Περίοδος Δ΄ • Τεύχος 22 • Φεβρουάριος 2015

φαινόμενον:::

Το περιοδικό του Τμήματος Φυσικής του Α.Π.Θ.

- ευφυή υλικά
- το πνευματικό άλμα του Νεύτωνα
- η ειδική σχετικότητα πριν τον Einstein
- περί σύγκλισης: Αρχιμήδης
- βραβεία Νόμπελ 2014 φυσικής και χημείας

http://phenomenon.physics.auth.gr

φαινόμενον::::

Περίοδος Δ' · Τεύχος 22
Φεβρουάριος 2015
Περιοδική έκδοση του Τμήματος Φυσικής
Α.Π.Θ. (προεδρία Κ. Χρυσάφη)

συντακτική ομάδα

Γεώργιος Δημητρακόπουλος
(Αναπλ. Καθ. Τμ. Φυσικής)
Μαρία Κατσικίνη
(Επικ. Καθ. Τμ. Φυσικής)
Αναστάσιος Λιόλιος
(Αναπλ. Καθ. Τμ. Φυσικής)
Χαρίκλεια Μελέτη
(Επικ. Καθ. Τμ. Φυσικής)
Στυλιανός Στούλος
(Επικ. Καθ. Τμ. Φυσικής)
Ιωάννης Στούμπουλος
(Επικ. Καθ. Τμ. Φυσικής)
Ολυμπία Δάρτση, Δημήτριος Χατζηπαναγιωτίδης
(Απόφοιτοι Τμ. Φυσικής)
Στέφανος Μαύρος, Κων/νος Κατριοπλάς, Μαρία Κρικέλη, Στέφανος Μανουσαρίδης, Παύλος Μανωλούδης, Αθανάσιος Μάττας, Κωνσταντίνα Πανουτσοπούλου, Χρήστος Παπαπαντελής, Δάφνη Παρλιάρη, Μάριος Σαμάνης, Αναστασία Τερζοπούλου, Βασίλειος Τσιώλης , Νικόλαος Χατζαράκης, Ηλίας Χατζηχιδήρογλου
(Φοιτητές/τριες Τμ. Φυσικής)

στο τεύχος αυτό συνεργάστηκαν

Φιλομήλα Κομνηνού
(Καθηγήτρια Τμ. Φυσικής)
Γεώργιος Θεοδώρου
(Διατελέσας Καθηγητής Τμ. Φυσικής)
Καλλιόπη Μπαζιώτη
(Υποψ. Διδάκτορας Τμ. Φυσικής)
Χρήστος Παπαπαντελής, Αναστασία Τερζοπούλου, Βασίλειος Τσιώλης, Νικόλαος Χατζαράκης
(Φοιτητές/τριες Τμ. Φυσικής)

εκτύπωση
COPYCITY Ε.Π.Ε.

ψηφιακή έκδοση
http://phenomenon.physics.auth.gr
E-mail επικοινωνίας:
phenomenon@physics.auth.gr

σημείωμα της σύνταξης

Σε αυτό το τεύχος του «ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΝ», περιέχονται άρθρα σχετικά με τα ευφυή υλικά, τη θεωρία της βαρύτητας του Νεύτωνα, την ειδική σχετικότητα πριν την διατύπωση της σχετικής θεωρίας από τον Einstein καθώς και την έννοια της σύγκλισης και τη συνεισφορά του Αρχιμήδη στην κατανόηση και τη θεμελίωσή της. Η ύλη αυτού του τεύχους εμπλουτίστηκε και με ένα «επιστημονικό» σταυρόλεξο. Από το τεύχος δε λείπουν τα νέα και οι εκδηλώσεις του τμήματος αλλά και τα επιστημονικά νέα με τα βραβεία Νόμπελ Φυσικής και Χημείας 2014.

Η ΣΥΝΤΑΚΤΙΚΗ ΟΜΑΔΑ

περιεχόμενα

- Νόμπελ Φυσικής 2014 **1**
- Νόμπελ Χημείας 2014 **3**
- Το πνευματικό άλμα του Νεύτωνα **5**
- Ευφυή υλικά **11**
- Η ειδική σχετικότητα πριν τον Einstein **16**
- Περί της σύγκλισης: Αρχιμήδης **23**
- Σταυρόλεξο **28**
- Νέα του Τμήματος **29**
- Συνέβησαν στο Τμήμα **30**

φωτογραφίες

Εξώφυλλο: (φόντο) wallpapers.free-review.net, pixshark.com, www.fbpapa.com, www.nobelprize.org, becuo.com,
Οπισθόφυλλο: www.noesis.edu.gr.
Φωτογραφίες ορκωμοσιών: Ι. Στούμπουλος

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, διαδώστε, διασκευάστε 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.
Δείτε αναλυτικά του όρους: **http://creativecommons.org/licences/by-sa/3.0/**

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

Blue Light Emitting Diodes: *η ανατροπή του τοπίου στη φωτονική τεχνολογία*

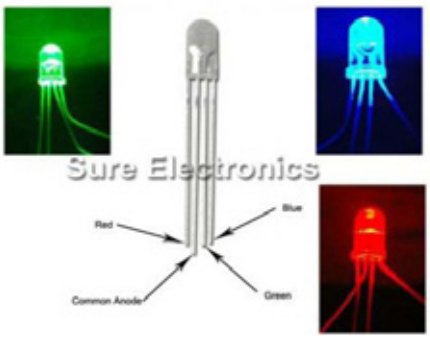
Νόμπελ Φυσικής 2014

Φιλομήλα Κομνηνού
Καθηγήτρια
Τμ. Φυσικής

Την 7η Οκτωβρίου 2014 η Βασιλική Σουηδική Ακαδημία Επιστημών, ανακοίνωσε την απονομή του Βραβείου Νομπέλ Φυσικής για το 2014 από κοινού σε τρεις Ιάπωνες επιστήμονες για την εφεύρεση των διόδων εκπομπής φωτός (LEDs) κυανού χρώματος, που επέτρεψε την κατασκευή πηγών λευκού φωτός μεγάλης λαμπρότητας, μεγάλου χρόνου ζωής και χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης. Οι τρεις νομπελίστες είναι οι:

- **Isamu Akasaki,** καθηγητής στο Meijo University και το Nagoya University της Ιαπωνίας,
- **Hiroshi Amano**, επίσης καθηγητής στο Nagoya University, και
- **Shuji Nakamura**, καθηγητής στο University of California, Santa Barbara των ΗΠΑ.

Τα LEDs τελευταίας γενιάς είναι φωτονικές διατάξεις που εκπέμπουν μονοχρωματικό φώς μέσω επανασύζευξης ζευγών ηλεκτρονίων-οπών (solid-state lighting). Τα βασικά δομικά στοιχεία μιας τέτοιας διάταξης αποτελούν δυο στρώσεις (layers) ημιαγωγικών υλικών με διαφορετικές προσμίξεις (doping), μια με περίσσεια ηλεκτρονίων, n-στρώση, και η δεύτερη με περίσσεια οπών (έλλειψη ηλεκτρονίων), p-στρώση, μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται μια πολυστρωματική περιοχή κβαντικών φρεάτων/φραγμάτων (multiple quantum wells). Η περιοχή αυτή είναι η ενεργός περιοχή της διάταξης, δηλαδή η περιοχή από την οποία εκπέμπονται φωτόνια συγκεκριμένου μήκους κύματος (καθορίζουν το χρώμα) λόγω επανασύζευξης ηλεκτρονίων-οπών τα οποία κινούνται και παγιδεύονται στην ενεργό περιοχή με ορθή πόλωση της διάταξης. Είναι αποδεκτό από τη διεθνή ερευνητική κοινότητα ότι η φωτονική τεχνολογία χρωστά την αλματώδη πρόοδό της σε ημιαγωγικά υλικά που δεν υπάρχουν στη φύση σε μονολιθική μορφή αλλά αναπτύσσονται σε μορφή λεπτών υμενίων επάνω σε κατάλληλα κρυσταλλικά υποστρώματα με την επιταξιακή εναπόθεση ατομικών στρώσεων μίας προς μία. Η επιταξιακή ανάπτυξη επιτυγχάνεται με σύγχρονες μεθόδους όπως είναι η επιταξία με μοριακή δέσμη (MBE) και η επιταξία με μεταλλοργανική εναπόθεση ατμών (MOVPE). Στην κατηγορία αυτών των υλικών ανήκουν και οι σύνθετοι ημιαγωγοί άμεσου ενεργειακού χάσματος III-V και ειδικότερα τα νιτρίδια του γαλλίου (GaN), του ινδίου (InN) και του αργιλίου (AlN). Το GaN με ενεργειακό χάσμα 3.42 eV εκπέμπει ιώδες φως (λ=365 nm), το InN με ενεργειακό χάσμα 0.67 eV εκπέμπει στο υπέρυθρο (λ=1.85 μm) ενώ το AlN είναι ο ημιαγωγός με το μεγαλύτερο ενεργειακό χάσμα, 6.12 eV, και εκπέμπει στο κάτω όριο του βαθέος υπεριώδους (λ=210 nm). Επομένως, συνδυάζοντας δυο ή τρία μεταλλικά στοιχεία με άζωτο, σχηματίζονται τριαδικά ή τετραδικά κράματα, $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$, των οποίων το ενεργειακό χάσμα και συνεπώς το χρώμα των εκπεμπόμενων φωτονίων καθορίζεται από το ποσοστό (x,y) του αντίστοιχου δυαδικού. Με κατάλληλη επιλογή του ποσοστού των μετάλλων στις ενώσεις επιτυγχάνεται εκπομπή φωτονίων που καλύπτουν όλη τη φασματική περιοχή από το βαθύ υπεριώδες έως το μακρό υπέρυθρο. ***Γιατί είναι τόσο σημαντική η εφεύρεση των φωτο-διόδων κυανού;*** Τα LEDs κόκκινου και πράσινου φωτός είχαν κατασκευαστεί περίπου πριν από μισό αιώνα. Όμως παρά τις μεγάλες προσπάθειες της παγκόσμιας ερευνητικής κοινότητας και της βιομηχανίας φωτονικής, τα LEDs κυανού, το τρίτο χρώμα που



LED εκπομπής λευκού φωτός τεσσάρων ακίδων, τρεις για R-G-B με κοινή άνοδο (www.ledssuperbright.com)

χρειάζεται για τη σύνθεση του λευκού φωτός (θυμηθείτε τα RGB δηλ. Red, Green, Blue στις έγχρωμες οθόνες τηλεοράσεως) δεν είχαν αναπτυχθεί και αυτό αποτελούσε πρόκληση για τρεις δεκαετίες.

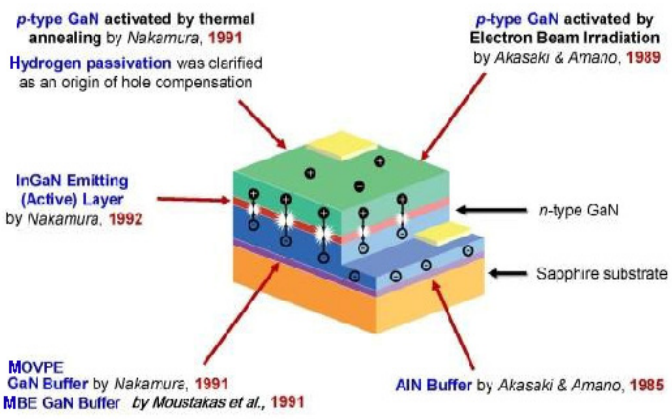
Είναι οι τρεις αυτοί ερευνητές που άνοιξαν το δρόμο για την παραγωγή τους με αποτέλεσμα τη ραγδαία ανάπτυξη της φωτονικής τεχνολογίας. Ο Akasaki ξεκίνησε τη μελέτη του GaN ήδη από το 1973, την εποχή που εργαζόταν στο Matsushita Research Institute στο Τόκιο. Το 1981, ανέλαβε θέση καθηγητή στο Πανεπιστήμιο Nagoya και συνέχισε την έρευνά του μαζί με τον τότε υποψήφιο διδάκτορα Hiroshi Amano. Το μεγάλο βήμα προς την ανάπτυξη των LEDs κυανού ήταν η μείωση της μεγάλης πυκνότητας των νηματοειδών εξαρμόσεων, δηλαδή των γραμμικών ατελειών της δομής (threading dislocations), που εισάγονται από τη διεπιφάνεια το υμενίου GaN με το υπόστρωμα λόγω της διαφοράς στη δομής τους (lattice mismatch), και διαδίδονται σε όλο το υμένιο GaN μειώνοντας δραστικά την απόδοση του υλικού. Αυτό πέτυχαν οι Akasaki & Amano το 1985 με την εναπόθεση μιας λεπτής στρώσης AIN (~30 nm) επάνω στο υπόστρωμα προ της ανάπτυξης του υμενίου GaN και τους οδήγησε στην ανάπτυξη των LEDs κυανού το 1991 με τη βελτιστοποίηση της νανοδομής των στρώσεων n-GaN/$In_xGa_{1-x}N$/p-GaN.

Παράλληλα ο Nakamura το 1991 ανακοίνωσε την ανάπτυξη εξαιρετικής κρυσταλλικής ποιότητας GaN αντικαθιστώντας το AlN στρώμα πυρηνοποίησης με GaN. Πρέπει να αναφερθεί ότι το '91, λίγο νωρίτερα από τον Nakamura, η ιδέα να χρησιμοποιηθεί GaN αντί AlN δημοσιεύτηκε από τον Έλληνα καθηγητή στο Boston University Θεόδωρο Μουστάκα, απόφοιτο και επίτιμο διδάκτορα του Τμήματος Φυσικής του ΑΠΘ. Το 1993 ο Nakamura παρουσίασε τα LEDs κυανού διπλής ετεροεπαφής $In_{0.2}Ga_{0.8}N$/GaN με λ=450 nm και ισχύ εξόδου 2.5 mW και στη συνέχεια τα Lasers κυανού που οδήγησαν στη σημαντική αύξηση της αποθηκευτικής ικανότητας των οπτικών δίσκων εγγραφής δεδομένων (Blu-Ray). Δεδομένου ότι ~1/4 της παγκόσμιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται για φωτισμό, τα LEDs λευκού φωτός με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, μεγάλη φωτεινότητα (300 lm/W) και χρόνο ζωής (~100000 h) θα συμβάλλουν σημαντικά στην εξοικονόμηση ενεργειακών πόρων. Πληροφοριακά αναφέρεται ότι οι λαμπτήρες πυρακτώσεως αποδίδουν 16 lm/W ενώ οι λαμπτήρες φθορισμού 70 lm/W. Προβλέπεται ότι το 2030 η χρήση των LEDs για φωτισμό στις ΗΠΑ θα οδηγήσει σε ~40% εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας (261 TWh) και θα μειώσει την ετήσια παραγωγή CO_2 κατά ~185 εκατομμύρια τόνους. Η έρευνα στα υλικά αυτά συνεχίζεται σε διεθνές, αλλά και σε εθνικό, επίπεδο και αποτελεί κύριο αντικείμενο ερευνητικών ομάδων στην Ελλάδα αλλά και στο Τμήμα μας. Στην ιστοσελίδα

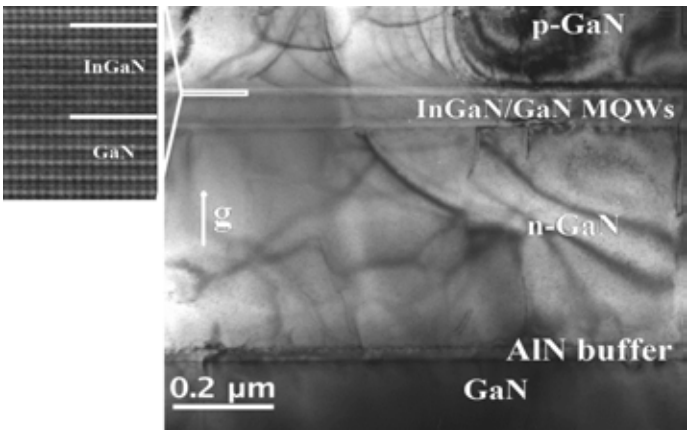
http://nmmg.physics.auth.gr

φαίνονται οι δραστηριότητες της ομάδας «Μικροσκοπίας Νανοδομημένων Υλικών» όπου διαπιστώνεται η μακροχρόνια ενασχόληση με το αντικείμενο (ως παράδειγμα η εικόνα TEM).

Είναι γεγονός ότι τα υλικά αυτά έχουν ανατρέψει το τοπίο στη φωτονική τεχνολογία του 21ου αιώνα. Οι λαμπτήρες LEDs θεωρούνται ως η ***σημαντικότερη ανακάλυψη μετά την εφεύρεση του ηλεκτρικού λαμπτήρα από τον Thomas Edison τον 19ο αιώνα***.



Γραφική απεικόνιση της δομής κυανού LED και χρονική εξέλιξη της ερευνητικής προσπάθειας.



Εικόνα TEM εγκάρσιας διατομής στην οποία παρουσιάζεται η μικροδομή κυανού LED. Η ενεργός περιοχή αποτελείται από δεκαπέντε ζεύγη λεπτών στρώσεων InGaN / GaN. Η δομή σε ατομική κλίμακα ενός ζεύγους φαίνεται στην ένθετη εικόνα υψηλής διακριτικής ικανότητας.

Από το οπτικό μικροσκόπιο στο νανοσκόπιο

Νόμπελ Χημείας 2014

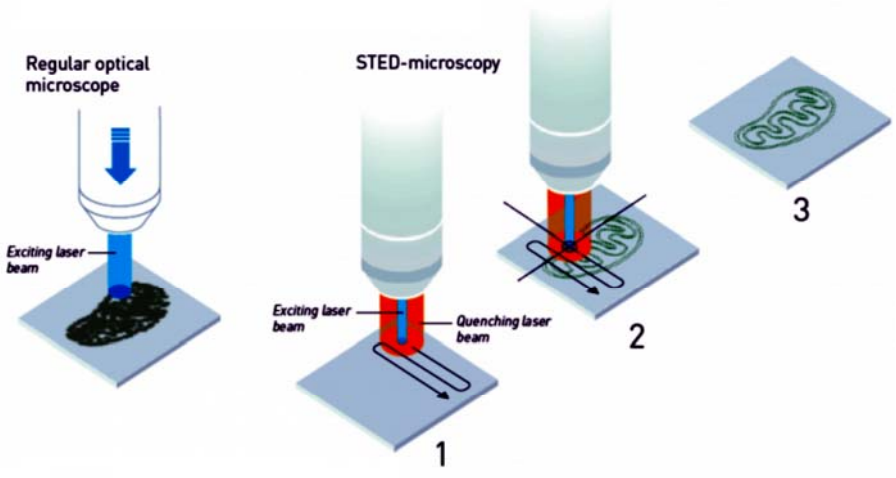
Αναστασία Τερζοπούλου
Φοιτήτρια
Τμ. Φυσικής

Το βραβείο Νόμπελ Χημείας 2014 αφορά στο πως το οπτικό μικροσκόπιο έγινε νανοσκόπιο (nanoscope) και απονέμεται στους Eric Betzig, Stefan W. Hell, William E. Moerner. Μέχρι πρόσφατα, στην επιστημονική κοινότητα επικρατούσε ο περιορισμός που προβλέπει ότι ένα οπτικό μικροσκόπιο δεν μπορεί ποτέ να δώσει ανάλυση καλύτερη από 0.2 μm. Ο περιορισμός αυτός, γνωστός ως όριο περίθλασης Abbe, προβλέπει ότι είναι αδύνατο να διακριθούν δύο στοιχεία μιας δομή που βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη από το μισό του μήκους κύματος (λ) της χρησιμοποιούμενης ακτινοβολίας στο επίπεδο (x, y). Δηλαδή σε ένα μιτοχόνδριο, που είναι της προαναφερθείσας τάξης μεγέθους, θα μπορούσαμε να διακρίνουμε το σχήμα του αλλά τίποτα από το εσωτερικό του, όπως π.χ. πρωτεΐνες.

Το όριο αυτό δεν επιτρέπει επίσης την εστίαση μιας δέσμης laser σε επιφάνεια πολύ μικρών διαστάσεων, με αποτέλεσμα όταν παρατηρείται το δείγμα στο οπτικό μικροσκόπιο η επιφάνεια φθορισμού να είναι μεγαλύτερη από τις διαστάσεις των δομών του και η εικόνα που λαμβάνεται να έχει χαμηλή ανάλυση. Οι τρεις επιστήμονες πέτυχαν να ξεπεράσουν τον περιορισμό Abbe με δύο διαφορετικούς τρόπους.

