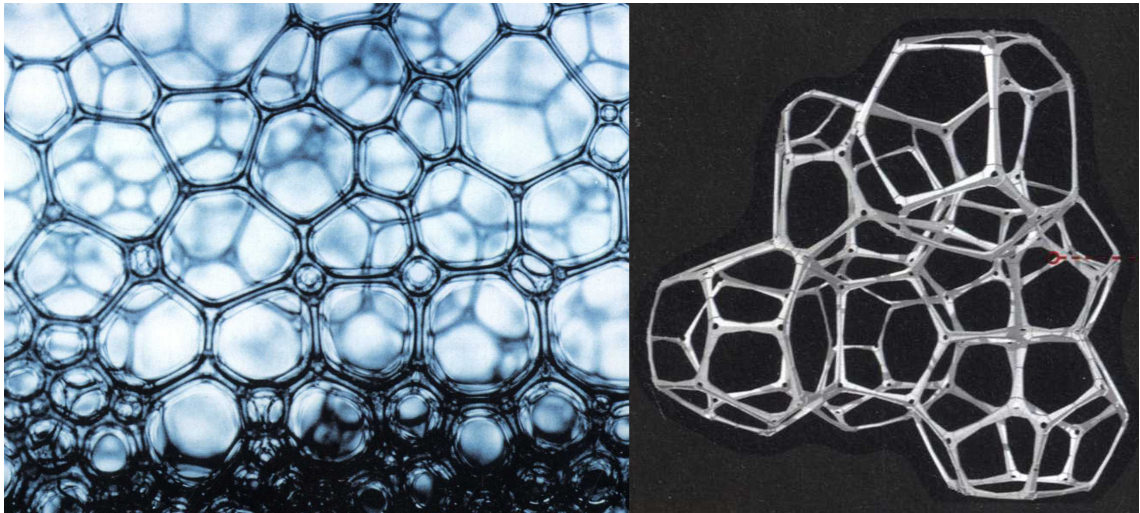
### 3.0 Αρχιτεκτονική

→ 3.3 Emergence & Μορφογένεση

→ 3.3.3 To emergence & η μορφογένεση στην αρχιτεκτονική

το πρίσμα της ανάδυσης είναι εφικτός, αλλά πραγματικά αναδυόμενοι τρόποι κατασκευής απουσιάζουν σχεδόν παντελώς. Είναι δυνατόν να κατασκευαστούν τα φυσικά μοντέλα αυτών των περίπλοκων μορφών χρησιμοποιώντας τη σύγχρονη τεχνολογία (laser grinding method, laser cutter, CNC machines, κτλ.), αλλά όσον αφορά τις ίδιες τις κατασκευές, δεν είμαστε σε θέση να τις «εξελιξουμε» επί τόπου. Χρησιμοποιούμε σύγχρονα υλικά και τεχνικές τα οποία όμως σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να χαρακτηριστούν εξελικτικά σε σχέση με τα φυσικά συστήματα και τις μορφές, των οποίων όχι μόνο το σχέδιο και το περιεχόμενο των δεδομένων με το οποίο αναπτύσσονται εξελίσσεται, αλλά και τα οποία κατασκευάζονται και αυτόνομα με την βοήθεια της ανάδραση (feedback) αλλά και σύμφωνα με τους γενετικούς αλγόριθμους που κατέχουν.

Παρ' όλα αυτά, πρόταση και πεποίθηση της συντακτικής ομάδας αυτού του ερευνητικού είναι ότι δεν κρίνεται απαραίτητη η αποκλειστική χρήση emergent διαδικασιών σε όλα τα στάδια σχεδιασμού και κατασκευής ενός project. Μπορεί κάλλιστα να περιορισθεί η χρήση μιας τέτοιας μεθόδου σε κάποιο συγκεκριμένο κομμάτι του έργου, όπως λόγου χάρη ένα στατικό φορέα, μια όψη, ένα σύστημα σκιάστρων και ούτω καθ' εξής.



**Watercube**→ Στο Watercube, το ολυμπιακό κέντρο κολύμβησης του Πεκίνου, η δομή του περιβλήματος προέκυψε από την διαδικασία μεταφοράς της γεωμετρίας των φυσαλίδων του νερού (Weaire-Phelan geometry), από τη μικροκλίμακα του φυσικού κόσμου στην κλίμακα σχεδιασμού και κατασκευής ενός κτιρίου. Ενσωματώνοντας μέσα σε μία διαδικασία τη λογική του υλικού, τη μορφή και τη δομή, το περίβλημα (άρα και η όψη) του κολυμβητηρίου εκπληρώνει παράλληλα κριτήρια: μορφολογίας (συμβολικής φύσεως), στατικότητας (σε ένα χώρο με πλάτος και μήκος 177 m και ύψος 30 m η οροφή παραμένει αυτοφερόμενη και το εσωτερικό ελεύθερο από στηρίγματα) αλλά και λειτουργικότητας αφού η μεμβράνη του περιβλήματος καθιστά το κτίριο άκρως ενεργειακά αποδοτικό.



## ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

Η προβληματική γύρω από το emergence στην αρχιτεκτονική, άρχισε να έχει υπόσταση τα τελευταία μόνο χρόνια και περιορίζεται κυρίως σε θεωρητικό πλαίσιο. Παρ' όλα αυτά, έχουν δημοσιευθεί κατά καιρούς παραδείγματα με συγκεκριμένες διαδικασίες κατά το σχεδιασμό, οι οποίες περιλαμβάνουν, αν όχι αποκλειστικά, στρατηγικές και χειρισμούς συγγενείς ως προς το emergence.

