



Φαινόμενο

Περίοδος Δ' | Τεύχος 40 | Ιούνιος 2024

ISSN: 2529-1874/2529-1875 (online)

Αναγνώριση Δυναμικών Εξισώσεων
Χαοτικών Συστημάτων
Σελ. 3

Κβαντικές «τελείες»
...όταν το μέγεθος έχει σημασία
Σελ. 6

το Μεγάλο Πείραμα του CERN
ήρθε στο Α.Π.Θ.
Σελ. 10

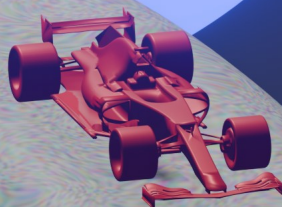
άπειρο
η υπέρβαση της ανθρώπινης σκέψης
Σελ. 23

ατύχημα στον πυρηνικό σταθμό
Fukushima Daiichi
Σελ. 15

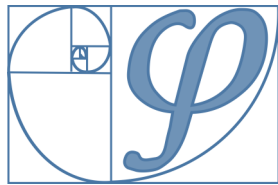
πυρηνική ενέργεια
ιστορία και προοπτικές για ένα
βιώσιμο ενεργειακό μέλλον
Σελ. 27

22/23 Δεκεμβρίου 178 π.Χ.
...όταν ξεκίνησαν οι δείκτες
του Μηχανισμού των Αντικυθήρων
Σελ. 19

Luciano Rezzola
Συνέντευξη
Σελ. 30



σύνθετα υλικά
από τη F1 στη ναυοκλίμακα
Σελ. 11



Φαινόμενο

Περίοδος Δ' · Τεύχος 40
Ιούνιος 2024

Περιοδική έκδοση του Τμήματος
Φυσικής Α.Π.Θ.
(προεδρία Α. Ιωαννίδου)

συντακτική ομάδα

Επιτροπή εκδόσεων, σεμιναρίων
και προβολής του Τμήματος
Φυσικής

Σ. Κασσαβέτης · Φ. Πινakίδου · Ε. Βίγκα ·
Χ. Σαραφίδης · Π. Πατσαλός · Α.
Λασκαράκης · Α. Μάτζαρη · Ι.
Τσιαούσης · Ν. Χαστάς

στο τεύχος αυτό συνεργάστηκαν

Αριστείδης Βούλγαρης
(Συνεργάτης Τμ. Φυσικής, Α.Π.Θ.)
Φλώρα Μαντελάκη
(Φοιτήτρια Τμ. Φυσικής Α.Π.Θ.)
Αναστασία Μαυρομάτη
(Φοιτήτρια Τμ. Φυσικής Α.Π.Θ.)
Μαρία Μυστακίδου
(Φοιτήτρια Τμ. Φυσικής Α.Π.Θ.)
Βασίλης Οικονόμου
(Ε.ΔΙ.Π. Τμ. Φυσικής Α.Π.Θ.)
Σπύρος Πάνος
(Φοιτητής Τμ. Φυσικής Α.Π.Θ.)
Αστέριος Παπαδόπουλος
(Φοιτητής Τμ. Φυσικής Α.Π.Θ.)
Χαράλαμπος Σαραφίδης
(Αναπλ. Καθηγ. Τμ. Φυσικής Α.Π.Θ.)
Άννα Γεωργία Χατζημάρκου
(Φοιτήτρια Τμ. Φυσικής Α.Π.Θ.)
Κωνσταντίνος Χεριστανίδης
(Φοιτητής Τμ. Φυσικής Α.Π.Θ.)
Αλεξάνδρα Χουμπάεβ
(Φοιτήτρια, Τμ. Μηχανολόγων
Μηχανικών, Παν. Δυτικής Μακεδονίας)

Εκτύπωση

COPYCITY Ε.Π.Ε.

ψηφιακή έκδοση

<http://phenomenon.physics.auth.gr>

E-mail επικοινωνίας:

phenomenon@physics.auth.gr

facebook: τμήμα φυσικής απθ &
περιοδικό "φαινόμενο"

ISSN: 2529-1874 · 2529-1882 (online)

σημείωμα της σύνταξης

Στο νέο **Τεύχος 40 του «ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΝ»** θα διαβάσετε άρθρα φοιτητών/τριών και μελών του Τμ. Φυσικής του Α.Π.Θ. καθώς και του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας για τα σύνθετα υλικά, την αναγνώριση δυναμικών εξισώσεων σε χαοτικά συστήματα, την πυρηνική ενέργεια καθώς και το ατύχημα στον σταθμό Fukushima, το άπειρο ως υπέρβαση της ανθρωπίνης σκέψης και για την ημερομηνία έναρξης λειτουργίας του μηχανισμού των Αντικυθήρων.

Το κεντρικό άρθρο είναι αφιερωμένο στο Νόμπελ Χημείας 2023 για την ανακάλυψη και την σύνθεση κβαντικών τελειών. Στο τέλος του τεύχους θα βρείτε μια πολύ ενδιαφέρουσα συνέντευξη που έδωσε ο παγκοσμίως καταξιωμένος καθηγητής σχετικής αστροφυσικής Luciano Rezzola σε φοιτητές του τμήματος Φυσικής του Α.Π.Θ..

Η ΣΥΝΤΑΚΤΙΚΗ ΟΜΑΔΑ

περιεχόμενα

Επιστημονικά νέα	1
Αναγνώριση Δυναμικών Εξισώσεων Χαοτικών Συστημάτων	3
Κβαντικές «τελείες», όταν το μέγεθος έχει σημασία	6
Το Μεγάλο Πείραμα του CERN ήρθε στο Α.Π.Θ.	10
Σύνθετα υλικά: από την Formula 1 στην νανοκλίμακα	11
Ατύχημα στον πυρηνικό σταθμό Fukushima Daiichi 22/23 Δεκεμβρίου 178 π.Χ., όταν ξεκίνησαν οι δείκτες του Μηχανισμού των Αντικυθήρων	15
22/23 Δεκεμβρίου 178 π.Χ., όταν ξεκίνησαν οι δείκτες του Μηχανισμού των Αντικυθήρων	19
Άπειρο, η υπέρβαση της ανθρωπίνης σκέψης	23
Πυρηνική ενέργεια: ιστορία και προοπτικές για ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον	27
Συνέντευξη του Καθ. Luciano Rezzola	30



Εξώφυλλο: Αλέξανδρος Μυλωνάς (Απόφοιτος Τμ. Φυσικής)

πνευματικά δικαιώματα



Το δημοσιευμένο υλικό στο περιοδικό αυτό προστατεύεται από Copyright. Το υλικό δημοσιεύεται υπό όρους που καθορίζονται από την Creative Commons Public License και απαγορεύεται κάθε χρήση του με διαφορετικές προϋποθέσεις από αυτές που καθορίζονται από την άδεια. Είστε ελεύθεροι να διανείμετε, αναπαράγετε, κατανείμετε, διαδώσετε, διασκευάσετε το έργο αυτό με τις ακόλουθες προϋποθέσεις: Η αναφορά στο έργο πρέπει να γίνει κατά τον τρόπο που καθορίζεται από το συγγραφέα ή το χορηγό της άδειας (αλλά όχι με τρόπο που να υποδηλώνει ότι παρέχουν επίσημη έγκριση σε σας ή για χρήση του έργου από εσάς). Εάν αλλοιώσετε, τροποποιήσετε ή δομήσετε πάνω στο έργο αυτό, η διανομή του παράγωγου έργου μπορεί να γίνει μόνο υπό τους όρους της ίδιας, παρόμοιας ή συμβατής άδειας.

Οι απόψεις που παρουσιάζονται σε κάθε κείμενο εκφράζουν το συγγραφέα του και όχι υποχρεωτικά τη συντακτική ομάδα του περιοδικού.



Χάρης Σαραφίδης
Αναπληρωτής Καθηγητής
Τμήματος Φυσικής

Το Ινστιτούτο της Φυσικής (The Institute of Physics - IOP) είναι από τις πιο παλιές και γνωστές επιστημονικές κοινότητες στον χώρο. Ιδρύθηκε το 1874 στο Λονδίνο με αποστολή την προώθηση της επιστήμης της Φυσικής και των εφαρμογών της και της εκπαίδευσης στις φυσικές επιστήμες και πλέον περιλαμβάνει περισσότερα από 20.000 μέλη από όλο τον κόσμο. Ο σημαντικός αυτός οργανισμός εξέδωσε πρόσφατα μια αναφορά με τίτλο «Η φυσική κινεί την πράσινη οικονομία». Στο κείμενο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά οι προοπτικές και η σημασία της εργασίας των φυσικών επιστημόνων για την ανάπτυξη τεχνολογιών που θα συμβάλλουν στην προστασία του περιβάλλοντος. Όπως διαπιστώνεται στο κείμενο, δεν υπάρχει καμία επιστημονική αμφιβολία για την επίδραση των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στην αλλαγή των κλιματικών συνθηκών στον πλανήτη μας. Είναι πλέον επιτακτική η ανάγκη για ανάπτυξη και εφαρμογή σε μεγάλη κλίμακα τεχνολογιών που θα περιορίζουν τις αρνητικές συνέπειες ενώ ταυτόχρονα θα διατηρούν σταθερό το επίπεδο ζωής μας ή θα το βελτιώνουν περαιτέρω.



Οι φυσικοί επιστήμονες έχουν έναν ιδιαίτερο ρόλο στην προσπάθεια. Οι παρατηρήσεις των καιρικών φαινομένων και επακόλουθα η ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων μας προσφέρουν την δυνατότητα κατανόησης και πρόβλεψης των κλιματικών αλλαγών. Επιπρόσθετα, σχεδόν όλες οι «καθαρές» τεχνολογίες βασίζονται στην έρευνα και την καινοτομία στον χώρο της φυσικής. Στο Ηνωμένο Βασίλειο το 72 % των ερευνητικών κονδυλίων τις τελευταίες δύο δεκαετίες κατευθύνονται σε τομείς καίριους για την ανάπτυξη φιλικών προς το περιβάλλον τεχνολογιών όπως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η πυρηνική ενέργεια, η αποθήκευση ενέργειας, η δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα και οι τεχνολογίες υδρογόνου, τομείς που το Ινστιτούτο της Φυσικής τις εντάσσει στον πυρήνα της επιστήμης.



Βασικό στοιχείο της έρευνας στην φυσική είναι η μεθοδολογία της συστημικής προσέγγισης, ο ολιστικός τρόπος αντιμετώπισης περίπλοκων συστημάτων που αποτελούνται από θεωρητικά ανεξάρτητα στοιχεία τα οποία όμως βρίσκονται σε αλληλεπίδραση και συσχέτιση μεταξύ τους, μία συχνή κατάσταση πλέον στην φυσική. Παρατηρώντας έτσι τον κόσμο μας δίνουμε έμφαση στις σχέσεις και τις αλληλεπιδράσεις των επιμέρους στοιχείων και μπορούμε να προβλέψουμε καλύτερα την πορεία του συνολικού συστήματος. Δίνουμε έμφαση στην βελτίωση των επιμέρους τομέων χωρίς να ξεχνάμε την συνολική τους προσαρμογή. Οι φυσικοί επιστήμονες κατέχουν πολύ καλά την συγκεκριμένη μεθοδολογία και αυτό τους αναδεικνύει ως τους πλέον κατάλληλους για την συγκεκριμένη αποστολή.



Το Ινστιτούτο της Φυσικής έχει εντοπίσει τουλάχιστον 158 τομείς γνώσεων της φυσικής επιστήμης, που έχουν σημασία για την ανάπτυξη τεχνολογιών προς την κατεύθυνση της μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Ενδεικτικά στην πυρηνική σχάση εντοπίζονται 21 τομείς γνώσεων, μεταξύ των οποίων τομείς που αφορούν την πυρηνική φυσική και την φυσική

των στοιχειωδών σωματιδίων, υπολογιστική φυσική τόσο για υπολογισμούς σχετικά με την λειτουργία του αντιδραστήρα όσο και μοντελοποίηση των δικτύων μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, ρομποτική, φυσική των υλικών και άλλα. Εξελίξεις σε κάποιον τομέα γνώσεων μπορούν να πυροδοτήσουν συνολικά βελτιώσεις στον τρόπο που ο πολιτισμός μας παράγει, αποθηκεύει, διανέμει και χρησιμοποιεί την ενέργεια.



Σε παλιότερη μελέτη στελέχη της Ευρωπαϊκής Εταιρίας Φυσικής (European Physical Society – EPA) είχαν καταλήξει σε αντίστοιχα συμπεράσματα. Η συνεισφορά στην ευρωπαϊκή οικονομία εταιρειών των οποίων τα προϊόντα βασίζονται στην έρευνα και την καινοτομία στα γνωστικά πεδία της φυσικής αποτέλεσαν το 12 % της ευρωπαϊκής οικονομίας σε όρους προστιθέμενης αξίας, περισσότερο από την λιανική αγορά (4,5 %), τις κατασκευές (5,3 %) και τις χρηματοπιστωτικές υπηρεσίες (επίσης 5,3 %). Η Ευρωπαϊκή Εταιρεία Φυσικής διαπιστώνει επίσης ένα διαχρονικό πρόβλημα, ότι ακόμη και οι ίδιοι οι επιστήμονες δεν τεκμηριώνουν ή δεν γνωρίζουν τα μακροπρόθεσμα οφέλη από τις ανακαλύψεις τους. Όπως χαρακτηριστικά είχε αναφέρει η τότε επικεφαλής του οργανισμού, όταν ο Albert Einstein εργάζονταν στην εξαναγκασμένη εκπομπή δεν μπορούσε να φανταστεί ότι στο μέλλον πηγές LASER θα χρησιμοποιούνταν για χειρουργικές επεμβάσεις στα μάτια.



Δημιουργία από εργαλείο «τεχνητής νοημοσύνης» με θέμα μεγάλο επιστημονικό όργανο, όπως αυτά που είναι προσαρμοσμένα στον μεγάλο επιταχυντή του CERN. Οι καινούργιες εφαρμογές τεχνητής νοημοσύνης βασίζονται σε αλγόριθμους μηχανικής μάθησης, που είχαν εφαρμοστεί σε τομείς της υπολογιστικής φυσικής όπως στην αναζήτηση νέων υλικών (η εικόνα συντέθηκε από εργαλείο AI).



Για να γίνουν όλα αυτά, χρειάζεται ένα υγιές επιστημονικό οικοσύστημα με ισχυρά επιστημονικά κέντρα και πανεπιστήμια και το κατάλληλο ανθρώπινο δυναμικό. Ο ρόλος της εκπαίδευσης λοιπόν στην φυσική είναι ιδιαίτερα σημαντικός και πρέπει να ενισχυθεί. Δεν πρέπει να παραβλέπουμε και την κοινωνική συναίνεση, οι ευρύτερες κοινωνικές μάζες πρέπει να αντιληφθούν την ανάγκη για μεγαλύτερες επενδύσεις στις φυσικές επιστήμες και το πως αυτές οι επενδύσεις θα οδηγήσουν σε βελτίωση της ζωής όλων μας.

Αναγνώριση Δυναμικών Εξισώσεων Χαοτικών Συστημάτων



Αλεξάνδρα Χουμπάεβ
Φοιτήτρια
Τμήματος Μηχανολό-
γων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο
Δυτικής Μακεδονίας

Με τον όρο δυναμικά συστήματα, αναφερόμαστε σε οποιοδήποτε σύστημα, φυσικό ή τεχνητό, του οποίου η συμπεριφορά μεταβάλλεται με το χρόνο. Για τη μελέτη ενός τέτοιου συστήματος, είναι απαραίτητη η χρήση ενός μοντέλου που να περιγράφει τη δομή του, και την εξέλιξη του στο χρόνο. Στο συνεχή χρόνο, η εξέλιξη αυτή περιγράφεται από ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων. Μέσω των διαφορικών εξισώσεων, είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε τη λύση, ή αλλιώς «τροχιά», του συστήματος, και να μελετήσουμε διάφορες ιδιότητες του, όπως την ευστάθεια, τα σημεία ισορροπίας, την ύπαρξη χαοτικής συμπεριφοράς, και πολλά ακόμα.

Τι γίνεται όμως όταν δεν έχουμε πρόσβαση στο μοντέλο του συστήματος; Πολύ συχνά λοιπόν, στη μελέτη δυναμικών συστημάτων, υπάρχει το ενδεχόμενο να έχουμε αποκτήσει μια σειρά μετρήσεων από μια διεργασία, αλλά να μας λείπουν πληροφορίες για το ίδιο το μοντέλο που έδωσε τις μετρήσεις. Στην καλύτερη περίπτωση, μπορεί να γνωρίζουμε το μοντέλο των διαφορικών εξισώσεων του συστήματος, αλλά να είναι άγνωστες οι τιμές των παραμέτρων του. Στη χειρότερη περίπτωση, μπορεί να μη γνωρίζουμε καθόλου ποιο είναι το μοντέλο των διαφορικών εξισώσεων.

Εδώ λοιπόν τίθεται ένα σημαντικό πρόβλημα, αυτό της εκτίμησης ενός μοντέλου διαφορικών εξισώσεων, κάνοντας χρήση μόνο μιας χρονοσειράς της λύσης του. Το πρόβλημα αυτό της αναγνώρισης συστημάτων, αποτελεί σημαντικό κομμάτι μελέτης στη θεωρία δυναμικών συστημάτων, αλλά και στη θεωρία ελέγχου.

Αναγνώριση Δυναμικών Συστημάτων

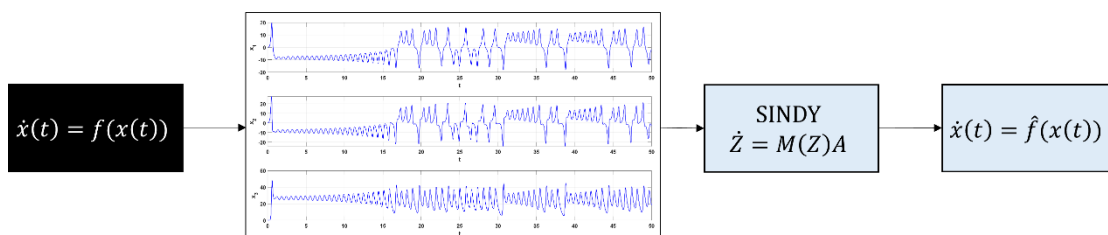
Το πρόβλημα της αναγνώρισης μελετήθηκε πρόσφατα από μια ιδιαίτερα αποδοτική, και πολύ απλή στη δομή της μέθοδο, γνωστή ως Sparse Identification of Nonlinear Dynamics (SINDY) [1-3]. Η μέθοδος, όπως φαίνεται στην Εικ. 1, βασίζεται στην επίλυση μιας απλής γραμμικής εξίσωσης, που δημιουργείται από τα μετρήσιμα δεδομένα, με σκοπό τον εντοπισμό των υποψήφιων συναρτήσεων που δομούν τη διαφορική εξίσωση του συστήματος.

Έστω λοιπόν πως το μοντέλο μας είναι άγνωστο (black box), και το μόνο που έχουμε είναι μια σειρά μετρήσεων της μεταβλητής του $\{x(0), x(h), x(2h), \dots, x(N)\}$, για κάποια δειγματοληψία h και χρόνο N . Αρχικά, από αυτή τη χρονοσειρά, είναι εύκολο να εκτιμήσουμε την αντίστοιχη παράγωγο $\{\dot{x}_{est}(0), \dot{x}_{est}(h), \dot{x}_{est}(2h), \dots, \dot{x}_{est}(N-h)\}$, κάνοντας χρήση μιας μεθόδου πεπερασμένων διαφορών [4], όπως γνωρίζουμε από την αριθμητική ανάλυση. Έπειτα, θεωρούμε πως η διαφορική εξίσωση που μας έδωσε την παραπάνω χρονοσειρά, αποτελείται από ένα σύνολο από υποψήφιες συναρτήσεις, κάθε μια με τον αντίστοιχο συντελεστή της, για παράδειγμα:

$$\dot{x}(t) = a_1 x(t) + a_2 x^2(t) + a_3 x^3(t) + a_4 \cos(x(t)) + a_5 \sin(x(t)) + \dots$$

Εδώ, οι συντελεστές a_i μας είναι άγνωστοι, μιας και δε γνωρίζουμε ποιες από τις παραπάνω συναρτήσεις υπάρχουν πραγματικά στη διαφορική εξίσωση του συστήματος. Σίγουρα λοιπόν κάποιοι συντελεστές θα είναι μηδενικοί, για τους όρους που δεν εμφανίζονται καθόλου. Το θέμα είναι να αναγνωρίσουμε επομένως ποιοι από τους παραπάνω συντελεστές είναι οι σωστοί.

Για να το επιτύχουμε, αντικαθιστούμε στην παραπάνω εξίσωση τις τιμές της χρονοσειράς και της παραγώγου για χρόνο $t = 0, h, 2h, \dots$, και στοιβάζουμε όλες αυτές τις εξισώσεις σε ένα τελικό γραμμικό σύστημα πινάκων, ως εξής:



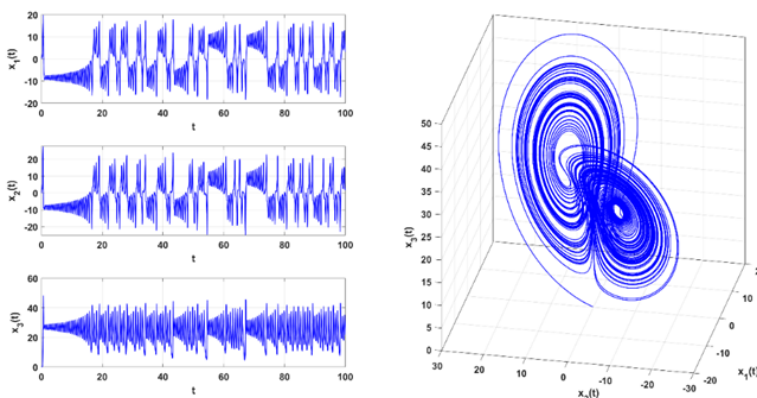
Εικόνα 1: Η συνολική δομή του συστήματος αναγνώρισης των διαφορικών εξισώσεων ενός συστήματος, κάνοντας χρήση των μετρήσιμων χρονοσειρών.

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \dot{x}_{est}(0) \\ \dot{x}_{est}(h) \\ \vdots \\ \dot{x}_{est}(N-h) \end{pmatrix}}_Y = \underbrace{\begin{pmatrix} x(0) & x^2(0) & \dots \\ x(h) & x^2(h) & \dots \\ \vdots & \dots & \vdots \\ x(N-h) & x^2(N-h) & \dots \end{pmatrix}}_B \underbrace{\begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_k \end{pmatrix}}_A$$

Το παραπάνω σύστημα είναι ένα απλό γραμμικό σύστημα της μορφής $Y = B \cdot A$, όπου οι πίνακες Y, B είναι γνωστοί, και ο A είναι άγνωστος. Μπορεί επομένως να λυθεί με απλούς κανόνες γραμμικής άλγεβρας που γνωρίζουμε από τις προπτυχιακές ακόμα σπουδές. Η επίλυση του συστήματος θα μας δώσει λοιπόν τις τιμές των συντελεστών a_i που συνθέτουν την πραγματική διαφορική εξίσωση του συστήματος.

Προσέξτε την ιδιαιτερότητα της μεθόδου, ενώ το σύστημα που θέλουμε να αναγνωρίσουμε είναι μη γραμμικό, και πιθανότατα να παρουσιάζει ακόμα και χαοτική συμπεριφορά, το τελικό σύστημα εξισώσεων που χρειάζεται να λύσουμε για να γίνει η αναγνώριση του είναι ένα απλό γραμμικό σύστημα. Αυτή η απλή μέθοδος λοιπόν μας επιτρέπει να αναγνωρίσουμε τους συντελεστές που δομούν τη διαφορική εξίσωση του συστήματος. Βέβαια, η μέθοδος μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί και στην περίπτωση που έχουμε παραπάνω από μια μεταβλητές, προσθέτοντας επιπλέον υποψήφιους συντελεστές, και λύνοντας το γραμμικό σύστημα για κάθε διαφορική εξίσωση ξεχωριστά, όπως θα δούμε παρακάτω.

Τέλος, για να βελτιώσουμε την παραπάνω εκτίμηση, κάνουμε χρήση μιας διορθωτικής τεχνικής, όπου το παραπάνω γραμμικό σύστημα λύνεται κατ'επανάληψη, αλλά κάθε φορά αποβάλλονται οι συντελεστές με πολύ χαμηλές τιμές, κάτω από ένα ορισμένο όριο αποκοπής. Έτσι, η διαφορική εξίσωση προσεγγίζεται με μεγαλύτερη ακρίβεια.



Εικόνα 2: Λύση του συστήματος Lorenz.

Παραδείγματα

Θα κλείσουμε αυτό το σύντομο άρθρο δίνοντας μερικά παραδείγματα εκτίμησης δυναμικών συστημάτων με τη μέθοδο SINDY.

Σύστημα Lorenz

Ας θεωρήσουμε ένα από τα πιο διάσημα χαοτικά συστήματα, το σύστημα του Lorenz. Το σύστημα περιγράφεται από τις παρακάτω διαφορικές εξισώσεις

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= s(x_2(t) - x_1(t)) \\ \dot{x}_2(t) &= x_1(t)(r - x_3(t)) - x_2(t) \\ \dot{x}_3(t) &= x_1(t)x_2(t) - bx_3(t) \end{aligned}$$

όπου $x_1(t), x_2(t), x_3(t)$ οι τρεις καταστάσεις του συστήματος και s, r, b παράμετροι. Αρχικά, το σύστημα προσομοιώνεται αριθμητικά στο Matlab κάνοντας χρήση της εντολής ode45, για χρόνο 100sec, με βήμα $\Delta t = 0.001$, ξεκινώντας από αρχικές συνθήκες $x_1(0) = 0.1, x_2(0) = 0.1, x_3(0) = 0.1$, και παραμέτρους $r = 0.28, s = 10, b = 8/3$. Οι χρονοσειρές της λύσης φαίνονται στην Εικ. 2.