Η μικροσκοπία STED (stimulated emission depletion) αποτελεί τον έναν τρόπο με τον οποίο επιτυγχάνεται ανάλυση εικόνας οπτικού μικροσκοπίου σε διαστάσεις μικρότερες των 0.2 μm και ήταν αυτή που προτάθηκε από τον S.W. Hell. Ο Hell πρότεινε ότι αν μια δέσμη laser μπλε χρώματος περικυκλωθεί από μια δέσμη laser κόκκινου χρώματος τότε περιορίζεται η κατανομή του κίτρινου χρώματος που προκύπτει από το φθορισμό των δομών του δείγματος και είναι δυνατή η εστίαση σε μικρότερη επιφάνεια μελέτης. Αυξάνοντας την ένταση της κόκκινης δέσμης καθίσταται εφικτή η εστίαση σε όλο και μικρότερη επιφάνεια κι έτσι λαμβάνεται εικόνα υψηλότερης ανάλυσης. Το δείγμα σαρώνεται ως προς τις διευθύνσεις x,y,z και δημιουργείται μια λεπτομερής εικόνα του.

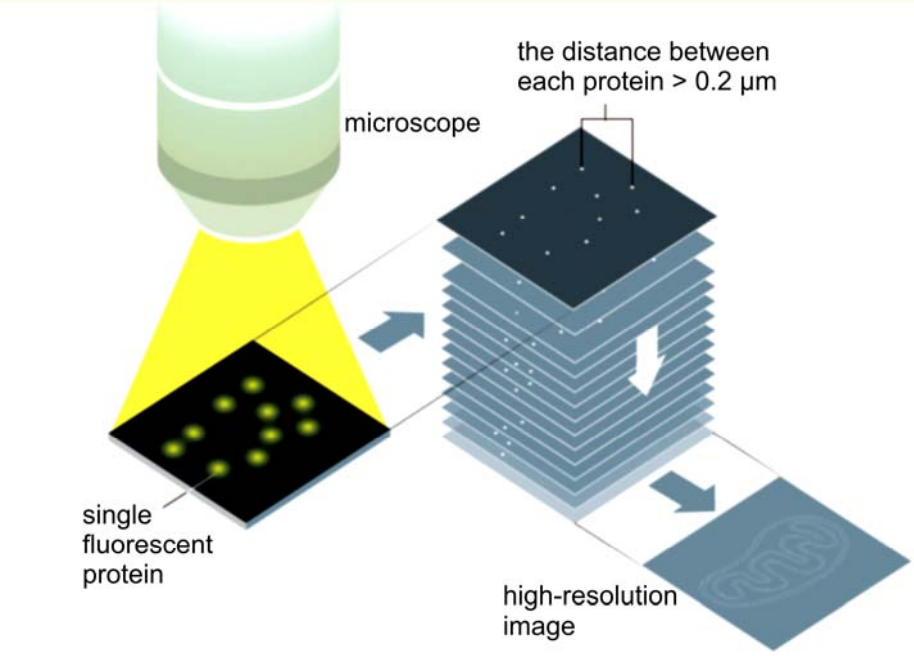
Ο δεύτερος τρόπος είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της έρευνας των δύο άλλων επιστημόνων. Το 1989 ο Moerner παρατηρεί το φθορισμό από ένα μόνο μόριο (single fluorescent molecule) και ο Betzig το 1995, χρησιμοποιώντας αυτή την παρατήρηση, προτείνει την ιχνηθέτηση ενός δείγματος με φθορίζοντα μόρια τα οποία δίνουν διαφορετικό χρώμα όταν φωτίζονται. Εφόσον οι κουκίδες του ίδιου χρώματος βρίσκονται σε απόσταση μεγαλύτερη από το όριο περίθλασης Abbe μπορεί να προσδιοριστεί η ακριβής θέση των αντίστοιχων δομών και προσθέτοντας τις εικόνες όλων των χρωμάτων να προκύψει η συνολική. Η ιδέα αυτή δεν δούλεψε πρακτικά διότι απαιτούνται πάρα πολλά διαφορετι-



Η λειτουργία STED μικροσκοπίου σε αντιπαραβολή με το συμβατικό οπτικό μικροσκόπιο.

κά φθορίζοντα μόρια ώστε να επιτευχθεί υψηλή ανάλυση και να μην υπάρχουν κενές περιοχές στην τελική εικόνα. Το 1997 ο Moerner ανακάλυψε μια πρωτεΐνη η οποία ενεργοποιούνταν και απενεργοποιούνταν (ON-OFF) από φως διαφορετικού μήκους κύματος. Αρχικά φωτίζοντάς την με φως μήκους κύματος 488 nm «αναβόσβηνε» περίπου δέκα φορές (ON) και μετά παρέμενε απενεργοποιημένη (OFF). Για να ενεργοποιηθεί και πάλι έπρεπε να φωτιστεί αρχικά με φως μήκους κύματος 405 nm και στη συνέχεια με 488 nm οπότε και περνούσε πάλι στη λειτουργία ON. Το 2006 ο Betzig σκέφτηκε να σηματοδοτήσει το δείγμα με τέτοιες πρωτεΐνες. Φωτίζοντάς το με μια δέσμη φωτός ενεργοποιείται ένα κλάσμα (1/1.000.000) αυτών οι οποίες βρίσκονται σε απόσταση μεγαλύτερη των 0.2 μm και μπορεί να προσδιοριστεί η ακριβής τους θέση. Με μία δεύτερη δέσμη φωτός ενεργοποιούνται κάποιες άλλες. Η τελική εικόνα προκύπτει «αθροίζοντας» τις επιμέρους.

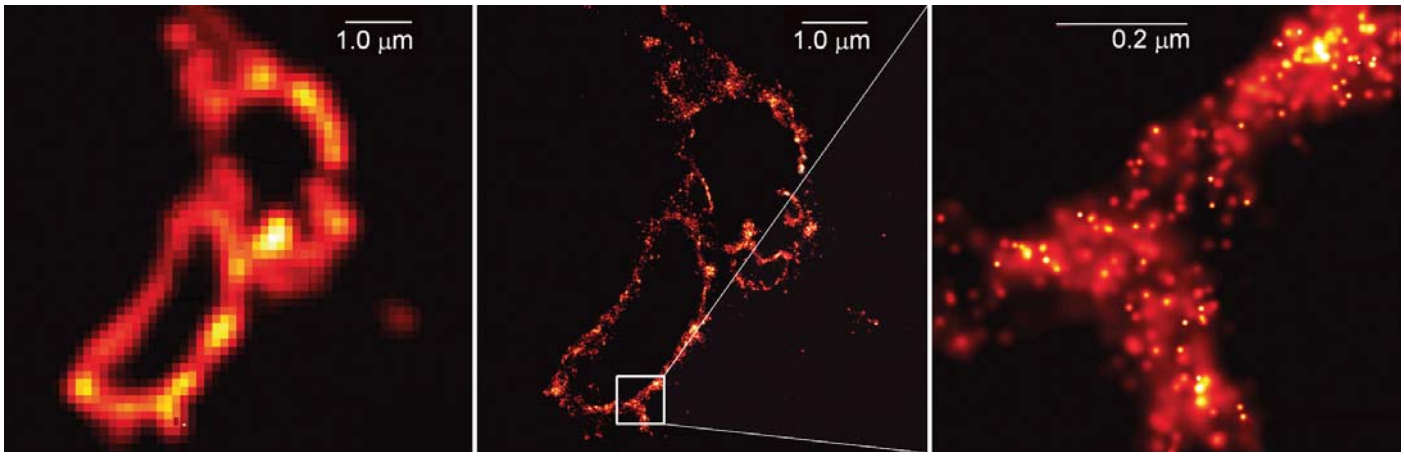
Η σημασία της ανακάλυψης της μικροσκοπίας φθορισμού υψηλής ανάλυσης, έγκειται στη δυνατότητα μελέτης ζωντανών



Αρχή λειτουργίας της μικροσκοπίας φθορισμού μοναδικού μορίου.

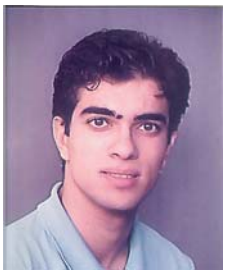
οργανισμών και κυττάρων. Αξίζει να τονισθεί πως με την ηλεκτρονική μικροσκοπία επιτυγχάνεται ανάλυση της τάξης του 1 Å. Ωστόσο αυτή είναι μόνο χωρική και δεν αφορά έμβια όντα. Η μικροσκοπία φθορισμού υψηλής ανάλυσης έχει διαδοθεί πλέον σε όλο τον κόσμο και εφαρμόζεται για τη μελέτη βιολογικών δομών και ιδιοτήτων, όπως η αντιγραφή-μεταγραφή και μετάφραση του DNA, για τη συσχέτιση πρωτεϊνών και της έκφρασής τους σε ασθένειες καθώς και για τη λειτουργία των νευρώνων του εγκεφάλου κατά τη μάθηση. Η μελέτη με μικροσκοπία φθορισμού γίνεται σε πραγματικό χρόνο (real time observation) και δίνει πληροφορίες όχι μόνο για το που, αλλά και για το πότε και το πως. Αυτή είναι και η σπουδαιότητα της ανακάλυψης.

Πηγή:
http://www.nobelprize.org (official announcement, popular-chemistryprize2014, advanced-chemistryprize2014)



Στην κεντρική εικόνα απεικονίζονται οι μεμβράνες ενός λυσοσώματος και είναι μια από τις πρώτες που λήφθηκαν από τον Betzig με μικροσκοπία μοναδικού μορίου. Αριστερά η ίδια εικόνα όπως λήφθηκε με συμβατικό οπτικό μικροσκόπιο. Δεξιά η εικόνα των μεμβρανών μεγεθυμένη.

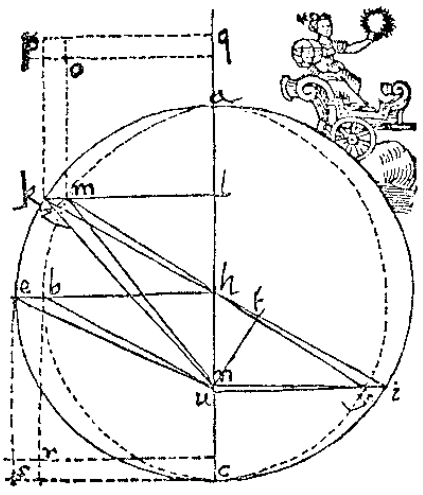
Το πνευματικό άλμα του Νεύτωνα



Βασίλειος Τσιώλης
Φοιτητής
Τμ. Φυσικής

Την περίοδο της Αναγέννησης σηματοδοτεί η εκρηκτική εξέλιξη της Αστρονομίας με τη διατύπωση του Ηλιοκεντρικού συστήματος του Κοπέρνικου (1473-1543), τους νόμους κίνησης των πλανητών του Kepler (1571-1630), τις εργασίες του Γαλιλαίου (1564-1642) και τέλος τους νόμους της δυναμικής του Νεύτωνα (1642-1727). Η βαρύτητα και το πώς αυτή λειτουργεί ήταν το κατ' εξοχήν πρόβλημα το οποίο ταλάνιζε τους επιστήμονες της εποχής, ειδικά τον **Νεύτωνα**. Ο τελευταίος διακεκριμένος φιλόσοφος και μαθηματικός της εποχής του, κατέληξε σε εξαιρετικά αποτελέσματα σχετικά με τη δύναμη της παγκόσμιας έλξης και επινόησε τον απειροστικό λογισμό σε ηλικία 22 μόλις ετών. Σύγχρονοί του επιστήμονες, όπως οι Wren, Halley και Hooke αναρωτιόταν κατά πόσο μια δύναμη αντιστρόφου τετραγώνου μπορούσε να εξηγήσει την κίνηση των πλανητών. Είχαν καταλάβει ότι, στην περίπτωση κυκλικών κινήσεων, η δύναμη θα έπρεπε να είναι δύναμη αντιστρόφου τετραγώνου, ωστόσο αδυνατούσαν να θεμελιώσουν τις απόψεις τους σε μαθηματικό πλαίσιο. Εν τω μεταξύ, ο Δανός **Tycho Brahe** (1546-1601) κατασκευάζοντας αστεροσκοπεία αρχικά στην Κοπεγχάγη και αργότερα στην Πράγα, συνέταξε μεγάλης ακρίβειας αστρονομικούς πίνακες με τη θέση των πλανητών. Το έργο του πέρασε και συνεχίστηκε από τον μαθητή του, Γερμανό μαθηματικό **Johannes Kepler**, ο οποίος μετά από επιτυχημένες και περισσότερο ακριβείς μετρήσεις από αυτές του καθηγητή του, κατέληξε στους παρακάτω εμπειρικούς νόμους για την κίνηση των πλανητών:

- ***1ος Νόμος:*** Οι πλανήτες κινούνται σε ελλείψεις τη μία εστία των οποίων καταλαμβάνει ο Ήλιος.
- ***2ος Νόμος:*** Σε ίσα χρονικά διαστήματα η επιβατική ακτίνα που συνδέει τον Ήλιο με τον κάθε πλανήτη σαρώνει ίσα εμβαδά.
- ***3ος Νόμος:*** Το τετράγωνο της περιόδου περιφοράς των πλανητών γύρω από τον Ήλιο είναι ανάλογο του κύβου του μήκους του μεγάλου ημιάξονα της ελλειπτικής του τροχιάς, με σταθερά αναλογίας ίδια για όλους τους πλανήτες.



Περίπου 70 χρόνια αργότερα από τη διατύπωση των νόμων του Kepler, ο Νεύτωνας διατυπώνει τους περίφημους τρεις νόμους της Μηχανικής στο έργο του Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, στηριζόμενος στις παρατηρήσεις και τα πειράματα του Γαλιλαίου. Ο τελευταίος ασχολήθηκε με το νόμο της ελεύθερης πτώσης, τις κινήσεις σε κεκλιμένο επίπεδο και την έννοια της αδράνειας. Υποστήριξε ότι ανεξάρτητα από τη μάζα τους, τα σώματα που αφήνονται στη Γη υπόκεινται όλα στη βαρυτική επιτάχυνση, καταρρίπτοντας έτσι τη θεωρία του Αριστοτέλη που προέβλεπε ότι τα ελαφρύτερα σώματα πέφτουν βραδύτερα από τα βαρύτερα. Ο **Νεύτωνας** λοιπόν, «πατώντας» στις εργασίες τούτες και προσπαθώντας να συσχετίσει την ελεύθερη πτώση των σωμάτων πάνω στη Γη με τις κινήσεις των πλανητών, διατυπώνει:

- ***1ος Νόμος:*** Κάθε σώμα παραμένει σε κατάσταση ακινησίας ή ισοταχούς κίνησης επί ευθείας γραμμής, εκτός αν αναγκαστεί από εξωτερικά αίτια να μεταβάλλει την κινητική του κατάσταση.
- ***2ος Νόμος:*** Η μεταβολή της ποσότητας κίνησης (αυτό που σήμερα αποκαλούμε ορμή) είναι ανάλογη της ασκούμενης δύναμης και συντελείται επί της ευθείας που δρα η δύναμη.
- ***3ος Νόμος:*** Σε κάθε δράση αντιτίθεται πάντα μία αντίδραση, δηλαδή οι αμοιβαίες

δράσεις που ασκούν ταυτόχρονα δύο σώματα το ένα στο άλλο είναι πάντα ίσες και αντίθετες.

Η απόδειξη

Το ερώτημα το οποίο τίθεται είναι κατά πόσο μπορούμε να προσδιορίσουμε τη δύναμη μεταξύ δύο ουράνιων σωμάτων με δεδομένους τους νόμους του Kepler και του Νεύτωνα (υποθέτουμε ότι ο Ήλιος έχει πολύ μεγαλύτερη μάζα από τους πλανήτες, έτσι ώστε να αγνοήσουμε την κίνησή του).

- ***Βήμα 1ο:*** *Δύναμη κεντρική*

Κατ' αρχήν αν σκεφτούμε ότι σε ένα στοιχειώδες χρονικό διάστημα dt, η επιβατική ακτίνα του πλανήτη σαρώνει εμβαδόν dA, τότε προκύπτει το Σχήμα 1. Το στοιχειώδες αυτό εμβαδόν ισούται με:

$$dA = \frac{1}{2}\left|\vec{r}\times\left(\vec{r}+d\vec{r}\right)\right| = \frac{1}{2}\left|\vec{r}\times d\vec{r}\right| \quad (1)$$

Παραγωγίζοντας την (1) ως προς το χρόνο παίρνουμε:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2}\left|\vec{r}\times\vec{v}\right| \quad (2)$$

Από τον 2ο νόμο του Kepler συμπεραίνουμε ότι αφού η εμβαδική ταχύτητα του πλανήτη παραμένει σταθερή τότε θα πρέπει και το μέτρο του διανύσματος να παραμένει σταθερό. Το διάνυσμα αυτό είναι κάθετο στο επίπεδο της κίνησης και επιπλέον, από το γεγονός ότι η τροχιά του πλανήτη είναι επίπεδη και από το ότι η φορά διαγραφής τόξων δεν αλλάζει, θα πρέπει και η διεύθυνση του $\vec{r}\times\vec{v}$ να είναι σταθερή. Συνεπώς το διάνυσμα $\vec{r}\times\vec{v}$ είναι σταθερό. Θυμόμαστε όμως ότι η στροφορμή του πλανήτη γύρω από το ελκτικό κέντρο ορίζεται ως ακολούθως:

$$\vec{L} = m\vec{r}\times\vec{v} \quad (3)$$

Θα μπορούσε δηλαδή κανείς να διατυπώσει ισοδύναμα το 2ο νόμο του Kepler ως εξής: «Η στροφορμή των πλανητών ως προς τον Ήλιο είναι σταθερή». Παραγωγίζοντας τη σχέση (3) ως προς το χρόνο παίρνουμε:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = m\left(\frac{d\vec{r}}{dt}\times\vec{v}\right)+\vec{r}\times\left(m\frac{d\vec{v}}{dt}\right) = \quad (4)$$
$$= m\left(\vec{v}\times\vec{v}\right)+\vec{r}\times\left(m\vec{a}\right) = \vec{r}\times\vec{F}$$

Στην προκειμένη περίπτωση επειδή ο ρυθμός μεταβολής της στροφορμής είναι μηδενικός, από την (4) προκύπτει ότι:

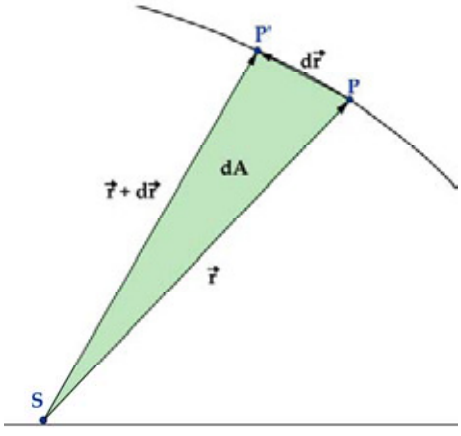
$$\vec{r}\times\vec{F} = \vec{0} \quad (5)$$

Η (5) μας εξασφαλίζει ότι η ζητούμενη δύναμη είναι κεντρική, διότι εφόσον το εξωτερικό γινόμενο των $\vec{r}$ και $\vec{F}$ είναι μηδέν τότε αυτά τα διανύσματα είναι συγγραμμικά. Επομένως

$$\vec{F} = F(r)\hat{e}_r \quad (6)$$

- ***Βήμα 2ο:*** *Δύναμη του αντιστρόφου τετραγώνου.*

Αν εκμεταλλευτούμε το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, εκφρασμένο σε πολικές συντεταγμένες γύρω από το ελκτικό κέντρο, τότε έχουμε την ακόλουθη εξίσωση:



Σχήμα 1

$$m\left(\ddot{r}-r\dot{\theta}^2\right)\hat{e}_r + \quad (7)$$
$$+\frac{m}{r}\frac{d}{dt}\left(r^2\dot{\theta}\right)\hat{e}_\theta = F(r)\hat{e}_r$$

Από την οποία προκύπτουν διαδοχικά ότι:

$$m\left(\ddot{r}-r\dot{\theta}^2\right) = F(r) \quad (7.1)$$

$$m\left(r\ddot{\theta}+2\dot{r}\dot{\theta}\right) = 0 \quad (7.2)$$

Στις παραπάνω σχέσεις το πλήθος των τελειών επάνω από τα σύμβολα δηλώνει την τάξη παραγώγισης ως προς το χρόνο. Τα *r* και *θ* είναι οι πολικές συντεταγμένες του πλανήτη ως προς την εστία της ελλειπτικής του τροχιάς όπου βρίσκεται ο Ήλιος. Η εξίσωση (7.1) συνδέει την ακτινική επιτάχυνση με την ακτινική δύναμη, ενώ η εξίσωση (7.2) μηδενίζει τη γωνιακή επιτάχυνση, λογικότατο, αφού η δύναμη έχει μόνο ακτινική συνιστώσα. Επειδή η ταχύτητα σε πολικές συντεταγμένες γράφεται:

$$\vec{v} = \dot{\vec{r}} = \dot{r}\hat{e}_r + r\dot{\theta}\hat{e}_\theta$$

αν πολλαπλασιάσουμε εξωτερικά με $\vec{r}$, εύκολα προκύπτει από την (3) ότι η στροφορμή γράφεται:

$$L = mr^2\dot{\theta} \rightarrow \dot{\theta} = \frac{L}{mr^2} \quad (8)$$

Η παραπάνω σχέση παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς μας λέει ότι εάν γνωρίζουμε τη στροφορμή ενός πλανήτη τότε μπορούμε να υπολογίσουμε και τη γωνιακή του ταχύτητα. Επειδή επιπρόσθετα το δεύτερο μέλος της (8) έχει σταθερό πρόσημο ο πλανήτης είναι αναγκασμένος να περιστρέφεται πάντα με την ίδια φορά ως προς τον ήλιο (όπως ήδη προαναφέρθηκε). Αν δεν συνέβαινε αυτό τότε η στροφορμή δεν θα ήταν διατηρήσιμο μέγεθος και δεν θα