Κοινός τόπος τέτοιων παραδειγμάτων σχετικών με το emergence αποτελεί η χρήση του υπολογιστή. Σε όλα τα παραδείγματα ο σχεδιασμός γίνεται με τη χρήση κατάλληλων προγραμμάτων, τα οποία δίνουν τη δυνατότητα στον σχεδιαστή να ορίσει τις διεργασίες που θα λάβουν χώρα μέσα στο κατάλληλο γραφικό περιβάλλον. Πρόκειται για την έννοια της προσομοίωσης. (Ο συνδυασμός συγκεκριμένων ιδιοτήτων του υπολογιστή -πλήθος υπολογισμών, συγχρονικότητα, χρονική ανεξαρτησία- έχει ως αποτέλεσμα την επίτευξη της διαδικασίας που ονομάζεται προσομοίωση). Η διαφοροποίηση όμως σε σχέση με άλλα project στα οποία υπήρξε χρήση υπολογιστή, έγκειται στο γεγονός ότι η τελική φόρμα προκύπτει σε μακροσκοπικό επίπεδο μέσα από τις διαδικασίες του συστήματος σε μικροσκοπικό επίπεδο (micro-macro effect), χωρίς την άνωθεν εμπλοκή του σχεδιαστή. Ο αρχιτέκτονας παύει να έχει άμεση σχέση με την τελική φόρμα. Έργο του σχεδιαστή αποτελεί η επιλογή των υλικών, των τρόπων δομής, των εξωτερικών επιδράσεων... το στήσιμο του συστήματος που προσομοιώνεται με λίγα λόγια. Ο σχεδιαστής θα ορίσει τις σχέσεις και τις ιδιότητες, όχι τη μέθοδο και θα ελέγξει το αποτέλεσμα. Μεταξύ του ορισμού των σχέσεων και του τελικού αποτελέσματος υπάρχει ένα χάσμα, μια απλησίαστη περιοχή (χαοτική περιοχή) που δεν είναι προσπελάσιμη από την αντίληψη του αρχιτέκτονα. Το τελικό αποτέλεσμα όμως της μορφογενετικής διαδικασίας αναδύεται μέσα από έναν κύκλο διαντιδράσεων, στον οποίο απουσιάζει η άμεση επιστασία του αρχιτέκτονα. Ας επικεντρωθούμε όμως σε δύο πειραματικά αρχιτεκτονικά παραδείγματα ώστε να κατανοήσουμε καλύτερα τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να εισχωρήσει το emergence κατά την συνθετική διαδικασία, αλλά και το πόσο πολυδιάστατος μπορεί να γίνει ο τρόπος της ενσωμάτωσης.

### PAPER STRIP EXPERIMENT, DIFFERENTIATION AND PROLIFERATION (ACHIM MENGES)

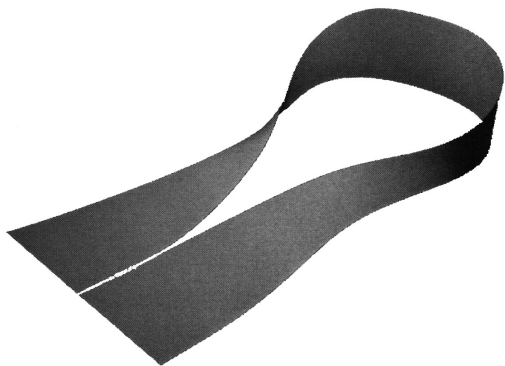
Το πρώτο παράδειγμα είναι μια μορφογενετική ψηφιακή διαδικασία, σχεδιασμένη και δημοσιευμένη από τον Achim Menges, στην οποία ορίζεται ως δομική μονάδα μια λωρίδα χαρτί διπλωμένη κατά τον τρόπο που φαίνεται στην εικόνα 1. Πρόκειται στην ουσία για μια πειραματική διάταξη όπου ο Menges ερευνά τις δυνατότητες του παραμετρικού σχεδιασμού, μέσω του ηλεκτρονικού προγραμματισμού, προσομοιώνοντας στην ουσία τη συμπεριφορά της συγκεκριμένης δομικής μονάδας σε ένα ψηφιακό περιβάλλον.



#### 3.0 Αρχιτεκτονική

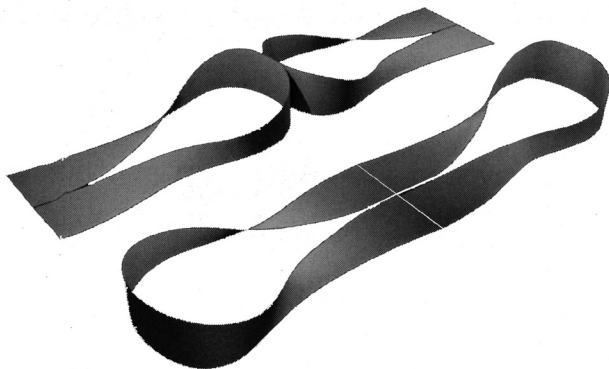
→ 3.3 Emergence & Μορφογένεση

→ 3.3.3 Το emergence & η μορφογένεση στην αρχιτεκτονική



**Εικόνα 1**→ Η βασική μονάδα (επίπεδο μικροκλίμακας), αποτελούμενη από μια λωρίδα χαρτί, διπλωμένη με τον τρόπο που φαίνεται.

Αυτό που ενδιαφέρει τον ερευνητή, είναι οι ποιοτικές σχέσεις των δομικών μονάδων και όχι το μετρικό σύστημα ή οι διαστάσεις. Πρόκειται δηλαδή για τη μεταφορά των ιδιοτήτων του χαρτιού, διπλωμένου κατά αυτόν τον τρόπο, σε ένα ψηφιακό περιβάλλον. Η γεωμετρική (τοπολογική) μορφή της λωρίδας της εικόνας 1, προκύπτει από την κάμψη και στρέβλωση του χαρτιού και έχει ως αποτέλεσμα την εικόνα που βλέπουμε. Ίσως η πιο σημαντική απόφαση στο μοντέλο αυτό, αποτελεί ο τρόπος σύνδεσης των δομικών στοιχείων, ο τρόπος δηλαδή με τον οποίο «μπορούν» οι δομικές μονάδες να ενωθούν, και κατά προέκταση να αναπτυχθεί το σύστημα. Ο τρόπος σύνδεσης αποτελεί την θεμελιώδη ιδιότητα των δομικών αυτών μονάδων πέρα από την ίδια τους την μορφή. Στην εικόνα 2 βλέπουμε τους δύο τρόπους διάταξης με τους οποίους μπορούν να ενωθούν οι δομικές μονάδες (λωρίδες).



**Εικόνα 2**→ Οι δύο τρόποι συναρμογής των δομικών στοιχείων.

Σκοπός της προσομοίωσης, είναι η ανάπτυξη ενός φορέα (μακροσκοπικό επίπεδο) μέσα από τις διαντιδράσεις των δομικών μονάδων (μικροσκοπικό επίπεδο). Με αυτό τον τρόπο, αναδύεται μια δομή η οποία ακολουθεί κατά κύριο λόγο την λογική του υλικού (Logics of Material). Στην περίπτωση αυτή, ως υλικό λαμβάνεται η λωρίδα χαρτιού, με τις ιδιότητες της και τους τρόπους ένωσης που προαναφέρθηκαν. Για να έχει νόημα η προσομοίωση, ο μελετητής οφείλει να ορίσει τις ιδιότητες του υλικού με τέτοιο τρόπο που να ανταποκρίνονται στο φυσικό

κόσμο. Έτσι ο Menges ερεύνησε και όρισε κάποιες στοιχειώδεις ιδιότητες του χαρτιού όπως η μέγιστη τιμή της καμπυλότητας, τα «ανεκτά» αναπτύγματα των επιφανειών του χαρτιού βάσει των τοπολογικών χαρακτηριστικών (Surface Developpness), την επαφτότητα (Tangency) και τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια αντοχής σε σχέση με τις διαστάσεις. Τις ίδιες παραμέτρους όρισε και για τις συνδέσεις των στοιχείων αναλύοντας τη συμπεριφορά του μέσου συγκόλλησης με το χαρτί.