Για να εκτιμήσουμε το σύστημα, θεωρούμε μια βιβλιοθήκη υποψήφιων συναρτήσεων, που αποτελείται από πολυωνυμικούς όρους όλων των μεταβλητών, έως και τρίτης τάξης. Τα αποτελέσματα της εκτίμησης, έπειτα από δέκα επαναλήψεις του αλγορίθμου, φαίνονται στην Εικ. 3. Βλέπουμε πως οι πραγματικοί συντελεστές πράγματι αναγνωρίζονται με ικανοποιητική ακρίβεια, και οι περιττοί όροι έχουν απαλειφθεί.

Var1	coefx1	coefx2	coefx3
{ '1' }	0	0	0
{ 'x_1' }	-10.002	27.943	0
{ 'x_2' }	10.002	-0.98243	0
{ 'x_3' }	0	0	-2.6676
{ 'x_1^2' }	0	0	0
{ 'x_2^2' }	0	0	0
{ 'x_3^2' }	0	0	0
{ 'x_1*x_2' }	0	0	0.99984
{ 'x_1*x_3' }	0	-0.99823	0
{ 'x_2*x_3' }	0	0	0
{ 'x_1^3' }	0	0	0
{ 'x_2^3' }	0	0	0
{ 'x_3^3' }	0	0	0
{ 'x_1^2*x_2' }	0	0	0
{ 'x_1^2*x_3' }	0	0	0
{ 'x_1*x_2^2' }	0	0	0
{ 'x_2^2*x_3' }	0	0	0
{ 'x_1*x_3^2' }	0	0	0
{ 'x_2*x_3^2' }	0	0	0

Εικόνα 3: Τα αποτελέσματα της εκτίμησης των διαφορικών εξισώσεων του συστήματος Lorenz.

Μηχανικό Σύστημα

Ως δεύτερο παράδειγμα, θεωρούμε ένα σύστημα δύο μαζών, συνδεδεμένες με ένα μη γραμμικό ελατήριο (Εικ. 4). Το σύστημα περιγράφεται από τις παρακάτω διαφορικές εξισώσεις [5]:

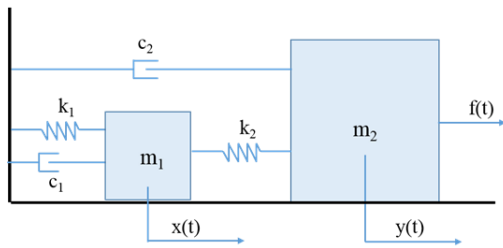
$$\dot{x}_1(t) = x_3(t)$$

$$\dot{x}_2(t) = x_4(t)$$

$$\dot{x}_3(t) = -\frac{k_1}{m_1}x_1(t) - \frac{c_1}{m_1}x_3(t) - \frac{k_2}{m_1}(x_1(t) - x_2(t))^2$$

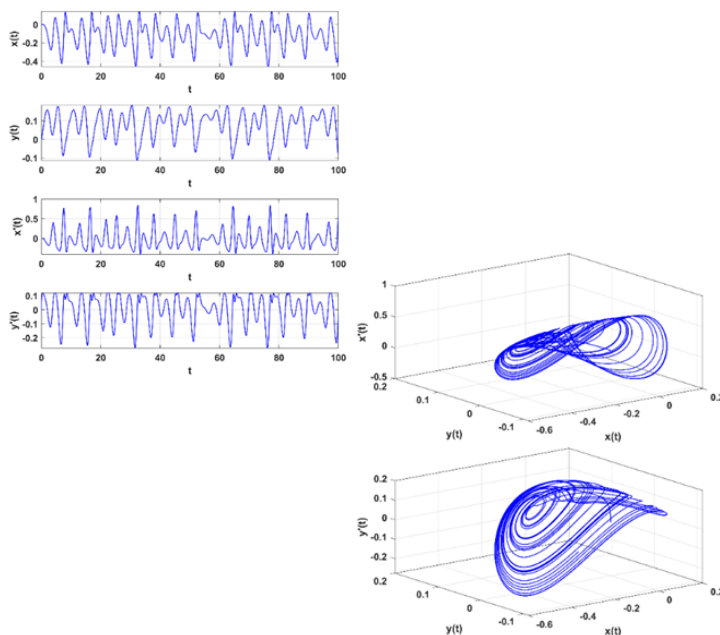
$$\dot{x}_4(t) = -\frac{c_2}{m_2}x_4(t) - \frac{k_2}{m_2}(x_2(t) - x_1(t))^2 + \frac{f(t)}{m_2}$$

όπου οι καταστάσεις του συστήματος είναι οι μετατοπίσεις και οι ταχύτητες των δύο μαζών, δηλαδή $x_1(t) = x(t)$, $x_2(t) = y(t)$, $x_3(t) = \dot{x}(t)$, $x_4(t) = \dot{y}(t)$. Αρχικά, το σύστημα προσομοιώνεται αριθμητικά στο Matlab κάνοντας χρήση της εντολής ode45, για χρόνο 100sec, με βήμα $\Delta t = 0.001$, για παραμέτρους $m_1 = 1$ kg, $m_2 = 1$ kg, $c_1 = 1.5$ Ns/m, $c_2 = 10$ Ns/m, $k_1 = 10$ N/m, $k_2 = 20$ N/m² και σταθερή είσοδο $f(t) = 1.2$ N. Οι χρονοσειρές της λύσης φαίνονται στην Εικ 5.



Εικόνα 4: Ένα μη γραμμικό μηχανικό σύστημα δύο μαζών.

Για να εκτιμήσουμε το σύστημα, θεωρούμε μια βιβλιοθήκη υποψήφιων συναρτήσεων, που αποτελείται από πολυωνυμικούς όρους όλων των μεταβλητών, έως και δεύτερης τάξης. Τα αποτελέσματα της εκτίμησης, έπειτα από δέκα επαναλήψεις του αλγορίθμου, φαίνονται στην Εικ. 6. Όπως και με το σύστημα του Lorenz, οι πραγματικοί συντελεστές αναγνωρίζονται με ικανοποιητική ακρίβεια, και οι περιττοί όροι έχουν εξαλειφθεί.



Εικόνα 5: Λύση του μηχανικού συστήματος.

Var1	coefx1	coefx2	coefx3	coefx4
{ '1' }	0	0	0	1.1998
{ 'x_1' }	0	0	-10	0
{ 'x_2' }	0	0	0	0
{ 'x_3' }	1	0	-1.5001	0
{ 'x_4' }	0	1	0	-9.998
{ 'x_1^2' }	0	0	-20	-19.996
{ 'x_2^2' }	0	0	-19.999	-19.998
{ 'x_3^2' }	0	0	0	0
{ 'x_4^2' }	0	0	0	0
{ 'x_1*x_2' }	0	0	40.002	39.994
{ 'x_1*x_3' }	0	0	0	0
{ 'x_1*x_4' }	0	0	0	0
{ 'x_2*x_3' }	0	0	0	0
{ 'x_2*x_4' }	0	0	0	0
{ 'x_3*x_4' }	0	0	0	0

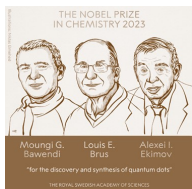
Εικόνα 6: Τα αποτελέσματα της εκτίμησης των διαφορικών εξισώσεων του μηχανικού συστήματος.

Συμπεράσματα

Στο άρθρο αυτό παρουσιάστηκε μια μέθοδος αναγνώρισης των διαφορικών εξισώσεων ενός συστήματος, κάνοντας χρήση μιας σειράς μετρήσεων των μεταβλητών του. Η μέθοδος αυτή έχει βρει μεγάλη αναγνώριση, με πολλές νέες δουλειές να συνεισφέρουν συνεχώς στη βελτίωσή της. Στόχος μας στο μέλλον είναι να δοκιμάσουμε την παραπάνω τεχνική και σε πραγματικές μετρήσεις από πειραματικές προσομοιώσεις [6], καθώς και σε μοντέλα που σχετίζονται με τη δυναμική αεροσκαφών [7].

Αναφορές

- [1] Brunton, S. L., Proctor, J. L., & Kutz, J. N. (2016). Discovering governing equations from data by sparse identification of nonlinear dynamical systems. *Proceedings of the national academy of sciences*, 113(15), 3932-3937.
- [2] Brunton, S. L., Proctor, J. L., & Kutz, J. N. (2016). Sparse identification of nonlinear dynamics with control (SINDYc). *IFAC-PapersOnLine*, 49(18), 710-715.
- [3] Χουμπάεβ, Α., Μωυσής, Α. (2024). Αναγνώριση Μηχανικών Συστημάτων μέσω Εξωτερικών Μετρήσεων. 14^η Διεθνής Μαθηματική Εβδομάδα.
- [4] Stephen Roberts. Lecture notes on "Computing derivatives and integrals". *Engineering Computation Course*
- [5] Kacar, S., Wei, Z., Akgul, A., & Aricioglu, B. (2018). A novel 4D chaotic system based on two degrees of freedom nonlinear mechanical system. *Zeitschrift für Naturforschung A*, 73(7), 595-607.
- [6] Schmidt, M., & Lipson, H. (2009). Distilling free-form natural laws from experimental data. *science*, 324 (5923), 81-85.
- [7] Cao, R., Lu, Y., & He, Z. (2022). System identification method based on interpretable machine learning for unknown aircraft dynamics. *Aerospace Science and Technology*, 126, 107593.



Κβαντικές «τελείες» ...όταν το μέγεθος έχει σημασία



Σταύρος Πάνος
Υποψήφιος Διδάκτωρ
Τμήματος Φυσικής,
Α.Π.Θ.

Οι κβαντικές τελείες (Quantum Dots) αποτελούν το ακρογωνιαίο λίθο της νανοτεχνολογίας και της επιστήμης των υλικών στην νανοκλίμακα. Η μεγάλη ποικιλία φαινομένων και το ευρύ φάσμα υλικών από τα οποία μπορούν να κατασκευαστούν, διευρύνουν τις εφαρμογές των κβαντικών τελειών στα διεπιστημονικά πεδία, όπου ήδη πρωταγωνιστούν εφαρμογές της Νανο-

νοτεχνολογίας, όπως η τεχνολογία ημιαγωγών και η μικροηλεκτρονική, η φωτονική, η κατάλυση, η ιατρική ακριβείας κ.α. Βασική προϋπόθεση για την βελτιστοποίηση υφιστάμενων εφαρμογών και την δημιουργία νέων αποτελεί η ικανότητα κατασκευής κβαντικών τελειών με ακρίβεια, υψηλή πιστότητα και ασφάλεια. Οι βραβευθέντες με το Νόμπελ Χημείας για το 2023 είχαν κεντρικό ρόλο στην καθιέρωση αυτών των δυνατοτήτων των κβαντικών τελειών και με αυτόν τον τρόπο παρείχαν τους σπόρους για την περαιτέρω ανάπτυξη της Νανοτεχνολογίας.

Το μέγεθος έχει σημασία στη νανοκλίμακα

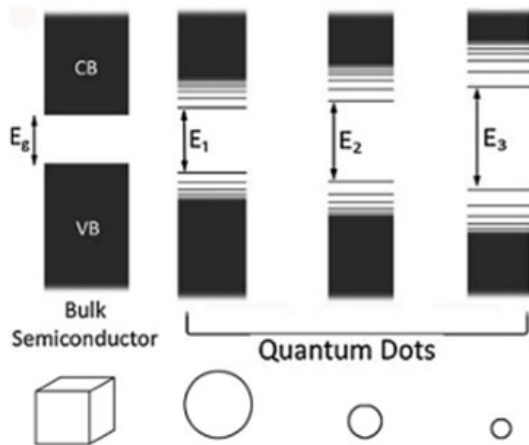
Στον νανόκοσμο, τα πράγματα συμπεριφέρονται διαφορετικά από ότι στον μικρόκοσμο. Μόλις οι διαστάσεις των υλικών αρχίσουν να μετριοούνται σε εκατομμυριοστά του χιλιοστού, τα κβαντικά φαινόμενα κυριαρχούν. Οι βραβευμένοι με Νόμπελ Χημείας του 2023 υπήρξαν πρωτοπόροι στην εξερεύνηση

του νανοκόσμου. Στις αρχές της δεκαετίας του 1980, ο Louis Brus και ο Aleksey Yekimov πέτυχαν να δημιουργήσουν, ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο, κβαντικές τελείες. Το 1993, ο Moungi Bawendi έφερε επανάσταση στις μεθόδους παρασκευής κβαντικών τελειών εξαιρετικά υψηλής ποιότητας, βασικό προαπαιτούμενο για την χρήση τους σε σύγχρονες εφαρμογές της νανοτεχνολογίας. Χάρη στο έργο των βραβευθέντων, η ανθρωπότητα είναι πλέον σε θέση να αξιοποιήσει μερικές από τις ιδιόμορφες ιδιότητες του νανοκόσμου. Οι κβαντικές τελείες βρίσκονται πλέον σε εμπορικά προϊόντα και χρησιμοποιούνται σε πολλούς επιστημονικούς κλάδους, από τη φυσική και τη χημεία έως την ιατρική.

Οι κβαντικές τελείες αποτελούν μια νέα κατηγορία υλικών που δεν ανήκουν ούτε στα μοριακά ούτε στα υλικά όγκου (bulk materials). Έχουν την ίδια δομή και ατομική σύνθεση με τα υλικά όγκου, αλλά οι ιδιότητές τους μπορούν να ρυθμιστούν χρησιμοποιώντας μία μόνο παράμετρο, το μέγεθος του σωματιδίου / της κβαντικής τελείας. Για παράδειγμα, η οπτική απορρόφηση και εκπομπή των κβαντικών τελειών CdSe μπορούν να συντονιστούν σε όλο σχεδόν το ορατό εύρος του οπτικού φάσματος. Αυτό είναι δυνατό επειδή το ενεργειακό χάσμα (E_g) των κβαντικών τελειών CdSe κυμαίνεται μεταξύ 1,8 eV (η μαζική του τιμή) έως 3 eV (στις μικρότερες κβαντικές τελείες, βλ. Σχ. 2). Άλλες ιδιότητες των υλικών που μπορούν να συντονιστούν από το μέγεθος της κβαντικής τελείας περιλαμβάνουν τα δυναμικά οξειδοαναγωγής, τη θερμοκρασία τήξης και τις μεταβάσεις μεταξύ στερεάς φάσης, για να αναφέρουμε μόνο μερικές.



Σχήμα 1: Μία κβαντική τελεία αποτελείται από μερικές χιλιάδες άτομα. Σε όρους μεγέθους, έχει την ίδια σχέση μεγέθους με την μπάλα ποδοσφαίρου, όση εκείνη που έχει η μπάλα ποδοσφαίρου με τη Γη.



Σχήμα 2: Σχηματική αναπαράσταση της εξάρτησης του χάσματος των ημιαγωγών με το μέγεθος του νανοσωματίδιου

Για δεκαετίες, τα κβαντικά φαινόμενα στον νανόκοσμο ήταν απλώς μια πρόβλεψη

Όταν ο Aleksey Yekimov και ο Louis Brus παρήγαγαν τις πρώτες κβαντικές τελείες, οι επιστήμονες γνώριζαν ήδη ότι μπορούσαν -θεωρητικά- να έχουν ασυνήθιστα χαρακτηριστικά. Το 1937, ο φυσικός Herbert Fröhlich είχε ήδη προβλέψει ότι τα νανοσωματίδια δεν θα συμπεριφέρονταν όπως τα άλλα σωματίδια. Διερεύνησε τις θεωρητικές συνέπειες της περίφημης εξίσωσης Schrödinger, η οποία δείχνει ότι όταν τα σωματίδια γίνονται εξαιρετικά μικρά, υπάρχει λιγότερος χώρος για τα ηλεκτρόνια του υλικού. Με τη σειρά τους, τα ηλεκτρόνια - που συμπεριφέρονται και ως κύματα αλλά και ως σωματίδια - συμπιέζονται μεταξύ τους. Ο Fröhlich συνειδητοποίησε ότι αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα δραστικές αλλαγές στις ιδιότητες του υλικού, ενώ ερευνητές χρησιμοποιώντας μαθηματικά εργαλεία, κατάφεραν να προβλέψουν πολυάριθμα κβαντικά φαινόμενα που εξαρτώνται από το μέγεθος των κβαντικών τελειών. Όμως η προσπάθεια κατασκευής τους κάθε άλλο παρά εύκολη ήταν, ιδιαίτερα για εκείνη την εποχή, καθώς θα έπρεπε να «κατασκευάσουν» κρυσταλλικά υλικά με διαστάσεις περίπου ένα εκατομμύριο φορές μικρότερες από την κεφαλή μίας καρφίτσας.

Την δεκαετία του 1970, οι ερευνητές κατάφεραν να φτιάξουν αυτά τα νανοδομικά υλικά. Χρησιμοποιώντας μοριακές δέσμες, δημιούργησαν επικάλυψη πάχους λίγων νανομέτρων πάνω από ένα παχύ υλικό - υπόστρωμα, και κατάφεραν να αποδείξουν ότι οι οπτικές ιδιότητες της επικάλυψης διέφεραν ανάλογα με το πόσο λεπτό ήταν το υλικό, μια παρατήρηση που ταίριαζε με τις προβλέψεις της κβαντι-

κής μηχανικής. Αυτή ήταν μια σημαντική ανακάλυψη, αλλά το πείραμα απαιτούσε πολύ προηγμένη τεχνολογία (εξαιρετικά υψηλό κενό $< 10^{-8}$ mbar) όσο και θερμοκρασίες κοντά στο απόλυτο μηδέν. Ωστόσο, σήμερα που η επιστήμη και η μηχανική έχουν αναπτυχθεί, προσφέρουν νέες δυνατότητες μελέτης, αρχής γενομένης από αυτή μιας αρχαίας εφεύρεσης: το έγχρωμο γυαλί.

Ο Aleksey Yekimov χαρτογραφεί τα μυστήρια του χρωματιστού γυαλιού

Το γεγονός ότι μια μεμονωμένη ουσία θα μπορούσε να οδηγήσει σε διαφορετικού χρώματος γυαλί ενδιέφερε τον Aleksey Yekimov, γιατί είναι στην πραγματικότητα παράλογο. Εάν ζωγραφίσετε μια εικόνα σε κόκκινο καδμίου, θα είναι πάντα κόκκινο καδμίου, εκτός εάν αναμειγνύετε άλλες χρωστικές. Πώς θα μπορούσε λοιπόν μια μεμονωμένη ουσία να δώσει γυαλί διαφορετικών χρωμάτων; Κατά τη διάρκεια του διδακτορικού του, ο Yekimov ειδικεύθηκε στους ημιαγωγούς, και χρησιμοποίησε οπτικές μεθόδους ως διαγνωστικά εργαλεία για την αξιολόγηση της ποιότητας των ημιαγωγών. Ο Yekimov ήταν εξοικειωμένος με αυτές τις μεθόδους, έτσι άρχισε να τις χρησιμοποιεί για να εξετάσει το έγχρωμο γυαλί. Μετά από κάποια αρχικά πειράματα, αποφάσισε να παράγει συστηματικά γυαλί που ήταν βαμμένο με χλωριούχο χαλκό. Θέρμανε το λιωμένο γυαλί σε μια περιοχή θερμοκρασιών μεταξύ 500°C και 700°C, μεταβάλλοντας τον χρόνο θέρμανσης από 1 ώρα σε 96 ώρες. Μόλις το γυαλί είχε κρυώσει και σκληρύνει, το μετρούσε σε διάταξη περίθλασης ακτίνων-X και παρατήρησε ότι μικροσκοπικοί κρύσταλλοι χλωριούχου χαλκού είχαν σχηματιστεί μέσα στο γυαλί, ενώ η διαδικασία κατασκευής επηρέασε το μέγεθος αυτών των σωματιδίων. Σε ορισμένα από τα δείγματα γυαλιού οι κρύσταλλοι χλωριούχου χαλκού ήταν περίπου δύο νανόμετρα, ενώ σε άλλα έφταναν έως και 30 νανόμετρα. Κατά την μελέτη των δειγμάτων του με οπτικές τεχνικές απέδειξε ότι η απορρόφηση του ορατού φωτός από το γυαλί επηρεάστηκε από το μέγεθος των σωματιδίων. Τα μεγαλύτερα σωματίδια απορρόφησαν το φως με τον ίδιο τρόπο όπως γίνεται στον μακρόκοσμο, όσο όμως τα σωματίδια μικραίνουν σε μέγεθος τόσο η απορρόφηση «μετακινούταν» στην υπεριώδη φασματική περιοχή. Ως φυσικός, ο Yekimov γνώριζε καλά τους νόμους της κβαντικής μηχανικής και γρήγορα συνειδητοποίησε ότι είχε παρατηρήσει ένα κβαντικό φαινόμενο που εξαρτάται από το μέγεθος (Σχ. 3). Αυτή ήταν η πρώτη φορά που κάποιος κατάφερε να παράγει σκόπιμα κβαντικές τελείες νανοσωματί-

δια που προκαλούν κβαντικά φαινόμενα εξαρτώμενα από το μέγεθος.

Το 1981, ο Yekimov δημοσίευσε την ανακάλυψή του σε ένα σοβιετικό επιστημονικό περιοδικό, αλλά αυτό ήταν δύσκολο να γίνει γνωστό στους ερευνητές του Δυτικού κόσμου, λόγω των περιορισμών του Ψυχρού Πολέμου. Ως εκ τούτου, ο επίσης βραβευμένος με Νόμπελ Χημείας του 2023 - ο Louis Brus - δεν γνώριζε την ανακάλυψη του Aleksey Yekimov όταν, το 1983, ανακάλυψε εξαρτώμενα από το μέγεθος κβαντικά φαινόμενα σε σωματίδια νανοδιαστάσεων που βρίσκονταν ελεύθερα σε ένα διάλυμα.

Ο Brus δείχνει ότι οι παράξενες ιδιότητες των σωματιδίων είναι κβαντικά αποτελέσματα

Ο Louis Brus εργαζόταν στα εργαστήρια της Bell στις Η.Π.Α., με μακροπρόθεσμο στόχο να πραγματοποιήσει χημικές αντιδράσεις χρησιμοποιώντας ηλιακή ενέργεια. Για να το πετύχει αυτό, χρησιμοποιούσε σωματίδια θειούχου καδμίου, τα οποία μπορούν να απορροφήσουν στο ορατό φάσμα και στη συνέχεια να χρησιμοποιήσουν την ενέργεια τους για να προκαλέσουν χημικές αντιδράσεις. Τα σωματίδια ήταν σε διάλυμα και το μέγεθος τους ήταν αρκετά μικρό, ώστε να έχουν περισσότερη ενεργό επιφάνεια. Κατά τη διάρκεια της εργασίας του με αυτά τα μικροσκοπικά σωματίδια, ο Brus παρατήρησε ότι οι οπτικές τους ιδιότητες άλλαξαν αφού τα είχε αφήσει για λίγο στον πάγκο του εργαστηρίου. Υπέθεσε ότι αυτό θα μπορούσε να οφείλεται στο ότι τα σωματίδια είχαν μεγαλώσει σε διαστάσεις, έτσι για να επιβεβαιώσει τις υποψίες του παρήγαγε σωματίδια θειούχου καδμίου που είχαν διάμετρο μόλις 4,5 νανόμετρα. Στη συνέχεια ο Brus συνέκρινε τις οπτικές ιδιότητες αυτών των σωματιδίων με εκείνες μεγαλύτερων σωματιδίων θειούχου καδμίου, τα οποία είχαν διάμετρο περίπου 12,5 νανόμετρα. Τα μεγαλύτερα σωματίδια απορρόφησαν φως στα ίδια μήκη κύματος όπως το θειούχο κάδμιο στο μακρόκοσμο, αλλά τα μικρότερα σωματίδια είχαν μια απορρόφηση που μετατοπιζόταν προς την κυανή φασματική περιοχή (Σχ. 3). Ακριβώς όπως ο Yekimov, ο Brus κατάλαβε ότι είχε παρατηρήσει ένα κβαντικό φαινόμενο που εξαρτάται από το μέγεθος. Δημοσίευσε τα αποτελέσματά του το 1983 και στη συνέχεια άρχισε να ερευνά σωματίδια που παράγονται από μια σειρά άλλων ουσιών. Το συμπέρασμα ήταν το ίδιο –

όσο μικρότερα ήταν τα σωματίδια, η απορρόφηση «μετακινούνταν» προς την υπεριώδη φασματική περιοχή.