είχε σημασία σαν ολοκλήρωμα της κίνησης. Αντικαθιστούμε την (8) στην (7.1) και παίρνουμε:

$$m\left(\ddot{r}-\frac{L^2}{m^2}\frac{1}{r^3}\right)=F(r) \qquad (9)$$

Ας θεωρήσουμε ως μεταβλητή την $u=r\dot{\theta}$. Άρα τώρα έχουμε $L=mur$, οπότε αν παραγωγίσουμε ως προς θ και αν συμβολίσουμε τις παραγωγίσεις ως προς θ με τόνο τότε:

$$\dot{r}=\frac{dr}{dt}=\frac{dr}{d\theta}\frac{d\theta}{dt}=r'\dot{\theta}=-u' \qquad (10)$$

$$\ddot{r}=\frac{d^2r}{dt^2}=\frac{d\dot{r}}{d\theta}\frac{d\theta}{dt}=-\frac{m}{L}u^2u'' \qquad (11)$$

Οπότε μέσα από τις σχέσεις (9) και (11), προσπαθώντας να απαλείψουμε το r, προκύπτει η ακόλουθη Δ.Ε.:

$$u''+u=-\frac{L}{m^2}\frac{f(u)}{u^2} \qquad (12)$$

Η σχέση (12) αποτελεί τη διαφορική εξίσωση του νόμου της δύναμης ως προς την μεταβλητή u, δηλαδή: f(u)≡ F(r)

Γενικά η εξίσωση μίας κωνικής τομής σε πολικές συντεταγμένες είναι:

$$r=\frac{p}{1+e\cos\theta} \qquad (13)$$

Η ποσότητα e καλείται εκκεντρότητα της τομής και για την έλλειψη είναι μικρότερη της μονάδος. Η ποσότητα p είναι μία σταθερά που συνδέεται με την εκκεντρότητα και τον μεγάλο ημιάξονα με τη σχέση $p=\alpha(1-e^2)$. Αν γράψουμε την (13) εκφρασμένη ως προς τη μεταβλητή u, ενθυμούμενοι ότι L=mur τότε παίρνουμε:

$$u=u(\theta)=\frac{L}{pm}(1+e\cos\theta) \qquad (14)$$

Παραγωγίζοντας δύο φορές την (14) ως προς θ παίρνουμε:

$$u''=\frac{L}{pm}(1-e\cos\theta) \qquad (15)$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (14) και (15), αντικαθιστούμε στην (12) και έχουμε:

$$2\frac{L}{pm}=-\frac{L}{m^2}\frac{f(u)}{u^2}\rightarrow f(u)=-\frac{2m}{p}u^2\rightarrow$$

$$\rightarrow F(r)=-\frac{2m}{p}\frac{L^2}{m^2r^2}=-\frac{2L^2}{mp}\frac{1}{r^2}=-\frac{k^2}{r^2}$$

όπου $k^2=2L^2/mp$. Δηλαδή η δύναμη που απαιτείται για να είναι η τροχιά του πλανήτη ελλειπτική πρέπει να είναι ελκτική και ευθέως ανάλογη του αντίστροφου τετραγώνου του μέτρου της απόστασης του πλανήτη από τον Ήλιο.

$$\vec{F}=-\frac{k^2}{r^2}\hat{e}_r \qquad (16)$$

Ωστόσο η δουλειά μας δεν έχει τελειώσει ακόμη. Ο νόμος της παγκόσμιας έλξης δεν έχει διατυπωθεί πλήρως. Ποιο είναι το *k*;

- ***Βήμα 3ο:*** *Ποιο είναι το k;*

Ο προσεκτικός αναγνώστης θα έχει προσέξει ότι, σε όλη την παραπάνω διαδικασία, ενώ οι δύο πρώτοι νόμοι του Kepler διαδραματίζουν ενεργό ρόλο, ο 3ος νόμος είναι ένας απλός παρατηρητής. Ήρθε η ώρα λοιπόν να κάνει την εμφάνιση του. Αν ανατρέξουμε στη διατύπωση του 3ου νόμου του Kepler τότε δεχόμαστε μέσω της παρατήρησης ότι:

$$\frac{T^2}{\alpha^3}=C \qquad (17)$$

όπου Τ, η περίοδος περιφοράς του πλανήτη περί τον Ήλιο, *α* το μήκος του μεγάλου ημιάξονα της ελλειπτικής τροχιάς του πλανήτη και *C*, σταθερά για όλους του πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος. Από αυτό το τελευταίο κατανοούμε ότι το *C* τούτο θα είναι ίδιο για τον Ερμή, την Αφροδίτη, τον Άρη, τη Γη κτλ. Εδώ είναι και το κλειδί για να καταλήξουμε στον νόμο της παγκόσμιας έλξης του Νεύτωνα.

Ας επιχειρήσουμε πρώτα να υπολογίσουμε την περίοδο περιφοράς του πλανήτη γύρω από τον ήλιο. Σε μία πλήρη περιστροφή του πλανήτη, η επιβατική ακτίνα του, δηλαδή το διάνυσμα με αρχή τον ήλιο S και πέρας τον πλανήτη P, έχει διαγράψει επίπεδη επιφάνεια ίση με το εμβαδόν της έλλειψης που ορίζει η τροχιά του. Το εμβαδόν της έλλειψης είναι A=πab. Επειδή όμως από το δεύτερο νόμο του Kepler, ο ρυθμός σάρωσης του εμβαδού είναι σταθερός, μπορούμε να γράψουμε ότι:

$$A=\pi ab=\frac{dA}{dt}T=\frac{L}{2m}T\rightarrow$$

$$\rightarrow T=\frac{2\pi m\alpha b}{L}$$

Και αν αντικαταστήσουμε το b με $\alpha(1-e^2)^{1/2}$, όπως δηλώσαμε και στο Σχήμα 2, θα προκύψει:

$$T=\frac{2\pi m}{L}\alpha^2\sqrt{1-e^2} \qquad (18)$$

Η σχέση (18) πρέπει να αντικατασταθεί με μία ισοδύναμη, στην οποία το α να εκφράζεται συναρτήσει των παραμέτρων της έλλειψης (e,p). Ανατρέχοντας στο Σχήμα 2, το αφήλιο και το περιήλιο είναι αντίστοιχα:

$$r(\max)=\frac{p}{1-e} \quad \text{και} \quad r(\min)=\frac{p}{1+e}$$

οπότε αν αναλογιστεί κανείς ότι r(max)+r(min)=2α, εύκολα καταλήγει στο ότι:

$$\alpha=\frac{p}{1-e^2} \qquad (19)$$

Επακολούθως από τις (18) και (19), αν αντικατασταθεί το $\sqrt{1-e^2}$, γράφουμε:

$$T = \frac{2\pi m}{L} p^{\frac{1}{2}} \alpha^{\frac{3}{2}} \qquad (20)$$

Ακόμη αποδείξαμε ότι $k_2=2L^2/mp$. Άρα αξιοποιώντας το k και τη σχέση (20) παίρνουμε κατόπιν στοιχειωδών πράξεων:

$$T = 2\sqrt{2}\pi \frac{\sqrt{m}}{k} \alpha^{\frac{3}{2}} \qquad (21)$$

Η σχέση (21) δείχνει πράγματι ότι το τετράγωνο της περιόδου περιφοράς γύρω από τον ήλιο είναι ευθέως ανάλογο του κύβου του μήκους του μεγάλου ημιάξονα της ελλειπτικής τροχιάς που ορίζει η κίνηση του πλανήτη. Υψώνουμε την (21) στο τετράγωνο για να έχουμε μία καλύτερη έκφραση του 3ου νόμου του Kepler:

$$T^2 = 8\pi^2 \frac{m}{k^2} \alpha^3 \qquad (22)$$

Συγκρίνοντας τη σχέση (17) με τη σχέση (22) διαπιστώνουμε ότι ο λόγος m/k^2, είναι σταθερός για όλους τους πλανήτες. Επομένως για δύο πλανήτες με μάζες m_1, m_2 θα πρέπει να ισχύει:

$$\frac{m_1}{k_1^2} = \frac{m_2}{k_2^2} \qquad (23)$$

Λύνοντας ως προς k_1 παίρνουμε:

$$k_1^2 = \frac{k_2^2}{m_2} m_1 \qquad (24)$$

Η σχέση (24) θα αληθεύει μεταξύ δύο πλανητών, αλλά μεταξύ και ενός πλανήτη και του Ήλιου. Γράφουμε λοιπόν για τον εκάστοτε πλανήτη i, ότι

$$k_1^2 = m_1 f(M_H) \qquad (25)$$

Σύμφωνα με τον τρίτο νόμο του Νεύτωνα, ο πλανήτης αντιδρά στον Ήλιο με δύναμη ίση σε μέτρο με την F αλλά αντίθετης φοράς, ώστε:

$$k_1^2 = m_1 f(M_H) \qquad (25)$$

όπου f μία σταθερά την οποία θεωρήσαμε ότι εξαρτάται από τη μάζα του ήλιου. Άρα λοιπόν το **μέτρο** της δύναμης που ασκεί ο ήλιος, μάζας M_H, σε έναν πλανήτη μάζας m, είναι:

$$F = \frac{m f(M_H)}{r^2} \qquad (26)$$

Σύμφωνα με τον τρίτο νόμο του Νεύτωνα, ο πλανήτης αντιδρά στον Ήλιο με δύναμη ίση σε μέτρο με την F αλλά αντίθετης φοράς, ώστε:

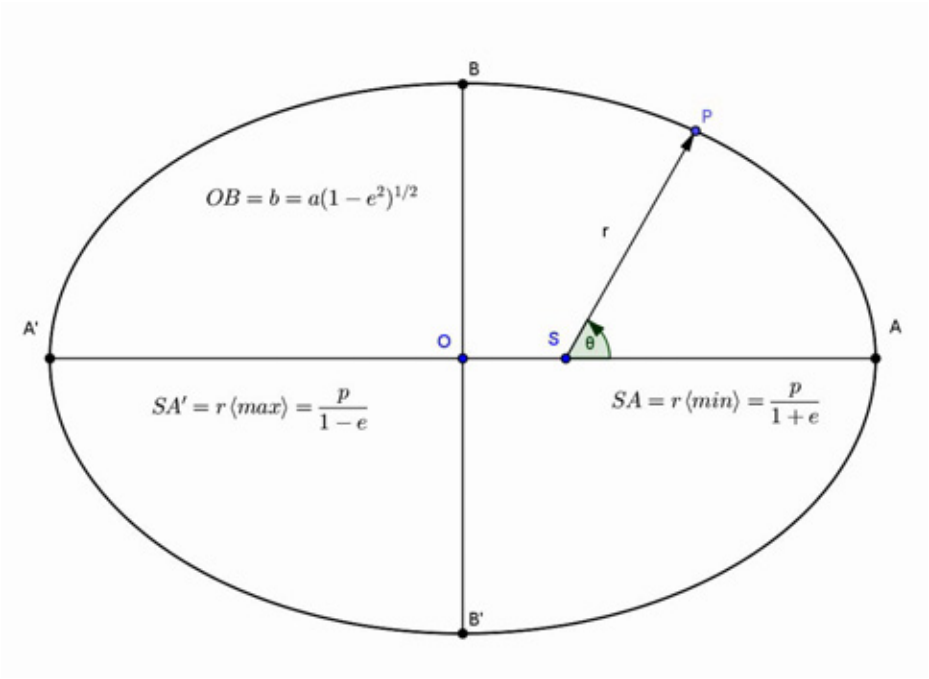
$$F = \frac{M_H f(m)}{r^2} \qquad (27)$$

Από τις σχέσεις (26) και (27) συμπεραίνουμε ότι θα πρέπει να ισχύει:

$$m f(M_H) = M_H f(m) \qquad (28)$$

Επιλύοντας ως προς f(m) παίρνουμε:

$$f(m) = \frac{f(M_H)}{M_H} m \qquad (29)$$



Σχήμα 2. Η ελλειπτική τροχιά ενός πλανήτη γύρω από τον ήλιο, όπου A το περιήλιο, S ο ήλιος, P πλανήτης και A" το αφήλιο.

Θέτουμε λοιπόν $G=F(M_H)/M_H$, όπου G μία σταθερά του ηλιακού μας συστήματος. Τώρα λοιπόν είμαστε έτοιμοι να γράψουμε τον νόμο της παγκόσμιας έλξης των μαζών (μεταξύ πλανήτη – Ήλιου) στη γνωστή του μορφή:

$$\vec{F} = -G \frac{m M_H}{r^2} \hat{e}_r \qquad (30)$$

Αδυναμίες και βελτιώσεις

Ο Νεύτωνας βέβαια δεν αρκέστηκε σε αυτό. Βάσει των πειραματικών δεδομένων και των μετρήσεων του Kepler, έδειξε ότι το αποτέλεσμα της (30) γενικεύεται μεταξύ δύο οποιωνδήποτε σωμάτων, επομένως η σταθερά G είναι παγκόσμια. Η κλασική μηχανική αποτελεί την πρώτη συστηματική προσέγγιση εύρεσης της νομοτέλειας που διέπει την κίνηση των σωμάτων. Μέχρι τον Νεύτωνα πολλές παρατηρήσεις είχαν γίνει, με ιδιαίτερη εστίαση στα ουράνια σώματα, οι οποίες ωστόσο δεν μπορούσαν να στηριχθούν από μαθηματικούς δυνα-

μικούς νόμους. Με τη διατύπωση του νόμου της παγκόσμιας έλξης («παγκόσμιας» γιατί όλα τα σώματα υπόκεινται στη βαρύτητα), ο Νεύτωνας μπόρεσε να εξηγήσει τους εμπειρικούς νόμους του Kepler, περιγράφοντας την «όρεξη των πλανητών για τον ήλιο». Εφοδιασμένοι με αυτό το «όπλο» οι επιστήμονες της εποχής, ξεκινούσαν το τολμηρό τους εγχείρημα για να σμιλέψουν ένα νέο ηλιακό σύστημα.

1η Αδυναμία

Σε αντίθεση με το πρόβλημα των δύο σωμάτων (Ήλιος-Πλανήτης), το πρόβλημα των τριών σωμάτων (Ήλιος-Πλανήτης-Πλανήτης) δεν είναι καθόλου εύκολο να λυθεί. Η θεωρία του Νεύτωνα αποκαλύπτει ότι η περιγραφή της κίνησης των πλανητών από τον Kepler δεν είναι παρά μόνο κατά προσέγγιση, διότι κάθε πλανήτης σαφώς και δεν δέχεται μόνο έλξη από τον Ήλιο (two body problem) αλλά και από άλλους πλανήτες (κυρίως από τον Δία, που δίχως άλλο είναι ο πιο ογκώδης). Το πρόβλημα των τριών σωμάτων απασχόλησε άλλωστε τους σημαντικότερους μαθηματικούς του κόσμου για πάνω από δύο αιώνες. Ασχολήθηκαν, μεταξύ άλλων, ο ίδιος ο Νεύτωνας –που χρησιμοποίησε τριγωνομετρικές σειρές– ο **Poincaré** –που έδειξε ότι οι σειρές του Νεύτωνα αποκλίνουν– και τελικά ο Φιλανδός **Sundmann** που χρησιμοποίησε επίσης τριγωνομετρικές σειρές, συγκλίνουσες αυτή τη φορά, που συγκλίνουν βραδέως. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε τελικά ως επί το πλείστον ήταν η θεωρία των παρέλξεων και η θεωρία των διαταραχών.*

Αποτέλεσμα λοιπόν αυτής της περαιτέρω έλξης από τους υπόλοιπους πλανήτες είναι ο πλανήτης να αποκλίνει από την εγγύτατη ελλειπτική τροχιά του. Οι αποκλίσεις αυτές, αν και ελάχιστες, μπορούν εντούτοις να υπολογιστούν και είναι προσιτές στην αστρονομική παρατήρηση. Αποτελούν το αντικείμενο της σημαντικής «θεωρίας των διαταραχών», που επιτρέπει το 1846 στον **Ουρβανό Λε Βεριέ** και τον **Τζον Άνταμς** να προβλέψουν την ύπαρξη και τη θέση ενός νέου πλανήτη, του Ποσειδώνα, μέσω παρατηρήσεων που έγιναν στην «ανώμαλη» τροχιά του Ουρανού. Ο Ουρανός αποτελεί τον πρώτο πλανήτη που ανακαλύφθηκε μαθηματικά και όχι με αστρονομική παρατήρηση. Συγκεκριμένα, η θεωρία διαταραχών είναι μία προσεγγιστική μέθοδος που χρησιμοποιείται για την επίλυση ενός δύσκολου προβλήματος. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται συχνά για την εύρεση προσεγγιστικής λύσης διαταραγμένων, γενικότερα μη γραμμικών εξισώσεων, όταν η λύση των αντίστοιχων αδιατάρακτων εξισώσεων είναι γνωστή, δηλαδή όταν γενικότερα οι εξισώσεις που πρέπει να λυθούν παρουσιάζουν μια μικρή απόκλιση από τις εξισώσεις ενός προβλήματος που έχει ήδη λυθεί. Για παράδειγμα, η τροχιά ενός πλανήτη γύρω από τον Ήλιο είναι μία έλλειψη. Η επίδραση των άλλων πλανητών επιφέρει μία διαταραχή που τροποποιεί ελαφρά την τροχιά, με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορεί να υπολογιστεί από τη θεωρία των διαταραχών. Η θεωρία των διαταραχών έχει την πιο ευρεία εφαρμογή από όλες τις προσεγγιστικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται στην κβαντομηχανική.

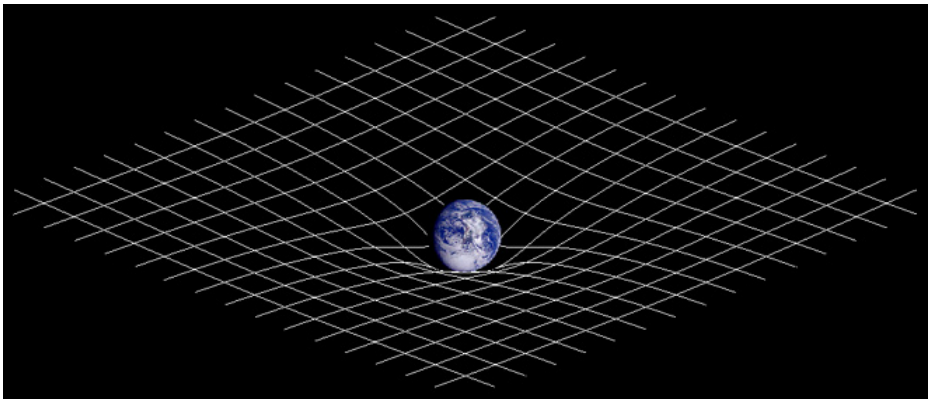
2η Αδυναμία

Ο Νεύτωνας δεν αιτιολόγησε πώς δημιουργείται η βαρύτητα, αλλά εξήγησε τα αποτελέσματα αυτής στα σώματα και το πώς τούτη επιβάλλει την κίνηση αυτών. Την έλλειψη τούτη καλύπτει η γενική θεωρία της σχετικότητας (Γ.Θ.Σ.). Η Γενική θεωρία της Σχετικότητας είναι η θεωρία βαρύτητας που προτάθηκε από τον Albert Einstein, και η οποία περιγράφει την βαρυτική δύναμη μέσω των καμπυλώσεων του χωρόχρονου παρουσία μάζας.

Μία προσέγγιση που δέχθηκε ο Νεύτωνας από τον Kepler είναι ότι ο λόγος C της σχέσης (17) είναι ίδιος για όλους τους πλανήτες, πράγμα το οποίο δεν αληθεύει σύμφωνα με σύγχρονες ακριβείς αστρονομικές μετρήσεις. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι για τον Ερμή ο λόγος αυτός είναι 2.510 σε μονάδες 10^{19} km^3/d^2, όπου d μία γήινη μέρα. Επιπλέον, ακριβείς μετρήσεις έχουν δείξει ότι το περιήλιο του Ερμή μεταπίπτει κατά 5597" ανά αιώνα. Κατά το πλείστον η μετάπτωση τούτη, εκτός από 43", δύναται να εξηγηθεί από τους νόμους του Νεύτωνα για τη βαρύτητα. Για τα υπόλοιπα 43" υπεισέρχεται η γενική θεωρία της σχετικότητας.

** Τραχανάς Στέφανος, Κβαντομηχανική Ι, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης 2009.*

Τραχανάς Στέφανος, Κβαντομηχανική ΙΙ, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης 2009.