Μέχρις αυτό το σημείο, ο Menges στην ουσία κατάφερε να δημιουργήσει ένα εν δυνάμει πεδίο ανεκτών δομών, αφού οποιαδήποτε παραγόμενη μορφή ενέχει (στην ουσία οφείλεται) τους κατασκευαστικούς κανόνες του υλικού. Έχουν εισέλθει δηλαδή τα ανώτατα και κατώτατα όρια μέσα στα οποία μπορεί να κινηθεί μια ενδεχόμενη μορφογενετική διαδικασία, μόνο που τα όρια αυτά είναι δυναμικά και δεν μπορεί να τα γνωρίζει εκ των προτέρων ο σχεδιαστής.



Εικόνα 3 → Ψηφιακή απεικόνιση (render) του προκύπτοντα φορέα

Για να ξεκινήσει λοιπόν η διαδικασία της προσομοίωσης (μορφογένεση), ο Menges εισήγαγε στο σύστημα τους εξωτερικούς παράγοντες που ενεργοποιούν τις δομικές μονάδες και οδηγούν στην ανάπτυξη του συστήματος (μακροδομή). Όρισε λοιπόν το περιβάλλον της προσομοίωσης, υπό τη μορφή χωρικών περιορισμών (μέγιστες επιτρεπόμενες διαστάσεις, ωφέλιμος χώρος), θέσπισε το πεδίο των δυνάμεων που ενεργούν (βαρύτητα) και εισήγαγε έναν επιπλέον παράγοντα, την κατανομή του φωτός στο εσωτερικό του κελύφους. Έχοντας λοιπόν εισάγει τις θεμελιώδεις ιδιότητες των δομικών μονάδων (DNA των λωρίδων) και ενεργοποιώντας τις εξωτερικές επιδράσεις-περιορισμούς, τα μικροστοιχεία διαντιδρούν αρχικά σε τοπικό επίπεδο και αρχίζουν να δημιουργούνται οι πρώτες δέσμες στοιχείων. Κάθε φορά που ένα στοιχείο προστίθεται (γεννάται) και δεν ικανοποιεί τις προϋποθέσεις, το σύστημα αντιδρά και «αναγκάζεται» το στοιχείο αυτό να διαφοροποιήσει κάποιο χαρακτηριστικό του (μήκος,



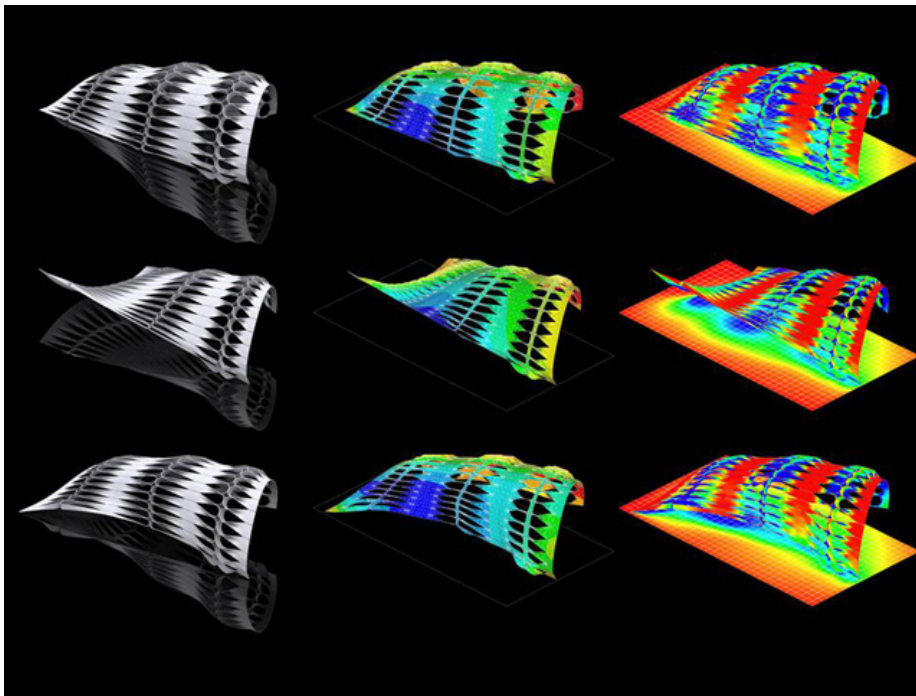
### 3.0 Αρχιτεκτονική

→ 3.3 Emergence & Μορφογένεση

→ 3.3.3 To emergence & η μορφογένεση στην αρχιτεκτονική

γωνία επαφής, κλίση κτλ). Έτσι μετά από ένα χρονικό διάστημα, το σύστημα αρχίζει να τείνει προς μια βέλτιστη λύση που να ικανοποιούνται όλες οι συνθήκες σε τοπικό επίπεδο και στο σύστημα ως όλον. Δεν πρέπει να ξεχνάμε, πως ο Menges όρισε τις ιδιότητες των μικρομονάδων και τις σχέσεις μεταξύ αυτών, ενώ παράλληλα θέσπισε ένα δίκτυο ζητούμενων και για τις μικρομονάδες αλλά και για το μακροσύστημα. Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, η αντιμετώπιση αυτή έχει άμεση σχέση με τις emergent διαδικασίες, μιας και ο μελετητής δεν έχει στην ουσία καμία ανάμειξη με τη προκύπτουσα δομή, παρά μόνο με τα ζητούμενα που αυτός θέλει να εκπληρώνει αυτή η δομή. Στην παρακάτω εικόνα 3 φαίνεται μια προκύπτουσα δομή, όπως αποτυπώθηκε στο γραφικό περιβάλλον της προσομοίωσης.