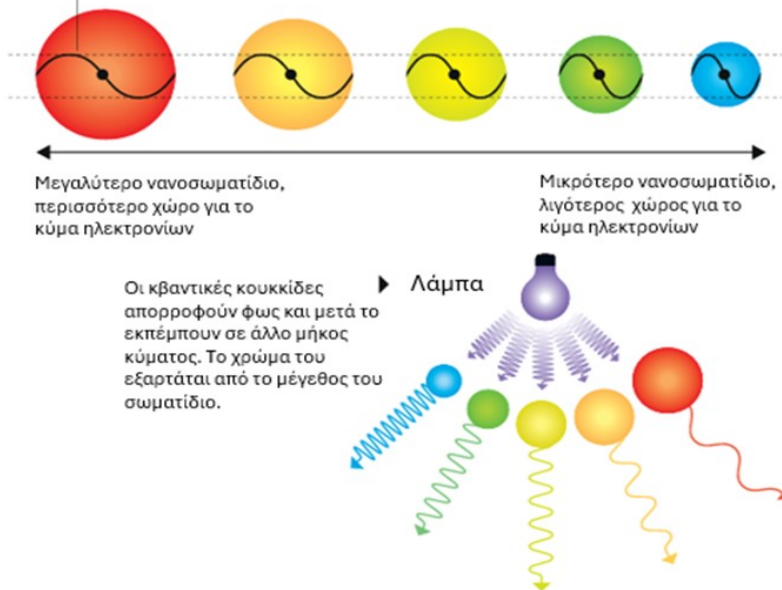
Ο Mounqi Bawendi φέρνει επανάσταση στην παραγωγή κβαντικών τελειών

Η παραγωγή κβαντικών τελειών ήταν το πρόβλημα που αποφάσισε να λύσει ο τρίτος βραβευμένος με Νόμπελ Χημείας φέτος. Ο Mounqi Bawendi ξεκίνησε τη μεταδιδακτορική του εκπαίδευση στο εργαστήριο του Louis Brus το 1988, όπου βρισκόταν σε εξέλιξη εντατική εργασία για τη βελτίωση των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή κβαντικών τελειών. Χρησιμοποιώντας μια σειρά διαλυτών, θερμοκρασιών και τεχνικών, πειραματίστηκε με μια ποικιλία υλικών για να σχηματίσει καλά οργανωμένους νανοκρυστάλλους. Και οι κρύσταλλοι γίνονταν καλύτεροι, αλλά και πάλι όχι όσο έπρεπε. Ωστόσο, ο Bawendi δεν το έβαλε κάτω. Όταν άρχισε να εργάζεται ως επικεφαλής ερευνητής στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης, MIT, συνέχισε τις προσπάθειές του για την παραγωγή νανοσωματιδίων υψηλότερης κρυσταλλικής ποιότητας. Η σημαντική ανακάλυψη έγινε το 1993, όταν η ερευνητική του ομάδα έκανε έγχυση των ουσιών που θα σχημάτιζαν νανοκρυστάλλους σε έναν θερμαινόμενο και προσεκτικά επιλεγμένο διαλύτη. Έκαναν

Κβαντικά φαινόμενα προκύπτουν όταν τα σωματίδια συρρικνώνονται

Όταν τα σωματίδια έχουν διάμετρο μόλις λίγα νανόμετρα, ο διαθέσιμος χώρος για τα ηλεκτρόνια συρρικνώνεται. Αυτό επηρεάζει τις οπτικές ιδιότητες των σωματιδίων

Κύμα Ηλεκτρονίου



Σχήμα 3: Εξάρτηση της οπτικής απορρόφησης σωματιδίων σε συνάρτηση με το μέγεθος τους

έγχυση όσες ουσίες χρειαζόταν για να κορεστεί με ακρίβεια το διάλυμα, κάτι που οδήγησε στο να αρχίσουν να σχηματίζονται μικροσκοπικοί κρύσταλλοι ταυτόχρονα (Σχ. 4). Στη συνέχεια, μεταβάλλοντας δυναμικά τη θερμοκρασία του διαλύματος, ο Mounqi Bawendi και η ερευνητική του ομάδα πέτυχαν να αναπτύξουν νανοκρυστάλλους συγκεκριμένου μεγέθους. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης, ο διαλύτης βοήθησε να δώσουν στους κρυστάλλους λεία και ομοιόμορφη επιφάνεια. Οι νανοκρύσταλλοι που παρήγαγε ο Bawendi ήταν σχεδόν τέλειοι, προκαλώντας ξεχωριστά κβαντικά αποτελέσματα. Επειδή η μέθοδος παραγωγής ήταν εύκολη στη χρήση, όλο και περισσότεροι χημικοί άρχισαν να εργάζονται στη νανοτεχνολογία και να ερευνούν τις μοναδικές ιδιότητες των κβαντικών τελειών.

Οι φωτεινές ιδιότητες των κβαντικών κουκκίδων βρίσκουν εμπορική χρήση

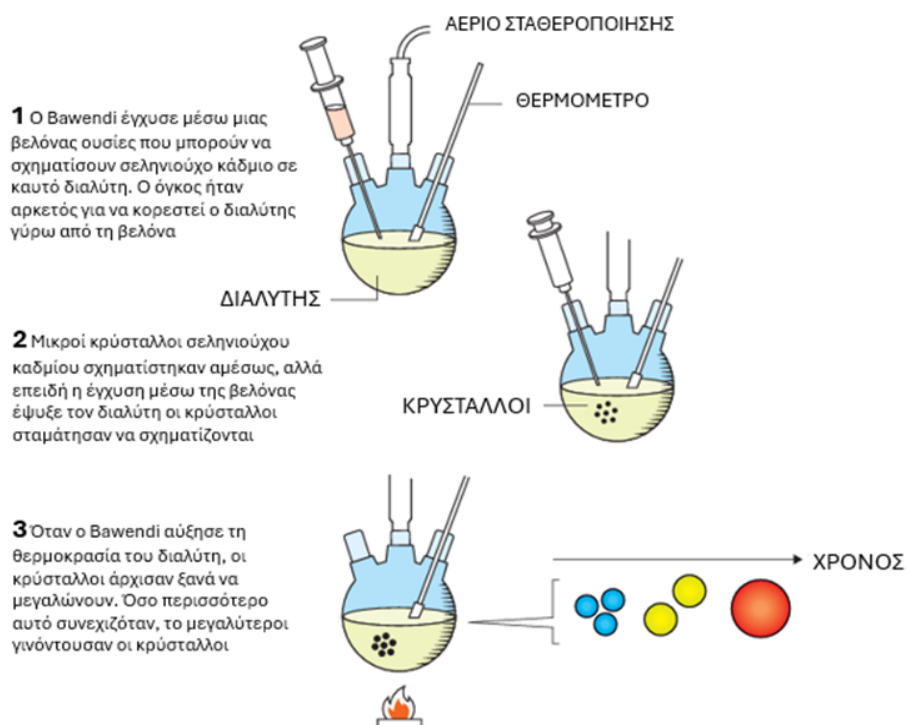
Τριάντα χρόνια αργότερα, οι κβαντικές τελείες αποτελούν πλέον σημαντικό μέρος της εργαλειοθήκης της νανοτεχνολογίας και βρίσκονται σε εμπορικά προϊόντα. Οι οπτικές ιδιότητες των κβαντικών τελειών χρησιμοποιούνται σε οθόνες υπολογιστών και τηλεοράσεων που βασίζονται στην τεχνολογία QLED, όπου το Q σημαίνει κβαντική τελεία (Quantum dot), ενώ το LED σημαίνει δίοδος εκπομπής φωτός (Light Emitting Diodes). Σε αυτές τις οθόνες, το μπλε φως παράγεται χρησιμοποιώντας τις ενεργειακά αποδοτικές διόδους εκπομπής φωτός (Νόμπελ Φυσικής 2014). Οι κβαντικές τελείες χρησιμοποιούνται για να αλλάξουν το χρώμα του μπλε φωτός, μετατρέποντάς το σε κόκκινο ή πράσινο. Αυτό καθιστά δυνατή την παραγωγή των τριών βασικών χρωμάτων που απαιτούνται για την λειτουργία της οθόνης. Ομοίως, οι κβαντικές τελείες χρησιμοποιούνται σε ορισμένους λαμπτήρες LED για τη ρύθμιση του ψυχρού φωτός των διόδων. Το παραγόμενο φως μπορεί να γίνει τόσο «ψυχρό» όσο το φως της ημέρας ή τόσο «ζεστό» όσο το φως που παράγει ένας «θαμπός» λαμπτήρας. Οι κβαντικές τελείες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν στη βιοχημεία και την ιατρική. Βιοχημικοί τοποθετούν

κβαντικές τελείες σε βιομόρια για τη χαρτογράφηση κυττάρων και οργάνων. Οι γιατροί έχουν αρχίσει να διερευνούν την πιθανή χρήση κβαντικών τελειών για την παρακολούθηση του ιστών ενός όγκου στο ανθρώπινο σώμα. Οι χημικοί αντ' αυτού χρησιμοποιούν τις καταλυτικές ιδιότητες των κβαντικών τελειών για να οδηγήσουν τις χημικές αντιδράσεις. Οι κβαντικές τελείες φέρνουν έτσι μεγαλύτερο όφελος στην ανθρωπότητα και ακόμα είμαστε στην αρχή της εξερεύνησης τους. Οι ερευνητές πιστεύουν ότι στο μέλλον οι κβαντικές τελείες θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εύκαμπτα ηλεκτρονικά, μικροσκοπικούς αισθητήρες, λεπτότερα ηλιακά κύτταρα και ίσως στην κρυπτογραφημένη κβαντική επικοινωνία. Ένα πράγμα είναι σίγουρο – απομένουν πολλά να μάθουμε για εκπληκτικά κβαντικά φαινόμενα.

Πηγές:

1. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/>
2. Yekimov, A. I. *Optical-Properties of Semiconductor Quantum Dots in Glass Matrix. Phys Scripta* 1991, T39, 217-222;
3. Efros, A. L.; Brus, L. E. *Nanocrystal Quantum Dots: From Discovery to Modern Development. ACS Nano* 2021, 15 (4), 6192-6210.
4. Dong G, Wang H, Chen G, Pan Q and Qiu J (2015) *Quantum dot-doped glasses and fibers: fabrication and optical properties. Front. Mater.* 2:13.

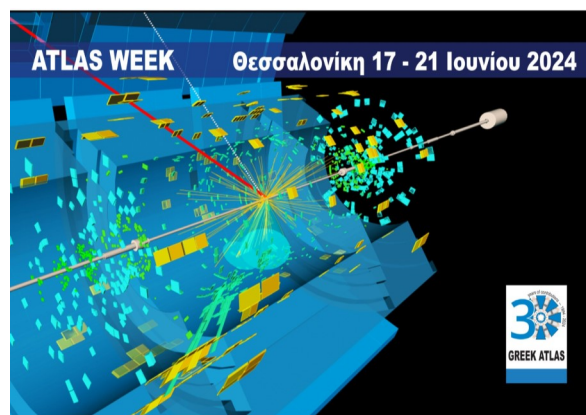
Πώς ο Mounqi Bawendi παρήγαγε κβαντικές τελείες



Σχήμα 4: Σχηματική αναπαράσταση παραγωγής κβαντικών τελειών από τον Mounqi Bawendi

το Μεγάλο Πείραμα του CERN ήρθε στο Α.Π.Θ.

Η διεθνής επιστημονική κοινότητα του Πειράματος ATLAS του CERN επέλεξε το Α.Π.Θ. για να πραγματοποιήσει το **ετήσιο Συνέδριο της, με τίτλο: «ATLAS WEEK 2024»**, από 17 έως 21 Ιουνίου 2024, στην Αίθουσα Τελετών του Α.Π.Θ. Καθοριστικό ρόλο στην επιλογή του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου είχε η συμβολή του ιδρύματος, μέσω του Εργαστηρίου Πυρηνικής Φυσικής και Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων του Τμήματος Φυσικής του ΑΠΘ, στην ανάπτυξη του Πειράματος ATLAS του CERN, στην επιστήμη της Φυσικής, τη βασική έρευνα και τις εφαρμογές της.



Στο Συνέδριο παρουσιάστηκαν οι τελευταίες εξελίξεις στις αναλύσεις για φλέγοντα θέματα φυσικής, με τα τελευταία δεδομένα του Μεγάλου Επιταχυντή Αδρονίων (LHC) που συλλέχθηκαν απ' το πείραμα ATLAS, καθώς και η πορεία στην αναβάθμιση των ανιχνευτών του πειράματος για την επόμενη φάση λειτουργίας, του επιταχυντή. Στο Συνέδριο συμμετείχαν εξέχοντες επιστήμονες από όλο τον κόσμο, και ειδικότερα περισσότεροι από 250 επιστήμονες από 38 χώρες και περισσότερα από 180 πανεπιστήμια και ερευνητικά ιδρύματα.

Η Κοσμητεία της Σχολής Θετικών Επιστημών του ΑΠΘ τίμησε τον Ιδρυτή του Πειράματος ATLAS, Καθηγητή Peter Jenni

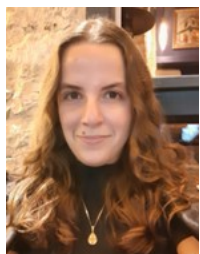
Το έτος 2024 σηματοδοτεί 70 χρόνια από την ίδρυση του CERN, του οποίου η Ελλάδα είναι ιδρυτικό μέλος. Στο πλαίσιο του Συνεδρίου, πραγματοποιήθηκε ανοιχτή εκδήλωση για τον εορτασμό της συμπλήρωσης 30 χρόνων της ελληνικής συμμετοχής στο πείραμα ATLAS. Στην εκδήλωση, η Κοσμητεία της Σχολής Θετικών Επιστημών του Α.Π.Θ. τίμησε τον **Ιδρυτή του Πειράματος ATLAS, Καθηγητή Peter Jenni**, για την πολύτιμη συμβολή του στην επιστήμη, την κοινωνική προσφορά του αλλά και τη στήριξή του στη σημαντική συνεισφορά του ΑΠΘ στο Πείραμα ATLAS. Η εκδήλωση πραγματοποιήθηκε την Τρίτη 18 Ιουνίου 2024 και ώρα 18.00, στην Αίθουσα Τελετών του Α.Π.Θ. Ο Καθηγητής Peter Jenni συμμετέχει στα πειράματα του CERN απ' το 1972, με καίριες συνεισφορές στην ανακάλυψη των αδρονικών πιδάκων και των σωματιδίων W και Z, φορέων της ασθενούς αλληλεπίδρασης. Από το 1980, ασχολείται με τον σχεδιασμό και υλοποίηση του Μεγάλου Αδρονικού Επιταχυντή και των πειραμάτων του και το 1992 δημιούργησε την κοινοπραξία ATLAS. Πρόσφατα, η συμβολή του ήταν καθοριστική στην Ανακάλυψη του Μποζονίου Higgs από το Πείραμα ATLAS.

30 χρόνια στο Πείραμα ATLAS στο CERN

Το Εργαστήριο Πυρηνικής Φυσικής και Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων του Τμήματος Φυσικής του Α.Π.Θ. συμμετέχει ενεργά τα τελευταία 30 χρόνια στο Πείραμα ATLAS στο CERN και έχει παίξει σημαντικό ρόλο τόσο με την κατασκευή και έλεγχο μεγάλου αριθμού σύγχρονων ανιχνευτών σωματιδίων με αυστηρές προδιαγραφές, όσο και στην ανακάλυψη του μποζονίου Higgs. Σήμερα, το Εργαστήριο, εκτός από την συμμετοχή του στο Πείραμα ATLAS, δραστηριοποιείται ενεργά σε εφαρμογές της Φυσικής Υψηλών Ενεργειών στην Διαγνωστική και Θεραπευτική Ιατρική, σε δράσεις Πολιτισμού, όπως η μη επεμβατική χαρτογράφηση τύμβων με Τομογραφία Μιονίων Κοσμικής Ακτινοβολίας, αλλά και στη μελέτη Έργων Τέχνης.

σύνθετα υλικά

... από την Formula 1 στην νανοκλίμακα



Φλώρα Μαντελάκη
Φοιτήτρια
Τμήματος Φυσικής,
Α.Π.Θ.

Δεδομένου ότι η επιστήμη δεν παύει συνεχώς να εξελίσσεται, ο τομέας της φυσικής των υλικών εξακολουθεί να εντυπωσιάζει μέλη και μη της επιστημονικής κοινότητας, αναδεικνύοντας καθημερινά καινοτόμες ιδέες και προχωρώντας σε νέες ανακαλύψεις που ξαφνιάζουν. Σε μια προηγμένη κοινωνία

όπως η δική μας, όλοι εξαρτόμαστε από σύνθετα υλικά σε κάποια πτυχή της ζωής μας, με τα τελευταία να συμβολίζουν την αιχμή της τεχνολογικής ανάπτυξης. Από τα αεροσκάφη και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έως την 3D εκτύπωση και την κατασκευή οχημάτων της Formula 1, τα σύνθετα υλικά κατέχουν μια εξέχουσα θέση ως προς την παροχή σημαντικών και επιθυμητών ιδιοτήτων, συμβάλλοντας με τον τρόπο αυτό τόσο στην πρόοδο της βιομηχανίας όσο και της ίδιας της επιστήμης.

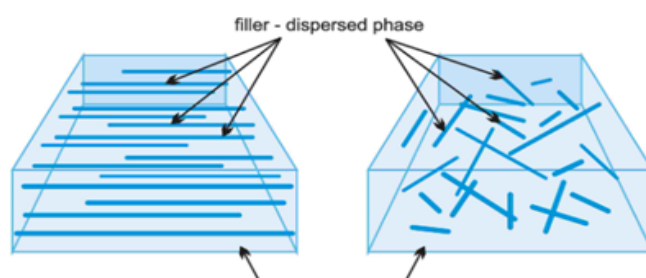
Πόσο «απλό» είναι ένα σύνθετο υλικό;

Τα σύνθετα υλικά (Composites) αποτελούνται συνήθως από δύο ή περισσότερα διαφορετικά υλικά προερχόμενα από τις κατηγορίες των μετάλλων, των κεραμικών και των πολυμερών. Μια ουσία, που ονομάζεται **μήτρα**, δρα ως συνδετικό υλικό, συγκρατώντας τις άλλες ουσίες, που ονομάζονται **ενισχύσεις** (ή **οπλισμός**) (Εικόνα 1). Αυτή η μοναδική σύνθεση επιτρέπει στα υλικά αυτά να διαθέτουν ένα συνδυασμό ιδιοτήτων, ανώτερων σε σύγκριση με τα επιμέρους συστατικά από τα οποία αποτελούνται. Κάποιες από τις ιδιότητες αυτές ενδέχεται να αφορούν για παράδειγμα αυξημένη αντοχή, αν-

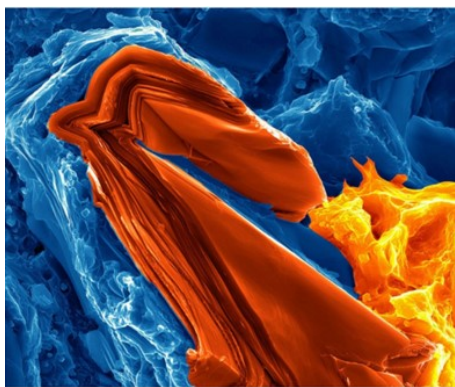
θεκτικότητα ή να προσδίδουν άλλα επιθυμητά χαρακτηριστικά στο τελικό σύνθετο υλικό.

Ιστορικά, ενώ τα πρώτα σύνθετα υλικά κατασκευάστηκαν από φυσικά υλικά όπως η λάσπη και το άχυρο, τα σημερινά σύνθετα υλικά δημιουργούνται εντός εργαστηρίου. Εν αντιθέσει με τα παραδοσιακά υλικά, όπου οι ουσίες αναμειγνύονται ή διαλύονται μαζί, τα μεμονωμένα υλικά διατηρούν τη χωριστή ταυτότητά τους. Στην πραγματικότητα τα επιμέρους συστατικά συνεργάζονται για να δώσουν στο σύνθετο μοναδικές ιδιότητες, αλλά εντός αυτού εύκολα μπορεί κανείς να τα ξεχωρίσει (Εικόνα 2).

Το μέλλον των σύνθετων υλικών χαρακτηρίζεται από συναρπαστικές τάσεις και καινοτομίες. Στον τομέα της σύγχρονης μηχανικής, τα παραδοσιακά υλικά ενδέχεται να μην έχουν τη βέλτιστη ισορροπία δομικών ιδιοτήτων για να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις εφαρμογών υψηλής απόδοσης. Ως εκ τούτου, τα υλικά με βάση ανθρακονήματα προσφέρουν ένα υλικό αντικατάστασης με εξαιρετικές αναλογίες αντοχής προς βάρος, επιτρέποντας ελαφρύτερες και πιο ανθεκτικές δομές. Τα σύνθετα έξυπνα μέταλλα είναι επίσης μια πρωτοποριακή κατηγορία υλικών που συνδυάζουν κράματα ή πολυμερή με μνήμη σχήματος με μεταλλικές μήτρες, αλλάζοντας το σχήμα ή τις ιδιότητές τους ως απόκριση σε εξωτερικούς παράγοντες όπως η θερμοκρασία ή το στρες.



Εικόνα 1: Απεικονίζοντας τις φάσεις ενός σύνθετου υλικού.



Εικόνα 2 : Απεικόνιση μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου ενός σύνθετου μήτρας μαγνησίου ενισχυμένο με καρβίδιο αλουμινίου/τιτανίου (ψευδές χρώμα).

Formula 1: Εφαρμογές σύνθετων υλικών στον μηχανοκίνητο αθλητισμό

Τα σύνθετα εξαρτήματα αντιπροσωπεύουν πλέον έως και το 85 % των σημερινών αυτοκινήτων της Formula 1, αλλά μόνο περίπου το 20 % του βάρους (Εικόνα 3). Οι ίνες άνθρακα εξασφαλίζουν απίστευτη αναλογία αντοχής προς βάρος, καθιστώντας το κατάλληλο για την απορρόφηση υψηλών φορτίων, συμβάλλοντας στην θερμική και μηχανική αντίσταση και επιτρέποντας βελτιώσεις στην αεροδυναμική απόδοση και αύξηση της δομικής αντοχής των αυτοκινήτων (Εικόνα 4).

Η McLaren ήταν η πρώτη ομάδα που αγωνίστηκε με σασί κατασκευασμένο εξ' ολοκλήρου από ανθρακονήματα το 1981, ενώ πιο πρόσφατα εισήγαγε τις ίνες λίνου ως υποκατάστατο των παραδοσιακών ινών άνθρακα το 2020, μια πρωτοποριακή ανακάλυψη που μπορεί να μεταμορφώσει περαιτέρω τον μηχανοκίνητο αθλητισμό και όχι μόνο. Ένα νέο αγωνιστικό κάθισμα φυσικών ινών, καθιστά το πρώτο ανταλλακτικό



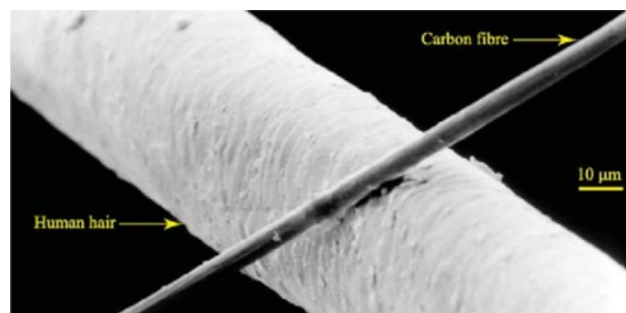
Εικόνα 3: Τα σύγχρονα οχήματα της Formula 1 αποτελούνται κατά βάση από σύνθετα εξαρτήματα.

αυτοκινήτου της Formula 1 που κατασκευάζεται από ανανεώσιμες υφαντικές ίνες, βελτιστοποιώντας τις μηχανικές ιδιότητες των ινών μέσω της αρχιτεκτονικής του υφάσματος, προσδίδοντας αφενός την απαιτούμενη αντοχή και ακαμψία, και αφετέρου 75 % χαμηλότερο αποτύπωμα CO₂ σε σύγκριση με το αντίστοιχο από ανθρακονήματα (Εικόνα 4). Η χρήση των συγκεκριμένων ινών αποτελεί μια βιώσιμη εναλλακτική, μειώνοντας τους κραδασμούς, και ενισχύοντας την ασφάλεια.

Σήμερα, τα αυτοκίνητα χρησιμοποιούν πολλαπλές ρητίνες προσαρμοσμένες για πολύ συγκεκριμένες εφαρμογές. Την αρχή ενός νέου κεφαλαίου σηματοδοτεί η τρισδιάστατη εκτύπωση σύνθετων υλικών υψηλής απόδοσης, που είναι ικανά να αντικαταστήσουν μεταλλικά εξαρτήματα. Ο στόχος είναι να παραχθούν εξαρτήματα που είναι δύσκολο ή αδύνατο να κατασκευαστούν με άλλες μεθόδους παραγωγής λόγω εξαιρετικά πολύπλοκων γεωμετριών.

Νανοσύνθετα υλικά και μελέτη της μικροδομής

Αναμφισβήτητα η νανοτεχνολογία βρίσκεται σήμερα στο επίκεντρο της τρέχουσας ερευνητικής δραστηριότητας, με την ανάπτυξη νανοσύνθετων υλικών να αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της επιστημονικής και βιομηχανικής προόδου. Ο βασικός λόγος της σύνθεσης νανοϋλικών επικεντρώνεται στη βελτίωση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, καθιστώντας τα κατάλληλα για εφαρμογές στα ηλεκτρονικά και την αποθήκευση ενέργειας. Τα νανοϋλικά με βάση τον άνθρακα όπως τα φουλερένια, οι νανοσωλήνες



Εικόνα 4 : Μικροσκοπική σύγκριση ανθρακονήματος με ανθρώπινη τρίχα.



Εικόνα 5 : Αγωνιστικά καθίσματα κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά φυσικών ινών.