Η σύγκλιση των θεωριών

Θα μπορούσε να ισχυριστεί κάποιος ότι η νευτώνεια θεώρηση του σύμπαντος θεωρείται ξεπερασμένη, αφού νέες θεωρίες, όπως η σχετικότητα φαίνεται να δίνουν καλύτερα και πιο ακριβή δεδομένα. Επομένως τι μας χρειάζεται μια θεωρία η οποία υστερεί σε σύγκριση με μία άλλη; Κατ' αρχήν η καθημερινή πρακτική δεν βρίσκεται σε καμία, μα καμία, αντίφαση με τους νόμους της νευτώνειας μηχανικής. Όποιος θα χρησιμοποιούσε όρους σχετικότητας για να υπολογίσει ταχύτητες αυτοκινήτων πάνω στην επιφάνεια της γης, μάλλον αφελής θα ήταν. Όχι μόνο τα μηχανήματα καθημερινής χρήσης αλλά ακόμα και ευρέως διαδεδομένα τεχνολογικά επιτεύγματα, όπως τα διαστημόπλοια, υποτάσσονται πιστά στον νόμο της παγκόσμιας έλξης. Έκπληξη ίσως να προκαλέσει το γεγονός ότι ακόμα και οι επιστήμονες και μηχανικοί που σχεδιάζουν πτήσεις στο διάστημα, υπολογίζουν τις τροχιές των δορυφόρων και των διαστημοπλοίων βάσει της νευτώνειας θεώρησης. Ολόκληρο το πλανητικό μας σύστημα, αλλά και οι κοντινοί μας γαλαξίες, υπόκεινται αρκετά ικανοποιητικά στους νόμους της νευτώνειας μηχανικής. Συνεπώς μάλλον άδικο θα ήταν να θεωρήσουμε τη μηχανική του Νεύτωνα ξεπερασμένη.

Στον αντίποδα, όπως κάθε θεωρία, έτσι και η νευτώνεια μηχανική έχει το δικό της «πεδίο ορισμού», έξω από το οποίο αρχίζει να δίνει εσφαλμένα συμπεράσματα. Η αμέσως επόμενη θεωρία δεν έρχεται να αναιρέσει την προηγούμενη ούτε να την αντικαταστήσει, αλλά να την συμπληρώσει. Συνήθως οι πρώτες θεωρίες αποτελούν οριακές περιπτώσεις των νέων πολύπτυχων θεωριών. Διευρύνοντας, μέσω καινούργιων θεωρήσεων τους νόμους του φυσικού κόσμου, ναι μεν αποκτάμε μία διαρκώς αυξανόμενη αντίληψη για τα φυσικά δρώμενα αλλά οι διορθώσεις που παίρνουμε κάθε φορά είναι ολοένα και μικρότερες. Υπό αυτήν την έννοια λοιπόν μπορούμε να πούμε ότι οι θεωρίες φαίνεται να συγκλίνουν γρήγορα σαν τους όρους μιας σειράς με πολύ γρήγορη σύγκλιση.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Χ. Βάρβογλη, όσον αφορά τις ιστορικές επισημάνσεις και την αλληλουχία των γεγονότων, τον κ. Κ. Τσιγάνη, για τις μαθηματικές υποδείξεις του και ιδιαίτερα τον κ. Λ. Βλάχο ο οποίος μου έδωσε το έναυσμα για τη συγγραφή του άρθρου και αφιέρωσε σημαντικό χρόνο ώστε να παραχθεί τούτο το αποτέλεσμα. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στον φίλο και συνάδελφο, Δ. Τερζόπουλο, του οποίου οι υποδείξεις βοήθησαν σημαντικά στην βελτίωση της εικόνας και της δομής του τελικού κειμένου.

Βιβλιογραφία

«Απειροστικός λογισμός», R.L. Finney, M.D. Weir, F.R. Giordano, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης

«Φυσική: Εισαγωγή στη Μηχανική», Θ. Καρακώστας, Δ. Σ. Κυριάκος, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη

«Ένα αστέρι πεθαίνει», Jean-Pierre Luminet, Εκδοτικός οίκος ΤΡΑΥΛΟΣ

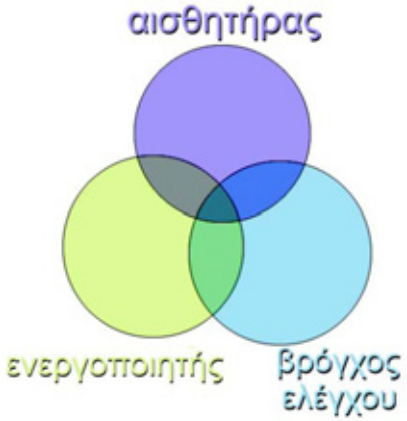
www.wikipedia.com

users.uoa.gr/~pjioannou/mech1/NOTES/leckepler.pdf

Ευφυή υλικά

Καλλιόπη Μπαζιώτη
Υπ. Διδάκτορας
Τμ. Φυσικής

Η ιστορία της ανθρωπότητας έχει αποδείξει την τεράστια επιρροή που ασκούσαν τα προηγμένα υλικά κάθε εποχής στην εξέλιξη του πολιτισμού, στην ενδυνάμωση της οικονομίας και στον καθορισμό του βιοτικού επιπέδου που απολάμβανε η κοινωνία. Δεν είναι άλλωστε τυχαίο το γεγονός ότι ολόκληρες χρονικές περίοδοι της ιστορίας χαρακτηρίστηκαν από το υλικό που κυριαρχούσε κάθε φορά, όπως η Λίθινη Εποχή, η Εποχή του Χαλκού, η Εποχή του Σιδήρου. Κατά τη διάρκεια του 20ου αιώνα, σημαντικό ρόλο έπαιξαν τα πολυμερή και οι ημιαγωγοί ενώ τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκαν σημαντικά τα "ευφυή" υλικά. Τα υλικά αυτά έχουν την ιδιότητα να μεταβάλλουν τη συμπεριφορά τους ή κάποιο χαρακτηριστικό τους με δεδομένο και ελεγχόμενο τρόπο μετά από κατάλληλη διέγερση. Αποτελούνται από τρία μέρη: τον αισθητήρα, τον ενεργοποιητή και το βρόγχο ελέγχου. Θα μπορούσαμε να πούμε πως η "ευφυΐα" τους βασίζεται στην τομή (συνδυασμό) των τριών αυτών μερών (βλ. Σχ. 1) και είναι αρκετή ώστε να μπορούμε να τα παρομοιάσουμε με έναν βιολογικό οργανισμό! Έτσι ο αισθητήρας είναι το νευρικό σύστημα του υλικού που το βοηθά να αισθάνεται αλλαγές του εξωτερικού περιβάλλοντος ή της δομής του, ο ενεργοποιητής αποτελεί το μυϊκό σύστημα ώστε το υλικό να δρα αλλάζοντας κάποια ιδιότητα του προς ορισμένη κατεύθυνση και τέλος ο βρόγχος ελέγχου είναι ο εγκέφαλος που έχει την εποπτεία όλου του συστήματος.



Σχήμα 1

Η πρώτη επαφή με τα υλικά αυτά μπορεί να τοποθετηθεί στο 1880, όταν ο Pierre Curie πειραματίζονταν με πιεζοηλεκτρικά υλικά. Ωστόσο, η διεξοδική τους μελέτη ξεκίνησε από τα τέλη τις δεκαετίας του 1960. Παρόλα αυτά πέρασαν σχεδόν 25 χρόνια, ώσπου το 1992 κάποιες επιτυχημένες εφαρμογές τους κατάφεραν να τραβήξουν το ενδιαφέρον μεγάλων εταιριών, εγκαινιάζοντας την έναρξη μεγάλων επενδύσεων στην κατεύθυνση αυτή. Τα υλικά ανάλογα με το ερέθισμα (μεταβολή) στο οποίο αντιδρούν και την ιδιότητά τους που μεταβάλλεται, κατατάσσονται σε κατηγορίες, που παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Λόγω της συνεχούς εξέλιξης των υλι-

Πίνακας 1

Τύπος	**Ερέθισμα**	**Απόκριση**
Πιεζοηλεκτρικά	Μηχανική τάση	Ηλεκτρική τάση
Κράματα μνήμης σχήματος	Θερμοκρασία/ μηχανική τάση	Σχήμα
Ηλεκτρορεολογικά	Ηλεκτρικό πεδίο	Μηχανικές ιδιότητες
Μαγνητορεολογικά	Μαγνητικό Πεδίο	Μηχανικές Ιδιότητες
Ηλεκτροσταλτικά	Ηλεκτρικό πεδίο	Σχήμα
Μαγνητοσταλτικά	Μαγνητικό πεδίο/ μηχανική τάση	Σχήμα/μαγνήτιση
Ηλεκτροχρωμικά	Ηλεκτρική τάση	Χρώμα
Θερμοχρωμικά	Θερμοκρασία	Χρώμα
Φωτοχρωμικά	Φως	Χρώμα
pH-ευαίσθητα πολυμερή	pH	Όγκος
Φωτομηχανικά υλικά	Φως	Σχήμα
Αυτοθεραπευόμενα		

κών αυτών ο Πίνακας 1 δεν καλύπτει όλες τις κατηγορίες που υπάρχουν, είναι όμως ενδεικτικός του εύρους των ιδιοτήτων που μεταβάλλονται και κατά συνέπεια των εφαρμογών που προκύπτουν.

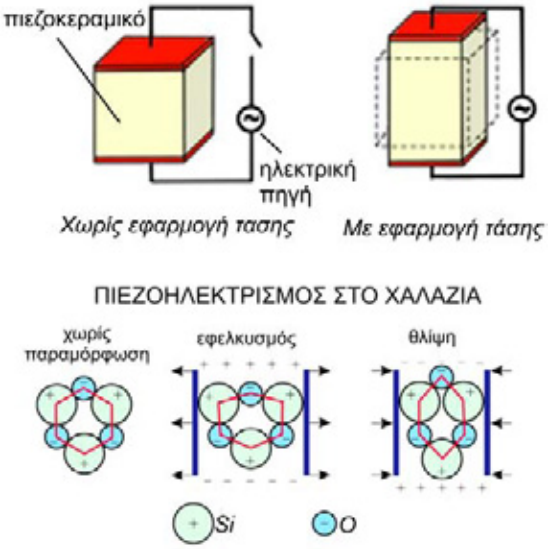
Ακολουθεί η περιγραφή μερικών κατηγοριών ευφυών υλικών:

Πιεζοηλεκτρικά ονομάζονται τα υλικά που αντιδρούν στην εφαρμογή μηχανικής τάσης παράγοντας ηλεκτρική τάση στα άκρα τους. Λειτουργούν και αντιστρόφως, καθώς όταν ασκείται πάνω τους ηλεκτρική τάση μεταβάλλουν το σχήμα τους. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν κυρίως κρυσταλλικά στερεά, αρκετά κεραμικά και πολυμερή και είναι τόσο υλικά που βρίσκονται στη φύση (χαλαζίας, τουρμαλλίνης) όσο και τεχνητά ($PbZr_xTi_{1-x}O_3$ για $0<x<1$, $BaTiO_3$, άλας του Rochelle). Για να αντιληφθούμε το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο σε μικροσκοπικό επίπεδο αρκεί να σκεφτούμε πως στα πιεζοηλεκτρικά υλικά κάθε μόριο ή κυψελίδα συμπεριφέρεται ως δίπολο. Υπό απουσία παραμόρφωσης, η κατάσταση είναι ουδέτερη καθώς η συνισταμένη των διπολικών ροπών είναι μηδέν. Η εφαρμογή όμως μηχανικής τάσης επηρεάζει τον προσανατολισμό των διπολικών ροπών με αποτέλεσμα να αναπτύσσεται ηλεκτρική τάση στα άκρα του υλικού (βλ. Σχ. 2).

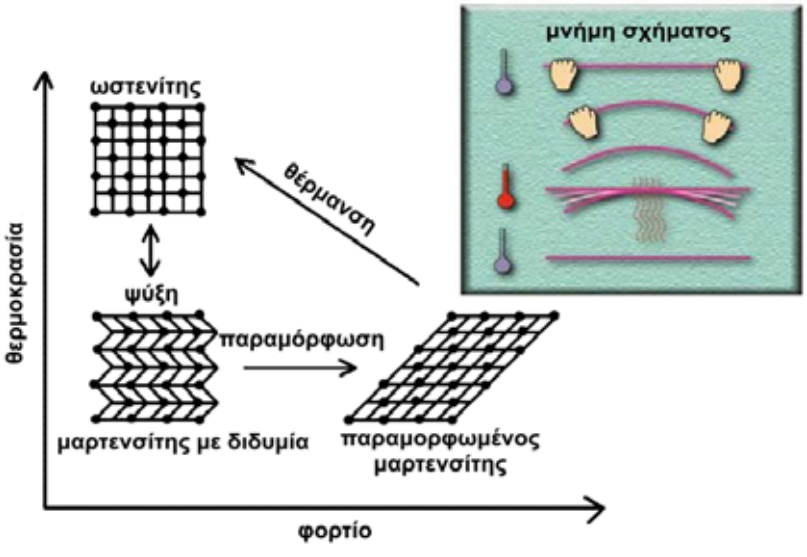
Τα **κράματα με μνήμη σχήματος (shape-memory alloys)** έχουν την ικανότητα να «θυμούνται» και να επιστρέφουν σε ένα προγενέστερο σχήμα τους, αντιδρώντας σε μια θερμοκρασιακή μεταβολή ή σε άσκηση μηχανικής τάσης. Κράματα μνήμης σχήματος με ευρεία χρήση είναι: Ni-Ti, Cu-Al-Ni, Cu-Zn-Al-Ni. Η αλλαγή του σχήματος οφείλεται σε εναλλαγή δύο φάσεων του κράματος: της ωστενιτικής και της μαρτενσιτικής. Σε υψηλές θερμοκρασίες ευνοείται η ωστενιτική φάση όπου το κράμα έχει κυβική δομή και είναι σκληρό. Όταν η θερμοκρασία ελαττώνεται, το κράμα μετασχηματίζεται στη μαρτενσιτική φάση η οποία έχει ρομβοεδρική δομή, γίνεται πιο μαλακό και μπορεί να διαμορφωθεί στο επιθυμητό σχήμα (βλ. Σχ. 3). Καθώς όμως αυξάνεται ξανά η θερμοκρασία, εμφανίζεται πάλι η ωστενιτική φάση και το υλικό επιστρέφει στην κυβική δομή και στο αρχικό του σχήμα.

Αυτοθεραπευόμενα είναι συνθετικά υλικά που, όπως το λέει και η ονομασία τους, έχουν την ικανότητα να αυτοθεραπεύονται καθώς έχουν ψεκαστεί με μικροκάψουλες κόλλας οι οποίες δρουν δυναμικά στη στεγανοποίηση τριχοειδών ρωγμών που μπορεί να αναπτυχθούν στο υλικό (βλ. Σχ. 4). Αν και η επιστημονική έρευνα σε αυτόν τον τομέα των υλικών είναι σε εξέλιξη, δεν έχει ξεκινήσει ακόμα η εμπορική παραγωγή τους. Η εφαρμογή τους θα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιοχές στις οποίες είναι δύσκολο να υπάρχει άμεσα ανθρώπινη παρέμβαση (π.χ. διαστημικές εφαρμογές).

Τα ευφυή υλικά βρίσκουν εφαρμογές σχεδόν σε κάθε τομέα της ζωής μας όπως η υγεία, οι μεταφορές, η βιομηχανία τροφίμων και ποτών, το περιβάλλον, οι πολεοδομικές εγκαταστάσεις, ο αθλητισμός, η άμυνα, οι διαστημικές αποστολές κ.α.. Μερικές εφαρμογές τους παρουσιάζονται παρακάτω.



Σχήμα 2



Σχήμα 3

Υγεία

Επανάσταση στον τομέα της υγείας έφερε η εφαρμογή ευφυών υλικών στην κατασκευή βιοαισθητήρων. Ο βιοαισθητήρας είναι μια ανεξάρτητη ολοκληρωμένη συσκευή, ευαίσθητη σε φυσικά ή χημικά ερεθίσματα που μετατρέπει μια βιολογική απόκριση σε ηλεκτρικό σήμα. Αποτελείται από δύο τμήματα: τον βιοχημικό υποδοχέα και το στοιχείο μετατροπέα. Ο βιοχημικός υποδοχέας αποτελείται από ένα βιολογικό υλικό (π.χ. ένζυμο, κύτταρο, ιστό, DNA, RNA, αντίσωμα) το οποίο δεσμεύει το στοιχείο που θέλουμε να μελετήσουμε (π.χ. γλυκόζη) μέσω βιοχημικών αντιδράσεων οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα να συμβεί στο σύστημα μια φυσικοχημική μεταβολή (π.χ. μηχανική τάση). Αυτή γίνεται αντιληπτή από το στοιχείο μετατροπέα (π.χ. πιεζοηλεκτρική συσκευή) που αντιδρά παράγοντας ηλεκτρικό σήμα (βλ. Σχ. 5). Έτσι ανάλογα με το μέγεθος του ηλεκτρικού σήματος που λαμβάνουμε προσδιορίζεται η συγκέντρωση ουσιών και άλλων παραμέτρων βιολογικού ενδιαφέροντος. Με τη χρήση βιοαισθητήρων μπορεί να επιτευχθεί παρακολούθηση της γλυκόζης σε ασθενείς με διαβήτη, αναλυτική μέτρηση φολικού οξέως, βιοτίνης, βιταμίνης B12 και παντοθενικού οξέως ως εναλλακτική λύση στη μικροβιολογική ανάλυση καθώς και πιθανή διάγνωση μελανώματος, δερματικών παθήσεων, ανάλυση τοξικών, λοιμογόνων και καρκινογόνων παραγόντων, διαταραχές μεταβολικών ισορροπιών.

Βιομηχανία τροφίμων και ποτών

Στη βιομηχανία τροφίμων και ποτών γίνεται χρήση βιοαισθητήρων για ανίχνευση μολυντών, εξακρίβωση συστατικών του προϊόντος, έλεγχο μεταλλαγμένων προϊόντων, έλεγχο φρεσκάδας προϊόντος. Ήδη η βιομηχανία μπύρας χρησιμοποιεί βιοαισθητήρες.

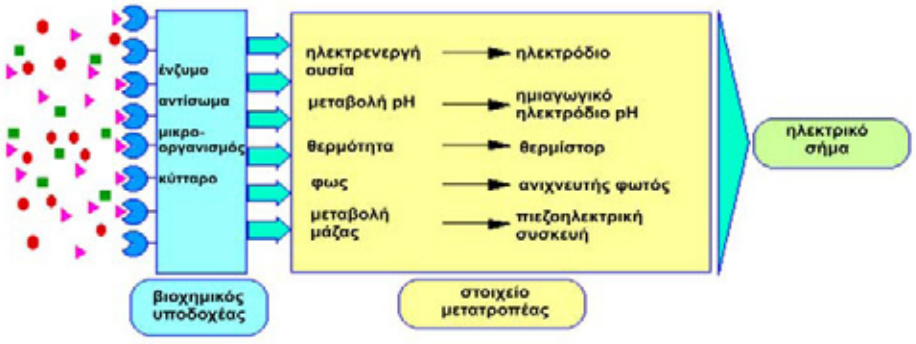
Σχήμα 4

Περιβάλλον

Βιοαισθητήρες χρησιμοποιούνται και σε περιβαλλοντικές εφαρμογές για την ποσοτική ανάλυση όπως για παράδειγμα τη μέτρηση της τοξικότητας του νερού αλλά και για την ανίχνευση συστατικών όπως είναι βιοκτόνες ουσίες, ενδογενείς ορμόνες, PCBs, διοξίνες, απολυμαντικά, αρωματικές ενώσεις, αντιβιοτικά. Είναι σημαντικό το γεγονός ότι οι βιοαισθητήρες επέτρεψαν την πραγματοποίηση επιτόπιων μετρήσεων ακόμα και σε δυσπρόσιτες περιοχές (π.χ. υπόγεια νερά, λίμνες, υδάτινα λύματα) χωρίς την ανάγκη μεταφοράς του νερού στα εργαστήρια σε δοχεία που θα απαιτούσε περεταίρω χημική επεξεργασία (λόγω των χημικών αντιδράσεων του νερού με το δοχείο).