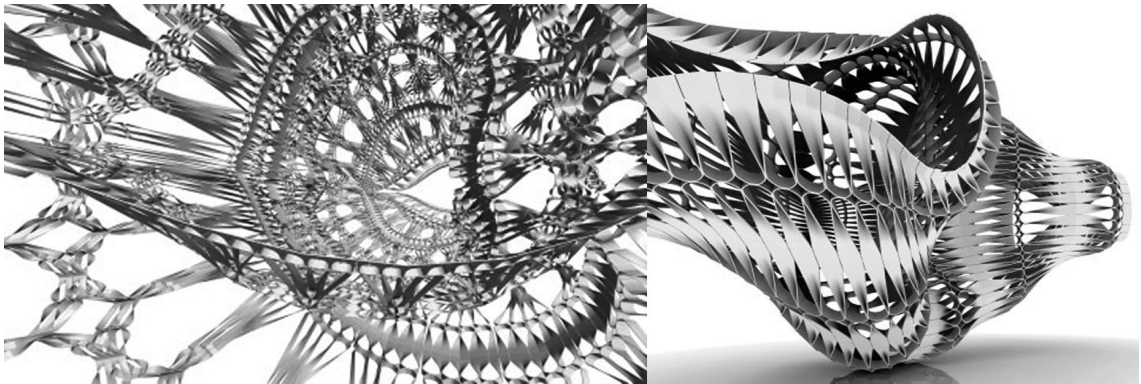
Για τον καλύτερο έλεγχο της παραγόμενης δομής, ο Menges συνδύασε το γεωμετρικό μοντέλο που προκύπτει από την διαδικασία, με συγκεκριμένα προγράμματα που ελέγχουν δύο από τις αρχικές παραμέτρους: Τη στατική συμπεριφορά και την κατανομή του φωτός στο εσωτερικό. Του δίνεται λοιπόν η δυνατότητα να ελέγξει σε οποιοδήποτε στάδιο της διαδικασίας το παραγόμενο αποτέλεσμα και να μελετήσει τη «συμπεριφορά» του συστήματος, είτε αναζητώντας τη βέλτιστη λύση, είτε ερευνώντας για τυχόν διαφοροποιήσεις που πρέπει να κάνει για την καλύτερη λειτουργία της μορφογενετικής διαδικασίας. Στην εικόνα 4 βλέπουμε τρεις διαφορετικές προκύπτουσες μορφές (στήλη στα αριστερά), τις αναλύσεις του στατικού συστήματος (κεντρική στήλη) και τη κατανομή του φωτός (στήλη στα δεξιά).



**Εικόνα 4→**  
Ανάλυση του προκύπτοντος φορέα, σχετικά με τη στατική συμπεριφορά των δομικών μονάδων και την διασπορά του φωτός στο εσωτερικό του κελύφους.

Πλέον ο Menges, μπορεί να επέμβει στις δομικές σχέσεις του συστήματος και όχι στην προκύπτουσα δομή. Μελετώντας τα αποτελέσματα κάθε μορφογενετικής διαδικασίας, είναι σε θέση να μελετήσει τις επιπτώσεις που έχει η παραμικρή αλλαγή στα δεδομένα (στοιχειώδεις μονάδες) στο σύστημα και εν συνεχεία να προσπαθήσει να βελτιστοποιήσει τις παραμέτρους. Δεν μπορεί όμως να εισχωρήσει στην ίδια την λογική της διαδικασίας και να φτάσει μέσω της επαγωγικής οδού σε άμεσα αιτιακές σχέσεις. Αυτή είναι και η ουσία της διαδικασίας, μιας και η «οργανικότητα» του φορέα εμπεριέχει δυναμικές, μη γραμμικές σχέσεις. Όλα τα δεδομένα συνυπάρχουν και συλλειτουργούν στον ίδιο χρόνο και τα δομικά στοιχεία αυτο-οργανώνονται μέσα από συνεχείς διαντιδράσεις (interactions) και αναδράσεις (feedbacks)

Στο πείραμα του Achim Menges, έχει ενδιαφέρον η έννοια της ανάδρασης, έτσι όπως προέκυψε κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Όπως είδαμε στα προηγούμενα κεφάλαια, η ανάδραση (feedback), δηλαδή η συνεχής ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των μικροστοιχείων και του συνολικού συστήματος, μπορεί να είναι είτε θετική είτε αρνητική. Η θετική ανάδραση οδηγεί σε ανοικτές λύσεις, όπου το σύστημα αδυνατεί να φτάσει σε μια κατάσταση ισορροπίας. Αντίθετα όταν η ανάδραση είναι αρνητική, τότε το σύστημα οδηγείται σε μια συγκεκριμένη κατάσταση, προσδιορίσιμη και σταθερή. Έχει λοιπόν ενδιαφέρον η οπτική απεικόνιση των δύο διαφορετικών αναδράσεων στο συγκεκριμένο πείραμα (εικόνα 5).



**Εικόνα 5** → Η διαφορά μεταξύ της θετικής (αριστερά) και της αρνητικής (δεξιά) ανάδρασης. Στην δεύτερη περίπτωση το σύστημα φθάνει σε κατάσταση ισορροπίας.

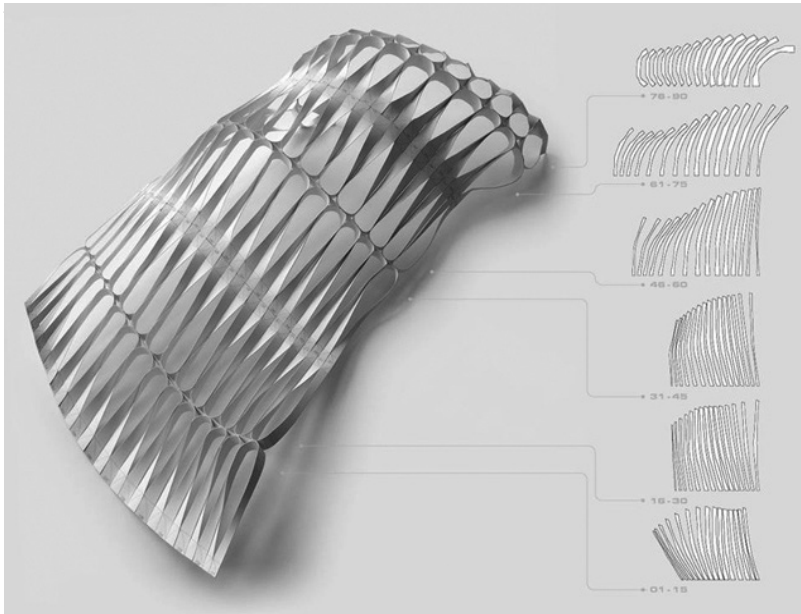
Για να ελέγξει ο Menges την «αξιοπιστία» του πειράματος, επέλεξε το αποτέλεσμα από μια μορφογενετική διαδικασία και λαμβάνοντας τα δεδομένα από την γεωμετρία του συστήματος, έφτιαξε μια μακέτα του ψηφιακού μοντέλου. Αυτό που έκανε δηλαδή στην ουσία, ήταν να τυπώσει τα αναπτύγματα από όλες τις δομικές μονάδες ξεχωριστά και να τα «κολλήσει» με τον τρόπο που φαίνονταν στο μοντέλο. Η διαδικασία αυτή ήταν ακριβής, μιας και το ψηφιακό γεωμετρικό μοντέλο παρείχε όλες τις απαιτούμενες γεωμετρικές πληροφορίες για την παραγωγή