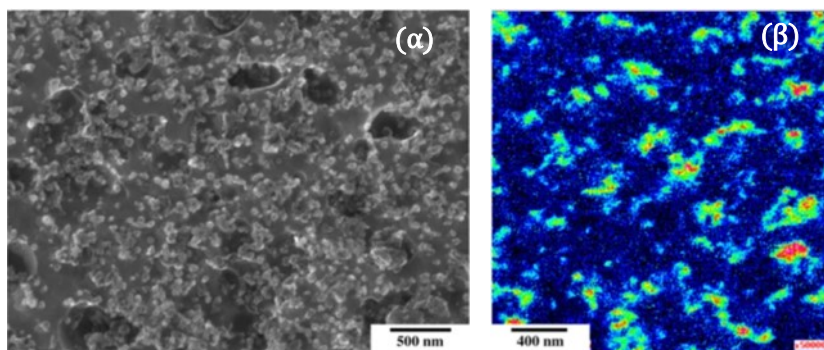
άνθρακα και το γραφένιο αποτελούν πρόκληση ως προς την υπέρβαση των σημερινών περιορισμών των συμβατικών υλικών, παρέχοντας εξαιρετικές ιδιότητες και σταθερές μοριακές δομές που προκαλούνται από ισχυρούς sp^2 δεσμούς. Η χρήση της τεχνητής νοημοσύνης για τη σύνθεση νανοσωματιδίων έχει λάβει πρόσφατα μεγάλη προσοχή. Άλλες καινοτομίες στα νανοσύνθετα υλικά περιλαμβάνουν τις δυνατότητες αυτοίασης, όπου τα νανοσωματίδια ή οι νανοκάψουλες απελευθερώνουν θεραπευτικούς παράγοντες όταν προκύψει βλάβη, οδηγώντας σε αυτόνομη επισκευή της σύνθετης δομής.

Προκειμένου να καταλήξει κανείς στις επιθυμητές ιδιότητες που θα πρέπει να παρουσιάζουν τα σύνθετα και νανοσύνθετα υλικά, άκρως σημαντική καθίσταται η περεταίρω μελέτη της δομής τους, με στόχο τη βελτιστοποίησή τους. Τα χαρακτηριστικά της μικροδομής μπορούν να αναλυθούν χρησιμοποιώντας μια ποικιλία τεχνικών χαρακτηρισμού. Το κλάσμα όγκου του οπλισμού στη μήτρα μετράται ποσοτικά χρησιμοποιώντας περίθλαση ακτίνων X (XRD), φασματοσκοπία φωτοφωταύγειας ακτίνων X (XPS) και άλλες μεθόδους. Τα νανοϋλικά άνθρακα που είναι ενσωματωμένα στο τελικό σύνθετο μπορούν να εξεταστούν σε εικόνες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM), ενώ ταυτόχρονα μπορεί να λάβει χώρα και η φασματοσκοπία ηλεκτρονί-

ων Auger (AES). Ο στοιχειακός χάρτης AES απεικονίζει την κατανομή της πλούσιας σε άνθρακα φάσης στο σύνθετο υλικό, επιτρέποντας την ανάλυση σύνθεσης νανοκλίμακας λόγω της σχετικά μικρής μέσης ελεύθερης διαδρομής των ηλεκτρονίων Auger της τάξης των λίγων νανομέτρων σε σύγκριση με εκείνα των ακτίνων X (Εικόνα 6).

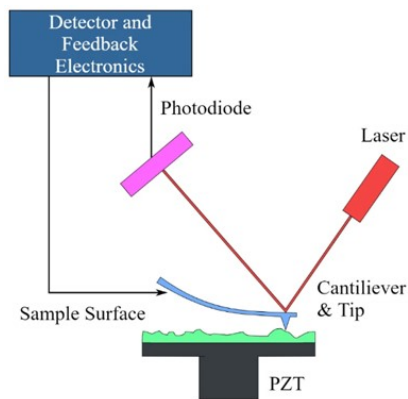
Τεράστιο ενδιαφέρον παρουσιάζουν όσον αφορά την τρέχουσα έρευνα και ανάπτυξη νανοϋλικά με βάση τα πολυμερή, τα οποία συντίθενται σε γενικές γραμμές από την πολυμερική μήτρα - συνήθως μία εποξειδική ρητίνη - και τις νανοϊνες ή τα νανοσωματίδια ως ενισχυτική φάση. Τέτοιου είδους υλικά διαθέτουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες συγκρίσιμες με αυτές του χάλυβα και πλεονεκτούν από αυτόν στο βάρος. Το στρώμα διεπαφής μεταξύ ενίσχυσης και μήτρας είναι το κλειδί για τη συνολική αντοχή και σταθερότητα του τελικού σύνθετου συστήματος. Η κατανόηση και ο χαρακτηρισμός αυτού του επιφανειακού στρώματος είναι, επομένως, ένα ουσιαστικό βήμα στην ανάπτυξη σύνθετων υλικών με βάση πολυμερή.

Η μικροσκοπία ατομικών δυνάμεων (AFM) είναι μια τεχνική ικανή να προσφέρει τον χαρακτηρισμό των μηχανικών ιδιοτήτων και της μορφολογίας σε νανοκλίμακα. Το μικροσκόπιο ατομικών δυνάμεων χρησιμοποιεί ένα εξαιρετικά αιχμηρό άκρο το οποίο σαρώνει το δείγμα, χαρτογραφώντας την τοπογραφία του μέσω μιας σειράς φυσικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ του άκρου και του δείγματος. Καθώς το άκρο



Εικόνα 6: (α) Μικρογραφία SEM και (β) Χάρτης AES για άνθρακα, που ελήφθη από σύνθετα υλικά αλουμινίου/ νανοσωλήνων άνθρακα (Al/CNT) έπειτα από επεξεργασία με τριβή.

έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια, καταγράφεται η κίνηση της δοκού η οποία είναι ενδεικτική της δύναμης αλληλεπίδρασης κορυφής – δείγματος, χρησιμοποιώντας μια δίοδο λέιζερ και έναν φωτοανιχνευτή (Εικόνα 7).



Εικόνα 7 : Αρχή λειτουργίας ηλεκτρονικού μικροσκοπίου ατομικών δυνάμεων (AFM).

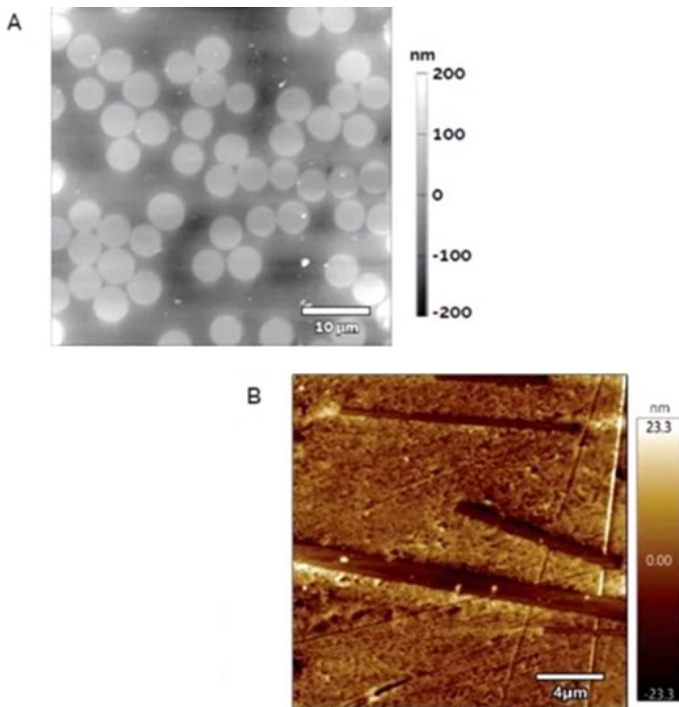
Η ηλεκτρονική μικροσκοπία ατομικών δυνάμεων αποτελεί μια ιδιαιτέρως χρήσιμη μέθοδο όσον αφορά τον χαρακτηρισμό της επιφανειακής δομής ενός δείγματος, ικανή να παράσχει πληροφορίες για διάφορα χαρακτηριστικά όπως για παράδειγμα η τραχύτητα της επιφάνειας,

υπογραμμίζοντας τη δομή της ενίσχυσης εντός της μήτρας. Η ικανότητα χαρακτηρισμού της διεπαφής ενίσχυσης – μήτρας είναι ζωτικής σημασίας όταν πρόκειται για την κατανόηση και τη βελτιστοποίηση της ανάπτυξης και παραγωγής σύνθετων υλικών με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες (Εικόνα 8). Οι κατάλληλες μέθοδοι χαρακτηρισμού είναι συνεπώς ιδιαίτερα σημαντικές, καθώς αυτό το στρώμα μπορεί να κυμαίνεται από κλίμακα νανομέτρου έως μικρομέτρου όσον αφορά το μήκος.

Συμπερασματικά, τα σύνθετα υλικά αποτελούν παράδειγμα της διασταύρωσης της καινοτομίας και της πρακτικότητας στη σύγχρονη μηχανική. Μέσα από μια ολοκληρωμένη κατανόηση της σύνθεσης, των τύπων και των εφαρμογών τους, γίνεται εμφανές πώς τα υλικά αυτά καθίστανται πλέον απαραίτητα σε διάφορες βιομηχανίες, απέναντι σε νέες προκλήσεις οι οποίες αποτελούν αναπόσπαστο μέρος των μελλοντικών εξελίξεων. Κοιτάζοντας προς έναν ορίζοντα γεμάτο τεχνολογική πρόοδο, ο ρόλος των σύνθετων υλικών στην προώθηση της αποδοτικότητας, της βιωσιμότητας και της απόδοσης συνεχίζει να αυξάνεται, σηματοδοτώντας ένα νέο κεφάλαιο στην εξέλιξη της επιστήμης των υλικών.

Πηγές

- <https://appmicro.springeropen.com/articles/10.1186/s42649-019-0024-2>
- <https://www.science.org.au/curious/technology-future/composite-materials>
- <https://www.essentialchemicalindustry.org/materials-and-applications/composites.html>
- <https://www.compositesworld.com/news/formula-one-team-adopts-3d-printing-technology-to-transform-component-design-production-2>
- <https://www.formula1.com/en/latest/article/mclaren-announce-first-of-its-kind-recycled-carbon-fibre-trial-for-united.1A05ukenWnG10IZQIFMbk9>
- <https://www.compositesworld.com/news/mclaren-bcomp-uses-natural-composite-fibers-in-f1-racing-seat>
- <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=5990>



Εικόνα 8 : Εικόνες AFM (A) σύνθετου εποξειδικής ρητίνης ενισχυμένης με ανθρακονήματα και (B) σύνθετο νιφάδων /ρητίνης γυαλιού.

ατύχημα στον πυρηνικό σταθμό Fukushima Daiichi



**Κωνσταντίνος
Χεριστανίδης**
Φοιτητής Τμήματος
Φυσικής
Α.Π.Θ.

Ένα σημαντικό μάθημα για την παγκόσμια κοινότητα στον τομέα της πυρηνικής ενέργειας αποτέλεσε το πυρηνικό ατύχημα στο σταθμό Fukushima Daiichi στην πόλη Ōkuma της Ιαπωνίας (Εικ. 1). Έλαβε χώρα στις 11 Μαρτίου 2011, όταν ένας ισχυρός σεισμός 9,0 Ρίχτερ και το επακόλουθο τσουνάμι έπληξαν την ανατολική ακτή της Ιαπωνίας.

Μία αλυσίδα από γεγονότα

προκάλεσε διαρροές ραδιενέργειας και κατέστρεψε οριστικά πολλούς από τους αντιδραστήρες του, καθιστώντας αδύνατη την επαναλειτουργία τους. Το ατύχημα είχε σοβαρές επιπτώσεις στην περιοχή, προκαλώντας εκτεταμένη ραδιενεργή μόλυνση και αναγκάζοντας χιλιάδες ανθρώπους να εκκενώσουν τις κατοικίες τους.

Έντεκα αντιδραστήρες σε τέσσερις πυρηνικούς σταθμούς βρίσκονταν σε λειτουργία και όλοι έκλεισαν αυτόματα όταν συνέβη ο σεισμός. Οι μονάδες που έκλεισαν ήταν οι Fukushima Daiichi 1, 2, 3 και Fukushima Daini 1, 2, 3, 4, Onagawa 1, 2, 3 του Tohoku και To- kai της Japco. Οι μονάδες 4, 5 και 6 της Fukushima Daiichi δεν λειτουργούσαν εκείνη τη στιγμή, αλλά επηρεάστηκαν. Το κύριο πρόβλημα επικεντρώθηκε αρχικά στις μονάδες Fukushima Daiichi 1-3 ενώ στη 4^η μονάδα παρουσιάστηκαν προβλήματα την πέμπτη ημέρα. Η ισχύς των αντιδραστήρων ήταν 460 MWe για τη μονάδα 1, 784 MWe για τις μονάδες 2-5 και 1100 MWe για τη μονάδα 6.



**Εικόνα 1: Αεροφωτογραφία πυρηνικού σταθμού
Fukushima Daiichi.**

Boiling water Reactors

Οι αντιδραστήρες του πυρηνικού σταθμού Fukushima Daiichi ήταν αντιδραστήρες BWR (Boiling Water Reactors), οι οποίοι είναι θερμικοί αντιδραστήρες σχάσης, ψυχτικού ελαφρού ζέοντος ύδατος και αμέσως μετά από τους PWR (Pressurised Water Reactors) είναι οι πλέον πιο διαδεδομένοι στον κόσμο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. (Εικ. 2)

Οι αντιδραστήρες αυτοί βασίζονται στην αντίδραση της σχάσης ραδιενεργών στοιχείων, όπως το ουράνιο. Σε μία τέτοια αντίδραση παράγονται δύο θυγατρικοί πυρήνες, ένα σύνολο νετρονίων (δύο με τρία) και ένα ποσό θερμότητας. Όμως περίπου το 80 % της ενέργειας που απελευθερώνεται με τη σχάση εμφανίζεται τελικώς ως θερμότητα. Οι ενέργειες που εκπέμπονται είναι αρκετά υψηλές και αυτός είναι ο λόγος κατασκευής αυτών των διατάξεων ώστε να μπορούν να αξιοποιούν αυτή την ενέργεια προς όφελος της κοινωνίας. Οι αντιδραστήρες είναι μια διάταξη σχάσιμων και άλλων υλικών, σε κατάλληλες πυκνότητες και γεωμετρίες, ώστε να επιτρέπουν μια αυτοσυντήρητη αλυσιδωτή αντίδραση σχάσεων με νετρόνια.

Μια τυπική διάταξη ενός πυρηνικού αντιδραστήρα (Εικ. 3) περιλαμβάνει τα παρακάτω βασικά στοιχεία:

1. Πυρήνας/καρδιά αντιδραστήρα (reactor core): αποτελείται από το καύσιμο, τον επιβραδυντή και τις ράβδους ελέγχου

i. Καύσιμο (fuel): είναι το σχάσιμο υλικό του αντιδραστήρα (^{233}U , ^{235}U ή ^{239}Pu) που περιλαμβάνει συνήθως εμπλουτισμένο ^{235}U κατά 2,8 %, και στη περίπτωση των BWR υπάρχουν 170 tn UO_2 (διοξείδιο του ουρανίου). Τα ορυκτά που χρησιμοποιούνται ως καύσιμο είναι πλούσια σε UO_2 (65-90 %) τα οποία περιέχουν μόλις 0,72 % ραδιενεργού ^{235}U ενώ το υπόλοιπο είναι μη ραδιενεργό ^{238}U . Για το λόγο αυτό απαιτείται η επεξεργασία τους ώστε να εμπλουτιστούν. Το καύσιμο υλικό είναι τοποθετημένο εντός ράβδων όπου το σύνολο αυτών δημιουργεί μία συστοιχία τετραγωνικής διατομής. Στους BWR αντιδραστήρες οι ράβδοι καυσίμου είναι συνολικά 46,000, μήκους περίπου 3,7 m και διαμέτρου 0,0125 m, και έχουν κατασκευαστεί από κράμα ζirkονίου.

ii. Επιβραδυντή (moderator): ένας BWR είναι ένας αντιδραστήρας ελαφρού ύδατος και η επιβράδυνση των νετρονίων καθώς και η ψύξη γίνεται με ελαφρύ νερό,

H₂O. Απαιτείται επιβραδυντής ώστε τα παραγόμενα από την αντίδραση σχάσης ταχέα νετρόνια να γίνουν θερμικά, να βρίσκονται δηλ. σε θερμική ισορροπία με το περιβάλλον τους, κοντά στην περιοχή των 0,1 eV.

iii. Ράβδοι ελέγχου (control rods): οι ράβδοι περιλαμβάνουν υλικά με υψηλή ενεργό διατομή απορρόφησης νετρονίων. Ο σκοπός αυτών είναι να ελέγχουν το ρυθμό σχάσεων του αντιδραστήρα. Να σημειωθεί ότι ο ρυθμός σχάσεων (συνεπώς και της θερμικής ισχύς) είναι προσεγγιστικά ανάλογος του συνολικού αριθμού νετρονίων στον αντιδραστήρα.

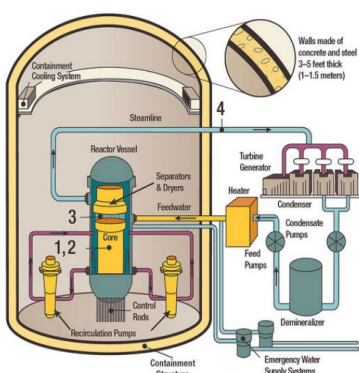
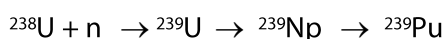
2. Ανακλαστής (reflector): είναι υλικό που περιβάλλει τον πυρήνα του αντιδραστήρα ώστε τα νετρόνια που διαφεύγουν να ανακλώνται ξανά σε αυτόν. Το υλικό αυτό έχει μικρή ενεργό διατομή απορρόφησης νετρονίων και αντίστοιχη υψηλή για τη σκέδαση αυτών. Επίσης, έχει παρόμοιες ιδιότητες με τον επιβραδυντή.

3. Θερμική και βιολογική θωράκιση (thermal shielding): πρόκειται για ένα έλασμα σιδήρου (ή χαλύβδινο) πάχους μερικών εκατοστών για την απορρόφηση ακτινοβολιών και τη μείωση της έντασης τους σε επίπεδα ανεκτά για τη διατήρηση των εξαρτημάτων του αντιδραστήρα και την αποφυγή καταπόνησης αυτών. Όσον αφορά τη βιολογική θωράκιση αποτελείται συνήθως από κοινό νερό ή σκυρόδεμα πάχους ορισμένων μέτρων για την περαιτέρω εξασθένιση της εκπεμπόμενης από τον πυρήνα του αντιδραστήρα ακτινοβολίας και για την καλύτερη προστασία των εργαζομένων.

4. Δοχείο πίεσης (pressure vessel): Η καρδιά του αντιδραστήρα και ο σχετικός εξοπλισμός του κυκλώματος του ψυκτικού περιέχονται συνήθως μέσα σε δοχείο πίεσης.

5. Δοχείο εγκλωβισμού (containment vessel): είναι κατασκευασμένο από οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 1 m και υπενδεδυμένο εσωτερικά με στεγανό χαλύβδινο έλασμα. Σκοπός του είναι να αντέχει τις αναμενόμενες μεγάλες πιέσεις και να εγκλωβίζει τα ραδιενεργά προϊόντα σε περίπτωση ατυχήματος.

Μία από τις αντιδράσεις που πραγματοποιούνται εντός του πυρήνα είναι αυτή του ισότοπου του ουρανίου:



Εικόνα 3 : Διάγραμμα βημάτων λειτουργίας BWR.

Εικόνα 4: Αναλυτικό διάγραμμα πυρήνα του BWR.

Το ²³⁹U είναι ραδιενεργό και αποδιεγείρεται με εκπομπή ακτινοβολίας β με ημιζωή 23,5 min σε ²³⁹Np όπου επίσης αποδιεγείρεται σε ²³⁹Pu αλλά με ημιζωή 23,5 days.

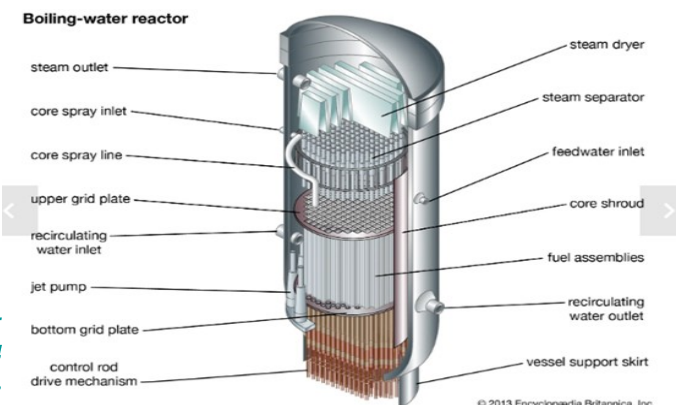
Ένα τυπικό διάγραμμα ενός αντιδραστήρα ψυκτικού ελαφρού ζέοντος ύδατος φαίνεται στην Εικ. 4 με απαρίθμηση των βασικών βημάτων λειτουργίας.

- Ο πυρήνας παράγει θερμότητα από τις αλυσιδωτές αντιδράσεις σχάσης που πραγματοποιούνται εντός του.
- Το ψυκτικό του αντιδραστήρα (καθαρό νερό) κινείται προς τα πάνω και μέσω του πυρήνα απορροφά τη θερμότητα που παράγει. Το ψυκτικό θερμαίνεται περίπου στο 286 °C, συνεπώς βράζει εντός του δοχείου πίεσης και παράγεται ένα μίγμα ατμού-νερού.
- Το μίγμα αυτό διαφεύγει από τον πυρήνα και εισέρχεται στα δύο στάδια διαχωρισμού υγρασίας πάνω από το δοχείο πίεσης. Οι σταγόνες πίεσης αφαιρούνται από τον ατμό μέσω φυγόκεντρων διαχωριστών.
- Ο αποξηραμένος ατμός κατευθύνεται απευθείας στον στρόβιλο με πίεση 68-71 bar. Ο στρόβιλος συνδέεται με μία ηλεκτρική γεννήτρια και από τη περιστροφή της παράγεται ηλεκτρική ενέργεια.

Στην συνέχεια, ο αχρησιμοποίητος ατμός εξαντλείται στον συμπυκνωτή όπου συμπυκνώνεται σε νερό. Το παραγόμενο νερό μέσω μιας σειράς αντλιών εισέρχεται στο συμπυκνωτή και στην συνέχεια θερμαίνεται ξανά όπου καταλήγει πίσω στο δοχείο του αντιδραστήρα ως νερό τροφοδοσίας. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του BWR που τον διαφοροποιεί από υπόλοιπους αντιδραστήρες είναι το κλειστό σύστημα ατμού-νερού. Η παρουσία ατμού μειώνει την πίεση του αντιδραστήρα περίπου στο μισό σε σύγκριση με τον PWR, μειώνοντας έτσι το πάχος θωράκισης και το κόστος παραγωγής. Η ολική απόδοση ενός τέτοιου αντιδραστήρα είναι 33-34 %.

Κατασκευή του πυρηνικού σταθμού

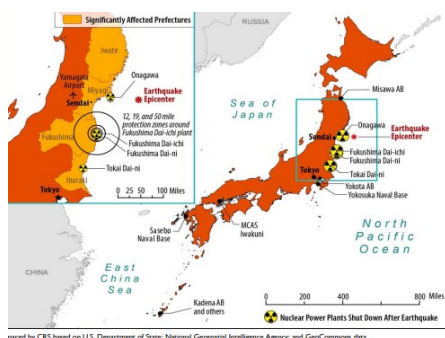
Βάσει των τσουνάμι που προέκυψαν από μεγάλους σεισμούς στην Ιαπωνία τον περασμένο αιώνα, το υψόμετρο ασφαλείας των αντιδραστήρων θεωρήθηκε ε-



παρκές. Το εργοστάσιο Daiichi κατασκευάστηκε 10 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, με τις αντλίες θαλασσινού νερού 4 m ψηλότερα και το τοίχος θαλάσσης στα 5 m. Το εργοστάσιο Daiin χτίστηκε 13 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Παρόλο που 18 χρόνια πριν την καταστροφή του 2011, επιστημονικά δεδομένα έδειχναν πιθανότητα τσουνάμι ύψους 15,7 m, κανένας φορέας ή η κυβέρνηση δεν ευαισθητοποιήθηκαν. Το ύψος των εργοστασίων διατηρήθηκε χαμηλό για να μειωθεί το κόστος λειτουργίας των αντλιών θαλασσινού νερού. Η πεποίθηση ότι τα πυρηνικά εργοστάσια ήταν απόλυτα ασφαλή οδήγησε στην έλλειψη επαρκούς προετοιμασίας για σοβαρά ατυχήματα όπως αυτό που ακολούθησε.

Ο μεγάλος σεισμός

Ο σεισμός που πραγματοποιήθηκε ήταν μεγέθους 9 Ρίχτερ και σημειώθηκε στις 14:46 στις 11/04/2011, με επίκεντρο κοντά στο νησί Χόνσου και 24,4 km κάτω από τον πυθμένα του δυτικού Ειρηνικού Ωκεανού. (Εικ. 5) Η διάρκεια του ήταν 6 min και ήταν ένας από τους ισχυρότερους που είχαν ποτέ καταγραφεί, ακολουθούμενος από εκατοντάδες μετασεισμοί μεγέθους 6 και 7 Ρίχτερ. Ο σεισμός που πραγματοποιήθηκε ήταν τόσο ισχυρός που έγινε αισθητός ακόμη και στη Ρωσία, Petropavlovsk-Kamchatsky, ενώ εκείνη την ημέρα δορυφόρος σε τροχιά εκτός της ατμόσφαιρας ανίχνευσε υπέρηχους. Ο σεισμός ήταν τόσο ισχυρός ώστε προκάλεσε μετακίνηση του άξονα της Γης κατά 10 cm ενώ το ίδιο το νησί Χονσού, μετακινήθηκε 2,4 m ανατολικότερα.