Πολεοδομικές εγκαταστάσεις

Μέχρι τώρα για τον έλεγχο της κατάστασης πολεοδομικών εγκαταστάσεων, όπως για παράδειγμα γέφυρες, δρόμοι, κτίρια, συστήματα ύδρευσης, απαιτούνταν η ανθρώπινη παρέμβαση κάτι που αφενός κόστιζε σε χρόνο και χρήμα, αφετέρου ήταν αναποτελεσματικό καθώς δεν ήταν δυνατό να ανιχνευθούν κρυμμένες ρωγμές ή διάβρωση από πλημμύρες. Αν αναλογιστούμε την ανάγκη άμεσου ελέγχου των πολεοδομικών εγκαταστάσεων ειδικά σε περιοχές που πλήττονται συχνά από φυσικές καταστροφές όπως σεισμούς, πλημμύρες, υψηλή στάθμη θάλασσας, κατανοούμε την ανάγκη εφαρμογών ευφυών υλικών. Ειδικότερα:



Σχήμα 5

• *Γέφυρες:* Για τον έλεγχο της κατάστασης των γεφυρών τοποθετούνται αισθητήρες σε κρίσιμα σημεία, δημιουργώντας ένα πλέγμα το οποίο μεταφέρει ηλεκτρικά σήματα και δίνει 2D απεικόνιση της απόκρισης της γέφυρας στις διάφορες μηχανικές τάσεις που δέχεται (Βλ. Σχ. 6). Έτσι γίνεται δυνατή η συλλογή στοιχείων για τη συμπεριφορά της γέφυρας σε συγκεκριμένες συνθήκες (π.χ. αυξημένη κυκλοφορία, δυνατοί άνεμοι). Για τέτοιου είδους εφαρμογές μπορούν να χρησιμοποιηθούν:

α) Πιεζοηλεκτρικά υλικά η τοποθέτηση των οποίων σε κομβικά σημεία για τον έλεγχο της κατασκευής και την ανίχνευση τοπικών βλαβών.

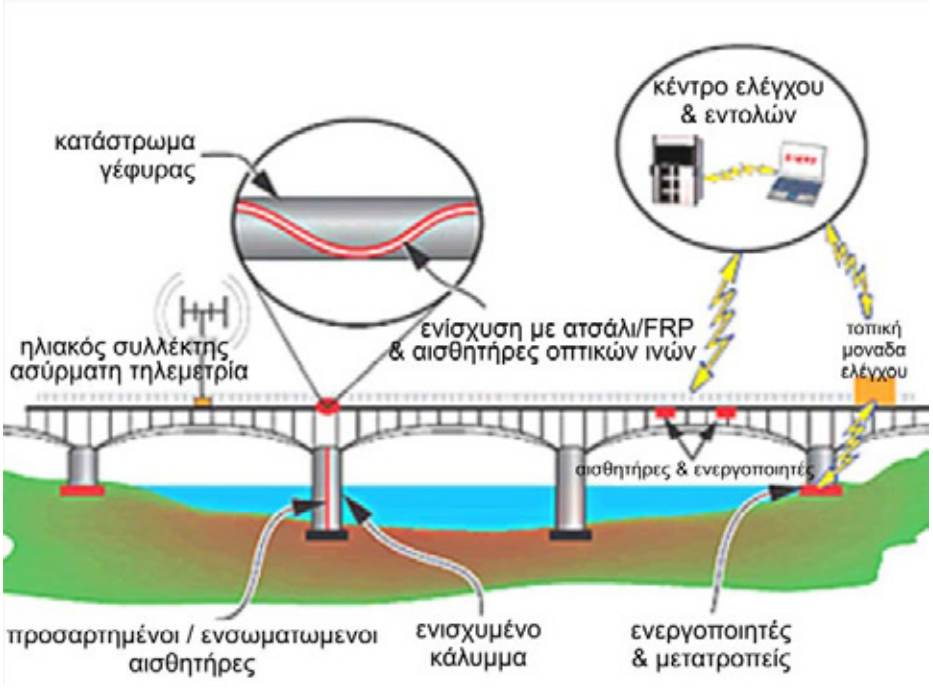
β) Κράματα μνήμης σχήματος σε μορφή μετακατασκευαστικών ινών εγκλεισμένων μέσα σε δοκάρια και κολώνες.

γ) Αυτοθεραπευόμενα υλικά τα οποία αλλάζοντας σχήμα «επουλώνουν» ολοκληρωτικά την πρώτη κιόλας ρωγμή.

δ) Χρωμικά υλικά με τη μορφή διακοσμητικής χρωστικής που αλλάζει χρώμα ηλεκτρονικά και προειδοποιεί για σημεία μεγάλων πιέσεων.

• *Οδικό δίκτυο:* Η δημιουργία δικτύου πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων στο οδικό δίκτυο στοχεύει στον έλεγχο της κίνησης, στην ανίχνευση οχήματος, στη μέτρηση βάρους και ταχύτητας.

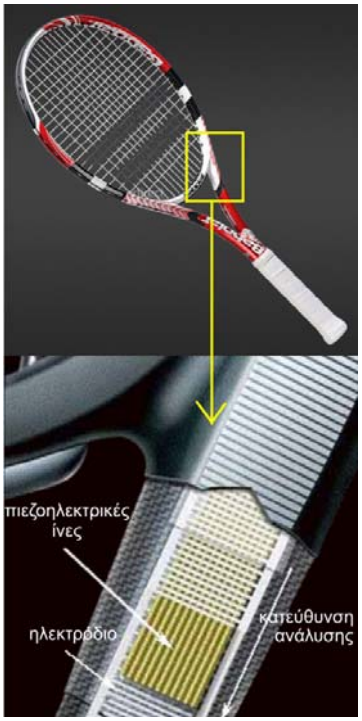
• *Έξυπνο σπίτι:* Η λειτουργία του στηρίζεται στις αρχές του αυτοματισμού, τηλεχειρισμού, χρονοπρογραμματισμού και της οπτικοποίησης. Χάρη στην εφαρμογή έξυπνων υλικών μπορούν να επιτευχθούν λειτουργίες όπως: αυτόματη ρύθμιση της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου, κλείσιμο κεντρικής θέρμανσης ή κλιματισμού όταν ξεχαστεί ανοιχτό κάποιο παράθυρο, ανέβασμα τέντας όταν φυσάει δυνατά, προσομοίωση κάποιας λειτουργίας του κτιρίου ώστε να αποθαρρυνθούν διαρρήκτες (π.χ. ανοιγοκλείνοντας φώτα), ενημέρωση για την κατάσταση του κτιρίου μέσω διαδικτύου ή κινητού τηλεφώνου. Οι παραπάνω εφαρμογές στοχεύουν σε άνοδο του βιοτικού επιπέδου, στη βοήθεια ατόμων με ιδιαίτερες ανάγκες (νοητικά, κινητικά προβλήματα, ηλικιωμένοι) και στην εξοικονόμηση ενέργειας μέσω μιας πιο ορθολογικής χρήσης του κτιριακού συστήματος.



Σχήμα 6

Μεταφορές

Στον τομέα των μεταφορών η μεγαλύτερη προσπάθεια για έρευνα και ανάπτυξη των υλικών γίνεται στον κλάδο της στρατιωτικής αεροπορίας, ακολουθούν η αυτοκινητοβιομηχανία και η ναυτιλία ενώ τις μικρότερες επενδύσεις προσελκύει ο κλάδος των σιδηροδρόμων. Βασικός στόχος είναι η μείωση ή και αποτροπή της καταπόνησης των υλικών που μπορεί να οδηγήσει σε ατυχήματα, συχνά μάλιστα με πολλά θύματα, καθώς και η μείωση του κόστους συντήρησης των μέσων μεταφοράς. Αρκεί να σκεφτούμε πως μέχρι σήμερα στα αεροπλάνα μετά από κάθε προσγείωση γίνεται επιθεώρηση με γυμνό μάτι για τον εντοπισμό των περισσότερο εμφανών σημείων που έχουν υποστεί ζημιά και σε τακτά χρονικά διαστήματα γίνεται εκτεταμένη επιθεώρηση με τεχνητά μέσα (π.χ. με συσκευές υπερήχων). Στην ουσία πρόκειται για "γδύσιμο" του αεροπλάνου από όλο τον πρόσθετο εξοπλισμό του, διαδικασία που προφανώς απαιτεί χρόνο για να ολοκληρωθεί και αυξάνει το κόστος συντήρησης. Στόχος πλέον είναι η κατασκευή αεροπλάνων που θα ελέγχουν την καταπόνηση των υλικών τους σε όλη τη διάρκεια της πτήσης και ταυτόχρονα θα έχουν τη δυνατότητα της αυτοεπισκευής. Οι προσπάθειες της επιστήμης επικεντρώνονται στις οπτικές ίνες που διατρέχοντας ένα μεγάλο μέρος του αεροπλάνου θα προσθέσουν υψηλής τεχνολογίας "νευρικό σύ-



Σχήμα 7

στημα" στα αεροπλάνα. Οπτικοί αισθητήρες θα μπορούν να αντιλαμβάνονται αεροδυναμικές δυνάμεις και να προσδιορίζουν ζημιές στα υλικά, συνδυασμός πιεζοηλεκτρικών υλικών και κραμάτων μνήμης σχήματος θα μπορούν να μεταβάλλουν το σχήμα των φτερών (όπως τα πουλιά) για βέλτιστη αεροδυναμική του οχήματος και αυτοθεραπευόμενα υλικά θα στεγανοποιούν δυναμικά αναπτυσσόμενες ρωγμές αποτρέποντας ζημιές. Όλα αυτά, πέρα από την ασφάλεια επιτρέπουν και μείωση του κόστους συντήρησης στο μισό (σήμερα οι αεροπορικές εταιρείες ξοδεύουν περίπου 30 δισεκατομμύρια δολάρια για αυτό το σκοπό).

Αθλητισμός

Προκειμένου να βελτιωθούν οι επιδόσεις των αθλητών έχουν ενσωματωθεί ευφυή υλικά στον σχεδιασμό του εξοπλισμού διαφόρων αθλημάτων όπως σε ρακέτες, σκι, μπαστούνια γκολφ, σανίδες και σκελετούς ποδηλάτων. Ένα καλό παράδειγμα για την κατανόηση της χρήσης αυτών των υλικών είναι η εφαρμογή στις ρακέτες του τένις (βλ. Σχ. 7). Οι μοντέρνες ρακέτες έχουν σχεδιαστεί να είναι δύσκαμπτες ώστε όλη την ενέργεια που δέχονται από το μπαλάκι να την επιστρέφουν πίσω σε αυτό. Για να μειωθεί η δόνηση της ρακέτας ενσωματώνονται στον λαιμό της πιεζοηλεκτρικές ίνες. Όταν η μπάλα χτυπά στη ρακέτα ο σκελετός της παρεκκλίνει ελάχιστα λυγίζοντας τις ίνες και έτσι παράγεται εναλλασσόμενο ρεύμα το οποίο μέσω ηλεκτροδίων μεταφέρεται σε ένα ενσωματωμένο μικροτσίπ που περιλαμβάνει επαγωγείς, πυκνωτές και αντιστάτες και επιστρέφει το εναλλασσόμενο ρεύμα πίσω στις ίνες σε άλλη φάση ώστε μέσω του φαινομένου της καταστροφικής συμβολής να μειώνεται η δόνηση.

Τα υλικά του μέλλοντος

Δε θα ήταν υπερβολικό να πιστέψουμε πως εφαρμογές που σήμερα ανήκουν στη σφαίρα της επιστημονικής φαντασίας θα τις δούμε στο μέλλον να πραγματοποιούνται με τη βοήθεια των ευφυών υλικών. Για παράδειγμα είναι πολύ πιθανό να κάνουμε εξέταση αίματος φορώντας φακούς επαφής! Πολλοί βιολογικοί δείκτες απαντώνται σε κύτταρα που υπάρχουν στην επιφάνεια του ματιού. Ενσωματώνοντας βιοαισθητήρες, μικροκεραίες και ημιδιαφανή μικροκυκλώματα σε φακούς επαφής (βλ. Σχ. 8) που θα φοράει ο ασθενής και που θα συνδέονται με ασύρματο δίκτυο μετάδοσης δεδομένων θα είναι δυνατόν να μετράμε π.χ. τα επίπεδα του σακχάρου συνεχώς.

Τα ευφυή υλικά προσελκύουν μεγάλες επενδύσεις και τεράστιο επιστημονικό ενδιαφέρον. Αναμένεται να κυριαρχήσουν τις επόμενες δεκαετίες και να επηρεάσουν σχεδόν όλους τους τομείς της ζωής μας.

Πηγές:

1. S. C. Liu, K. P. Chong and M. P. Singh, Smart Mater. Struct. ***4****, A169 (1995).*

2. E. T. Powner, F. Yalcinkaya, Sensor Review, ***17****, 107 (1997).*

3. H. Yanagida, Materials and Design, ***21****, 507 (2000).*

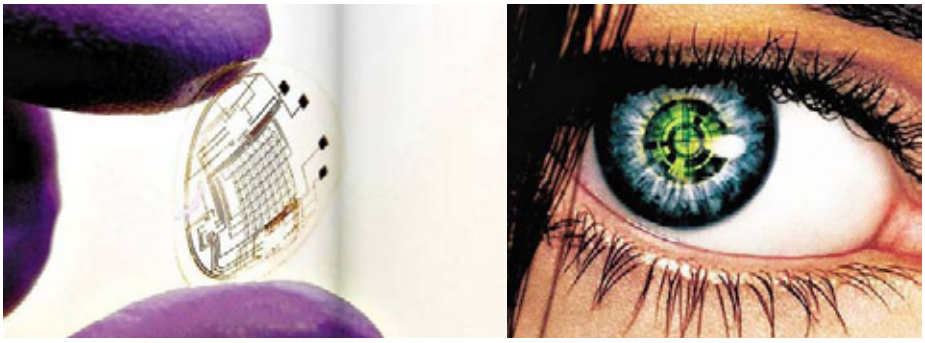
4. "Smart Materials for the 21st Century", by Foresight Materials Taskforce (IOM3)

5. "Smart materials and new Technologies: For the architecture and design professions", M. Addington and D. Shodek, Elsevier (2005).

6. S. Rodriguez-Mozaz, M.-P. Marco, M. J. Lopez de Alda, and D. Barceló, Pure Appl. Chem., ***76****, 723 (2004).*

7. http://academic.uprm.edu/pcaceres/Undergrad/Smart-Alessandra/smart.htm

8. http://webdocs.cs.ualberta.ca/~database/MEMS/sma_mems/index2.html



Σχήμα 8

Η ειδική σχετικότητα πριν τον Einstein

Νικόλαος Χατζαράκης
Φοιτητής Τμ. Φυσικής

Η Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας υπήρξε μία από τις θεωρίες της Φυσικής που όταν εμφανίστηκε, στις αρχές του 20ου αιώνα, κατάφερε να αλλάξει ριζικά τον τρόπο σκέψης στον οποίο στηριζόταν η Φυσική. Διατυπώθηκε από τον Albert Einstein (1879-1955) το 1905, βαφτίστηκε από το Max Planck (1858-1947) και η διατύπωσή της άλλαξε την άποψη που έχει η ανθρωπότητα για το χώρο και το χρόνο και πλέον αποτελεί τη βάση πολλών θεωριών της Κλασσικής –και όχι μόνο– Φυσικής. Λίγα, όμως, είναι γνωστά για το πλήθος των ανθρώπων που ασχολήθηκαν με τη θεμελίωσή της και για την πορεία των ιδεών από το 16ο αιώνα μέχρι τη διατύπωσή της. Η παρουσίαση αυτών θα είναι και ο σκοπός του παρόντος άρθρου.

Γεωμετρία και εμπειρία: Η απολυτότητα του χώρου και του χρόνου

Το μεγαλύτερο, ίσως, άλμα που πρέπει να κάνει ο ανθρώπινος νους για να κατανοήσει τη Θεωρία της Σχετικότητας, είναι να καταλάβει ότι ο χώρος και ο χρόνος στον οποίο ζει δεν είναι απόλυτος. Δηλαδή, να αποδεχθεί ότι η διαίσθησή του, που είναι περιορισμένη σε ένα μικρό κομμάτι του κόσμου, περιέχει μόνον ένα μικρό κομμάτι της πραγματικότητας. Αυτή είναι η δυσκολία που απαίτησε σχεδόν τριάντα αιώνες πολιτισμού για να ξεπεραστεί και να οδηγήσει τον Einstein –και κάποιους ακόμη σύγχρονούς του– στη δημιουργία της Θεωρίας της Σχετικότητας.

Τι σημαίνει, όμως, απόλυτος χώρος και χρόνος; Απλούστατα ότι κάθε σημείο του σύμπαντος είναι ακίνητο και ανεξάρτητο των σωμάτων που διέρχονται από αυτό και κάθε χρονική στιγμή "διατρέχει" ταυτόχρονα το σύμπαν. Άρα, ένα οποιοδήποτε γεγονός δεν επηρεάζει ούτε στο ελάχιστο το χώρο και το χρόνο στα οποία συμβαίνει, την ταυτότητά του, δηλαδή. Ας δούμε, τώρα, ένα παράδειγμα: Έστω ένα τρένο που περνάει από ένα σταθμό και δύο άνθρωποι, ένας ακίνητος μέσα στο τρένο και ένας ακίνητος στο σταθμό. Έστω, τώρα, ότι ο άνθρωπος μέσα στο τρένο παίζει με ένα μπαλάκι στέλνοντας να χτυπήσει το απέναντι τοίχωμα, να ανακλαστεί και να επιστρέψει στο χέρι του. Η τροχιά του αυτή είναι σαν μία ευθεία γραμμή κάθετη προς το τοίχωμα και παράλληλη προς τη διεύθυνση του τρένου. Ο άνθρωπος μέσα στο τρένο παρατηρεί ότι η ευθεία που κατευθύνεται στο τοίχωμα ταυτίζεται απολύτως με την ευθεία που επιστρέφει από αυτό, τόσο χρονικά όσο και χωρικά. Οπότε, για αυτόν, η συνολική χρονική διάρκεια της κίνησης είναι t και το συνολικό μήκος που διανύει το μπαλάκι είναι ℓ. Ο άνθρωπος τώρα στο σταθμό, λόγω της κίνησης του τρένου, παρατηρεί ότι η ευθεία που κατευθύνεται προς το τοίχωμα είναι μεγαλύτερη από την ευθεία που επιστρέφει από αυτό, ωστόσο το δεύτερο μέρος της κίνησης διαρκεί περισσότερο. Κατά συνέπεια, η χρονική της διάρκεια, για αυτόν, είναι $t'>t$ και το μήκος που διανύει $\ell'>\ell$. Παρατηρούμε, ότι ακόμη και σε ένα πολύ απλό παράδειγμα σύνθεσης δύο ταχυτήτων λόγω της σχετικής κίνησης του ενός παρατηρητή με τον άλλο, είμαστε αναγκασμένοι να απορρίψουμε την ιδέα του απόλυτου χώρου και χρόνου.

Η ιδέα του απόλυτου χώρου και του απόλυτου χρόνου προτάθηκε από το sir Isaac Newton (1643-1727) στο βιβλίο του "Philosophiae Naturalis Principia Mathematica" (Μαθηματικές Αρχές της Φυσικής Φιλοσοφίας). Ωστόσο, η ιδέα αυτή τριγυρνούσε στα μυαλά των φιλοσόφων και των επιστημόνων από την περίοδο των αριστοτελικών διδασκαλιών και πιθανότατα πιο πριν. Είναι, ομολογουμένως, δύσκολο να παραδεχτεί κάποιος ότι δεν μπορεί να ξέρει όλη την αλήθεια για τον κόσμο γύρω του. Όμως, δεν μπορούμε να δεχόμαστε αιωνίως ότι υπάρχει κάποιος ακίνητος παρατηρητής-θεός στο "κέντρο του κόσμου" που θα μας επιτρέπει να τον χρησιμοποιούμε ως βάση για ότι παρατήρηση θέλουμε να κάνουμε.

Ο πρώτος που φάνηκε να δίνει μια λύση στο πρόβλημα, χωρίς, όμως, να αφαιρέσει την απολυτότητα του χρόνου, ήταν ο Galileo Galilei (1564-1642) μιλώντας για σχετικές κινήσεις. Οι μετασχηματισμοί που πρότεινε, γνωστοί ως «Οι Μετασχηματισμοί του Γαλιλαίου» επιτρέπουν τη μελέτη της κίνησης ενός σώματος σε σχέση με ένα κινούμενο παρατηρητή. Οι μετασχηματισμοί είναι:

$$t' = t \qquad x' = x - \upsilon_x t$$
$$y' = y - \upsilon_y t \qquad z' = z - \upsilon_z t$$

όπου x,y,z οι χωρικές συντεταγ-

μένες ενός ακίνητου και x',y',z' οι χωρικές συντεταγμένες ενός κινούμενου παρατηρητή (σε ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων). t και t' είναι ο χρόνος που μετράει ο ακίνητος και ο κινούμενος παρατηρητής, αντίστοιχα, και

$$\vec{\upsilon} = \upsilon_x \vec{e}_x + \upsilon_y \vec{e}_y + \upsilon_z \vec{e}_z$$

το διάνυσμα της ταχύτητας του κινούμενου παρατηρητή ως προς τον ακίνητο. Οι μετασχηματισμοί αυτοί, χωρίς φυσικά να λύνουν πλήρως το πρόβλημα της απολυτότητας του χώρου, είναι το πρώτο βήμα για ένα νέο κεφάλαιο της ιστορίας της Φυσικής: καμία κίνηση δε συμβαίνει αυτόνομα αλλά πάντα αναφέρεται ως προς ένα παρατηρητή ή σύστημα αναφοράς που κινείται. Χαρακτηριστικό παράδειγμα (από τα παιδικά μας χρόνια) είναι η εξής απορία: κινείται το αυτοκίνητο προς τον ακίνητο τροχονόμο με ταχύτητα υ ή κινείται ο τροχονόμος προς το ακίνητο αυτοκίνητο με ταχύτητα –υ; Το φαινόμενο, άλλωστε, δεν αλλάζει!