### 3.0 Αρχιτεκτονική

→ 3.3 Emergence & Μορφογένεση

→ 3.3.3 To emergence & η μορφογένεση στην αρχιτεκτονική



**Εικόνα 6**→ Η μακέτα του τελικού ψηφιακού μοντέλου, κατασκευασμένη με τη βοήθεια ειδικών plotter, που παρήγαγε τα αναπτύγματα των δομικών μονάδων.

Η σημασία του παραδείγματος έχει να κάνει με τον τρόπο τον οποίο διάλεξε ο Achim Menges να μελετήσει τις δυνατότητες μιας συγκεκριμένης κατασκευαστικής μονάδας. Μέσα από ένα ψηφιακό περιβάλλον προσομοίωσης, προσπάθησε να δημιουργήσει τις κατάλληλες συνθήκες, για την ανάπτυξη ενός συστήματος πλήρως ανταποκρινόμενο στη λογική (φύση) του υλικού (δομικής μονάδας), με γνώμονα τις διαδικασίες αυτό-οργάνωσης, ανταποκρινόμενο σε συγκεκριμένες απαιτήσεις.

### **HONEYCOMB MORPHOLOGIES, GENERATIVE ALGORITHMIC DEFINITION, ANDREW KUDLESS (MENGES, HENSEI, WEINSTOCK)**

Το συγκεκριμένο project, αποτελεί την διπλωματική εργασία του Andrew Kudless στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος AA Emergent Technologies, με υπεύθυνους τους Michael Hensel, Michael Weinstock και Achim Menges. Η λογική της παρούσης εργασίας είναι ανάλογη με το προηγούμενο παράδειγμα του Menges (Paper Strips). Οι τρόποι προσέγγισης της προσομοίωσης είναι σε γενικές γραμμές ίδιοι. Η θεμελιώδης διαφορά όμως μεταξύ των δύο, έγκειται στην επιλογή της βασικής δομικής μονάδας του συστήματος υπό μελέτη.

Ενώ λοιπόν, στο πρώτο παράδειγμα ο Menges επέλεξε ως δομικό στοιχείο μια συγκεκριμένη διάταξη μιας διπλωμένης λωρίδας χαρτιού, ο Kudless μετέφερε στο υπολογιστικό ψηφιακό περιβάλλον μια μικροδομή που συναντάται στη φύση. Πρόκειται για τις κυψέλες, οι οποίες απαρτίζουν την κηρήθρα, το οικοδόμημα μιας αποικίας μελισσών.

Αυτό που μελέτησε ο Kudless, δεν ήταν η συμπεριφορά των μελισσών και ο τρόπος με τον οποίο «χτίζουν» το περιβάλλον τους, αλλά επικεντρώθηκε στην κυψέλη αυτή καθ' εαυτή. Αν και παρουσιάζει ενδιαφέρον για το emergence, η μελέτη της δημιουργίας αυτών των κατασκευών από τις μέλισσες, η έννοια της αυτο-οργάνωσης και της ανάδυσης, έχουν νόημα στο παρόν παράδειγμα μόνο κατά τη διαδικασία της ψηφιακής προσομοίωσης και σχεδιασμού του μοντέλου, και όχι στα emergent φαινόμενα μιας κοινωνίας μελισσών. Η αναφορά αυτή γίνεται, για να καταστεί σαφές, πως το emergence μπορεί να χρησιμεύσει σε πολλά επίπεδα, χωρίς την ανάγκη μιας ολιστικής θεώρησης για το υπό μελέτη σύστημα.



**Εικόνα7**→ Κατασκευή του ψηφιακού μοντέλου με CAM μεθόδους, Όλα τα στοιχεία των κυψελών κόπηκαν και συναρμολογήθηκαν επί τόπου.

Ο απώτερος στόχος και των δύο παραδειγμάτων, ήταν η κατασκευή του αντίστοιχου φυσικού μοντέλου. Δεν επρόκειτο δηλαδή για καθαρά θεωρητική εργασία. Στο παράδειγμα με τις λωρίδες χαρτιού ο Menges προσπάθησε να μεταφέρει την κατασκευαστική αναλογία μιας μονάδας, σε ένα σύστημα αποτελούμενο από πλήθος τέτοιων μονάδων. Στο παράδειγμα με τις κυψέλες, ο Kudless επικεντρώθηκε στην αλγοριθμική μεταφορά των ιδιοτήτων των κυψέλων και τη δημιουργία ποικίλων γεωμετρικών σχηματισμών, ικανών να κατασκευαστούν στο εργαστήριο με τη βοήθεια κατάλληλου εξοπλισμού (Computer Aided Manufacturing) (Εικόνα 7). [Και τα δύο παραδείγματα, παρουσιάζονται και περιγράφονται από τον Achim Menges στο περιοδικό *Architectural Design*, τεύχος Μαρτίου/Απριλίου 2006 με τίτλο *Techniques and Technologies in Morphogenetic Design*, στο άρθρο: *Polymorphism*]



### 3.0 Αρχιτεκτονική

→ 3.3 Emergence & Μορφογένεση

→ 3.3.3 To emergence & η μορφογένεση στην αρχιτεκτονική

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ

Alexander C., A City is not a Tree, Στο Design 206:46-55, 1966

Bon R., Allometry in the Topologic Structure of Architectural Spatial Systems, Στο Ekistics, 36(215):270- 276, 1973

Camazine S., J.L. Deneubourg, N. Franks, J. Sneyd, G. Theraulaz and E. Bonabeau, Self-Organization in Biological systems, Princeton Studies in Complexity, Princeton University Press, Princeton, 2001

Castle Helen, Editorial in Architectural Design, Vol. 74, No.3, Wiley Academy, pp 5, May/June 2004