Εικόνα 5: Χάρτης σεισμού Ιαπωνίας, 21/04/2011

Όταν έγινε ο μεγάλος σεισμός στην Ιαπωνία, το εργοστάσιο Fukushima Daiichi ήταν αυτό που επλήγη περισσότερο. Οι αντιδραστήρες 4, 5 και 6 ήταν ανενεργοί για συντήρηση και ανατροφοδότηση, ενώ οι αντιδραστήρες 1, 2 και 3 ήταν σε πλήρη λειτουργία. Οι αντιδραστήρες έκλεισαν αυτόματα χωρίς σοβαρές ζημιές, καθώς αισθητήρες ανίχνευσαν τη σεισμική κίνηση και ενεργοποίησαν το σύστημα προστασίας. Ωστόσο, η παραγωγή θερμότητα συνεχίστηκε, απαιτώ-

ντας λειτουργία των συστημάτων ψύξης η οποία βασιζόταν στην ηλεκτρική ενέργεια. Ο σεισμός κατέστρεψε τον εξοπλισμό και τις γραμμές ρεύματος, προκαλώντας ολική απώλεια ηλεκτρικής ενέργειας. Οι εφεδρικές γεννήτριες ντίζελ ενεργοποιήθηκαν αυτόματα και στις έξι μονάδες, μειώνοντας τη θερμοκρασία και την πίεση στους αντιδραστήρες χωρίς περαιτέρω προβλήματα.

Το μεγάλο τσουνάμι

Ο σεισμός προκάλεσε ισχυρή εκτόπιση τεράστιων ποσοτήτων νερού, δηλαδή μία σειρά από καταστροφικά κύματα μεγάλου ύψους προς όλες τις κατευθύνσεις. Τα τσουνάμι έπληξαν την Ιαπωνία, προκαλώντας τεράστιες υλικές ζημιές αλλά και θανάτους, ειδικά τις περιοχές που ήταν στην ακτογραμμή της χώρας. Όμως, αποτέλεσε και την αφορμή για το δεύτερο μεγαλύτερο πυρηνικό ατύχημα στην ιστορία μετά από αυτό στο Chernobyl. Πιο συγκεκριμένα, 41 min μετά τον μεγάλο σεισμό, στις 03:42 μμ, το πρώτο κύμα τσουνάμι ύψους 4-5 m έφτασε στον πυρηνικό σταθμό. Τα τείχη προστασίας του σταθμού, σχεδιασμένα για κύματα μέγιστου ύψους 5,5 m, σφράγισαν την ασφάλεια του. Όμως, 8 min αργότερα από το πρώτο κύμα, ένα δεύτερο κύμα χτύπησε τα τείχη όπου αυτή τη φορά είχε ύψος περίπου 15 m. Το αποτέλεσμα ήταν να κατακλύσει τα τοιχώματα της θάλασσας και να πλημμυρίσει τη περιοχή προκαλώντας προβλήματα ύψιστης σημασίας για την ασφάλεια και τη λειτουργία του σταθμού.

Το κύμα πλημμύρισε και προκάλεσε βλάβες στις αντλίες και τους κινητήρες θαλασσινού νερού στην ακτογραμμή, επηρεάζοντας τα βασικά συστήματα και εξαρτήματα, συμπεριλαμβανομένων των γεννητριών ντίζελ έκτακτης ανάγκης. Η ψύξη των αντιδραστήρων και των κυκλωμάτων συμπυκνωτή διεκόπησαν. Επίσης, το κτήριο αποθήκευσης ραδιενεργών αποβλήτων πλημμύρισε χωρίς σοβαρές επιπτώσεις στα καύσιμα. Το νερό εισήλθε στα κτήρια με τους αντιδραστήρες, τις τουρμπίνες, τα κοινά κτίρια αναλωμένων καυσίμων και τις γεννήτριες ντίζελ, προκαλώντας ζημιές σε κτίρια, εξοπλισμό και ηλεκτρικά συστήματα. Αυτό οδήγησε στην απώλεια της τροφοδοσίας ρεύματος και της ψύξης των αντιδραστήρων, εκτός από τη μονάδα 6 όπου οι γεννήτριες παρέμειναν λειτουργικές. Οι αντιδραστήρες 1-5 έχασαν την τροφοδοσία με αποτέλεσμα την απώλεια ψύξης και ελέγχου των παραμέτρων των αντιδραστήρων. Οι δρόμοι επίσης καταστράφηκαν, καθιστώντας δύσκολη την πρόσβαση.

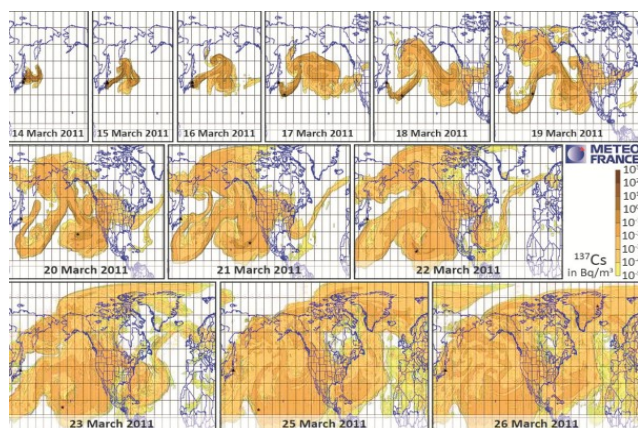
Στις 11/04/23 κηρύχθηκε πυρηνική έκτακτη ανάγκη και εκδόθηκε εντολή εκκένωσης της περιοχής εντός 2 km από το εργοστάσιο, η οποία αργότερα επεκτάθηκε στα 20 και τελικά στα 40 km, βάσει του ποσοστού δόσης 20 mSv/year. Η απουσία ψύξης οδήγησε στην πα-

ραγωγή ατμού και υδρογόνου μέσω της αλληλεπίδρασης με το ζirkόνιο του δοχείου πίεσης (PRV), προκαλώντας αύξηση της θερμοκρασίας και της πίεσης. Το σύστημα ψύξης έκτακτης ανάγκης (ECCS) τέθηκε σε λειτουργία αλλά απέτυχε, και η έγχυση νερού στο PRV γινόταν χειροκίνητα με πυροσβεστικές αντλίες.

Όσο αφορά τον κάθε αντιδραστήρα ξεχωριστά Αντιδραστήρας 1: Η στάθμη του νερού έπεσε γρήγορα, εκθέτοντας το καύσιμο και αυξάνοντας τη θερμοκρασία στους 2800 °C, προκαλώντας τήξη του πυρήνα μέσα σε 16 ώρες. Η έλλειψη ελέγχου λόγω απώλειας ρεύματος οδήγησε σε έκρηξη υδρογόνου, καταστρέφοντας την οροφή και διαβρώνοντας το δοχείο πίεσης κατά 65 cm. Αντιδραστήρας 2: Η θερμοκρασία αυξήθηκε ραγδαία, προκαλώντας τήξη του πυρήνα. Η στάθμη του νερού έπεσε λόγω απώλειας ψύξης. Οι εξαερώσεις απέτρεψαν την έκρηξη υδρογόνου, αλλά υπήρξε διαρροή ραδιενεργών υλικών. Η έγχυση νερού ξεκίνησε στις 14/04. Αντιδραστήρας 3: Το εφεδρικό σύστημα έγχυσης νερού απέτυχε στις 12/04, οδηγώντας σε πτώση της στάθμης του νερού. Η πίεση μειώθηκε μέσω εξαέρωσης, επιτρέποντας την έγχυση θαλασσινού νερού. Στις 14/04, η εξαέρωση προκάλεσε έκρηξη υδρογόνου, καταστρέφοντας μεγάλο μέρος της οροφής. Αντιδραστήρας 4: Η έκρηξη υδρογόνου στις 15/04 κατέστρεψε την οροφή και προκάλεσε ζημιές στο κτήριο του τρίτου αντιδραστήρα. Η έκρηξη προκλήθηκε από υδρογόνο της μονάδας 3 που έφτασε στη μονάδα 4 μέσω κοινόχρηστων αγωγών.

Ραδιενεργή μόλυνση

Η ραδιενεργός ρύπανση οφείλονταν σε ένα μεγάλο ποσοστό στις εκπομπές ραδιενέργειας από τον αντιδραστήρα 1 και 2. Οι μεγαλύτερες εκλύσεις παρατηρήθηκαν στις αρχές Απριλίου. Επικίνδυνα ραδιονουκλείδια που μπορούν να μολύνουν το περιβάλλον είναι τα ^{131}I , ^{134}Cs και ^{137}Cs , όπου μετά την απελευθέρωσή τους μπορούν να βρεθούν στο πόσιμο νερό, τα

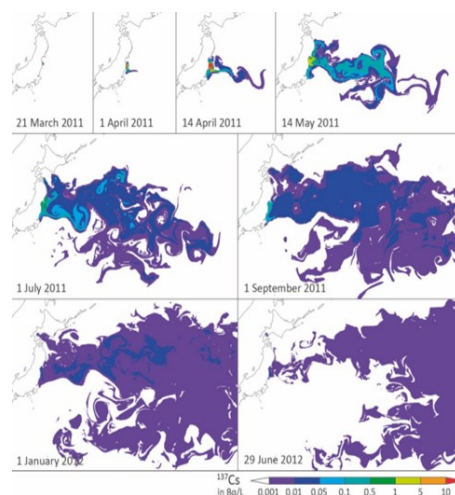


Εικόνα 6: Μοντέλο ατμοσφαιρικής διασποράς ^{137}Cs .

τρόφιμα και ορισμένα μη-βρώσιμα είδη. Μία από τις βασικότερες επιπτώσεις τους στον ανθρώπινο οργανισμό είναι η αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης καρκίνου.

Οι εκρήξεις στους αντιδραστήρες του πυρηνικού σταθμού Fukushima Daiichi προκάλεσαν την απελευθέρωση ραδιονουκλιδίων στο περιβάλλον, τόσο στον αέρα όσο και στον ωκεανό, με την ατμοσφαιρική κυκλοφορία και τα ωκεάνια ρεύματα να διαδραματίζουν κύριο ρόλο στη διάχυσή τους. Η κατεύθυνση του ανέμου άλλαζε, με αποτέλεσμα οι ραδιενεργές ουσίες να διασπείρονται προς τον Ειρηνικό Ωκεανό και στη συνέχεια βορειοδυτικά του σταθμού, καταλήγοντας σε χερσαίες περιοχές μέσω βροχόπτωσης, χιονόπτωσης και ομίχλης. Η διασπορά των ραδιενεργών ουσιών επηρέασε όλη τη περιοχή (Εικ. 6)

Η διάχυση του ραδιενεργού ισότοπου ^{137}Cs στο περιβάλλον αναλύθηκε με χρήση μοντέλων προσομοίωσης μολυσμένων νερών στον Ειρηνικό Ωκεανό. Όπως φαίνεται και στην Εικ. 7 όπου παρουσιάζεται η κλίμακα ενεργότητας του ^{137}Cs ανά λίτρο νερού, η μεγαλύτερη μόλυνση ανιχνεύθηκε δυτικά του Ειρηνικού. Η απελευθέρωση των επικίνδυνων ραδιονουκλιδίων στην ατμόσφαιρα και στον Ειρηνικό Ωκεανό προκάλεσε μεγάλη ανησυχία ειδικά για το ^{137}Cs λόγω της σχετικά μεγάλης ποσότητας που εκλύθηκε, το χρόνο ημιζωής (30,1 έτη) του αλλά και τις επιπτώσεις που επιφέρει στην υγεία του ανθρώπου.



Εικόνα 7: Μοντέλο προσομοίωσης διασποράς και μόλυνσης του ωκεανού.

Πηγές

1. IAEA report: www.pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub1710-reportbythedg-web.pdf
2. Data source: www.energy.gov/situation-japan-updated-12513
3. Report by the IAEA Director General: www.iaea.org/publications/10962/the-fukushima-daiichi-accident

22/23 Δεκεμβρίου 178 π.Χ. ... όταν ξεκίνησαν οι δείκτες του Μηχανισμού των Αντικυθήρων



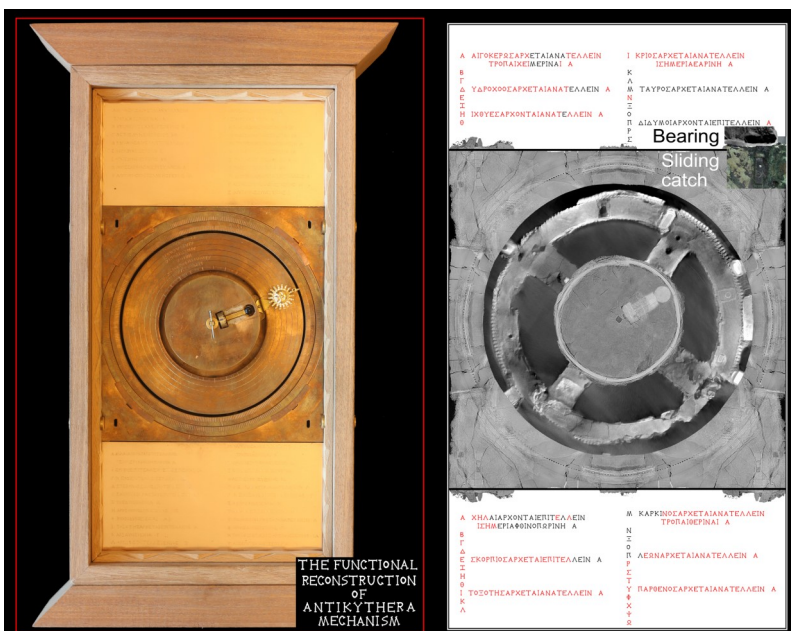
**Αριστείδης
Βούλγαρης**
Κατασκευαστή
Οπτομηχανικών
οργάνων / Μουσικός

Κάθε μετρητικό μηχάνημα, είτε γραναζωτό (πχ. ρολόι), είτε οπτικό (πχ. φωτόμετρο, φασματογράφος), είτε ψηφιακό (πχ. GPS) χρειάζεται πριν την έναρξη των υπολογισμών που πραγματοποιεί, να βαθμονομηθεί καταλλήλως (το λεγόμενο «καλιμπράρισμα»). Ακόμα και τα όργανα μίας συμφωνικής ορχήστρας πριν ξεκινήσουν να παίζουν, πρέπει να κουρδίσουν με μία κοινή νότα, τη νότα Λα 446 Hz.

Ο Μηχανισμός των Αντικυθήρων ήταν μία γραναζωτή μηχανή που έκανε υπολογισμούς και μετρήσεις Χρόνου στο εγγύς Μέλλον, όπως ποια θα είναι η φάση της Σελήνης μετά από χρονικό διάστημα, σε ποιόν αστερισμό θα βρίσκεται ο Ήλιος, πότε θα συμβεί μία έκλειψη

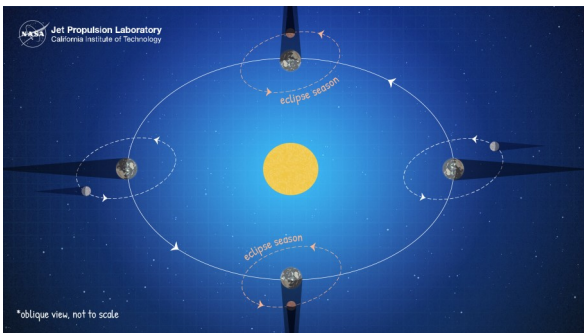
Ηλίου ή Σελήνης, ποια ώρα, ποιο μήνα, πότε θα ξεκινήσουν οι Ολυμπιακοί Αγώνες κτλ. Επομένως για να δείχνει σωστά τις μελλοντικές προβλέψεις, Μηχανισμός των Αντικυθήρων έπρεπε να ξεκινήσει μία πολύ συγκεκριμένη ημερομηνία και όχι μία οποιαδήποτε τυχαία. Η ημερομηνία έναρξης των δεικτών του Μηχανισμού είναι απαραίτητη έτσι ώστε οι δείκτες να τοποθετηθούν σε συγκεκριμένες θέσεις πριν την εκκίνησή τους. Με βάση την συγκεκριμένη - αρχική ημερομηνία βαθμονόμησης, οι προβλέψεις του οργάνου για τις εκλείψεις, μέσω των δεικτών του και των βαθμονομημένων κλιμάκων του, είναι αντιπροσωπευτικές.

Οι βαθμονομήσεις οργάνων συνήθως γίνονται σε χαρακτηριστικά φαινόμενα και όχι τυχαίες επιλογές. Πχ. Το μηδέν - 0 στη βαθμονόμηση της κλίμακας Celsius είναι η θερμοκρασία όπου συνυπάρχουν οι τρεις φάσεις του νερού (στερεό, υγρό και αέριο). Οι επιλογές αυτών των σημείων είναι τέτοιες ώστε να είναι



Ανακατασκευή πλήρως λειτουργικού μοντέλου του Μηχανισμού των Αντικυθήρων από την ομάδα The FRAME Project. Διακρίνονται το ΧΡΥΣΟΥΝ ΣΦΑΙΡΙΟΝ-ΗΛΙΟΣ, το ΣΦΑΙΡΙΟΝ ΤΗΣ ΣΕΛΗΝΗΣ. Το σφαίριο της Σελήνης σκοπεύει προς τον Ήλιο -Νέα Σελήνη και γι' αυτό εμφανίζει το ημισφαίριό της ως μαύρο. Δεξιά: Τα σημαντικά αστρονομικά σημεία μέτρησης μέσα σε ένα τροπικό έτος: Ηλιοστάσια/Ισημερίες. Ο αρχαίος κατασκευαστής χάραξε αυτά τα σημεία-ενάρξεις Εποχών του έτους σε 4 στήλες κατανομημένες στις 4 γωνίες της πρόσθιας πλευράς του δημιουργήματός του. Στην επάνω αριστερή γωνία (αρχή ανάγνωσης) διασώζεται η φράση ΑΙΓΟΚΕΡΩΣ ΑΡΧΕΤΑΙ ΑΝΑΤΕΛΛΕΙΝ - ΤΡΟΠΑΙ ΧΕΙΜΕΡΙΝΑΙ (Χειμερινό Ηλιοστάσιο). Ψηφιακή σύνθεση σχεδίου και AMRP αξονικών τομογραφιών: Α. Βούλγαρης

μοναδικές, εύκολα αναγνωρίσιμες και να παρουσιάζουν χαρακτηριστικά που θα διαφέρουν στα υπόλοιπα ενδιάμεσα σημεία, τα οποία παρουσιάζουν λιγότερο διακριτά χαρακτηριστικά. Επίσης, η επιλογή ενός σημείου βαθμονόμησης πρέπει να έχει τις λιγότερες δυνατές απαιτήσεις προετοιμασίας του και τις ελάχιστες παραμέτρους οι οποίες και θα επηρεάζουν τη θέση αυτού του σημείου. Σε μία μηχανή που μετράει τον Χρόνο, όπως ο Μηχανισμός των Αντικυθήρων, ως ημερομηνία έναρξης των μετρήσεων δύσκολα θα μπορούσε να ήταν μία τυχαία ημερομηνία χωρίς κάποια ιδιαίτερα αστρονομικά και χρονολογικά χαρακτηριστικά αποδεκτά στον τότε κόσμο.



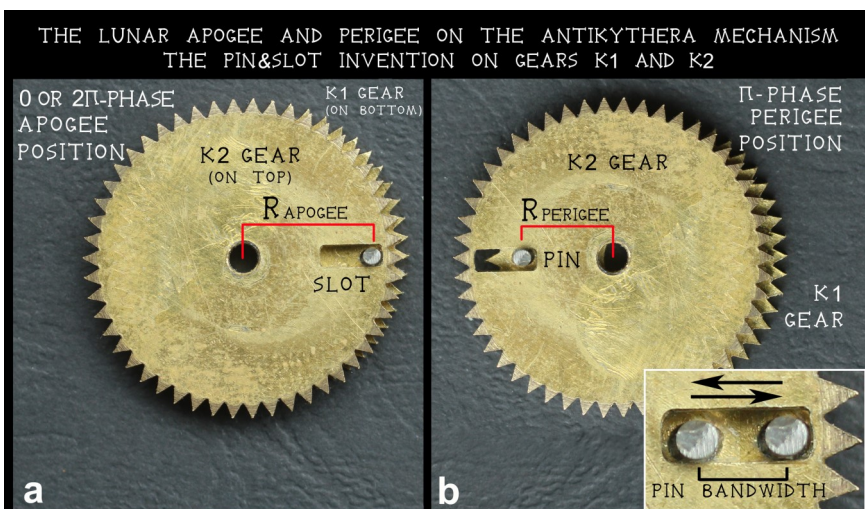
Αναπαράσταση των αναγκαίων συνθηκών για να συμβεί μία ολική έκλειψη Ηλίου ή Σελήνης. Credits NASA JPL.

Τα μέλη της ομάδας *The Functional Reconstruction of Antikythera Mechanism – The FRAME Project* (Α.Βούλγαρης, Χ.Μουρατίδης και Α.Βοσνάκης) έκαναν μία σημαντική παρατήρηση στο κείμενο του αρχαίου Έλληνα αστρονόμου Γέμινου του Ροδίου ($\approx 1^{\text{ος}}$ αιώνας π.Χ.)

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΕΙΣ ΤΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ.

Ο Γέμινος στο κεφάλαιο «Περὶ ἐξελιγμοῦ» αναφέρει: «Ἐξελιγμός ἐστὶ χρόνος ἐλάχιστος περιέχων ὅλους μῆνας καὶ ὅλας ἡμέρας καὶ ὅλας ἀποκαταστάσεις τῆς Σελήνης»: ο Εξελιγμός (και ο Σάρος), δηλ. ο χρονικός κύκλος που επαναλαμβάνεται ακριβώς από την αρχή, η αλληλουχία των εκλείψεων Ηλίου και Σελήνης ακριβώς με το ίδιο μοτίβο, περιέχει ακέραιο αριθμό αποκαταστάσεων των Κύκλων της Σελήνης. Πιο συγκριμένα, οι τρεις κύκλοι της Σελήνης, ο Συνοδικός κύκλος (το χρονικό διάστημα από Νέα Σελήνη στην επόμενη Νέα Σελήνη), ο Ανωμαλιστικός κύκλος (το χρονικό διάστημα από το Απόγειο της Σελήνης στο επόμενο Απόγειο), καθώς και ο Δρακωνικός κύκλος (η Σελήνη ξαναεπιστρέφει στο ίδιο σημείο του επιπέδου της Εκλειπτικής) επανέρχονται στα σημεία ενάρξεώς τους την ίδια ημέρα.

Ο Εξελιγμός (και ο Σάρος) ξεκινάει με ακέραιο αριθμό αποκαταστάσεων της Σελήνης: Νέα Σελήνη στο Απόγειο και στην Εκλειπτική δηλ. στον Εκλειπτικό σύνδεσμο (Ecliptic Node). Ο συντονισμός αυτών των τριών κύκλων σημαίνει ότι κατά την αρχή του Εξελιγμού (και του Σάρος) θα συμβεί μία έκλειψη Ηλίου (Νέα Σελήνη στον Σύνδεσμο/ Εκλειπτική σημαίνει έκλειψη Ηλίου). Αυτή η έκλειψη θα είναι σίγουρα Δακτυλιοειδής: Σελήνη στο Απόγειο άρα μακριά από τη Γη, δηλ. έχει τη μικρότερη φαινόμενη διάμετρο και δεν μπορεί να καλύψει ολόκληρο τον ηλιακό δίσκο. Ταυτόχρονα, η Σελήνη όταν βρίσκεται στο Απόγειο κινείται με την μικρότερη γωνια-



Η Σελήνη παρουσιάζει μεταβλητή γωνιακή ταχύτητα στον ουρανό. Αυτή η μεταβολή αναπαριστάται στον Μηχανισμό με την εμπλοκή δύο γραναζιών pin&slot, των οποίων οι άξονες δεν βρίσκονται στην ίδια ευθεία. Η μηχανική βαθμονόμηση του Μηχανισμού των Αντικυθήρων με τη Σελήνη στο Απόγειο παρουσιάζεται στο panel a.

κή ταχύτητα της και επομένως η Σελήνη διαβαίνει τον ηλιακό δίσκο πάρα πολύ αργά. Συνεπώς, ο Εξελιγμός (και ο Σάρος) ξεκινάει με μία δακτυλιοειδή έκλειψη Ηλίου πάρα πολύ μεγάλης διάρκειας.

Χρησιμοποιώντας τον κατάλογο των εκλείψεων της NASA μεταξύ του 340 π.Χ. και του 150 μ.Χ. οι συγγραφείς εντόπισαν συγκεκριμένες ημερομηνίες όπου «οι κύκλοι της Σελήνης-μηδενίζουν». Όμως, μία μόνο από αυτές τις ημερομηνίες απαντά στο ερώτημα «γιατί ο αρχαίος κατασκευαστής του Μηχανισμού χάραξε το Χειμερινό Ηλιοστάσιο σε προεξέχουσα θέση;». Στην επάνω αριστερή θέση (αρχή ανάγνωσης) της πρόσθιας όψης του Μηχανισμού των Αντικυθήρων αναγράφεται «ΑΙΓΟΚΕΡΩΣ ΑΡΧΕΤΑΙ ΑΝΑΤΕΛΛΕΙΝ - ΤΡΟΠΑΙ ΧΕΙΜΕΡΙΝΑΙ».

Δεδομένου πως τα αρχαία ελληνικά διαβάζονται από τα αριστερά προς τα δεξιά και από επάνω προς τα κάτω, είναι λογικό πως σε αυτή την «πρώτη» θέση τοποθετείται αυτό που είναι ιδιαίτερα σημαντικό. Αν ο αρχαίος κατασκευαστής χάραξε τυχαία τις θέσεις των Ηλιοστασίων/Ισημεριών, θα δημιουργούσε το απόλυτο κομφούζιο στον Χρήστη του Μηχανισμού!

Ο Μηχανισμός των Αντικυθήρων ως μία μηχανή υπολογισμού Χρόνου, πρέπει να δίνει ξεκάθαρα και με σαφή τρόπο το πότε ξεκίνησε να κάνει υπολογισμούς. Τα σημεία «κλειδιά» της έναρξης των μετρήσεων θα πρέπει να είναι

απολύτως σαφή και κατανοητά προς το χρήστη και να μην δημιουργούν ασάφειες και ερωτήματα, μπερδεύοντας τον χρήστη.