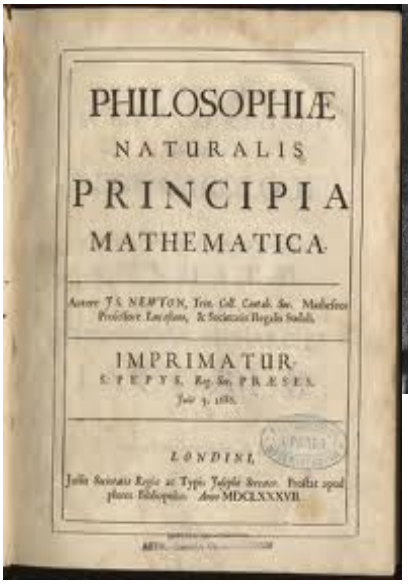
Δυστυχώς, αυτή η ιδέα δε φάνηκε να επηρεάζει τους φυσικούς της εποχής. Απλά, έλυνε κάποια λογικά προβλήματα που αντιμετώπιζε η μηχανική από τη γέννησή της. Γι' αυτό άλλωστε και αποτελούν μέχρι και σήμερα αναπόσπαστο κομμάτι της κλασσικής μηχανικής. Ωστόσο, λίγοι είχαν τη θέληση να προχωρήσουν πέρα από αυτούς και να αμφισβητήσουν την παντοδυναμία του χώρου και του χρόνου, όπως την όρισε ο Newton.

Ο σημαντικότερος, ίσως, "αντιρρησίας συνείδησης" ήταν ο Ernst Mach (1838-1916) ο οποίος διακήρυξε ευθαρσώς ότι χωρίς παρουσία ύλης, δεν μπορεί να υπάρξει γεωμετρία στο χώρο και το χρόνο, άρα δεν μπορούμε να πραγματοποιήσουμε καμία παρατήρηση ή μέτρηση. Η διατύπωση αυτή, εκτός από προάγγελος της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας, μας αναγκάζει να δεχθούμε ότι ο χώρος και χρόνος δεν είναι σταθεροί και ανεπηρέαστοι, αλλά υπόκεινται σε αλλαγές ανάλογα με τα σώματα που υπάρχουν σε αυτά ή με τα γεγονότα που συμβαίνουν.

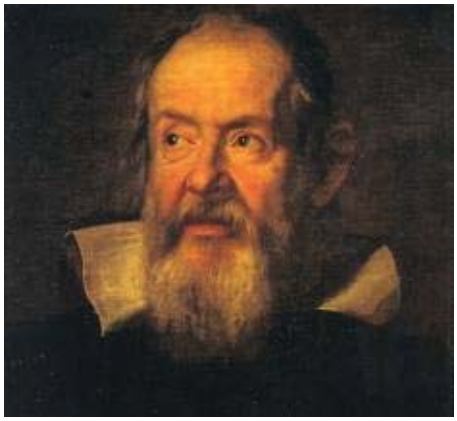
Ηλεκτρομαγνητική μάζα

Στα τέλη του 19ου αιώνα, η Φυσική, σύμφωνα με τον William Thomson (1824-1907) (γνωστό και ως Lord Kelvin), έκλεινε: τίποτα το σπουδαίο δεν υπήρχε να ανακαλυφθεί ακόμη. Ωστόσο, την ίδια αυτή περίοδο οι έρευνες καταλήγουν σε μερικά πολύ ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Ο σκωτσέζος James Clerk Maxwell (1831-1879), ακολουθώντας τα βήματα του Michael Faraday (1791-1867), διατυπώνει την πρώτη θεωρία πεδίου και ταυτόχρονα την πρώτη ενοποίηση δύο δυνάμεων της φύσης, της ηλεκτρικής και της μαγνητικής. Οι εξισώσεις του Maxwell περιγράφουν με τη μέγιστη, για την εποχή, δυνατή ακρίβεια το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Έχουν, επίσης, κάποιες ακόμη ενδιαφέρουσες συνέπειες: οι ηλεκτρομαγνητικές κυμάνσεις, οι διαταραχές δηλαδή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός. Το αποτέλεσμα αυτό, πέραν του ότι έρχεται σε πλήρη συμφωνία με τα πιστεύω της εποχής, ότι το φως είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα, βάζει ένα όριο στις ταχύτητες διάδοσης πληροφορίας, πεδίου ή σώματος: η μεγαλύτερη ταχύτητα στη φύση είναι αυτή του φωτός!

Αυτή η διατύπωση δε φαίνεται να επηρεάζει, τουλάχιστον με μια πρώτη ματιά, τη μέχρι τότε δομή της Φυσικής. Γιατί απλούστατα ελάχιστοι ασχολούνταν με ταχύτητες αυτού του μεγέθους. Ωστόσο, πρέπει

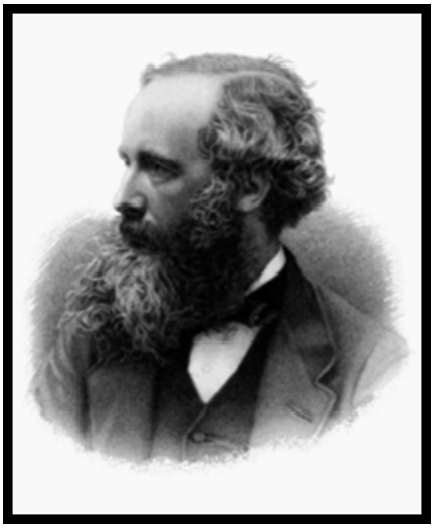


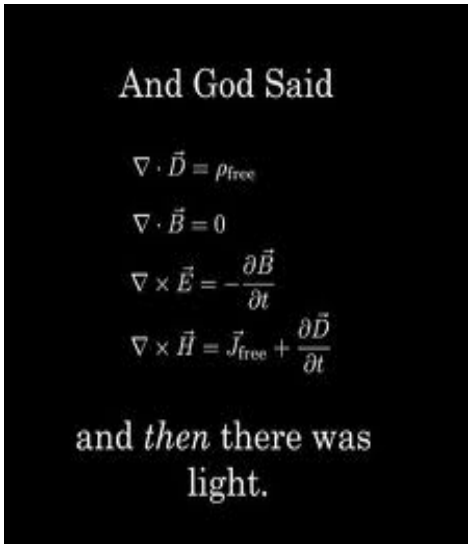
Ο sir Isaac Newton και το βιβλίο του "Philosophiae Naturalis Principia Mathematica"



Ο Galileo Galilei, πατέρας της Αρχής των Σχετικών Κινήσεων

κανείς να παραδεχθεί ότι η πρόσθεση ταχυτήτων που προτείνεται από τους μετασχηματισμούς του Γαλιλαίου δεν αρκεί για να καλύψει τα δεδομένα, αντίθετα προβλέπει ταχύτητες μεγαλύτερες του φωτός όταν οι ταχύτητες του κινούμενου παρατηρητή καθώς και του κινούμενου σώματος, όπως το παρατηρεί αυτός, πλησιάζουν αυτή του φωτός. Κατά συνέπεια, η νόμοι της Φυσικής που ίσχυαν μέχρι τότε έπρεπε να "διορθωθούν" για ταχύτητες που πλησιάζουν αυτή του φωτός.





Ο James Clerk Maxwell και οι περίφημες εξισώσεις του.

Παρ' όλα αυτά, η πλειονότητα των Φυσικών της εποχής (με αρχηγό το λόρδο Kelvin) θεώρησε ότι οι εξισώσεις του Maxwell και οι προβλέψεις τους επιβεβαίωναν ακριβώς τα μέχρι τότε μοντέλα που χρησιμοποιούνταν. Ειδικότερα, την υπόθεση της ύπαρξης του αιθέρα, ενός ασυμπίεστου, αβαρούς και υπερβολικά άκαμπτου ρευστού που γέμιζε όλο το σύμπαν επιτρέποντας στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, όπως το φως, να διαδίδονται (καθώς οι μέχρι τότε ενδείξεις δεν επέτρεπαν τη θεμελίωση θεωρίας στην οποία μία κύμανση διαδίδεται στο κενό). Μάλιστα, ο ίδιος ο Λόρδος Kelvin, μαζί με το μαθηματικό Peter Guthrie Tait (1831-1901), προσπάθησε να θεμελιώσει ένα μαθηματικό μοντέλο, βασισμένο στη Θεωρία των Κόμβων (Knot Theory), από την οποία να εξάγονται όλοι οι Νόμοι της Φυσικής κάτω από την ίδια αρχή ενέργειας.

Υπήρχαν, ωστόσο, και κάποιοι που, μελετώντας τις εξισώσεις του Maxwell, είδαν κάτι παραπάνω. Πρώτος από αυτούς, ο Joseph John Thomson (1856-1940) διαπίστωσε ότι η μάζα ενός αντικειμένου που κινείται μεγαλώνει κατά μία ορισμένη ποσότητα ανάλογα με την ταχύτητά του και τη διεύθυνση αυτής. Έτσι υπέθεσε ότι τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία διαθέτουν ένα μηχανισμό "αυτό-επαγωγής" και, λόγω αυτού, αντιδρούν με τα κινούμενα σώματα προσφέροντάς τους ένα είδος "ηλεκτρομαγνητικής μάζας", όπως ακριβώς τα ρευστά αντιδρούν στα σώματα που προσπαθούν να κινηθούν μέσα σε αυτά ασκώντας τους μία δύναμη αντίστασης. Η μάζα αυτή είναι συγκεκριμένη και ανάλογη με τη ενέργεια του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

Η ιδέα αυτή του Thomson υποστηρίχτηκε από τα πειράματα εκτροπής σε καθοδικούς σωλήνες. Τα αποτελέσματα έδειχναν ότι φορτισμένα σωματίδια που κινούνταν μέσα σε ισχυρά ηλεκτρομαγνητικά πεδία επιταχύνονται κερδίζοντας μάζα. Ακολούθησαν πολλές εργασίες από τους George Fitz-Gerald (1851-1901), Oliver Heaviside (1850-1925), George Frederick Charles Searle (1864-1954) και Max Abraham (1875-1922) ακολουθώντας τη λογική του Thomson.

Ο Δανός Hendrik A. Lorentz (1853-1928), βασιζόμενος στη θεωρία του Maxwell υπολόγισε την ακτίνα του ηλεκτρονίου θεωρώντας το σφαιρικό και παίρνοντας υπόψη του ότι η ενέργεια του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι:

$$E_{EM} = \frac{\mu_0 q_e^2}{12\pi r_e}\upsilon^2$$

όπου μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, υ η ταχύτητα του ηλεκτρονίου και r_e η ακτίνα και q_e το φορτίο του ηλεκτρονίου. Η ακτίνα, οπότε, είναι

$$r_e = \frac{\mu_0 q_e^2}{6\pi m_e} = 1.879\times10^{-15}\,\text{m}$$

όπου m_e η μάζα του ηλεκτρονίου, ενώ η τιμή που υπολογίζουμε σήμερα (χωρίς να λάβουμε υπόψη τις διορθώσεις της Κβαντομηχανικής) είναι:

$$r_e = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_e}{m_e c^2} = 2.8179\times10^{-15}\,\text{m}$$

όπου c η ταχύτητα του φωτός στο κενό. Επίσης, μαζί με τον Abraham, υπολόγισε τη δύναμη αντίδρασης της ακτινοβολίας που ασκείται σε ένα επιταχυνόμενο φορτισμένο σωματίδιο λόγω της ανάκρουσης, γνωστή και ως Δύναμη Lorentz-Abraham. Η δύναμη αυτή είναι:

$$F_{rad} = \frac{\mu_0 q^2}{6\pi c}\dot{\vec{\alpha}} = \frac{q^2}{6\pi\varepsilon_0 c^3}\dot{\vec{\alpha}}$$

όπου ε_0 η ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού, q το φορτίο του σωματιδίου και ά η χρονική παράγωγος της επιτάχυνσης.

Οι υπολογισμοί αυτοί επέτρεψαν τη σύνδεση της ενέργειας του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου

$$E_{EM} = \frac{1}{2}\frac{q^2}{r_e}$$

με τη μάζα ενός φορτισμένου σώματος που αλληλεπιδρά με το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο

$$m_{EM} = \frac{2}{3}\frac{q^2}{r_e c^2}$$

όπου q το ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο στο σώμα αυτό, σύμφωνα με τη σχέση

$$m_{EM} = \frac{4}{3}\frac{E_{EM}}{r_e c^2}$$

Το αποτέλεσμα αυτό προκύπτει αβίαστα, άλλωστε, από την παραδοχή ότι το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο έχει ορμή.

Το 1900 ο Wilhelm Wien (1864-1928) υπέθεσε ότι όλη η μάζα ενός σώματος έχει ηλεκτρομαγνητική προέλευση, όπως και όλες οι δυνάμεις. Θεώρησε έτσι ότι υπάρχει κάποια σχέση μεταξύ της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, της μάζας αδράνειας και της βαρυτικής μάζας. Ισχυρίστηκε πρώτος, μάλιστα, ότι η εξάρτηση της μάζας από την ενέργεια έχει σοβαρές συνέπειες. Η υπόθεση αυτή έγινε δεκτή με μεγάλη ικανοποίηση από τον Abraham, οποίος εγκαινίασε μία νέα "θεωρία των πάντων" με βάση τον Ηλεκτρομαγνητισμό, τη γνωστή ως "Ηλεκτρομαγνητική Όψη του Κόσμου". Η ιδέα αυτή εκκολαπτόταν ήδη από μία εργασία του Heaviside το 1889 που συνέδεε άρρηκτα την ηλεκτρομαγνητική ορμή και μάζα με την αντίσταση που συναντά ένα σώμα μέσα σε ένα ρευστό.

Ο Πόλεμος του Αιθέρα: Το Πείραμα των Michelson και Morley

Η ρομαντική άποψη, βέβαια, θέλει πάντα την αλήθεια να βγαίνει στο φως – ή, στην προκειμένη περίπτωση, το φως να βγάζει στην αλήθεια. Το 1881 οι Αμερικάνοι Albert Abraham Michelson (1852-1931) και Edward Morley (1838-1923), προσπάθησαν να μετρήσουν πειραματικά την ταχύτητα της Γης σε σχέση με τον αιθέρα χρησιμοποιώντας ένα συμβολόμετρο. Η ιδέα τους ήταν ότι η Γη, περιφερόμενη γύρω από τον Ήλιο, πρέπει να παρασέρνει τον αιθέρα, οπότε η ταχύτητα της Γης κατά τη διάρκεια του Φθινοπώρου (όταν βρίσκεται από τη μία μεριά του Ήλιου) θα είναι διαφορετική από την ταχύτητά της κατά τη διάρκεια της Άνοιξης (όταν θα βρίσκεται από την άλλη μεριά). Τα αποτελέσματα, όμως, που εκδόθηκαν το 1887, έδειξαν ότι η Γη δεν παρουσίαζε καμία διαφορά στην κίνησή της καθ' όλη τη διάρκεια της τροχιάς της. Αυτό ήταν και το πρώτο δεδομένο που αμφισβήτησε την ύπαρξη του αιθέρα. Όπως, όμως, ήταν αναμενόμενο η επιστημονική κοινότητα δε δέχτηκε να απορρίψει τόσο εύκολα κάτι στο οποίο πίστευε επί δεκαετίες.

Τα αποτελέσματα του πειράματος αυτού θεωρήθηκαν ανακριβή το 1892 από το Lorentz, ο οποίος πρότεινε μια νέα θεωρία για τον αιθέρα. Ο Lorentz υπέθεσε ότι υπάρχουν ηλεκτρόνια που "ταξιδεύουν" ελεύθερα στον αιθέρα και ότι αυτός είναι ακίνητος και δεν παρασύρεται από κάποια μάζα (όπως είχε προτείνει ο Fresnel). Η υπόθεση αυτή φαίνεται να αποδέχεται έναν ακίνητο αιθέρα, παρόλα αυτά δεν επιστρέφει πίσω στις νευτώνειες ιδέες περί απολύτου χώρου και απολύτου χρόνου. Ο ίδιος ο Lorentz πρότεινε το 1892 τον τοπικό χρόνο:

$$t' = t - x\frac{\upsilon}{c^2}$$

όπου t' και t ο χρόνος που παρατηρείται από έναν κινούμενο και έναν ακίνητο, αντίστοιχα, ως προς τον αιθέρα παρατηρητή, και x η κατεύθυνση κίνησης του σώματος. Το 1895 πρότεινε τη συστολή του μήκους:

$$\ell' = \ell\sqrt{1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}}$$

όπου ℓ' το μήκος που παρατηρείται από έναν κινούμενο (ως προς τον αιθέρα παρατηρητή και ℓ το μήκος που παρατηρείται από έναν ακίνητο (ως προς τον αιθέρα) παρατηρητή. Ο Lorentz πρότεινε τρεις πιθανές ε-

Ο J.J. Thomson, εισηγητής της ηλεκτρομαγνητικής μάζας.

Ο Oliver Heaviside (αριστερά) και ο George Fitz-Gerald (δεξιά), πρωτοπόροι στην ερμηνεία της ηλεκτρομαγνητικής μάζας.

ξηγήσεις για αυτές τις μεταβολές του χρόνου και του μήκους

- Κάθε σώμα που κινείται προς μία διεύθυνση συστέλλεται κατά τη διεύθυνση αυτή, διατηρώντας τις διαστάσεις του κατά κάθε άλλη κάθετη ως προς την κίνηση διεύθυνση.
- Κάθε σώμα που κινείται προς μία διεύθυνση διαστέλλεται κατά κάθε διεύθυνση κάθετη προς τη κίνηση, διατηρώντας τη διάστασή του ως προς τη διεύθυνση της κίνησης.
- Κάθε σώμα που κινείται προς μία διεύθυνση συστέλλεται κατά τη διεύθυνση αυτή και διαστέλλεται κατά κάθε άλλη κάθετη ως προς την κίνηση διεύθυνση.

Παρότι, ακόμη, δεν είχε ξεκαθαριστεί το τοπίο σε ότι αφορά τις κινήσεις με πολύ υψηλές ταχύτητες –δηλαδή ταχύτητες συγκρίσιμες με αυτή του φωτός, διότι μόνο σε τέτοιες ταχύτητες μπορούν να γίνουν αντιληπτές αυτές οι μεταβολές στο χώρο και το χρόνο– ο Lorentz κατάφερε να εξηγήσει την εκτροπή του φωτός, το πείραμα του Fizeau και το φαινόμενο Doppler.

Το 1899, ο Lorentz κατάφερε να περιγράψει με ακρίβεια την απουσία κάθε φαινομένου που προκαλείται από την κίνηση της Γης σε σχέση με τον αιθέρα με ακρίβεια της τάξης του $(\upsilon/c)^2$. Στην ίδια εργασία δήλωσε πώς «τα οπτικά φαινόμενα εξαρτώνται μόνον από τη σχετική κίνηση των υλικών σωμάτων και των φωτεινών πηγών και από τον χρησιμοποιούμενο οπτικό εξοπλισμό, κι αυτό είναι αλήθεια όχι μόνο σε τάξεις μεγέθους τετραγώνου ή κύβου της εκτροπής, αλλά σε κάθε περίπτωση».

Από το 1887, ο Woldemar Voigt (1850-1919) είχε δημιουργήσει ένα σύνολο μετασχηματισμών για να μελετήσει το Φαινόμενο Doppler.

Ο A.A. Michelson και το συμβολόμετρο που χρησιμοποίησε στο πείραμα του.

$$x' = x - \upsilon t \qquad y' = \frac{y}{\gamma}$$

$$z' = \frac{z}{\gamma} \qquad t' = t - x\frac{\upsilon}{c^2}$$

όπου

$$\gamma = \left(1 - \frac{\upsilon^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

ο παράγοντας Lorentz. Ο ίδιος ο Lorentz κατέληξε στους ίδιους μετασχηματισμούς το 1895 διατυπώνοντας το "Θεώρημα των Ανταποκρινόμενων Καταστάσεων", το οποίο εξηγεί ότι ένας παρατηρητής που κινείται με σταθερή ταχύτητα ως προς έναν ακίνητο αιθέρα παρατηρεί τα ίδια φαινόμενα με έναν παρατηρητή που είναι ακίνητος ως προς τον αιθέρα. Οι μετασχηματισμοί αυτοί βασίζονται σε διόρθωση των Μετασχηματισμών του Γαλιλαίου για ταχύτητες συγκρίσιμες με το φως και ονομάστηκαν από το Jules Henri Poincaré (1852-1912) Μετασχηματισμοί του Lorentz. Η σημερινή μορφή τους είναι:

$$x' = \gamma\left(x - \upsilon t\right) \qquad y' = y$$
$$z' = z \qquad t' = t - \gamma\left(t - \upsilon x\right)$$

Ο Lorentz προσπάθησε το 1904 να αποδείξει ότι οι μετασχηματισμοί αυτοί παραμένουν αναλλοίωτοι σε κάθε αλλαγή συστήματος συντεταγμένων, χωρίς, όμως, επιτυχία. Κατάφερε, ωστόσο, να τους χρησιμοποιήσει για να αντικαταστήσει τις εξισώσεις Maxwell-Hertz με τις εξισώσεις Maxwell-Lorentz, διευρύνοντας την ισχύ των εξισώσεων του Maxwell σε υψηλότερες ταχύτητες. Σύμφωνα με τους μετασχηματισμούς αυτούς, τα διανύσματα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της επαγωγή του μαγνητικού πεδίου, όταν είναι παράλληλα στο διάνυσμα της ταχύτητας, δεν επηρεάζονται, δηλαδή:

$$\vec{E}'_{\parallel} = \vec{E}_{\parallel} \qquad \vec{B}'_{\parallel} = \vec{B}_{\parallel}$$

ενώ, όταν είναι κάθετα στο διάνυσμα της ταχύτητας, μετασχηματίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$\vec{E}'_{\perp} = \gamma\left(\vec{E}_{\perp} + \vec{\upsilon} \times \vec{B}\right)$$

$$\vec{B}'_{\perp} = \gamma\left(\vec{B}_{\perp} - \frac{1}{c^2}\vec{\upsilon} \times \vec{E}\right)$$

Αντίστοιχοι μετασχηματισμοί ισχύουν για τη διηλεκτρική μετατόπιση και την ένταση του μαγνητικού πεδίου.