Currey J.D., The Mechanical Adaptation of Bone, Princeton University Press, 1984]

Emergence and Design Group, Emergence in Architecture, AD, Vol. 74, No.3, Wiley Academy pp 6-7, May/June 2004

Fromm Jochen, Types and Forms of Emergence, Kassel University Press, 2005

Heylighen Francis, Self Organization, Emergence and the Architecture of Complexity, Proceedings of 1st European Conference on System Science, 1981

Holland John H, Adaptation in Natural and Artificial systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence, MIT Press, 1992

Jencks C., The Architecture of the Jumping Universe, Academy Editions, London, 1997

Jeronimidis George, Biodynamics, AD, Vol.74, No.3, Wiley Academy, pp 95, May/June 2004

Johnson Stephen, "Emergence. The Connected lives of Ants, Brains, Cities and Softwares", 2001

Lim Joseph, Bio-Structural Analogues in Architecture, BIS Publishers, Amsterdam, 2009

Neville A.C., Biology of Fibrous Composites, Cambridge University Press, 1986

O'Reilly Dr Una-May, Martin Hemberg and Achim Menges, Evolutionary Computation and Artificial Life in Architecture: Exploring the Potential of Generative and Genetic Algorithms as Operative Design Tools, AD, Vol.74, No.3,; Wiley Academy, pp 49, May/June2004





POLO A. ZAERA, “Rollercoaster construction”. Verb, architecture boogazine, Barcelona: Actar, pp. 14-15, 2001

POLO A. ZAERA, F. MOUSSAVI, “Complexity and Consistency”, CECILIA F. LEVENE R. (eds), El Croquis, vol. 115/116[I]. Madrid: Premio COAM Publications, p.18, 2003

Prigogine Ilya, Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes, John Wiley, 1967

Simon H., The Architecture of Complexity, Στο Proceedings of the American Philosophical Society, 106(6):467-482, 1962

Alexander V Sprirov, “The Change in Initial Symmetry in the pattern form interaction model of sea urchin gastrulation, Journal of Theoretical Biology, 161, 1993

Thomson D’Arcy W., “On Growth and Form”, Dover Revised Edition, 1917

Venturi R., Complexity and Contradiction in Architecture, The Museum of Modern Art Press, New York 1967

Verb Natures, Actar, Barcelona, 2006

Warren Weaver, Science and Complexity, American Scientist, 36, 536, 1948

West G.B., J.H. Brown, και B.J. Enquist, A General Model for the Origin of Allometric Scaling Laws in Biology, Στο Science, 276:122-126, 1997

Weinstock M.. The Architecture of Emergence, Wiley, 2010

Weinstock Michael, Morphogenesis and the Mathematics of Emergence, AD Emergence: Morphogenetic design Strategies, 2004

Whitehead Alfred N., “The Concept of Nature”, Cambridge University Press, 1920

Alexiou, Zamenopoulos, Johnson και Gilbert, Gilbert κ.ά., υπό έκδοση, 2009

Alexiou K., J. Johnson, T. Zamenopoulos; Embracing Complexity in Design, Routledge, London 2009

Δανιήλ Μ. (Επιμελητής), Κ. Τσουκαλά (Επιμελητής), Χ. Παντελίδου (Επιμελητής), Μετανεωτερικές επ-όψεις, Επίκεντρο, Θεσσαλονίκη 2010



Zamenopoulos T., και K. Alexiou, Structuring the Plan Design Process as a Coordination Problem: The Paradigm of Distributed Learning Control Coordination. Στο P. Longley και M. Batty (επιμ.), Advanced Spatial Analysis• the CASA Book of GIS. Η.Π.Α. : ESRI Press. Σο. 407-426. 1, 2003

ΧΑΤΖΗΣΑΒΒΑ Δ., Α. ΣΙΑΜΠΙΡΗΣ, «Εφήμερες Δυναμικές Δομές & Σύγχρονα Υπολογιστικά Λογισμικά», στο ΜΠΕΛΙΜΠΑΣΑΚΗΣ Κ. (Επιμ.), Εφήμερες Κατασκευές, Η αρχιτεκτονική ως τέχνη, τεύχος 7, Θεσσαλονίκη: Περιοδική έκθεση ΣΑΘ, σελ. 15, 2002

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Alexander C., A City is not a Tree, Στο Design 206:46-55, 1966

Bak Per, Πώς λειτουργεί η φύση, Η επιστήμη της αυτοοργανούμενης κρισιμότητας, Κάτοπτρο, Αθήνα, 2008

Batty (επιμ.), Advanced Spatial Analysis, the CASA Book of GIS. Η.Π.Α.: ESRI Press. Σο. 407-426. 1, 2003

Bon R., Allometry in the Topologic Structure of Architectural Spatial Systems, Στο Ekistics, 36(215):270- 276, 1973

Briggs John, David Peat, Ο ταραγμένος καθρέπτης: μια περιήγηση στη θεωρία του χάους και την επιστήμη της ολότητας, Κάτοπτρο, Αθήνα, 2001

Briggs John, David Peat, Μια αιρετική άποψη για το χάος στην καθημερινή μας ζωή, Τραυλός, Αθήνα, 2001

Briggs John, Fractals: the patterns of chaos: discovering a new aesthetic of art, science, and nature, London, 1992

Camazine S., J.L. Deneubourg, N. Franks, J. Sneyd, G. Theraulaz and E. Bonabeau, Self-Organization in Biological systems, Princeton Studies in Complexity, Princeton University Press, Princeton, 2001

Castle Helen, Editorial in Architectural Design, Vol. 74, No.3, Wiley Academy, pp 5, May/June 2004

Currey J.D., The Mechanical Adaptation of Bone, Princeton University Press, 1984

Emergence and Design Group, Emergence in Architecture, AD, Vol. 74, No.3, Wiley Academy pp 6-7, May/June 2004

Fromm Jochen, Types and Forms of Emergence, Kassel University Press, 2005

Gleick James, Χάος: Μία Νέα Επιστήμη, Κάτοπτρο, Αθήνα, 1990

Heylighen Francis, Self Organization, Emergence and the Architecture of Complexity, Proceedings of 1st European Conference on System Science, 1981