Επίσης, η ημερομηνία έναρξης των υπολογισμών θα πρέπει να είναι μία πολύ σημαντική ημερομηνία και όχι μία τυχαία επιλογή, ειδικά για εκείνη την εποχή, που πολλά πράγματα όπως ο Χρόνος είχαν μία σχετικά υψηλή αβεβαιότητα εν συγκρίσει με το σήμερα και πολύ εύκολα μπορούσε να χαθεί η μέτρηση του Χρόνου: ύστερα από έναν λιμό ή μία καταστροφική εχθρική επιδρομή, ποιος επιζών θα ήταν σε θέση και θα είχε τη διάθεση να μετρήσει τον Χρόνο;;;

Κατά την ημερομηνία 22/23 Δεκεμβρίου 178 π.Χ. που εντόπισε η ομάδα του *The FRAME Project*, συνέβησαν δέκα πολύ σημαντικά αστρονομικά και θρησκευτικά γεγονότα:

- Η Σελήνη ήταν στη φάση της Νέας Σελήνης (αρχή συνοδικού μήνα, η πρώτη ημέρα του κάθε μήνα ενός αρχαιοελληνικού ημερολογίου).
- Η Νέα Σελήνη ήταν ακριβώς στο Απόγειο, δηλ. αρχή του Ανωμαλιστικού κύκλου.
- Η νέα Σελήνη βρισκόταν ακριβώς πάνω στο επίπεδο της Εκλειπτικής, δηλ. αρχή του Δρακωνικού κύκλου.
- Ο Ήλιος εισερχόταν στον αστερισμό του Αιγόκερω, ακριβώς πάνω στο ζωδιακό του σημείο.
- Ταυτόχρονα ξεκινούσε το Χειμερινό Ηλιοστάσιο (για την εποχή του 200-100 π.Χ. το



Η Ολική έκλειψη Ηλίου της 2ας Ιουλίου 2019, όπως καταγράφηκε από τον Αριστείδη Βούλγαρη, από το αστεροσκοπείο Cerro Tololo στην έρημο Atacama της Χιλής. Σύνθεση φωτογραφιών από αποχρωματικό τηλεσκόπιο 65/450.

χειμερινό ηλιοστάσιο ήταν στον αστερισμό του Αιγόκερω).

- Μία Δακτυλιοειδής έκλειψη ηλίου συνέβαινε ακριβώς στην αρχή του Αιγόκερω και κατά την έναρξη του Χειμερινού Ηλιοστασίου.
- Η συγκεκριμένη δακτυλιοειδής έκλειψη ηλίου ήταν η μεγαλύτερη σε διάρκεια μεταξύ του 3000 BC–150 AD (σύμφωνα με τους ενημερωμένους καταλόγους εκλείψεων της NASA).
- Ένας νέος Μετωνικός κύκλος ξεκινούσε. Ο Μετωνικός κύκλος είχε διάρκεια 19 ετών και σε κάθε τέτοιο κύκλο οι φάσεις της Σελήνης συμβαίνουν τις ίδιες ημερομηνίες του έτους. Ο πρώτος διορθωμένος Μετωνικός κύκλος ξεκίνησε το 330 π.Χ.
- Ξεκινούσε ο 3^{ος} Καλλιπικός κύκλος (ο Κάλλιππος διόρθωσε περαιτέρω τον Μετωνικό κύκλο που παρουσίαζε σφάλματα. Ένας Καλλιπικός κύκλος ισούται με 4 Μετωνικούς κύκλους μείον μία ημέρα, άρα 76 χρόνια – 1 ημέρα).
- Ταυτόχρονα η 22^α Δεκεμβρίου 178 π.Χ. ταυτίζεται με την ημερομηνία του Αιγυπτιακού ημερολογίου 17^η Αθύρ, κατά την οποία ξεκινούσε η εορτή των Ισίων (εορτή αφιερωμένη στην Ίσιδα).

Η εορτή των Ισίων εισήλθε στην Ελλάδα αμέσως μετά το θάνατο του Μεγάλου Αλεξάνδρου και αρκετοί ναοί της Ίσιδας διασώζονται στην Ελλάδα μέχρι και σήμερα. Όπως αναφέρει ο Πλούταρχος, η Ίσιδα και ο Όσιρις σχετίζονται με την έκλειψη Ηλίου και Σελήνης.

Σε πάρα πολλά κρατικά ή ιερατικά «έγγραφα» της αρχαίας Αιγύπτου (δηλαδή πέτρινες και γρανίτινες Στήλες) απεικονίζονται η Ίσιδα και ο Όσιρις και στο επάνω μέρος τους απεικονίζεται μία έκλειψη Ηλίου με το Στέμμα ως «φτερά».

Η εργασία “*The Initial Calibration Date of the Antikythera Mechanism after the Saros spiral mechanical Apokatastasis*” δημοσιεύθηκε πρόσφατα στο περιοδικό *Almagest* γνωστό στην ερευνητική κοινότητα του Μηχανισμού των Αντικυθήρων, δεδομένου ότι έχει δημοσιεύσει τις σωζόμενες επιγραφές του το 2016.

Πηγές

- Freeth, T., Bitsakis, Y., Moussas, X., et al.: “Decoding the Ancient Greek Astronomical Calculator Known as the Antikythera Mechanism”, *Nature* 444, 2006, 587-91.
- Bitsakis, Y., & Jones, A.: «The Front Dial and Parapegma Inscriptions» in Special Issue: The Inscriptions of the Antikythera Mechanism, *Almagest* 7(1) 2016a, 68-137.
- Γέμινου του Ροδίου ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΕΙΣ ΤΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ επιμέλεια Ε. Σπανδάγου, εκδόσεις Αίθρα 2002 (<https://www.astrologicon.org/geminus-rhodium/geminus-introduction-to-phaenomena2.html#18>)
- - NASA Eclipse Web Site, "Eclipse Predictions by Fred Espenak and Jean Meeus" NASA Goddard Space Flight Center, <https://eclipse.gsfc.nasa.gov/SEcatmax/SE-3999-6000MaxA.html>).
- Voulgaris, A., Mouratidis C., Vossinakis, A., & Bokovos G.: “Renumbering of the Antikythera Mechanism Saros cells, resulting from the Saros spiral Mechanical Apokatastasis”, *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 21 (2), 2021, 107-128.
- Voulgaris, A., Mouratidis C., Vossinakis, A.: “Reconstructing the Antikythera Mechanism lost eclipse events applying the Draconic gearing–The impact of the gears’ error”, *CHMTec, Cultural Heritage and Modern Technologies*, no.1, 2023b, 1-68. (<https://aaatec.org/documents/article/va1.pdf>)
- Voulgaris, A., Mouratidis C., Vossinakis, A.: “The Initial Calibration Date of the Antikythera Mechanism after the Saros Spiral Mechanical Apokatastasis”, *Almagest*, 14(1), 2023a, 4-39. (Version 1 in arxiv <https://arxiv.org/ftp/>)

Ο Αριστείδης Βούλγαρης είναι εξωτερικός συνεργάτης του Εργαστηρίου Οπτικής και Φασματοσκοπίας, μέλος διεθνούς ερευνητικής ομάδας η οποία πραγματοποιεί φασματικές αναλύσεις του ηλιακού στέμματος κατά τη διάρκεια Ολικών Εκλείψεων Ηλίου. Είναι ιδρυτικό μέλος της ομάδας *The Functional Reconstruction of Antikythera Mechanism – The FRAME Project*, η οποία αφού μελέτησε τις AMRP αξονικές τομογραφίες ακτίνων-Χ των Θραυσμάτων του Μηχανισμού των Αντικυθήρων κατασκεύασε πλήρως λειτουργικά μοντέλα του Μηχανισμού. Κατόπιν αιτήματος της ομάδας, παραχωρήθηκε η άδεια χρήσης των τομογραφιών μετά από σύμφωνη γνώμη των M. Edmunds, I. Σειραδάκη και Ξ. Μουσά.

άπειρο

η υπέρβαση της ανθρώπινης σκέψης



Μαρία Μυστακίδου
Φοιτήτρια
Τμήματος Φυσικής
Α.Π.Θ.

Τι θα συμβεί αν κάποιος με αμύθητη περιουσία κερδίσει ένα ευρώ; Αν δεν μπορώ να μετρήσω τους κόκκους άμμου όλης της Γης, αυτό τους καθιστά άπειρους; Το ίδιο ισχύει και με τα αστέρια που βλέπουμε στο νυχτερινό ουρανό; Είναι το σύμπαν τελικά άπειρο; Αυτά είναι μερικά από τα ερωτήματα με τα οποία έρχεται κανείς αντιμέτωπος όταν προσπαθεί να συλλάβει την έννοια του απείρου. Από τα αρχαία ακόμη χρόνια οι άνθρωποι προσπαθούν να κατανοήσουν τα πάντα γύρω τους και δεν ήταν λίγοι οι φιλόσοφοι και οι μαθηματικοί οι οποίοι ασχολήθηκαν με την ερμηνεία του απείρου.

Σε αυτό το άρθρο θα ασχοληθούμε με τους ανθρώπους που πρώτοι διερωτήθηκαν για την έννοια του απείρου, με την σημασία αυτού για την επιστήμη των μαθηματικών καθώς και με τα ενδιαφέροντα παράδοξα που προκύπτουν.

Οι πρωτοπόροι...

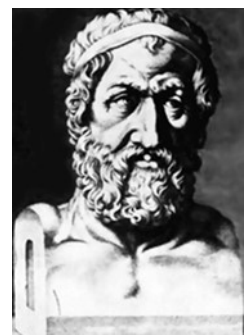
Πρώτος με την ιδέα του απείρου ήρθε αντιμέτωπος ο Αναξίμανδρος ο Μιλήσιος (611 π.Χ.-547π.Χ.) (Εικόνα 1), ο οποίος καταγόταν από την Ιωνία της Μικράς Ασίας και ήταν φυσικός φιλόσοφος. Σπούδασε Αστρονομία και Γεωγραφία στο πρώιμο στάδιό τους και εισήγαγε τον γνώμονα στην Ελλάδα κατασκευάζοντας τον χάρτη του τότε γνωστού κόσμου.

Η πρώτη χρήση της έννοιας του απείρου στα μαθηματικά ωστόσο προέρχεται από τον Ζήνωνα τον Ελεάτη (490π.Χ.-425π.Χ.) (Εικόνα 2), ο οποίος ήταν αρχαίος Έλληνας φιλόσοφος που καταγό-

ταν από την Ελέα της Ιταλίας. Ο Ζήνωνας διαφωνούσε με την Πυθαγόρεια αντίληψη της πραγματικότητας και ως απόδειξη για τις πεποιθήσεις του επινόησε αρκετά από τα παράδοξα στα οποία θα αναφερθούμε παρακάτω.

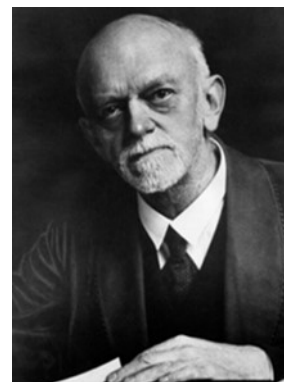


Εικόνα 1: Αναξίμανδρος ο Μιλήσιος.



Εικόνα 2: Ζήνωνας ο Ελεάτης.

Μπορεί να μην ήταν πρωτοπόρος με την ιδέα αλλά ο David Hilbert (1862-1943) συνέβαλε σημαντικά στην κατανόηση της έννοιας του απείρου (Εικόνα 3), μέσω ενός μαθηματικού παραδόξου. Ήταν γερμανός φυσικός, ασχολήθηκε με την ακαδημαϊκή καριέρα στο πανεπιστήμιο Königsberg και Göttingen και ασχολήθηκε με μεγάλα επιστημονικά πεδία για την Φυσική όπως η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας, η Κβαντική Μηχανική, η Θεωρία αριθμών και οι χώροι Hilbert.

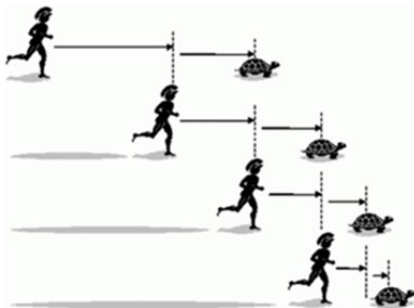


Εικόνα 3: David Hilbert.

Τα παράδοξα

«Ο Αχιλλέας και η χελώνα» (Ζήνωνας)

Εχουμε δύο δρομείς, τον Αχιλλέα, που τρέχει γρήγορα και τη χελώνα, που πάει πιο αργά από τον Αχιλλέα, οι οποίοι συμμετέχουν σε αγώνα δρόμου. Μιας και η χελώνα είναι πιο αργή της χαρίζεται ένα προβάδισμα από τον Αχιλλέα, το οποίο όμως φαίνεται να επιδρά καθοριστικά στο να νικά πάντα η χελώνα, όσο μικρό κι αν είναι το προβάδισμα και όσο μεγάλη και να είναι η απόσταση που θα διανύσουν στον αγώνα δρόμου. Για να προσπεράσει ο Αχιλλέας τη χελώνα πρέπει πρώτα να φτάσει στο σημείο από το οποίο η χελώνα ξεκίνησε. Ομως αυτό δεν πρόκειται να γίνει ποτέ όσο η χελώνα συνεχίζει να προχωρά, όσο αργή κι αν είναι. Ωσπου να καλύψει ο Αχιλλέας την απόσταση αυτή, η χελώνα θα έχει προχωρήσει λίγο πιο πέρα. Ετσι ο Αχιλλέας υποχρεούται να διανύσει κι άλλο διάστημα, ως τη νέα θέση της χελώνας. Ωσπου να διατρέξει το νέο αυτό διάστημα, η χελώνα θα έχει προχωρήσει κι άλλο, στον χρόνο που ο Αχιλλέας χρειάζεται για να φτάσει στο προηγούμενο σημείο.



Εικόνα 4: Ο Αχιλλέας και η χελώνα.

Τα

ο διάστημα που τους χωρίζει μπορεί να γίνεται ολοένα και πιο μικρό, όμως ποτέ ο Αχιλλέας δε μπορεί να φτάσει την χελώνα, όσο ο χώρος μπορεί και διαιρείται σε όλο και πιο μικρά μέρη (Εικόνα 4).

Η θεώρηση αυτή έρχεται σε αντίθεση με την αντίστοιχη που γνωρίζουμε από την φυσική. Δηλαδή, όταν δύο σώματα κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση και αυτό που βρίσκεται πίσω έχει μεγαλύτερη ταχύτητα από αυτό μπροστά του, τότε η μεταξύ τους απόσταση ελαττώνεται και

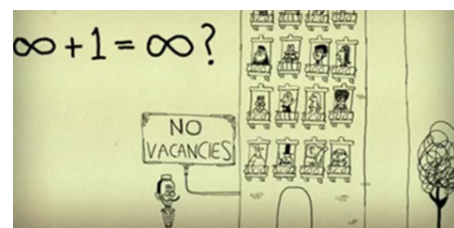
αυτό που βρίσκεται πίσω καταφέρνει να προσπεράσει το μπροστινό του. Εδώ βρίσκεται και το παράδοξο.

«Το άπειρο ξενοδοχείο» (Hilbert)

Φανταστείτε ένα ξενοδοχείο με άπειρα δωμάτια (Εικόνα 5). Όλα τα δωμάτια είναι πάντα κλεισμένα και ταυτοχρόνως υπάρχουν και κενά δωμάτια. Ενα βράδυ έρχεται ένας νέος πελάτης και ζητάει ένα δωμάτιο. Ετσι, ο διευθυντής του ξενοδοχείου ανακοινώνει πως όλοι οι πελάτες πρέπει να μετακινηθούν στο ακριβώς επόμενο δωμάτιο. Τα δωμάτια όμως είναι γεμάτα και περιμένουμε να δημιουργηθεί πρόβλημα.

Στο Άπειρο ξενοδοχείο πάντα υπάρχει χώρος. Ετσι όλοι οι πελάτες μετακινούνται σε θέση $n+1$ όπου n ο αριθμός του δωματίου που βρίσκονται τώρα. Οπότε ο καινούριος πελάτης μπορεί να μείνει στο δωμάτιο νούμερο 1. Αν μείνουν όλοι στα δωμάτιά τους και πάει ο νέος πελάτης στο τελευταίο κενό; Αυτό δεν θα μπορούσε να συμβεί, καθώς δεν υπάρχει τελευταίο δωμάτιο!

Ενα βράδυ φτάνουν άπειροι νέοι πελάτες οι οποίοι ζητάνε δωμάτιο. Πώς θα βρεθούν άπειρα κενά δωμάτια εφόσον είναι όλα κατειλημμένα; Αυτό το πρόβλημα ξεπερνιέται αν καθένας από τους πελάτες μετακινηθεί σε δωμάτιο αριθμού $2n$. Ετσι θα μείνουν κενά τα δωμάτια τα οποία λήγουν σε περιττούς αριθμούς για τους νέους πελάτες.



Εικόνα 5: Το ξενοδοχείο του Hilbert.

«Μπορώ να διαιρώ κάτι επ' άπειρον;»

Εστω ότι έχουμε ένα κομμάτι σχοινί πεπερασμένου μήκους L και θέλουμε να το κόψουμε. Πρώτα το κόβουμε σε μήκος $L/2$, έπειτα σε $L/4$, $L/8$,... Θεωρητικά η διαδικασία αυτή θα μπορού-

σε να συνεχίσει για πάντα καθώς πάντα θα έχουμε κάποιο μήκος του σχοινιού για να κόψουμε στην μέση, έστω και... πολύ μικρό. Ομως αυτό δεν γίνεται να συμβεί στην πραγματικότητα για τον εξής λόγο: η ύλη και άρα το σχοινί δεν είναι συνεχές όπως μια μαθηματική γραμμή, καθώς αποτελείται από άτομα και ενώσεις, ενώ μια μαθηματική γραμμή στο επίπεδο αποτελείται από άπειρα σημεία.

Το άπειρο στα μαθηματικά

Ανάμεσα σε δύο αριθμούς όπως το 0 και το 1 μπορώ να σκεφτώ άπειρους δεκαδικούς αριθμούς. Για παράδειγμα το διάστημα 0 με 1 το χωρίζω σε 0,1, 0,2, 0,3,... Ανάμεσα στο 0 και το 0,1 έχω τους αριθμούς 0,01, 0,02, 0,03... Ανάμεσα στους 0 και 0,01 έχω τους 0,001, 0,002, 0,003... Αυτή η διαδικασία θα μπορούσε να συνεχίσει για πάντα λαμβάνοντας όλο και πιο μικρά διαστήματα και προσθέτοντας όλο και περισσότερα μηδενικά μετά την υποδιαστολή. Ανάμεσα λοιπόν στους πεπερασμένους αριθμούς που γνωρίζουμε δεν υπάρχει κάποιου είδους κβάντωση, αλλά μια συνέχεια άπειρων δεκαδικών αριθμών.

Ενα ακόμη ενδιαφέρον ερώτημα που προκύπτει είναι πόσες πλευρές και πόσες γωνίες έχει ένας κύκλος; Ας θεωρήσουμε ένα ισόπλευρο τρίγωνο, έπειτα ένα κανονικό εξάγωνο, ένα κανονικό 12-γωνο κ.ο.κ. Δηλαδή κάθε φορά θα παίρνουμε το διπλάσιο πλήθος πλευρών από το προηγούμενο σχήμα (2n-γωνο). Αν συνεχίσουμε αυτή την διαδικασία έτσι ώστε το n να πλησιάζει στο άπειρο, θα έχουμε κατασκευάσει ένα σχήμα με άπειρες πλευρές και άπειρες γωνίες που δεν θα είναι τίποτε παρά ένας κύκλος! (Εικόνα 6)

Την έννοια του απείρου την συναντάμε και στα γεωμετρικά σχήματα fractals. Πρόκειται για σχήματα τα οποία προκύπτουν μέσω μαθηματικής ακολουθίας ή μέσω τύπων επανάληψης τα οποία αν μεγεθύνουμε απείρως επαναλαμβάνονται αυτούσια (Εικόνα 7).

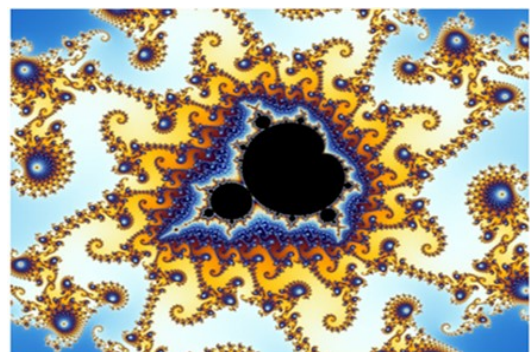
Αυτή η ιδιότητα δεν επιτυγχάνεται βέβαια μέσω της Ευκλείδειας γεωμετρίας καθώς δεν πρόκειται για απλά σχήματα, όπως για παράδειγμα έναν κύκλο. Αν δοκιμάσουμε να μεγεθύνουμε α-

Types	Sides	Shapes	Angles
Triangle	3		60°
Square	4		90°
Pentagon	5		108°
Hexagon	6		120°
Heptagon	7		128.571
Octagon	8		135°
Nonagon	9		144°
Decagon	10		140°
Hendecagon	11		147.273
Dodecagon	12		150°

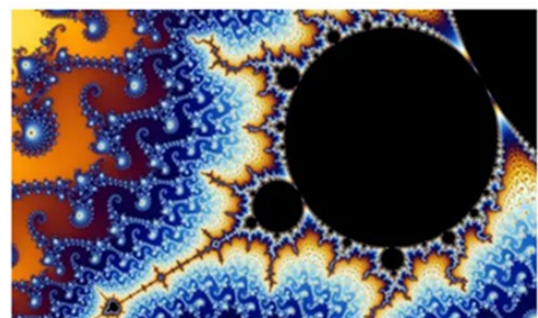
Εικόνα 6: Κανονικά n-γωνα.

πείρως ένα κύκλο τότε θα καταλήξουμε να βλέπουμε ευθεία, και αυτό είναι κάτι που οφείλεται στην έννοια της καμπυλότητας. Τα fractals δεν εμφανίζουν καμπυλότητα και έτσι με την μεγέθυνσή τους φαίνονται απλώς οι λεπτομέρειες που δεν μπορούσαμε να δούμε πριν (Εικόνα 8).

Στην φύση συναντάμε μορφές που μοιάζουν πολύ με αυτές των fractals και αυτή είναι και η απόδειξη πως το άπειρο ίσως να μην βρίσκεται μόνο στην σφαίρα του ιδεατού, αλλά να υπάρχει ανάμεσά μας. Μερικά από τα παραδείγματα είναι η μεγέθυνση ενός φύλλου ή μιας νιφάδας χιονιού,



Εικόνα 7: Fractal.



Εικόνα 8: Μεγέθυνση ενός fractal.



Εικόνα 9: Παραδείγματα fractal στην φύση

οι ρίζες ενός δέντρου, οι κυκλώνες, οι γαλαξίες ακόμη και οι νευρώνες του εγκεφάλου μας. Και αυτά είναι μόνο μερικά! (Εικόνα 9)

Το άπειρο στην Φυσική

Αφού καλύψαμε την μαθηματική υπόσταση του απείρου ήρθε η ώρα να αναρωτηθούμε τι σημαίνει άπειρο για την επιστήμη της Φυσικής. Το συναντάμε στην Γενική Θεωρία της Σχετικότητας του Αϊνστάιν, η οποία αναφέρει ότι ένα διαστελλόμενο Σύμπαν όπως το δικό μας άρχισε σε ένα χρονικό διάστημα στο πεπερασμένο παρελθόν, όταν η πυκνότητα του ήταν άπειρη - η γνωστή θεωρία της Μεγάλης Εκρηξης. Η θεωρία του Αϊνστάιν επίσης προβλέπει πως στο κέντρο μιας μαύρης τρύπας υπάρχει άπειρη πυκνότητα.

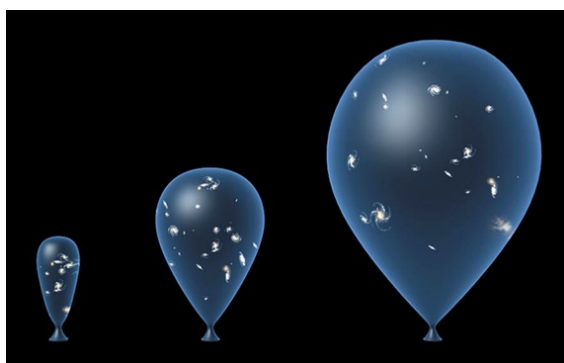
Ακόμη ένα ενδιαφέρον ερώτημα που βασανίζει φυσικούς και μη, είναι το αν το σύμπαν μας

είναι τελικά άπειρο. Προφανώς και δεν έχουμε ακριβή απάντηση για αυτό, αλλά μπορούμε να κάνουμε κάποιες εικασίες. Εάν κάποιος υποθέσει πως το σύμπαν δεν είναι άπειρο, προκύπτει αμέσως το ερώτημα τι θα υπάρχει μετά τα άκρα του. Ισως όμως συμβαίνουν και τα δύο. Ισως είναι πεπερασμένο, χωρίς να έχει άκρα. Ένας έξυπνος τρόπος να φανταστούμε τα παραπάνω είναι να σκεφτούμε το σύμπαν ζωγραφισμένο στην επιφάνεια ενός μπαλονιού το οποίο φουσκώνει (διαστελλεται) και ξεφουσκώνει (συστέλλεται). Με τον τρόπο αυτό, έχουμε φτιάξει ένα διδιάστατο διαστελλόμενο σύμπαν. (Εικόνα 10)

Είναι ενδιαφέρον ο τρόπος με τον οποίο μπορούμε να συνδέσουμε την έννοια του απείρου με κάτι το πεπερασμένο. Είναι λογικό ο εγκέφαλός μας να μην μπορεί να συλλάβει πλήρως την σημασία του απείρου, καθώς δεν αποτελεί μέρος της καθημερινότητάς μας. Ωστόσο υπάρχει κάτι το ελκυστικό στο να αναρωτιέται κανείς για αυτό καθώς συνδέεται και με θέματα όπως αυτά της ύπαρξης και της συνείδησης.