Einstein *vs* Poincaré

Μεταξύ των επιστημόνων που ασχολήθηκαν με την εξήγηση των αποτελεσμάτων του πειράματος των Michelson και Morley, ήταν ο Γάλλος μαθηματικός Jules Henri Poincaré, ο οποίος έφτασε και πλησιέστερα από όλους τους υπόλοιπους στη διατύπωση μία πλήρους θεωρίας αντίστοιχης αυτής του Einstein. Ο Poincaré ξεκίνησε να ασχολείται με τις σχετικές κινήσεις υλικών σωμάτων το 1895 σε βάση περισσότερο φιλοσοφική παρά μαθηματική. Ήταν, ωστόσο, ο πρώτος που αμφισβήτησε τις *ad hoc* υποθέσεις των υπόλοιπων επιστημόνων και υποστήριξε ότι η ύπαρξη του αιθέρα (εφόσον δεν έχει αποδειχτεί) και η σταθερότητα της ταχύτητας του φωτός για κάθε παρατηρητή πρέπει να θεωρούνται αξιώματα κάθε θεωρίας που επιχειρεί να εξηγήσει τις σχετικές κινήσεις των σωμάτων.

Από τις πιο χαρακτηριστικές του προσφορές ήταν η διαπραγμάτευση του τοπικού χρόνου που εισήγαγε ο Lorentz και η χρήση της ταχύτητας του φωτός για την εξακρίβωση της ταυτοχρονικότητας δύο γεγονότων (η πρόταση για συγχρονισμό των ρολογιών με φωτεινά σήματα, που χρησιμοποιήθηκε αργότερα από τον Einstein, θεωρείται πρόταση του Poincaré). Όμως, η πιο ενδιαφέρουσα συνεισφορά του ήταν η σύνδεση των θεωριών του Lorentz με τις αρχές που, σύμφωνα με τον Poincaré, πρέπει να διέπουν τη Φυσική.

Συγκεκριμένα, το 1900 ο Poincaré τόνισε πως ο συγχρονισμός που πρότεινε ο Lorentz είναι εφικτός μόνο για κινούμενους παρατηρητές και πως η θεωρία του μεγάλου Δανού φυσικού είναι σύμφωνη με της Αρχή Διατήρησης της Ενέργειας και την Αρχή των Σχετικών Κινήσεων, όχι όμως με το Νόμο Δράσης-Αντίδρασης, που προέρχεται από αυτές. Ο Poincaré εξήγησε το παράδοξο ισχυριζόμενος ότι η ικανοποίηση της Αρχής της Σχετικότητας οφείλεται στην αντιστάθμιση των γεγονότων. Ακόμη, επιχείρησε να συνδέσει την Αρχή των Σχετικών Κινήσεων με το Νόμο Δράσης-Αντίδρασης, χωρίς όμως επιτυχία, καθώς η πρώτη εφαρμοζόταν μόνο στη μάζα, ενώ η δεύτερη όχι.

Την ίδια περίοδο, μελετώντας την Αρχή Δράσης-Αντίδρασης και τη θεωρία του Lorentz, κατάλαβε ότι υπήρχε μία σχέση μεταξύ της μάζας και της ενέργειας. Στην προσπάθειά του να αποσαφηνίσει εάν ένα βαρυτικό κέντρο συνεχίζει να κινείται παρουσία ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, καταλήγει, όπως και άλλοι πριν από αυτόν, στο συμπέρασμα ότι η ενέργεια των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων δρα στη μάζα ενός σώματος σαν ένα υποθετικό ρευστό (fluide fictif) με πυκνότητα μάζας

$$m = \frac{E}{c^2}$$

Βέβαια, ο Poincaré θεωρούσε αυτή τη σχέση ένα μαθηματικό χειρισμό που δεν έχει φυσικές συνέπειες.

Το 1902, στο βιβλίο του "Επιστήμη και Υπόθεσις" (La Science et l' Hypothèse), δηλώνει ότι:

- *"Δεν υπάρχει απόλυτος χώρος και οι μόνες κινήσεις που συλλαμβάνουμε είναι σχετικές."*
- *"Δεν υπάρχει απόλυτος χρόνος, η ισότητα της διάρκειας δύο συμβάντων μπορεί να προσδιοριστεί μόνο από μία σύμβαση και δεν έχουμε καμία προαίσθηση για το αν δύο γεγονότα που λαμβάνουν χώρα σε διαφορετικά μέρη συμβαίνουν ταυτόχρονα."*

O Henri Poincaré

Το 1904, σε διάλεξή του στο Διεθνές Συνέδριο Τεχνών και Επιστημών του St. Louis με θέμα τη Μαθηματική Φυσική, όπου και διατύπωσε τις έξης θεμελιώδεις αρχές στις οποίες στηρίζεται η Φυσική, δήλωσε πως:

- *"Ο χρόνος πρέπει να μετριέται με ρολόγια που συγχρονίζονται με βάση φωτεινά σήματα."*
- *"Οι δυνάμεις, απ' όπου κι αν προέρχονται, θα ελαττώνονται με συγκεκριμένη αναλογία σε έναν κόσμο προικισμένο με μια ομοιόμορφη κίνηση."*

και έκανε λόγο για τη συστολή του μήκους των (κινούμενων) σωμάτων.

Στις 5 Ιουνίου του 1905 (λίγες μέρες πριν ο Einstein καταθέσει την εργασία του για δημοσίευση και τρεις μήνες πριν τη δημοσίευσή της) ο Poincaré εκδίδει μέσω της Επιστημονικής Ακαδημίας του Παρισιού ένα σύντομο κείμενό του, στο οποίο περιγράφει τα δικά του συμπεράσματα για τη σχετικότητα. Το κείμενο αυτό κλείνει όλα τα κενά της θεωρίας του Lorentz. Εκεί παρουσιάζονται οι μετασχηματισμοί Lorentz στην πλήρη τους μορφή και η διόρθωση των εξισώσεων του Lorentz για τους

μετασχηματισμούς της πυκνότητας φορτίου και της ηλεκτρικής πυκνότητας. Ο Poincaré πρόσθεσε κατά τη διόρθωση των εξισώσεων μία μη ηλεκτρική ενοποιό δύναμη ("πίεση Poincaré") για να επιτευχθεί η σταθερότητα των ηλεκτρονίων, που ο Lorentz είχε υποθέσει ότι βρίσκονται στον αιθέρα, και για να εξηγήσει τη συστολή του μήκους. Επίσης, δημιούργησε μία παραλλαγή του βαρυτικού μοντέλου του Lorentz, που συμπεριλάμβανε τα βαρυτικά κύματα, για να διευρύνει το πεδίο εφαρμογής των εξισώσεων του Lorentz και σε μη ηλεκτρικές δυνάμεις.

Στις 23 Ιουλίου του ίδιου έτους, λίγες μόλις μέρες πριν τη δημοσίευση της εργασίας του Einstein, ο Poincaré στέλνει προς εκτύπωση τη δική του εργασία (περίπου 40 σελίδων), μια εκτενέστερη μορφή της προηγούμενης δημοσίευσής του. Η εργασία τυπώθηκε στις 14 Δεκεμβρίου και εκδόθηκε τον Ιανουάριο του 1906 με τον τίτλο "Για τη Δυναμική του Ηλεκτρονίου" (Sur la Dynamique de l' Électron). Στην εργασία αυτή, γίνεται αναφορά στο "Αξίωμα της Σχετικότητας". Με την εργασία του αυτή, ο Poincaré παρέθεσε αναλυτικότερα τις εξισώσεις και τα ομαδικά τους χαρακτηριστικά που είχε εντοπίσει, εισάγοντας την "Ομάδα Lorentz".

Στην εργασία αυτή, ο Poincaré έδειξε ότι οι μετασχηματισμοί Lorentz είναι συνέπειες της Αρχής της Ελάχιστης Δράσης, έθεσε τις βάσεις για την "πίεση Poincaré" και απέδειξε ότι ο σχηματισμός

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2$$

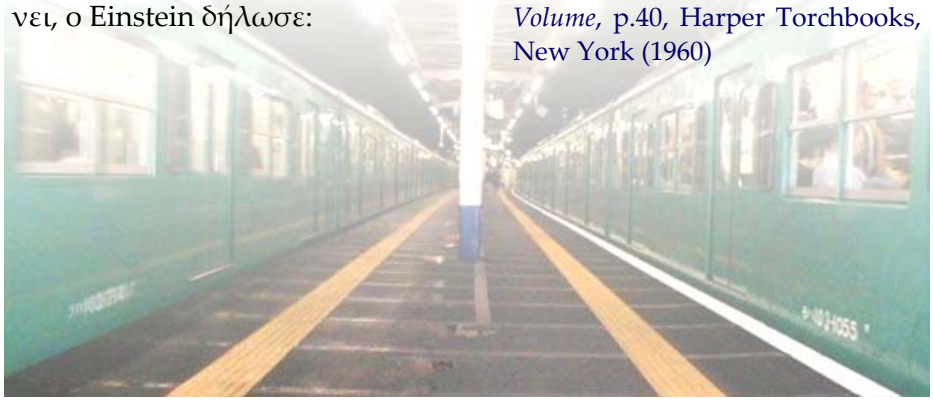
είναι αναλλοίωτος ως προς κάθε μετασχηματισμό. Επίσης, σημείωσε πρώτος ότι οι μετασχηματισμοί Lorentz είναι απλώς μια περιστροφή σε ένα τετραδιάστατο σύστημα και εισήγαγε τον όρο *ict*, θέτοντας τις βάσεις για το τετραδιάστατο σύστημα του Minkowsky.

Παρά το περιορισμένο ενδιαφέρον που τράβηξε το έργο του, σε σχέση με αυτό του Einstein, ο Poincaré συνέχισε να ασχολείται με τη σχετικότητα για λίγα ακόμη χρόνια. Η τελευταία του αναφορά είναι το 1908. Μάλιστα, προέβλεψε την ανάπτυξη μιας Νέας Δυναμικής με ανώτερο όριο ταχύτητας την ταχύτητα του φωτός.

Δυστυχώς, όμως, η συνεισφορά του άργησε να αναγνωριστεί. Η αδυναμία του να απελάσει την ύπαρξη του αιθέρα από τον κόσμο υπήρξε καταλυτική. Χαρακτηριστική, όμως, είναι και η απαξίωση του Einstein απέναντι στο γάλλο μαθηματικό. Συγκεκριμένα, ενώ στην πρώτη έκδοση της Ειδικής Θεωρίας της Σχετικότητας υπάρχει αναφορά στο Γάλλο μαθηματικό, στις επόμενες εκδόσεις αναφέρεται μόνο ο Lorentz. Επίσης, σε ένα άρθρο του για τη σχετικότητα το 1907, καθώς και σε μία διάλεξη με τίτλο "Γεωμετρία και Εμπειρία" (Geometrie und Erfahrung) για τη μη-ευκλείδια γεωμετρία (στην οποία ο Poincaré είχε επίσης συνεισφέρει σε μεγάλο βαθμό) το 1921, ο Einstein δεν κάνει την παραμικρή αναφορά στον Poincaré.

Μόνο λίγα χρόνια πριν πεθάνει, ο Einstein δήλωσε:

"Ο Lorentz είχε ήδη αντιληφθεί ότι οι μετασχηματισμοί που φέρουν το όνομά του είναι απαραίτητοι για την ανάλυση των εξισώσεων του Maxwell και ο Poincaré ήταν αυτός που εμβάθυνε κι άλλο σ' αυτή την πρόβλεψη…"



Πηγές

Χάρης Βάρβογλης: *"Ιστορία και Εξέλιξη των Ιδεών στη Φυσική"*, Εκδόσεις Πλανηταρίου Θεσσαλονίκης (Θεσσαλονίκη 2011)

Galileo Galilei, *"Dialogue concerning two chief world systems: Ptolemaic and Copernican"*, pp. 186,250, University of California Press – Berkeley (1953), Trans: Stillman Drake

"General relativity: Papers in Honor of J.L. Synge", pp. 21-34, Clarendon Press – Oxford (1972)

N. L. Balazs: *"The Acceptability of Physical Theories: Poincaré Vs. Einstein"*

C. Marshal: *Poincaré, Einstein and the Relativity: The Surprising Secret* (*http://web.ihep.su/library/pubs/tconf05/ps/c5-1.pdf*)

Supurna Sihna: *"Poincaré and the Special Theory of Relativity"*, Reasonance (February 2000)

H. Poincaré: *"Le Mesure du Temps"*, *pp. 222-234,, The Foundations of Science (The Value of Science), New York: Science Press,* (*http://www.archive.org/details/foundationsscie01poingoog*) (1898)

H. Poincaré: *"La science et l' hypothèse"*, pp. 111,245,246 (1902)

H. Bull: *"Poincaré"*, Am. Math. Soc., ser. 12 (1906)

H. Oeuvres: *"Poincaré"*, *Vol.9*, Gauthier-Villars, Paris (1954)

E.T.A. Whittaker: *"A History of the Theories Eather and Electricity"*, *2nd Volume*, p.40, Harper Torchbooks, New York (1960)

Περί της Σύγκλισης: Αρχιμήδης

Γεώργιος Θεοδώρου
Διατελέσας Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής

Αρχικά θέλω να επισημάνω ότι η παρακάτω διερεύνηση γίνεται με σημερινές γνώσεις, όχι της αρχαιότητας, και εκφράζει το γράφοντα. Την εποχή του Αρχιμήδη, το πλαίσιο ανάπτυξης των Επιστημών είχε σε γενικές γραμμές διαμορφωθεί. Ένα όμως στοιχείο που έμενε, και έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην περαιτέρω ανάπτυξή των, ήταν η εισαγωγή της **σύγκλισης** στην Αριθμητική. Αυτό έγινε από τον Αρχιμήδη (~287-212 π.Χ.) και ήταν η κορυφαία του συνεισφορά. Η εισαγωγή αυτή έγινε πολύ πριν την ανάπτυξη του απειροστικού λογισμού από τους Νεύτωνα (1620-1710) και Leibniz (1646-1716). Η εισαγωγή βασίζεται στη χρήση της Γεωμετρικής προόδου. Για μια φθίνουσα Γεωμετρική πρόοδο μαθαίνουμε ότι:

$$\alpha+\alpha\omega+\alpha\omega^2+\ldots=\frac{\alpha}{1-\omega},$$

για $0<\omega<1$.

Θεωρούνται θετικές όλες οι ποσότητες, καθώς τον καιρό εκείνο δεν είχαν ακόμη εισαχθεί οι αρνητικοί αριθμοί. Η Γεωμετρική πρόοδος ήταν γνωστή από την αρχαιότητα και την εφάρμοσε ο Αρχιμήδης με πρωτοποριακό τρόπο για τη λύση κλασικών προβλημάτων. Στο έργο του «Ψαμμίτης» διαπραγματεύεται το πόσοι κόκκοι άμμου χωρούν στο σύμπαν. Η απάντηση του ήταν ότι είναι πεπερασμένος ο αριθμός και όχι άπειρος όπως μέχρι τότε πίστευαν. Επομένως, κατά τον Αρχιμήδη, το σύμπαν είναι πεπερασμένο. Το ίδιο πρέσβευε και ο Ηράκλειτος (~540-480 π.Χ.). Θα δούμε πως η Γεωμετρική πρόοδος οδηγεί στην έννοια της σύγκλισης. Επίσης η έννοια της σύγκλισης οδηγεί στον ορισμό παραγώγων και ολοκληρωμάτων.

Θα ξεκινήσω με την εισαγωγή των φυσικών ακεραίων αριθμών. Η ανάγκη να βρει ο άνθρωπος ένα τρόπο να αριθμεί έμβια όντα τον οδήγησε στην εισαγωγή των φυσικών ακεραίων αριθμών. Οι ποσότητες αυτές υπάρχουν μόνο σε ακέραιες τιμές, π.χ. ένα ζωντανό κοτόπουλο υπάρχει μόνο ακέραιο, όχι τεμαχισμένο. Έτσι γίνεται η εισαγωγή των αριθμών 1, 2, …. Όμως για ένα έμβιο ον μπορεί να μην υπάρχει τίποτα. Για την αντιμετώπιση της περίπτωσης αυτής, εισάγεται και ο αριθμός μηδέν. Έτσι έχουμε τους ακέραιους αριθμούς της Αριθμητικής. Στη νεκρή Φύση έχουμε τη δυνατότητα να πάρουμε κλασματικές τιμές, έτσι εισάγονται και οι ρητοί αριθμοί. Μπορούμε όμως με αυτούς τους αριθμούς να αποδώσουμε όλες τις περιπτώσεις που υπάρχουν στη Φύση; Οι Πυθαγόρειοι μας λένε πως όχι, και πρέπει να εισαχθούν και οι άρρητοι αριθμοί. Τίθεται επίσης το ερώτημα για τον καθορισμό της αρχής της μέτρησης. Γενικά δε δεν μπορούμε να τη βρούμε. Έτσι εισάγονται και οι αρνητικοί αριθμοί.

Εικόνα του Αρχιμήδη στο μετάλλιο Fields.

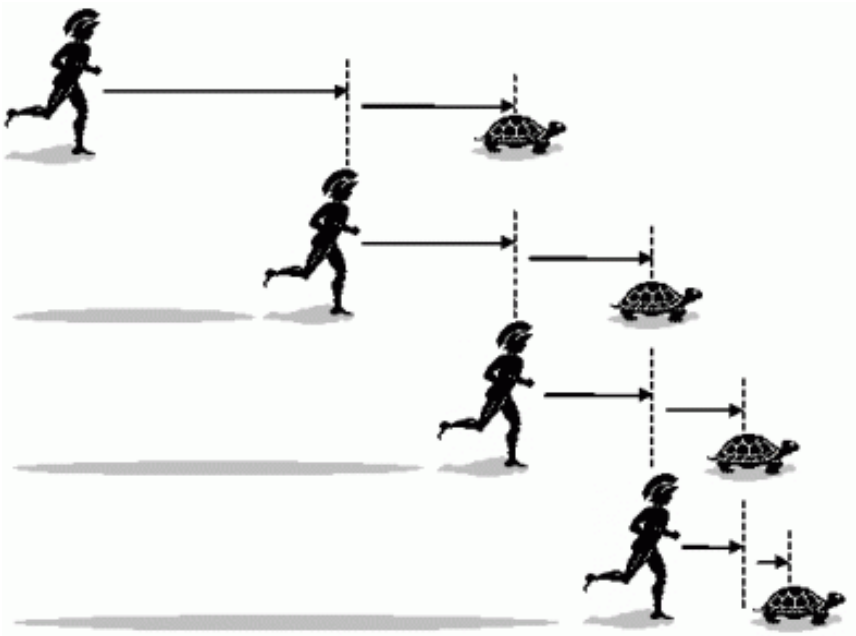
Αναξίμανδρος ο Μιλήσιος

Διαπραγματευόμαστε τους ακεραίους αριθμούς με τους οποίους έχουμε την περισσότερη εμπειρία. Σε κάθε ακέραιο αριθμό αντιστοιχούμε μια ποσότητα, α_n. Οι ποσότητες αυτές συνήθως αθροίζονται, $\sum\alpha_n$. Τίθεται δε το ερώτημα εάν οι ακέραιοι αριθμοί έχουν άνω φράγμα ή όχι. Τη σημερινή εποχή γνωρίζουμε ότι δεν υπάρχει, όμως την εποχή εκείνη ήταν άγνωστο. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει άνω φράγμα, το άθροισμα θα έχει άπειρους όρους. Την εποχή αυτή πίστευαν ότι οι άπειροι όροι θα έδιναν επίσης άπειρο άθροισμα. Την έννοια του **απείρου** πρώτος την εισάγει ο Αναξίμανδρος ο Μιλήσιος (~610-546 π.Χ.). Η έννοια όμως του απείρου που ο Αναξίμανδρος εισάγει είναι Γεωμετρική. Όπως δηλώνει και το όνομα του, είναι κάτι το χωρίς πέρας.