**Αιτιοκρατικό χάος** Ανδυόμενες φυσικές δομές

- Holland John H, *Adaptation in Natural and Artificial systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence*, MIT Press, 1992
- Jencks C., *The Architecture of the Jumping Universe*, Academy Editions, London 1997
- Jeronimidis G., *Biodynamics*, AD, Vol.74, No.3, Wiley Academy, pp 95, May/June 2004
- Johnson Stephen, "Emergence. The Connected lives of Ants, Brains, Cities and Softwares", 2001
- Joseph Lim, *Bio-Structural Analogues in Architecture*, BIS Publishers, Amsterdam, 2009
- Mandelbrot Benoit, *The fractal geometry of nature*, W. H. Freeman, San Francisco, 1982
- Neville A.C., *Biology of Fibrous Composites*, Cambridge University Press, 1986
- Dr O'Reilly Una-May, Martin Hemberg and Achim Menges, *Evolutionary Computation and Artificial Life in Architecture: Exploring the Potential of Generative and Genetic Algorithms as Operative Design Tools*, AD, Vol.74, No.3,; Wiley Academy, pp 49, May/June 2004
- ZAERA POLO A., "Rollercoaster construction". *Verb, architecture boogazine*, Barcelona: Actar, pp. 14-15, 2001
- ZAERA POLO A., F. MOUSSAVI, "Complexity and Consistency", CECILIA F. LEVENE R. (eds), *El Croquis*, vol. 115/116[I]. Madrid: Premio COAM Publications, p.18, 2003
- Prigogine Ilya, *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes*, John Wiley, 1967
- Prigogine Ilya, *Οι νόμοι του χάους*, Τραυλός, Αθήνα, 2003
- Prigogine Ilya, *Το τέλος της βεβαιότητας, Χρόνος, χάος και οι νόμοι της φύσης*, Κάτοπτρο, Αθήνα, 2003
- Prigogine Ilya, Isabelle Stengers, *Τάξη μέσα από το χάος, Ο νέος διάλογος του ανθρώπου με τη φύση*, Κέδρος, Αθήνα, 2008
- Prigogine Ilya, *Είναι το μέλλον δεδομένο;*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα, 2003
- Ruelle David, *Τύχη και χάος*, Τραυλός, Αθήνα, 1999
- Schrodinger Erwin, *Τι είναι η ζωή, Πνεύμα και ύλη*, Τραυλός, Αθήνα, 1995

Simon H., The Architecture of Complexity, Στο Proceedings of the American Philosophical Society, 106(6):467-482, 1962

Spirivov Alexander V, 'The Change in Initial Symmetry in the pattern form interaction model of sea urchin gastrulation, Journal of Theoretical Biology, 161, 1993

Stewart Ian, Παίζει ο Θεός ζάρια; Η επιστήμη του χάους, Τραυλός, Αθήνα, 1991

Stewart Ian, Είναι ο Θεός γεωμέτρης; , Η τρομερή συμμετρία, Τραυλός, Αθήνα, 2008

Szpiro George, Η εικασία του Πουανκαρέ, Τραυλός, Αθήνα, 2009

Thomson D'Arcy W., "On Growth and Form", Dover Revised Edition, 1917

Thuan Trihn Xuan, Χάος και Αρμονία, Η κατασκευή της Πραγματικότητας, Τραυλός, Αθήνα, 2004

Venturi R., Complexity and Contradiction in Architecture, The Museum of Modern Art Press, New York 1967

Verb Natures, Actar, Barcelona, 2006

Weaver Warren, Science and Complexity, American Scientist, 36, 536, 1948

Weinstock M., The Architecture of Emergence, Wiley, 2010

Weinstock Michael, Morphogenesis and the Mathematics of Emergence, AD Emergence: Morphogenetic design Strategies, 2004

West G.B., J.H. Brown, και B.J. Enquist, A General Model for the Origin of Allometric Scaling Laws in Biology, Στο Science, 276:122-126, 1997

Whitehead Alfred N., "The Concept of Nature", Cambridge University Press, 1920

Alexiou, Zamenopoulos, Johnson και Gilbert, Gilbert κ.ά., υπό έκδοση, 2009

Alexiou K., J. Johnson, T. Zamenopoulos; Embracing Complexity in Design, Routledge, London 2009

Δανιήλ Μ. (Επιμελητής), Κ. Τσουκαλά (Επιμελητής), Χ. Παντελίδου (Επιμελητής), Μετανεωτερικές επ-όψεις, Επίκεντρο, Θεσσαλονίκη 2010



**Αιτιοκρατικό χάος** Ανδυόμενες φυσικές δομές

Zamenopoulos T., και K. Alexiou, Structuring the Plan Design Process as a Coordination Problem: The Paradigm of Distributed Learning Control Coordination. Στο P. Longley και M.

Ηράκλειτος, Άπαντα, Πρόλογος-Μετάφραση: Τάσος Φάλκος-Αρβανιτάκης, Επίμετρο: Άνθρωπος, ζωή, σύμπαν, Θ. Χρηστίδης, Ζήτρος, Θεσσαλονίκη, 2010

Ησίοδος, Έργα και ημέρες, Θεογονία, Η ασπίδα του Ηρακλή, Εισαγωγή, μετάφραση, σχόλια: Σταύρος Γκιργκένης, Ζήτρος, Θεσσαλονίκη, 2001

Μπούντης Αναστάσιος, Δυναμικά συστήματα και χάος, Τόμος Α΄, Παπασωτηρίου, Αθήνα, 1995

Μπούντης Αναστάσιος, Δυναμικά συστήματα και χάος, Τόμος Β΄, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 1997

Πλάτων, Τίμαιος, Εισαγωγή, μετάφραση, σχόλια: Θεόδωρος Γ. Μαυρόπουλος, Ζήτρος, Θεσσαλονίκη, 2010

Πλάτων, Φαίδων, Εισαγωγή, μετάφραση, σχόλια: Θεόδωρος Γ. Μαυρόπουλος, Ζήτρος, Θεσσαλονίκη, 2007

Συλλογικό έργο, επιμέλεια Δήμητρα Σφενδόνη-Μέντζου, Φιλοσοφία των επιστημών, Τόμος Ι, Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2008

Συλλογικό έργο, επιμέλεια Δήμητρα Σφενδόνη-Μέντζου, Φιλοσοφία των επιστημών, Τόμος ΙΙ, Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2008

ΧΑΤΖΗΣΑΒΒΑ Δ., Α. ΣΙΑΜΠΙΡΗΣ, «Εφήμερες Δυναμικές Δομές & Σύγχρονα Υπολογιστικά Λογισμικά», στο ΜΠΕΛΙΜΠΑΣΑΚΗΣ Κ. (Επιμ.), Εφήμερες Κατασκευές, Η αρχιτεκτονική ως τέχνη, τεύχος 7, Θεσσαλονίκη: Περιοδική έκθεση ΣΑΘ, σελ. 15, 2002