Υπάρχει κάτι το ξεχωριστό στο να νιώθει κανείς «μικρός» μπροστά στο μεγαλείο του σύμπαντος και ταυτόχρονα να μπορεί να μελετά διάφορα φαινόμενα με τα εργαλεία που του προσφέρουν η φυσική και τα μαθηματικά.

Υπάρχει κάτι το ξεχωριστό στο να νιώθει κανείς «μικρός» μπροστά στο μεγαλείο του σύμπαντος και ταυτόχρονα να μπορεί να μελετά διάφορα φαινόμενα με τα εργαλεία που του προσφέρουν η φυσική και τα μαθηματικά.



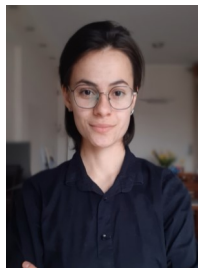
Εικόνα 11: Συστολή - Διαστολή.

Πηγές:

- <https://www.britannica.com/biography/David-Hilbert>
- <https://www.pancreta.gr/voices.php?p=14636>
- https://youtu.be/Uj3_Kqkl9Zo
- <https://www.britannica.com/science/infinity-mathematics>
- <https://plato.stanford.edu/entries/paradox-zeno/>
- <https://fractalfoundation.org/resources/what-are-fractals/comment-page-2/>

πυρηνική ενέργεια

ιστορία και προοπτικές για ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον



**Αναστασία
Μαυρομάτη**
Φοιτήτρια
Τμήματος Φυσικής
Α.Π.Θ.

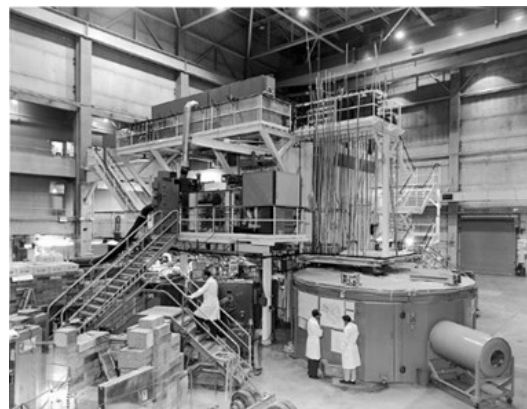
Η πυρηνική ενέργεια αποτελεί έναν τομέα που γνώρισε μεγάλη ανάπτυξη τις τελευταίες δεκαετίες. Με τη συνειδητοποίηση των αρνητικών συνεπειών που έχουν τα ορυκτά καύσιμα στο περιβάλλον, θεωρήθηκε αναγκαίο να βρεθούν νέες πηγές ενέργειας, φιλικότερες προς αυτό. Μία από αυτές αποτελεί και η πυρηνική ενέργεια και τεχνολογία, που έχουν τις απαρχές τους μόλις στα μέσα του προηγούμενου αιώνα.

Το 1951 ξεκίνησε η λειτουργία του EBR-I (Εικόνα 1), του πρώτου πυρηνικού αντιδραστήρα. Επρόκειτο για έναν αναπαραγωγικό αντιδραστήρα, που σχεδιάστηκε σε πειραματικό επίπεδο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά τη διάρκεια των τριών επόμενων δεκαετιών κατασκευάστηκαν πολλοί ακόμη, με σκοπό να χρησιμοποιηθούν σε πυρηνικά εργοστάσια σε όλον τον κόσμο. Ήδη στις αρχές της δεκαετίας του 1970 υπήρχαν 90 τέτοια εργοστάσια, σε 15 διαφορετικές χώρες, με συνολική ισχύ 16.500 MWe. Κατά μέσο όρο, κατασκευάζονταν 25 με 30 νέα εργοστάσια κάθε χρόνο. Έτσι, φτάνοντας στο 1980 βρίσκονταν σε λειτουργία 253 εργοστάσια, σε 22 χώρες, με συνολική ισχύ 135.000 MWe. Ιδιαίτερο παράδειγμα αποτελεί η Γαλλία, που ήδη από το 1974 κάλυπτε το 75% των ενεργειακών της αναγκών από την πυρηνική ενέργεια.

Η εκθετική αυτή αύξηση των πυρηνικών εργοστασίων οφειλόταν κυρίως στην κρίση του πετρελαίου. Τα αποθέματα που είχαν ανακαλυφθεί ως τότε δεν θα μπορούσαν να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες της ανθρωπότητας για πολλά χρόνια ακόμη, επομένως η χρήση της πυρηνικής ενέργειας φαινόταν ως η μοναδική διέξοδος. Σταδιακά όμως, η αύξηση του κόστους της ενέργειας, σε συνδυασμό με την οικονομική ύφεση, οδήγησαν σε μείωση της ζήτησης. Ταυτόχρονα, είχαν δημιουργηθεί πολλές ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια των πυρηνικών εργοστασίων, με αποτέλεσμα να τίθενται όλο και αυστηρότερες προδιαγραφές ως προς την κατασκευή τους. Συνεπώς, η ραγδαία ανάπτυξη που είχε γνωρίσει η πυρηνική τεχνολογία τα προηγούμενα χρόνια μετριάστηκε σε σύντομο χρονικό διάστημα.

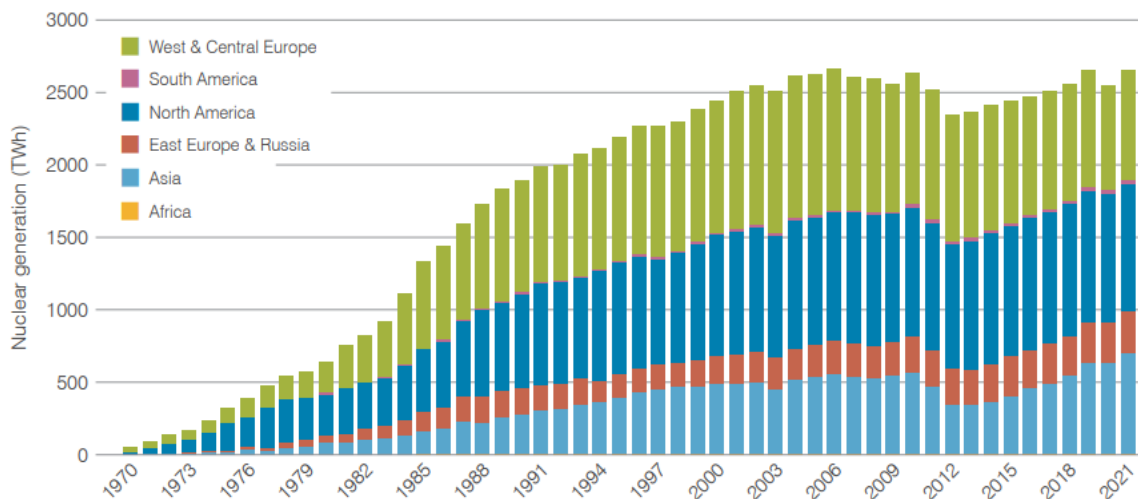
Κατά τη δεκαετία του 1990, η παραγωγή ενέργειας από πυρηνικά καύσιμα συνέχιζε να εμφανίζει αύξηση, όχι όμως εκθετική, όπως τις προηγούμενες δεκαετίες. Οι χώρες που παρήγαγαν το μεγαλύτερο μέρος αυτής ήταν οι ΗΠΑ, η Σοβιετική Ένωση, η Γαλλία, η Γερμανία και η Ιαπωνία. Παράλληλα, και άλλες ασιατικές χώρες, όπως η Κίνα, η Ινδία και το Πακιστάν άρχισαν να δραστηριοποιούνται πάνω στην πυρηνική ενέργεια.

Ως τις αρχές της δεκαετίας του 2000, η ασφάλεια των πυρηνικών εργοστασίων, ειδικά στις ΗΠΑ, ήταν υποδειγματική. Αυτό, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη ανησυχία για την κλιματική αλλαγή λόγω των εκπομπών άνθρακα, έφεραν στο προσκήνιο τη συζήτηση μιας «πυρηνικής αναγέννησης», που έπαιξε σημαντικό ρόλο στη συνέχιση της προσπάθειας καθιέρωσης της πυρηνικής ενέργειας ως μια βιώσιμη ενέργεια του μέλλοντος.



Εικόνα 1: EBR-I: Ο πρώτος πυρηνικός αντιδραστήρας

Το μερίδιο της πυρηνικής ενέργειας στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας τα πρώτα χρόνια της δεκαετίας του 2000 έφτανε κοντά στο 16%. Λειτουργούσαν περισσότεροι από 400 πυρηνικοί σταθμοί, με συνολική ισχύ περίπου 350 GWe. Συγκριτικά με τη δεκαετία του 1980, η παραγόμενη ισχύς είχε αυξηθεί κατά 2,6 φορές. Οι χώρες με τη μεγαλύτερη παραγωγή πυρηνικής ενέργειας ήταν η Γαλλία (76,4%), η Λιθουανία (73,7%), το Βέλγιο (56,8%), η Σλοβακική Δημοκρατία (53,4%) και η Ουκρανία (47,3%). Στις ΗΠΑ, το αντίστοιχο ποσοστό ανερχόταν στο 20%. Τέλος, ενδιαφέρον παρουσιάζει το ότι στα τέλη του 2000 η λειτουργία των πυρηνικών αντιδραστήρων στον κόσμο ξεπέρασε τα 9800 έτη συνολικά.



Εικόνα 2: Παραγωγή ενέργειας από πυρηνικές πηγές ανά ήπειρο: Διάγραμμα ενέργειας - χρονικής περιόδου

Σήμερα υπάρχουν περίπου 440 αντιδραστήρες πυρηνικής ενέργειας που λειτουργούν σε 32 χώρες με ισχύ περί τα 390 GWe και συνολικό χρόνο λειτουργίας που ξεπερνά τα 12.000 έτη. Το 2021 παρήχθησαν 2653 TWh ενέργειας, που αντιστοιχούν στο 10% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή ήταν η τρίτη υψηλότερη τιμή ετήσιας παραχθείσας ενέργειας από πυρηνικά καύσιμα, μετά το 2006 και το 2019, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2. Παρατηρείται ότι σήμερα πρωταγωνιστικό ρόλο παίζουν η Ασία, η Βόρεια Αμερική και η Κεντροδυτική Ευρώπη στην αξιοποίηση της πυρηνικής ενέργειας.

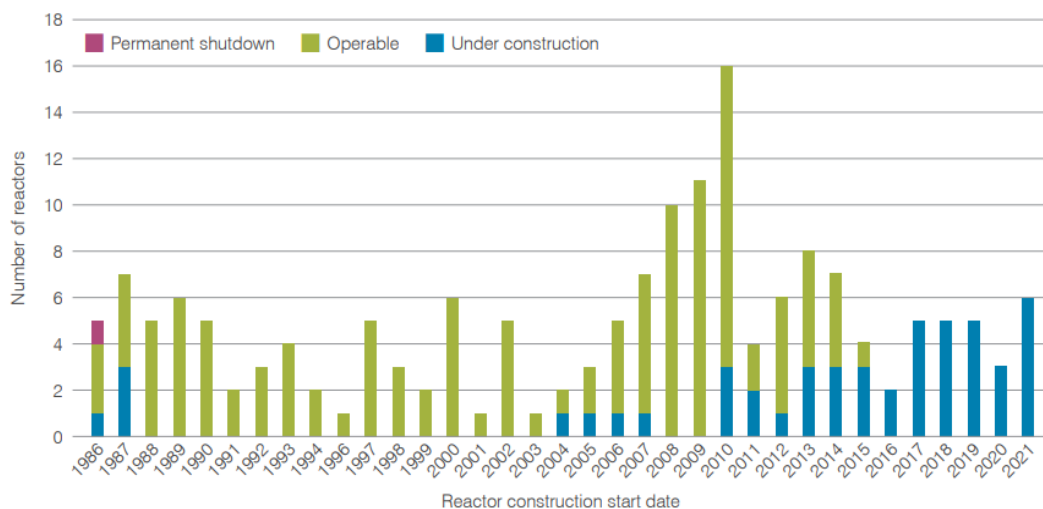
Την παρούσα χρονική περίοδο, 100 πυρηνικοί αντιδραστήρες, συνολικής ισχύος 100 GW βρίσκονται υπό κατασκευή ή η κατασκευή τους έχει προγραμματιστεί για τα επόμενα χρόνια, ενώ έχουν γίνει και προτάσεις για ανέγερση άλλων 300 αντιδραστήρων. Το μεγαλύτερο πλήθος αυτών βρίσκεται στην Ασία. Στο διάγραμμα της Εικόνας 3 αναγράφεται η κατάσταση λειτουργίας των αντιδραστήρων με κατασκευή που ξεκίνησε από το 1985 ως το 2021.

Η κατασκευή νέων πυρηνικών αντιδραστήρων και εργοστασίων καταναλώνει μεγάλο κεφάλαιο,

που δεν είναι εύκολα διαθέσιμο. Μια οικονομικότερη λύση, που δίνει τη δυνατότητα για επιπλέον χωρητικότητα, είναι η αναβάθμιση των ήδη υπαρχόντων πυρηνικών σταθμών. Αυτό έχει εφαρμοστεί σε διάφορες χώρες, όπως οι ΗΠΑ, η Ελβετία, η Ισπανία, η Φινλανδία και η Σουηδία, με αποτέλεσμα των αύξηση της πυρηνικής ισχύος κατά 10-20% σε κάθε περίπτωση.

Παράλληλα με την αύξηση της χωρητικότητας έρχεται και η επέκταση του χρόνου ζωής των εργοστασίων. Αρχικά, η περίοδος λειτουργίας ενός πυρηνικού σταθμού περιοριζόταν σε 25 με 40 έτη. Παρόλα αυτά, ένα μεγάλο πλήθος των πυρηνικών αντιδραστήρων κατάφερε να ανανεώσει την άδεια λειτουργίας του στα 60 έτη. Φυσικά, για να συμβεί κάτι τέτοιο, είναι απαραίτητη η αντικατάσταση του φθαρμένου εξοπλισμού ανά τακτά χρονικά διαστήματα, καθώς και η ανανέωση των καυσίμων.

Στην Εικόνα 4 φαίνεται η συνολική χωρητικότητα αντιδραστήρων διαφορετικών ηλικιών, που βρίσκονται σε λειτουργία από το 1970. Οι αντιδραστήρες που παραμένουν σε λειτουργία μετακινούνται στην επόμενη κατηγορία κάθε δέκα χρόνια. Στο διάγραμ-



Εικόνα 3: Κατάσταση λειτουργίας αντιδραστήρων με κατασκευή από το 1985 ως το 2021

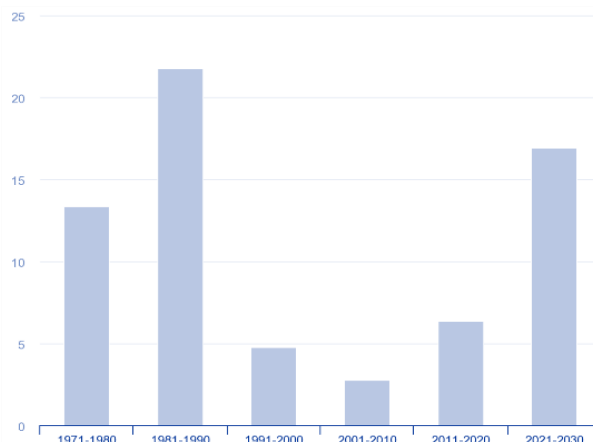
μα μπορεί να παρατηρηθεί η αύξηση του αριθμού των νέων αντιδραστήρων κατά τη δεκαετία του 1980, καθώς και η μείωση αυτού κατά την επόμενη δεκαετία. Η ικανότητα για μακροχρόνια λειτουργία των εργοστασίων γίνεται εμφανής από τα αντίστοιχα μέρη του διαγράμματος, που υποδεικνύουν χρόνο ζωής ακόμα και μεγαλύτερο από 50 έτη. Παρατηρείται, τέλος, μια μικρή αυξητική τάση στην ισχύ των νέων πυρηνικών σταθμών κατά τα τελευταία έτη, που υποδηλώνει αντίστοιχη αυξητική τάση στο ρυθμό κατασκευής τους.

Κάθε χρόνο, η Διεθνής Υπηρεσία Ενέργειας παρουσιάζει την παρούσα κατάσταση των ενεργειακών πόρων σε μια έκθεση, την Παγκόσμια Ενεργειακή Προοπτική (World Energy Outlook-WEO). Στην έκδοση του 2022 προβλέπεται αύξηση της παγκόσμιας πυρηνικής ισχύος σε ποσοστό 43% από το 2020 ως το 2050, φτάνοντας τα 590 GWe. Μάλιστα, σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη της πυρηνικής ενέργειας φαίνεται να λαμβάνει μελλοντικά η Ασία, με έμφαση την Κίνα και την Ινδία. Αν τα σενάρια αυτά γίνουν πραγματικότητα, θα επιτευχθεί παράλληλα και μείωση των εκπομπών άνθρακα κατά 13% ως το 2050.

Υπάρχει ένα πλήθος σεναρίων και στόχων που έχουν εκφραστεί σχετικά με την έκβαση της ενεργειακής κατάστασης στον κόσμο. Πρόσφατα, η Διεθνής Υπηρεσία Ενέργειας εισήγαγε το «Σενάριο Μηδενικών Εκπομπών έως το 2050» («Net Zero Emissions by 2050 Scenario (NEZ)»), που χαρτογραφεί τον τρόπο με τον οποίο θα επιτευχθεί μηδενισμός των εκπομπών άνθρακα μέχρι το 2050 και άνοδος της θερμοκρασίας της γης μόνο κατά 1,5°C. Αυτό βέβαια προϋποθέτει την καθολική πρόσβαση σε σύγχρονες πηγές ενέργειας έως το 2030, με παράλληλη αύξηση της πυρηνικής ισχύος στα 870 GWe. Αυτό φυσικά είναι ένα πολύ αισιόδοξο σενάριο, καθώς ένας τέτοιος στόχος είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί τόσο σύντομα.

Στο διάγραμμα της Εικόνας 5 φαίνονται οι προσθήκες στην παγκόσμια ισχύ (σε GW) της πυρηνικής

ενέργειας, από τη δεκαετία του 1970 μέχρι σήμερα. Η τελευταία στήλη υποδεικνύει την απαιτούμενη αύξηση στην ισχύ της πυρηνικής ενέργειας, έτσι ώστε να επιτευχθεί το «Σενάριο Μηδενικών Εκπομπών». Η αύξηση αυτή αντιστοιχεί σε 10 GW ανά έτος ως το 2030.

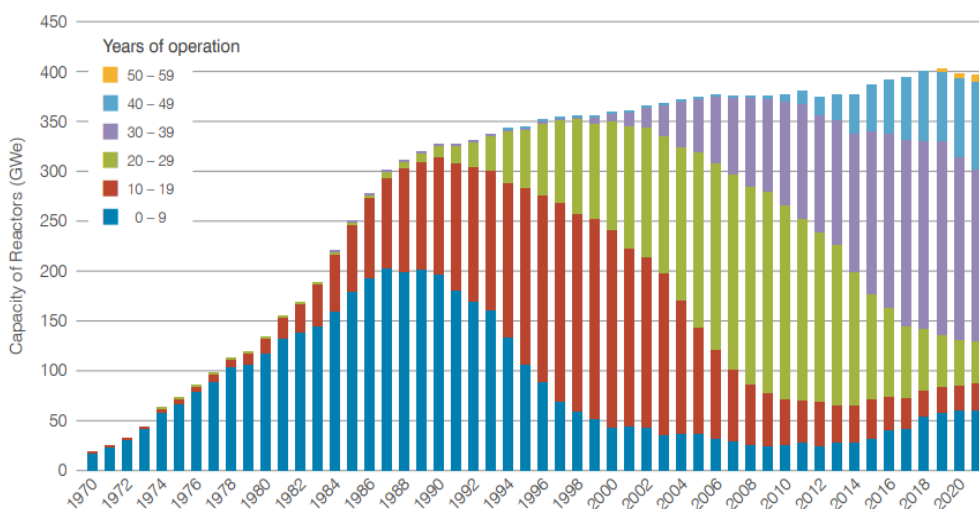


Εικόνα 5: Προσθήκες παγκόσμιας ισχύος πυρηνικής ενέργειας στο Σενάριο Μηδενικών Εκπομπών, 1971-2030

Παρόλες τις προκλήσεις, η πυρηνική ενέργεια εξακολουθεί να υπόσχεται πολλά ως μια βιώσιμη πηγή ενέργειας, ιδιαίτερα για το μέλλον. Ένα πλήθος εφαρμογών και καινοτομιών λαμβάνουν χώρα σήμερα, χαράσσοντας το δρόμο που θα ακολουθήσει η πυρηνική τεχνολογία τα επόμενα χρόνια, με σκοπό τη συμβολή στην πράσινη ανάπτυξη του ενεργειακού τομέα.

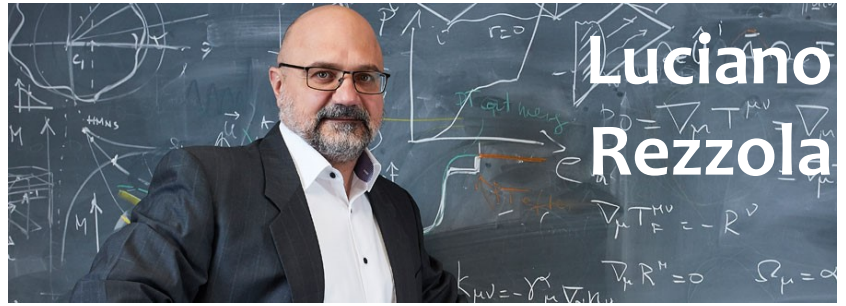
Πηγές

- **Char N.L and Csik B.J., Nuclear power development: History and outlook: IAEA Bulletin, 03/1987, pp. 19**
- <https://whatisnuclear.com/history.html>
- <https://world-nuclear.org/information-library.aspx>
- <https://ourworldindata.org/nuclear-energy>



Εικόνα 4: Συνολική χωρητικότητα αντιδραστήρων διαφορετικών ηλικιών που λειτουργούν ανά έτος από το 1970

Ο Luciano Rezzolla (γεννημένος το 1967) είναι Ιταλός καθηγητής σχετικιστικής αστροφυσικής και αριθμητικής σχετικότητας στο Πανεπιστήμιο Γκαίτε της Φρανκφούρτης. Το κύριο πεδίο μελέτης του είναι η φυσική και η αστροφυσική συμπαγών αντικειμένων όπως οι μαύρες τρύπες και οι αστέρες νετρονίων. Ανακοινώθηκε το 2019 ότι διορίστηκε επίτιμος καθηγητής Andrews της Αστρονομίας στο Trinity College του Δουβλίνου (TCD).



*Συνέντευξη του Καθ. L. Rezzolla από τους
Φοιτητές του Τμήματος Φυσικής
Αστέριο Παπαδόπουλο
Άννα Γεωργία Χατζημάρκου*

Στο project EHT συμμετείχαν επιστήμονες από διαφορετικούς ερευνητικούς χώρους και ιδρύματα. Ποια ήταν η σημασία της διεπιστημονικής συνεργασίας; Πώς αυτό το εγχείρημα συνείσφερε στην ενδυνάμωση της συνεργασίας αυτής;

Το project του Event Horizon Telescope (EHT) είναι ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα διεπιστημονικής συνεργασίας, στα πλαίσια της οποίας επιστήμονες από διαφορετικούς ερευνητικούς χώρους, με διαφορετική τεχνογνωσία και δεξιότητες ενώνουν τις «δυνάμεις» τους, με σκοπό την επίτευξη ενός επιστημονικού στόχου. Αυτό είναι ένα πολύ ωραίο πράγμα για την επιστήμη· αναδεικνύει τα θετικότερα χαρακτηριστικά του κάθε επιστήμονα που συμμετέχει και φέρνει τους ερευνητές πιο κοντά, προκειμένου να επιλύσουν σημαντικά προβλήματα. Επομένως, η περάτωση ενός τόσο μεγάλου επιτεύγματος θα ήταν αδύνατη χωρίς τη συνεισφορά όλων των επιστημόνων που συμμετείχαν στην ομάδα. Αυτή η συνεργασία είναι ένα εξαιρετικό παράδειγμα ανθρωπιάς στις μέρες μας, δεδομένου ότι στην εποχή μας οι άνθρωποι αναζητούν αιτίες για να ξεσπάσει πόλεμος.

Θεωρείτε πως η συνεργασία και η ομαδική εργασία είναι σημαντικές για το μέλλον της έρευνας και της επιστήμης γενικότερα;

Όταν θέλεις να αντιμετωπίσεις δύσκολα επιστημονικά ερωτήματα και να προχωρήσεις βήματα μπροστά, η συνεργασία είναι απαραίτητη. Αυτό συμβαίνει διότι, είναι αναγκαίος ένας αξιοσημείωτος αριθμός ανθρώπων που θα εκτελούν διαφορετικές εργασίες, παραδείγματος χάριν πειράματα και παρατηρήσεις. Επομένως, αν θέλεις να λάβεις αξιόλογες απαντήσεις, χρειάζεσαι ένα σύνολο ανθρώπων. Ωστόσο, αυτό δε σημαίνει ότι η επιστήμη μπορεί να προοδεύσει αποκλειστικά και μόνο με τη συνεργασία. Η επιστήμη προοδεύει και με την ατομική έρευνα· αυτό συμβαίνει επειδή οι επιστήμονες, εξ ορισμού, τείνουν να λειτουργούν ανεξάρτητα, ιδίως, οι θεωρητικοί φυσικοί κατασκευάζοντας δικές τους θεωρίες. Κατά τη γνώμη μου,

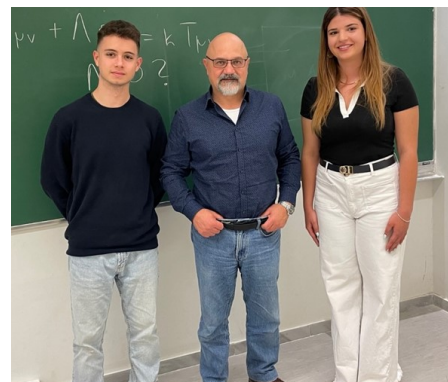
πρέπει να υπάρχει ένας ισορροπημένος συνδυασμός τοπικής έρευνας, στα πλαίσια της οποίας ολιγομελείς ομάδες μπορούν να διερευνούν εξωτικές θεωρίες, και ευρύτερων συνεργασιών, στους κόλπους των οποίων θα αντιμετωπίζονται τα ερωτήματα που δεν μπορούν να απαντηθούν διαφορετικά.

Ήταν δύσκολο να πείσετε τους επιστήμονες να συνεργαστούν για ένα τόσο μεγάλο project;

Ήταν από την αρχή ξεκάθαρο ότι είναι απαραίτητοι διαφορετικοί άνθρωποι για την επίτευξη του στόχου. Υπό αυτή την έννοια, δεν ήταν δύσκολο να πειστούν οι ερευνητές να συνεργαστούν. Όμως, όπως είναι φυσικό, στα πλαίσια της συνεργασίας δεν είναι το ίδιο εύκολο να επικοινωνήσεις με όλους τους ανθρώπους γύρω σου. Μερικοί είναι περισσότερο φιλικοί, άλλοι όχι τόσο. Συνεπώς, η κατάσταση αυτή κάποιες φορές δημιουργούσε μια αρνητικά φορτισμένη ατμόσφαιρα. Ωστόσο, οι επικεφαλής της συνεργασίας πάντοτε προσπαθούσαν να κάνουν όλους τους συνεργάτες να αισθάνονται άνετα.

Σε τι διέφερε η διαδικασία λήψης της δεύτερης εικόνας από την πρώτη; Ποιες νέες πληροφορίες ή λεπτομέρειες αποκαλύφθηκαν;

Η δεύτερη εικόνα του Sagittarius A* δόθηκε στην δημοσιότητα το 2022, αλλά τα δεδομένα για την δημιουργία της ελήφθησαν ταυτόχρονα με τα δε-



δομένα για τον M87. Με άλλα λόγια, χρειάστηκαν πέντε ολόκληρα χρόνια για την επεξεργασία των δεδομένων. Γιατί όμως; Αρχικά, η πανδημία περιέπλεξε όλη την διαδικασία της συνεργασίας και της επικοινωνίας. Επίσης, ήταν πολύ πιο δύσκολο να αποτυπωθεί ο Sagittarius A*, καθώς είναι μια πολύ μικρότερη μελανή οπή, (με μάζα μόνο 4 εκατομμύρια ηλιακές μάζες), σε σχέση με τον M87. Σαφέστερα, είναι σαν να φωτογραφίζουμε ένα μικρό παιδί αντί για ένα βουνό. Επιπλέον, οι πηγές των σημάτων ήταν μεταβλητές με το χρόνο, εξαιτίας του ότι κοιτάμε το κέντρο του γαλαξία, και, επομένως, καταγράφεται όλη η μεσοαστρική ύλη που είναι διάχυτη. Επιπρόσθετα, μία σημαντική διαφορά μεταξύ των φωτογραφιών είναι πως βλέπαμε ορθογώνια το γαλαξιακό κέντρο M87, ενώ στον Sagittarius A* βλέπαμε όλο τον δίσκο προσαύξησης που δημιουργεί παραμορφώσεις στα δεδομένα. Οι παραμορφώσεις αυτές εξαιτίας του της χρονικής τους μεταβολής είναι πολύ δύσκολο να μοτελοποιηθούν.

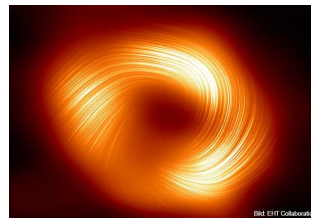
Πώς η αποτύπωση της πρώτης και της δεύτερης εικόνας συμβάλλει στην πρόοδο της Φυσικής; Αποδείχθηκε η θεωρία της σχετικότητας; Αντλήσαμε νέες γνώσεις για τις μελανές οπές;

Στην Φυσική και ιδιαίτερα στην Αστροφυσική είναι πολύ δύσκολο να αποδείξεις οτιδήποτε. Αυτό που μπορείς να κάνεις είναι να αποκτήσεις κάποια αποτελέσματα που επιβεβαιώνουν μια δεδομένη πρόβλεψη. Στην περίπτωση και των δύο εν λόγω φωτογραφιών, αυτές οι εικόνες επαληθεύουν το αναμενόμενο σύμφωνα με τη γενική σχετικότητα. Ωστόσο, είναι ακόμα πολύ νωρίς να ισχυριστούμε ότι πρόκειται αδιαμφισβήτητα για μια μελανή οπή και πως αυτή η μελανή οπή υπόκειται στους νόμους της γενικής σχετικότητας, καθώς υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα. Από την άλλη πλευρά, εξετάζοντας το ζήτημα με μια πιο συντηρητική οπτική, αν αναρωτηθούμε ποια θεωρία από αυτές που γνωρίζουμε δίνει την απλούστερη εξήγηση για αυτές τις εικόνες, η απάντηση θα ήταν η γενική σχετικότητα. Ωστόσο, πρέπει να διεξαχθούν επιπλέον έρευνες πάνω στο θέμα. Για αυτόν ακριβώς τον λόγο σπουδαζετε εσείς, οι φοιτητές.

Πώς φαντάζεστε το μέλλον του Event Horizon Telescope; Υπάρχουν συγκεκριμένα ουράνια αντικείμενα που αποτελούν στόχους για μελλοντική παρατήρηση;

Όσον αφορά τους στόχους, δεν υπάρχουν πολλοί στόχοι τους οποίους μπορούμε να επιδιώξουμε στο εγγύς μέλλον. Αυτό συμβαίνει επειδή χρειαζόμαστε ένα ουράνιο αντικείμενο, όπως μια τεράστια μελανή οπή, η οποία να είναι ορατή. Εάν μια μελανή οπή είναι πολύ μικρή, τότε απλά δεν έχουμε την απαιτούμενη αναλυτική ικανότητα για να την αποτυπώσουμε. Με άλλα λόγια, χρειαζόμαστε μια μελανή οπή να είναι αρκετά μεγάλη και αρκετά κοντά στη Γη, καθώς, αν είναι ικανοποιητικά μεγάλη αλλά πολύ μακριά από τη Γη, τότε πάλι φαίνεται πολύ

μικρή στον ουρανό. Τελικά, υπάρχουν μόνο δύο τέτοιες μελανές οπές: η πρώτη είναι η M87 και η δεύτερη ο Sagittarius A*. Αν θέλουμε να αποτυπώσουμε την επόμενη μελανή οπή, απαιτείται βελτίωση κατά παράγοντα 3. Ωστόσο, δεν πρόκειται να λάβουμε αυτή τη βελτίωση όταν χρησιμοποιούμε ραδιοτηλεσκόπια στη Γη· πρέπει να έχουμε κάτι που να μας δίνει μεγαλύτερη αναλυτική ικανότητα από αυτήν που μπορούμε να επιτύχουμε εδώ. Αυτό σημαίνει ότι η απάντηση βρίσκεται στο διάστημα. Αν θέλουμε να έχουμε βελτίωση κατά παράγοντα 10, χρειαζόμαστε ένα σύνολο δορυφόρων: τρεις δορυφόρους για την ακρίβεια, ο καθένας από τους οποίους θα φέρει ένα ραδιοτηλεσκόπιο. Αυτοί οι δορυφόροι θα βρίσκονται σε πολύ μεγάλη απόσταση μεταξύ τους, δημιουργώντας μία γραμμή βάσης. Έτσι, θα έχουμε την αναλυτική ικανότητα που χρειάζεται για να απεικονίσουμε μια υπερμεγέθη μελανή οπή πέρα από εκείνες που έχουμε παρατηρήσει. Μάλιστα, ο θόρυβος στο διάστημα είναι πολύ μικρότερος σε σχέση με αυτόν στην Γη. Επιπλέον,



Η μαύρη οπή SgrA: Η σπείρα των μαγνητικών πεδίων γύρω από την κεντρική σκιά της μαύρης οπής. (Πηγή: EHT Collaboration)*

ον, σήμερα τα τηλεσκόπια δεν χρησιμοποιούνται μόνο για μελανές οπές αλλά για κάθε είδους ραδιοπαρατηρήσεις· επομένως, έχουμε ένα μικρό χρονικό περιθώριο, προκειμένου να πραγματοποιήσουμε παρατηρήσεις, συνήθως μια εβδομάδα ανά έτος. Αντιθέτως, με τους δορυφόρους στο διάστημα θα μπορούσαμε να παρατηρήσουμε μια μαύρη τρύπα 24 ώρες το 24ωρο, για πολλές ημέρες, προκειμένου εύκολα να συλλέξουμε επαρκή δεδομένα, τα οποία θα μας δώσουν πρόσβαση σε εικόνες καλύτερης ανάλυσης.

Πώς είναι μια τυπική μέρα στην εργασία σας;

Αρχικά, κάνω πολλά πράγματα μέσα στη μέρα μου. Ασχολούμαι με την διδασκαλία και βοηθώ τους φοιτητές/τριές μου (από διαφορετικές βαθμίδες εκπαίδευσης), οι οποίοι έχουν ανάγκη για προετοιμασία σε ορισμένα ζητήματα. Επιπλέον, τα διοικητικά καθήκοντα «καταναλώνουν» ένα κομμάτι του χρόνου μου. Έτσι, είτε πολύ νωρίς το πρωί είτε πολύ αργά το βράδυ μου μένει χρόνος για την έρευνά μου· τουλάχιστον, την εντελώς προσωπική έρευνά η οποία διαφέρει από αυτή που διεξάγω με τους φοιτητές/τριές μου ή με τους μεταδιδακτορικούς ερευνητές.

Πώς είναι η ισορροπία μεταξύ εργασίας και προσωπικής ζωής;

Λοιπόν, το μεγαλύτερο hobby μου είναι η έρευνα.

Με αυτή την έννοια, μου είναι εύκολο να μη διαχωρίζω τη ζωή μου σε τομείς: δουλειά και προσωπική ζωή. Αυτό συμβαίνει επειδή δεν αντιμετωπίζω τη δουλειά μου ως ξεχωριστό κομμάτι της ζωής μου. Ωστόσο, θεωρώ πως είναι σημαντικό να μη γίνεται κανείς εμμονικός με τη δουλειά του. Πάντοτε ενθαρρύνω τους φοιτητές και τους συναδέλφους μου να κάνουν διαλείμματα, να πηγαίνουν διακοπές, να βρίσκουν χρόνο, προκειμένου να κάνουν άλλα πράγματα. Προσωπικά, μου αρέσει η ιστιοπλοΐα. Επομένως, όταν βρίσκω χρόνο, πηγαίνω για ιστιοπλοΐα. Μου αρέσει να ασχολούμαι με τη γλυπτική, και αφιερώνω το χρόνο μου σε αυτή τη δραστηριότητα. Εν κατακλείδι, είναι σημαντικό να έχει κανείς hobby, είναι ένας τρόπος για να αποφύγεις τον μονόπλευρο τρόπο σκέψης.

Τι συμβουλή θα δίνετε σε κάποιον που σκέφτεται να ακολουθήσει τον κλάδο σας;

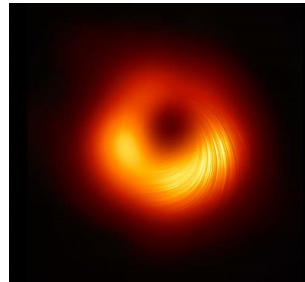
Να δουλέψει σκληρά. Η έρευνα απαιτεί δύο σημαντικά χαρακτηριστικά: το πρώτο είναι η δημιουργικότητα, η διαίσθηση και το άλλο είναι οι δεξιότητες, οι τεχνικές δεξιότητες. Επομένως, είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζεις καλά τα μαθηματικά και να μελετάς όσο περισσότερο μπορείς. Ποτέ να μη μαθαίνεις απλά για να μαθαίνεις, αντίθετα, να μαθαίνεις επειδή το θεωρείς κάτι σημαντικό και επειδή σου επιτρέπει να διασταυρώσεις αν μια θεωρία είναι σωστή ή λανθασμένη. Ένα άλλο παράδειγμα είναι να είσαι σε θέση να επιλύεις εξισώσεις να μάθεις, δηλαδή, πώς να επιλύεις εξισώσεις. Αυτό είναι σημαντικό, επειδή, στην πορεία, ίσως σκεφτείς μια θεωρία και, προκειμένου να την επαληθεύσεις, ίσως χρειαστεί να καταφύγεις στις εξισώσεις. Άρα, εδώ είναι που τα μαθηματικά σε βοηθούν. Πρέπει να αντιλαμβάνεσαι τα μαθηματικά ως ένα μέσο να ελέγξεις την ορθότητα μιας σκέψης.

Ποιες δεξιότητες, πέρα από γνώση μαθηματικών, χρειάζεται ένας νέος Φυσικός;

Τον παλαιότερο καιρό οι θεωρητικοί Φυσικοί έπρεπε να καθορίσουν τις εξισώσεις που περιγράφουν τους νόμους της Φυσικής. Ο Einstein ανακάλυψε το νόμο της βαρύτητας και τις εξισώσεις που τον περιγράφουν. Ωστόσο, στη σημερινή εποχή η δουλειά μας δεν είναι να καθορίσουμε αυτές τις εξισώσεις, εφόσον ήδη έχουν καθοριστεί. Η δουλειά μας συνίσταται στη διερεύνηση των συνεπειών των εξισώσεων αυτών, στην εύρεση λύσεων. Αυτό δεν απαιτεί μόνο γνώση μαθηματικών, αλλά απαιτεί και γνώση υπολογιστικών μεθόδων και εργαλείων, τα οποία μάς επιτρέπουν να λύσουμε τις εν λόγω εξισώσεις. Επιπρόσθετα, λάβετε υπόψη πως, χωρίς τις λύσεις, οι εξισώσεις αυτές θα ήταν εντελώς «στεγνές». Για αυτό, ενθαρρύνω τους νέους φοιτητές να μαθαίνουν υπολογιστικά εργαλεία. Αυτά τα εργαλεία είναι αναγκαία για ένα σύγχρονο θεωρητικό Φυσικό· χωρίς αυτά, δε θα ήταν δυνατό να βρεθούν οι απαραίτητες λύσεις.

Ποιο θεωρείτε ότι είναι το μέλλον της Αστροφυσικής τα επόμενα χρόνια;

Θεωρώ πως η Αστροφυσική θα διαδραματίσει έναν σημαίνοντα ρόλο στην επιστήμη της Φυσικής, κυρίως σε συνδυασμό με τη Φυσική των μελανών οπών, τα βαρυτικά κύματα, τη Φυσική υψηλών ενεργειών και τη Φυσική των αστέρων νετρονίων. Όλα αυτά ίσως κυριαρχήσουν τα επόμενα χρόνια.



Απεικόνιση της υπερμεγέθους μαύρης οπής M87 σε πολωμένο φως (Πηγή: EHT Collaboration).

Τι είδους πειραματικά δεδομένα μπορούμε να αναμένουμε τα επόμενα χρόνια;

Μπορούμε να περιμένουμε δεδομένα από όλες τις μεγάλες διεπιστημονικές συνεργασίες. Για παράδειγμα, από τα βαρυτικά κύματα, το LIGO, το VIRGO ή από την ομάδα που ασχολείται με την υπερμεγέθη μελανή οπή στο γαλαξία μας. Όλες αυτές οι συνεργασίες μπορούν να μας προσφέρουν νέες πληροφορίες σημαίνουσας σημασίας.

Θεωρείτε πως η επιστήμη είναι σε καλό σημείο στη σημερινή εποχή; Ακούμε πως οι επιστήμονες πιέζονται, βιάζονται, για να δημοσιεύσουν papers. Λαμβάνοντας υπόψιν σας το παραπάνω, θεωρείτε πως πράγματι παράγεται νέα γνώση από την επιστημονική έρευνα;

Σίγουρα παράγεται γνώση, αλλά με πολύ διαφορετικό τρόπο συγκριτικά με το παρελθόν. Όταν ήμουν φοιτητής, οι επιστήμονες συνήθιζαν να κάνουν μία δημοσίευση (paper) το χρόνο σε επιστημονικά περιοδικά ή κάθε δύο χρόνια. Η δημοσίευση αυτή περιείχε βαθιά και πλούσια γνώση, με πολλά αποτελέσματα. Επίσης, οι δημοσιεύσεις ήταν πολύ μεγαλύτερες σε μέγεθος. Στις μέρες μας, οι επιστήμονες δημοσιεύουν πολύ λιγότερα αποτελέσματα, επειδή θέλουν να δημοσιεύουν γρήγορα: δεδομένου ότι τόσοι πολλοί ερευνητές εργάζονται σε ένα συγκεκριμένο θέμα· είναι σημαντικό να είσαι πρώτος. Επομένως, η έρευνα διεξάγεται διαφορετικά. Με βάση τα παραπάνω, θεωρώ πως είναι σαφές ότι πραγματικά παράγεται γνώση· η επιστήμη προοδεύει. Ταυτόχρονα, η επιστήμη αλλάζει, με την έννοια ότι οι επιστήμονες πρέπει πλέον να γνωστοποιούν τα αποτελέσματα της ερευνάς τους όχι μόνο στους συναδέλφους τους αλλά και στο ευρύ κοινό.

Ευχαριστούμε τον Βασίλη Οικονόμου, Ε.ΔΙ.Π του Τμήματος Φυσικής για την οργάνωση της συνέντευξης.

ορκωμοσίες

Την Παρασκευή 29/03/2024 πραγματοποιήθηκε η ορκωμοσία των νέων πτυχιούχων του Τμήματος Φυσικής.

ΑΒΕΛΛΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ • ΒΑΦΕΙΑΔΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ • ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ • ΓΙΟΒΑΝΑΚΗΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ • ΓΟΥΝΑΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ • ΔΕΜΕΡΤΖΗ ΕΙΡΗΝΗ • ΔΗΜΗΤΡΙΑΔΗΣ ΣΤΕΡΓΙΟΣ • ΕΥΑΓΓΕΛΙΝΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ • ΖΗΣΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ • ΗΠΕΙΡΩΤΗΣ ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ • ΚΑΛΛΙΟΝΤΖΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ • ΚΑΡΑΜΠΕΡΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ • ΛΑΜΠΡΟΠΟΥΛΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣ • ΛΟΛΙΔΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ • ΜΠΟΣΚΟΥ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ • ΜΥΛΩΝΑΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ • ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΗ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ • ΠΕΡΔΙΚΙΔΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ • ΠΕΡΡΩ-ΣΤΗ ΜΥΡΤΩ • ΣΙΜΗΤΗ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ • ΤΙΛΛΗ ΔΑΦΝΗ • ΤΣΕΚΟΥΡΩΝΑ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ • ΤΣΙΟΥΧΑ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ • ΦΕΤΟ ΜΑΡΙΣΑ

* παρατίθενται μόνο τα ονόματα όσων συναίνεσαν

Την Παρασκευή 29/03/2024 ορκίστηκαν οι νέοι διδάκτορες του Τμήματος Φυσικής:

- ♦ **Αγοραστού Ζωή** (επιβλ. Στυλιανός Σίσκος): «Σχεδιασμός ηλεκτρονικών κυκλωμάτων για εφαρμογές IoT»
- ♦ **Ζαχαριάδης Αλέξανδρος** (επιβλ. Στέργιος Λογοθετίδης): «Ανάπτυξη και μελέτη σε πραγματικό χρόνο υμενίων ανόργανων και οργανικών υλικών για χρήση σε οργανικές ηλεκτρονικές διατάξεις»
- ♦ **Κωνσταντινίδης Παύλος** (επιβλ. Γεώργιος Κίτης): «Ερευνα των οδών επανασύνδεσης της φωταύγειας σε ανιχνευτές Θερμοφωταύγειας. Βελτιστοποίηση ως προς την θερμική διέγερση και το υλικό του ανιχνευτή»
- ♦ **Μέρμηγκας Μάριος** (επιβλ. Δημήτριος Μπαλής): «Τηλεπισκόπηση θερμοκηπικών αερίων με φασματοσκοπία FTIR και εκτίμηση των εκπομπών τους»
- ♦ **Σόρογκα Νίκη** (επιβλ. Ιωάννης Αρβανιτίδης): «Ανάπτυξη και μελέτη με τεχνικές οπτικής φασματοσκοπίας διδιάστατων διχαλκογενιδίων»
- ♦ **Χατζηθεοχάρης Δημήτριος** (επιβλ. Κωνσταντίνος Βυρσωκινός): «Προσομοιώσεις και σχεδιασμός φωτονικών κυκλωμάτων και διατάξεων στη πλατφόρμα SiN»

ΤΟ ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΑΝΟΙΓΕΙ ΤΙΣ ΠΟΡΤΕΣ ΤΟΥ ΣΕ ΜΗΡΟΥΣ ΚΑΙ ΜΕΓΑΛΟΥΣ

Α.Π.Θ.
ΤΗΝ
ΚΥΡΙΑΚΗ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ
ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΕΙΣ
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
ΠΑΙΧΝΙΔΙΑ
ΜΟΥΣΕΙΑ - ΑΡΧΕΙΑ - ΣΥΛΛΟΓΕΣ
ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΚΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑ
ΕΠΙΔΕΙΞΕΙΣ



Αγαπητοί φίλοι και αγαπητοί φίλοι,

Της Κυριακής 16 & 26 Μαρτίου μετατρέπουμε το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο
Θεσσαλονίκης στο μεγαλύτερο εκπαιδευτικό πάρκο της χώρας.
Ανοίγουμε τις πόρτες των εργαστηρίων, των σπώνων αρχαίων, μουσείων και συλλογών
μας σε όλους τους συμπατριώτες μας.
Επιμένουμε στην αξία της γνώσης, της έρευνας, της δημιουργίας αλλά και της αλληλεγγύης.
Όλοι μαζί είμαστε δυνατοί, μαθαίνουμε, αλληλεγγύη, δοκιμάζουμε.

Σας καλωσορίζουμε στο ΑΠΘ, το δικό σας Πανεπιστήμιο!

Οι Πρυτανικές Αρχές,

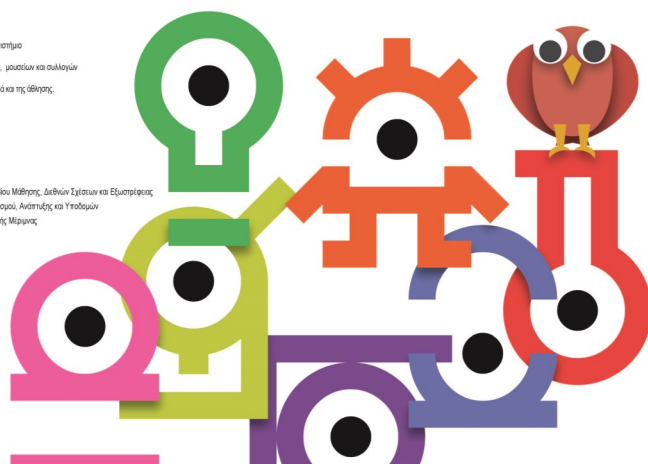
Χαράλαμπος Φίλιππος, Πρύτανης

Κυριάκος Γιάννης, Αντιπρύτανης Έρευνας και Καινοτομίας

Γεώργιος Τζήλης, Αντιπρύτανης Ακαδημαϊκών Υποθέσεων, Δατ Βίου Μέλησης, Διεθνών Σχέσεων και Εξωτερικών

Δημήτριος Κουσανλής, Αντιπρύτανης Οικονομικών, Προγραμματισμού, Ανάπτυξης και Υποδομών

Στέλιος Λαβός, Αντιπρύτανης Διοικητικών Υποθέσεων και Φοιτητικής Μέριμνας



INTERNATIONAL WORKSHOP

From Atoms to Materials with Electron Nanoscopy *Advanced Analytical and In-Situ Approaches*

28-29.9.2024

Thessaloniki - Greece

Registration & participation
information here



A poster session is available for
young researchers to present.

Registration & Abstract
submission open :

15.5.2024

Official Language: English

Venue: Aristotle University Research
Dissemination Center (KEΔEA)



Esteemed invited speakers unveil the
fascinating world of the small and the
behavior of matter down to the level of
atoms.

For researchers and students in
nanoscience & nanotechnology, materials
science & engineering, and life sciences.

Topics include atomic-resolution nanoscopy,
tomography, spectroscopical methods,
in-situ/operando microscopy, quantitative
microscopy, computational approaches.

Organized by the Greek Electron
Nanoscopy network Nanoscopy-GR.

Chair: Prof. G. P. Dimitrakopoulos

Electron Microscopy Laboratory
School of Physics AUTH
Celebrating 60 years of excellence



web: atmaten.physics.auth.gr

e-mail: nanoscopy@auth.gr



UNIVERSITY
OF OSLO



Hellenic
Microscopy
Society



RESEARCH COMMITTEE
ARISTOTLE UNIVERSITY OF THESSALONIKI



NanoMEGAS
Advanced Tools for electron diffraction