Χρηστίδης Θεόδωρος, Ο Ηράκλειτος, ο κόσμος και ο Θεός, Εξάντας, Αθήνα, 2009

Χρηστίδης Θεόδωρος, Χάος και πιθανολογική αιτιότητα: Μεταξύ προκαθορισμού και τύχης, Εκδόσεις Βάνιας, Θεσσαλονίκη, 1997

## ΠΗΓΕΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

### ΕΠΙΣΤΗΜΗ

**Η ελικοειδής ανέλιξη από το χάος στην τάξη και πάλι στο χάος**→προσωπικό αρχείο συγγραφέων

**Ο χώρος φάσεων και το επίπεδο Πουανκαρέ**→Trihn Xuan Thuan, Χάος και Αρμονία, Η κατασκευή της Πραγματικότητας, Τραυλός, Αθήνα, 2004, σελίδα 134

**Ο χώρος φάσεων και το επίπεδο Πουανκαρέ**→ [http://www.scholarpedia.org/article/Periodic\\_orbit](http://www.scholarpedia.org/article/Periodic_orbit)

**Κόμικς για το Χάος**→Trihn Xuan Thuan, Χάος και Αρμονία, Η κατασκευή της Πραγματικότητας, Τραυλός, Αθήνα, 2004, σελίδα 166

**Αναταραχή στον Δία**→<https://tntsite.wordpress.com/category/%CE%B4%CE%B9%CE%AC%CF%83%CF%84%CE%B7%CE%BC%CE%B1/page/3/>

**Το φαινόμενο της πεταλούδας**→Trihn Xuan Thuan, Χάος και Αρμονία, Η κατασκευή της Πραγματικότητας, Τραυλός, Αθήνα, 2004, σελίδα 114

**Ο ελκυστής του Λόρεντζ**→Trihn Xuan Thuan, Χάος και Αρμονία, Η κατασκευή της Πραγματικότητας, Τραυλός, Αθήνα, 2004, σελίδα 170

**Σημειακός μαγνήτης**→James Gleick, Χάος: Μία Νέα Επιστήμη, Κάτοπτρο, Αθήνα, 1990, σελίδα 185

**Ο παράξενος ελκυστής του Ενόν**→<http://sprott.physics.wisc.edu/chaos/henongpr.htm>

**Η ακτή της Βρετανίας είναι ένα φράκταλ**→Ian Stewart, Παίζει ο Θεός ζάρια; Η επιστήμη του χάους, Τραυλός, Αθήνα, 1991, σελίδα 252

**Τέλεια μαθηματικά φράκταλ**→ <http://mathworld.wolfram.com/Fractal.html>

**Η Φύση αγαπά τα φράκταλ**→John Briggs, Fractals: the patterns of chaos: discovering a new aesthetic of art, science, and nature, London, 1992, σελίδα 127

**Η Φύση αγαπά τα φράκταλ**→[http://mathartfun.com/shopsite\\_sc/store/html/FractalTree2.html](http://mathartfun.com/shopsite_sc/store/html/FractalTree2.html)

**Γραμμική και μη γραμμική συμπεριφορά**→Trihn Xuan Thuan, Χάος και Αρμονία, Η κατασκευή της Πραγματικότητας, Τραυλός, Αθήνα, 2004, , σελίδα 488

**Η οργάνωση της χημικής αντίδρασης των Μπελούσοφ-Ζαμποτίνσκι στο χώρο**→[http://ulisse.sissa.it/immagini/Uimg101001x002/popup\\_image\\_view](http://ulisse.sissa.it/immagini/Uimg101001x002/popup_image_view)

**Διαγράμματα διακλαδώσεων**→Ilya Prigogine, Οι νόμοι του χάους, Τραυλός, Αθήνα, 2003, σελίδα 34

**Διαγράμματα διακλαδώσεων**→Ilya Prigogine, Isabelle Stengers, Τάξη μέσα από το χάος, Ο νέος διάλογος του ανθρώπου με τη φύση, Κέδρος, Αθήνα, 2008, σελίδα 234



**Αιτιοκρατικό χάος** Ανδυόμενες φυσικές δομές

## ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ

**Η πολυπλοκότητα στην αρχιτεκτονική** → [www.williamlinehan.blogspot.com](http://www.williamlinehan.blogspot.com) & [www.stern.de](http://www.stern.de)

**A City is not a Tree** → Μετανεωτερικές επ-όψεις, Επίκεντρο, Θεσσαλονίκη 2010 (σελίδα 75)

**Sagrada Familia** → [www.flickr.com](http://www.flickr.com)

**Virtual House** → [www.cgg-journal.com](http://www.cgg-journal.com)

**Hadley cell** → M. Weinstock. The Architecture of Emergence, Wiley, 2010 (σελίδα 47)

**Φύση Vs Μηχανή** → [www.flyingmachines.com](http://www.flyingmachines.com) & [www.uni-kl.de](http://www.uni-kl.de)

**Δομή κατασκευής ενός emergent μοντέλου** → προσωπικό αρχείο

**Μετασχηματιστικό διάγραμμα (D'Arcy Thompson)** → [www.scribd.com](http://www.scribd.com)

**Sepiida** → [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

**Εγκαταλελειμμένη Πόλη** → M. Weinstock. The Architecture of Emergence, Wiley, 2010 (σελίδα 35)

**Κοπάδια ψαριών** → [www.twistedsifter.com](http://www.twistedsifter.com)

**Donax variabilis** → [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

**Interactivator: Networked Evolutionary Design System** → [www.generativedesign.com](http://www.generativedesign.com)

**Asparagus officinalis** → [www.uri.edu](http://www.uri.edu)

**Watercube** → Verb Natures, Actar, Barcelona, 2006

**Εικόνες 1-7** → Architectural Design, τεύχος Μαρτίου/Απριλίου 2006, Techniques and Technologies in Morphogenetic Design, στο άρθρο: Polymorphism



Ένας σοφός απάντησε κάποτε στο ερώτημα, ποιός ή τι είμαστε :

Είμαστε το άθροισμα όλων αυτών που συνέβησαν μπροστά μας  
όλων αυτών που έγιναν κάτω από τα μάτια μας

όλων αυτών όσων μας έχουν κάνει.

Είμαστε κάθε άνθρωπος και κάθε πράγμα

το οποίο με την ύπαρξή του επηρέασε τη δικιά μας

ή επηρεάστηκε από τη δικιά μας.

Είμαστε τα πάντα τα οποία θα γίνουν αφότου πλέον δεν είμαστε

και όσα δεν έχουν γίνει εάν δεν είχαμε έρθει.