Το παράδοξο του Ζήνωνα

Η πρώτη επισήμανση ότι το άπειρο δεν αφορά μόνο τη Γεωμετρία, προήλθε από τον Ζήνωνα τον Ελεάτη (~490-430 π.Χ.). Η

συμβολή του σε αυτό το πεδίο υπήρξε σημαντική. Έχουμε δε το γνωστό **παράδοξο του Ζήνωνα**: «Ο Αχιλλέας και η χελώνα». Το παράδοξο αυτό λέει ότι ένας ταχύς δρομέας, όπως ο Αχιλλέας, δεν μπορεί ποτέ να φθάσει μια προπορευόμενη αργή χελώνα. Το σκεπτικό του παράδοξου αυτού προέρχεται από το γεγονός ότι μέχρι ο δρομέας να διανύσει την απόσταση που αρχικά τον χωρίζει με τη χελώνα, η χελώνα έχει ήδη προχωρήσει παραπέρα. Όμως οι αποστάσεις που έτσι διανύει η χελώνα γίνονται συνεχώς μικρότερες. Με τη διαδικασία αυτή παίρνουμε άπειρα βήματα. Έτσι όταν δεν υπάρχει άνω όριο έχουμε να αθροίσουμε άπειρες σε αριθμό ποσότητες. Τότε πίστευαν ότι η άθροιση άπειρων σε αριθμό ποσοτήτων θα έδινε άπειρο. **Δεν είχε ακόμη γίνει εισαγωγή της έννοιας της σύγκλισης.** Με το σκεπτικό αυτό ο δρομέας δεν θα μπορούσε ποτέ να φθάσει τη χελώνα. Όμως η καθημερινή μας εμπειρία είναι διαφορετική. Υπάρχει δηλαδή πρόβλημα. **Ο Ζήνων έκανε εμφανή τη σημασία της Σύγκλισης.**



Η πρόταση του Δημόκριτου

Είδαμε παραπάνω το παράδοξο του Ζήνωνα. Το πρόβλημα των αρχαίων προερχόταν από το ότι έχουμε να αθροίσουμε άπειρες σε αριθμό ποσότητες. Η αντιμετώπιση του από τον Δημόκριτο (~460-360 π.Χ.) ήταν να προτείνει, ότι δεν μπορούμε να διαιρούμε το συνεχές σε όσο μικρή ποσότητα θέλουμε. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγουμε να έχουμε άπειρες σε αριθμό αποστάσεις. Δηλαδή, έθεσε το ερώτημα εάν το συνεχές μπορεί να διαιρείται μέχρι το μηδέν, ή υπάρχει και κάτι άλλο. Η τεχνική διερεύνηση του ερωτήματος αυτού απαιτούσε δυνατότητες που δεν υπήρχαν την αρχαιότητα. Όμως, πρότεινε την ύπαρξη του **άτμητου**. Την έννοια που πρότεινε την επεξεργάστηκαν οι αρχαίοι Έλληνες σε φιλοσοφικό επίπεδο. Η άποψη που προέκυψε είναι συμβατή με τη σύγχρονη άποψη της φυσικής για τα άτομα.

Περί της Σύγκλισης και του Ορίου

Τίθεται όμως το ερώτημα: ποιο είναι το στοιχείο που είχε καταλυτική επίδραση στην ανάπτυξη των μαθηματικών; Η απάντηση είναι: **η έννοια της σύγκλισης**. Η έννοια αυτή διαφοροποιεί τα μαθηματικά της αρχαιότητας, από τα σύγχρονα. Συνδεμένο με τη σύγκλιση είναι το αντίστοιχο όριο. Ο προσδιορισμός του ορίου είναι σημαντικό στοιχείο των εφαρμοσμένων μαθηματικών. Είναι επομένως πολύ σημαντικό να έχουμε ένα απλό μοντέλο όπου τα στοιχεία αυτά να μπορούν να μελετηθούν. Το μοντέλο αυτό βασίζεται στη Γεωμετρική πρόοδο, η οποία ήταν γνωστή από την αρχαιότητα: **Πρώτα μελετάμε το μερικό, και μετά το γενικό.**

Πρέπει όμως να γίνεται αξιοποίηση των υπαρχόντων μαθηματικών, όπως ο Mandelbrot (1924-2010) αξιοποίησε την υπάρχουσα θεωρία των ευσταθών κατανομών. Η Γεωμετρική πρόοδος μπορεί να μελετηθεί με απλό τρόπο. Για το λόγο αυτό είχε καταλυτική επίδραση στην ανάπτυξη των σύγχρονων μαθηματικών, όπως ο ταλαντωτής είχε καταλυτική επίδραση στην ανάπτυξη της φυσικής. Πρώτα δηλαδή θα πρέπει να βρεθεί με πρακτικό τρόπο η **συμπεριφορά** και μετά να γίνει η γενική θεμελίωση της περιοχής στη κατεύθυνση που δείχνει η πρακτική αντιμετώπιση. Στη Γεωμετρική πρόοδο έχουμε ένα άθροισμα της μορφής:

$$\sum_n a_n = a_0 + a_0\omega + a_0\omega^2 + \ldots$$

Το άθροισμα αυτό **συγκλίνει** για $0 < \omega < 1$ και το όριο του μπορεί να υπολογιστεί, ενώ για $\omega > 1$ η πρόοδος **αποκλίνει**.

Έτσι έχουμε μια πρόοδο που αλλάζει συμπεριφορά με την αλλαγή του λόγου της ω, και εμφανίζεται η έννοια της σύγκλισης. Τη συμπεριφορά αυτή τη θεωρούμε απλή, επομένως όχι σπουδαία.

Ο Αρχιμήδης ήταν αυτός που με τη χρήση της Γεωμετρικής προόδου, πρώτος πρόβαλε την έννοια της σύγκλισης για τη λύση κλασικών προβλημάτων. Έτσι πρέπει να θεωρηθεί ο **θεμελιωτής** των σύγχρονων μαθηματικών. Τη μέθοδο του την χρησιμοποίησε εκτενώς στον υπολογισμό εμβαδών και όγκων. Η δικιά του ορολογία ήταν της **«εξάντλησης»**. Η ορολογία της εξάντλησης πηγάζει από το γεγονός ότι η ακρίβεια της μεθόδου γίνεται μεγαλύτερη με την αύξηση των όρων της προόδου. Με τη χρήση της Γεωμετρικής προόδου μπορεί επίσης να μελετηθεί και το παράδοξο του Ζήνωνα.

Λύση του παράδοξου του Ζήνωνα

Ας εξετάσουμε το παράδοξο «Αχιλλέας και η χελώνα» με μεγαλύτερη λεπτομέρεια. Το πρόβλημα προσδιορίζεται πλήρως από την αρχική τους απόσταση και τις ταχύτητες τους. Αγνοούμε την αρχική κατάσταση των μεταβαλλόμενων ταχυτήτων. Έστω ότι ο δρομέας κινείται με σταθερή ταχύτητα υ_1 και η χελώνα με υ_2. Τα δεδομένα του προβλήματος δίνουν ότι $0 < \upsilon_2 << \upsilon_1$. Εξετάζουμε τους χρόνους που απαιτούνται για να διανύσει ο δρομέας τις διάφορες αποστάσεις. Έστω ότι η αρχική απόσταση που τους χωρίζει είναι x_0 . Ο χρόνος που απαιτείται για να διανύσει ο δρομέας την αρχική απόσταση είναι $t_0 = x_0/\upsilon_1$. Στη διάρκεια αυτού του χρόνου η χελώνα έχει διανύσει απόσταση

$$x_1 = \frac{x_0}{\upsilon_1}\upsilon_2.$$

Την απόσταση αυτή τη διανύει ο δρομέας σε χρόνο

$$t_1 = \frac{x_0}{\upsilon_1}\frac{\upsilon_2}{\upsilon_1}.$$

Με αυτό τον τρόπο υπολογίζουμε τα διαδοχικά βήματα και παίρνουμε ότι ο χρόνος που απαιτείται για το δρομέα για να διανύσει την ν-στη απόσταση είναι:

$$t_\nu = \frac{x_0}{\upsilon_1}\left(\frac{\upsilon_2}{\upsilon_1}\right)^\nu.$$

Έχουμε δηλαδή μια φθίνουσα Γεωμετρική πρόοδο με άπειρους όρους, της οποίας όμως το άθροισμα των συνολικών χρονικών διαστημάτων είναι πεπερασμένο, και είναι ίσο με:

$$T = \frac{t_0}{1-\upsilon_2/\upsilon_1}$$

Το Τ που υπολογίζεται δίνει το χρόνο που χρειάζεται ο δρομέας για να φθάσει τη χελώνα. Έτσι έχουμε **άπειρες** σε αριθμό ποσότητες με **πεπερασμένο** όμως άθροισμα. Τελικά το συνολικό άθροισμα των χρόνων είναι πεπερασμένο και οφείλεται στη φθίνουσα Γεωμετρική πρόοδο. Οι όροι της προόδου αυτής είναι άπειροι σε αριθμό και το μέγεθος τους τείνει στο μηδέν για $\nu \to \infty$. Με τον παραπάνω τρόπο εισάγεται η σύγκλιση στην Αριθμητική.

Στη δεύτερη περίπτωση τοποθετούμε αρχικά τη χελώνα πίσω από τον δρομέα. Η περίπτωση αυτή δεν έρχεται σε αντίθεση με τη Φύση. Στη περίπτωση αυτή θεωρούμε ότι η ταχύτητα της χελώνας είναι υ_1, και του δρομέα υ_2, έχουμε δηλαδή $\upsilon_2 > \upsilon_1$. Τότε η χελώνα δεν θα φθάσει ποτέ τον δρομέα, η πρόοδος δεν είναι πλέον φθίνουσα. Στη περίπτωση αυτή δεν μπορούμε πλέον να μιλάμε για το χρόνο που η χελώνα θα φθάσει το δρομέα, αλλά για το πώς μεταβάλλεται η μεταξύ τους απόσταση. Ο χρόνος που απαιτείται για να διανύσει η χελώνα την αρχική απόσταση είναι $t_0 = x_0/\upsilon_1$. Στη διάρκεια αυτού του χρόνου ο δρομέας έχει διανύσει απόσταση

$$x_1 = \frac{x_0}{\upsilon_1}\upsilon_2.$$

Με αυτό τον τρόπο υπολογίζουμε τα διαδοχικά βήματα και παίρνουμε ότι η απόσταση τους στο ν-στο βήμα είναι ίση με

$$x_\nu = x_0\left(\frac{\upsilon_2}{\upsilon_1}\right)^\nu.$$

Η απόσταση αυτή συνεχώς αυξάνει και τείνει στο άπειρο για

$$\beta = \frac{\upsilon_2}{\upsilon_1} > 1.$$

Στην περίπτωση αυτή δεν μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το ν μπορεί να τείνει στο άπειρο, γιατί το x^ν γίνεται επίσης άπειρο, ενώ το σύμπαν είναι πεπερασμένο.

Ο Αρχιμήδης ήταν ο πρώτος που χρησιμοποίησε την σύγκλιση στην Αριθμητική. Επίσης με τη διατήρηση πεπερασμένων όρων στη πρόοδο, η ακρίβεια του αθροίσματός της αυξάνει με τη διατήρηση περισσοτέρων όρων στη παραπάνω φθίνουσα Γεωμετρική πρόοδο. Η ορολογία της «**εξάντλησης**», πηγάζει από το γεγονός ότι η ακρίβεια της μεθόδου γίνεται μεγαλύτε-

ρη με την αύξηση των όρων της προόδου. Ο Αρχιμήδης εφάρμοσε τη μέθοδο της «εξάντλησης» σε πολλές περιπτώσεως. Έτσι η Γεωμετρική πρόοδος έπαιξε καταλυτικό ρόλο στην ανάπτυξη του απειροστικού λογισμού, μια και εισάγει την έννοια της σύγκλισης.

Από το Ειδικό στο Γενικό

Γενικά δεν μπορεί να βρεθεί μια θεωρία προτού βρεθεί ένα απλό μοντέλο που να περιγράφει το φαινόμενο. Κλασική περίπτωση στη σύγχρονη επιστήμη είναι η κατανομή της ενέργειας στην Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Το πείραμα ήταν σε αντίθεση με τη κλασική θεωρία. Η διαφορά αντιμετωπίστηκε με την πρόταση Planck για τη **κβάντωση** της ενέργειας. Η νέα θεωρία της κβαντομηχανικής προβλέπει κβάντωση της ενέργειας, έτσι δεν υπάρχει ασυμφωνία μεταξύ πειράματος και θεωρίας.

Τον πρακτικό τρόπο σκέψης του Αρχιμήδη τον χρησιμοποίησε αργότερα ο Διόφαντος ο Αλεξανδρινός (200-284 μ.Χ.), για την εισαγωγή της Άλγεβρας. Η αξιωματική ανάπτυξη της Άλγεβρας έγινε μεταγενέστερα από τους Άραβες. Όμως η Άλγεβρα του Διόφαντου διδάσκεται στη δευτεροβάθμια εκπαίδευση διεθνώς. Η τεχνική συνίσταται ότι πρώτα βρίσκουμε τη συμπεριφορά με πρακτικό τρόπο και μετά ακολουθεί η γενική θεμελίωση της περιοχής. Βλέποντας το θέμα ιστορικά, μπορούμε να πούμε ότι: Οι αρχαίοι Αιγύπτιοι δεν ενδιαφερόταν για τη θεωρητική θεμελίωση. Ο **Θαλής** εισήγαγε την Επιστημονική Μέθοδο και πρόβαλε ότι τα θέματα πρώτα αντιμετωπίζονται με πρακτικό τρόπο, και μετά με αξιωματικό. Ο **Πυθαγόρας** αντέστρεψε τη προσέγγιση, ότι δηλαδή προηγείται η αξιωματική αντιμετώπιση! Σε όλα όμως χρειάζεται «**μέτρο**», που το βρήκαν οι αρχαίοι Έλληνες. Η διαφορά αυτή των απόψεων είναι διαχρονική, και ο καθένας έχει την άποψη του. Αναφέρεται μόνο ότι ο **Ηράκλειτο**ς δεν είχε σε εκτίμηση τον Πυθαγόρα, ο δε Ποιητής λέει:

«Γιατί κ' οι άξιοι ρήτορες δεν έρχονται σαν πάντα
να βγάλουνε τους λόγους τους,
να πούνε τα δικά τους;
Γιατί οι βάρβαροι θα φθάσουν σήμερα·
κι αυτοί βαρυούντ' ευφράδειες και δημηγορίες.»

Από το άθροισμα στο ολοκλήρωμα

Είδαμε παραπάνω ότι το άθροισμα στη φθίνουσα Γεωμετρική πρόοδο είναι πεπερασμένο. Για τη πρόοδο αυτή η μεταβολή είναι $\alpha_{n+1}-\alpha_n=\alpha_n(\omega-1)$. Το κριτήριο για **σύγκλιση** είναι $-1<\omega-1<0$, ενώ για **απόκλιση** $\omega-1>0$. Δηλαδή η αλλαγή της συμπεριφοράς συμβαίνει για $\omega-1$ ίσο με μηδέν. Γενικεύοντας τον ορισμό για μια συνεχή μεταβλητή, ορίζεται η ποσότητα:

$$\frac{df(x)}{dx}=\lim_{\delta\to 0}\frac{f(x+\delta)-f(x)}{\delta}$$

που είναι η παράγωγος της συνάρτησης. Για δε τον ορισμό της παραγώγου, καίριο σημείο είναι η **ύπαρξη** του ορίου. **Η ύπαρξη του ορίου δηλώνει τη σύγκλιση**. Έτσι πηγαίνοντας σε συνεχή μεταβλητή έχουμε την παράγωγο, που εισήχθηκε σε μεταγενέστερους χρόνους. Στο

Πίνακας του Fetti (1620) που παρουσιάζει τον Αρχιμήδη

ολοκλήρωμα διαμερίζουμε το διάστημα της μεταβλητής σε πολλές σε αριθμό περιοχές και υπολογίζουμε το άθροισμα των εμβαδών που δημιουργούνται. Όταν η απόσταση μεταξύ διαδοχικών σημείων τείνει στο μηδέν, το συνολικό εμβαδόν τείνει σε μία σταθερή τιμή. Η τιμή αυτή είναι η τιμή του ολοκληρώματος. Άρα με τη χρήση της Γεωμετρικής προόδου μελετήθηκαν από τον Αρχιμήδη τα της **σύγκλισης**. Έτσι μελετήθηκαν όλα τα απαιτούμενα για τον ορισμό του ολοκληρώματος και της παραγώγου.

Είδη Απείρου

Παραπάνω είδαμε το είδος του απείρου που σχετίζεται με τους ακέραιους αριθμούς. Το είδος αυτό το αποκαλούμε «**αριθμήσιμο**». Στη περίπτωση των συνεχών μεταβλητών έχουμε ένα άλλο είδος απείρου, το οποίο αποκαλούμε «**μη αριθμήσιμο**». Στη περίπτωση αυτή, η τυχόν εμφανιζόμενη απροσδιοριστία επιλύεται με τους κανόνες L'Hospital. Τη μελέτη για τα είδη των απείρων

τη θεμελίωσε ο G. Cantor (1845-1918).

Περί Απειροστικού Λογισμού

Ο Απειροστικός λογισμός αναπτύσσει εκτενώς την έννοια της σύγκλισης. Αποτελεί γενίκευση των αποτελεσμάτων του μοντέλου του Αρχιμήδη. Δεν πρέπει όμως να ξεχνούμε και τη κορυφαία συνεισφορά του Αρχιμήδη. Η πρόοδος στα μαθηματικά που συντελέστηκε με τους Νεύτωνα (1620-1710) και Leibniz (1646-1716), άμεσα σχετίζεται με τη περαιτέρω ανάπτυξη της σύγκλισης.

Επιμύθιο

Πρώτα μελετούμε το ειδικό, και μετά το γενικό. Η σύγκλιση μελετήθηκε με τη χρήση ενός μοντέλου, που βασίζεται στη Γεωμετρική πρόοδο. Η γενίκευση της έννοιας της σύγκλισης, οδηγεί στον ορισμό της παραγώγου και του ολοκληρώματος. Συνεπώς, ο Αρχιμήδης είναι ο πρώτος που εισάγει τη Σύγκλιση στην Αριθμητική.

Η μέθοδος του Αρχιμήδη οδηγεί στην εισαγωγή του ολοκληρώματος και της παραγώγου. Όμως η γενική θεωρία έγινε μετά, από την οποία προέρχονται και οι εφαρμογές της. Για τη μελέτη των προβλημάτων ο Αρχιμήδης χρησιμοποίησε τον ειδικό τρόπο, και όχι τον γενικό. Πρώτα δηλαδή αναπτύσσεται ο ειδικός τρόπος και μετά γίνεται η γενική αντιμετώπιση. Ο τρόπος αυτός αποτελεί και τη σύγχρονη παιδαγωγική μέθοδο. Μετά, με βάση τα αυστηρά μαθηματικά, γίνεται με τη Λογική μια αυστηρή θεμελίωση των όσων βρέθηκαν, και βρίσκονται οι συνέπειες τους.

Η διδασκαλία στο Πανεπιστήμιο δεν πρέπει να αγνοεί την αρχαία Ελληνική συνεισφορά. Με βάση τα όσα ελέχθησαν, **ο Αρχιμήδης είναι ο θεμελιωτής των σύγχρονων μαθηματικών**. Μπορεί δε να λεχθεί ότι ο Αρχιμήδης ήταν ο τελευταίος κορυφαίος της Ελληνικής αρχαιότητας. Δε θα κάνω μια συνολική παρουσίαση του έργου του Αρχιμήδη που είναι τεράστιο. Υπήρξε Μαθηματικός, Φυσικός και Εφευρέτης. Επιγραμματικά θα αναφέρω ότι είναι ο μεγαλύτερος εφευρέτης όλων των εποχών. Πολλές από τις εφευρέσεις του τις διδασκόμαστε στο Δημοτικό και τις θεωρούμε σήμερα στοιχειώδεις. Θα πρέπει όμως να τις δούμε στα πλαίσια των τότε γνώσεων. Είναι επίσης διάσημη η φράση του: **Εύρηκα!** Η δραστηριότητα του αυτή επιδεικνύει ότι είχε μια μοναδική ικανότητα να συνδυάζει τη συμπεριφορά της Φύσης με τη πρακτική θεωρία, όπως και ο Θαλής. Αντιμετώπισε έτσι το πρόβλημα από τη πρακτική του σκοπιά. Με σημερινά δεδομένα, μπορούμε να πούμε ότι ο Αρχιμήδης ασχολείτο με τα εφαρμοσμένα μαθηματικά. Στο μαθηματικό του έργο προβάλλεται ότι: **Στόχος των μαθηματικών είναι να περιγράψουν τη Φύση.** Η σκοπιά αυτή είναι και η σκοπιά της Φιλοσοφικής Σχολής της Μιλήτου: χρησιμοποιήθηκε η **εμπειρική Λογική**, μέχρι της ανάπτυξης της αυστηρής. Ο Αρχιμήδης γεννήθηκε, έζησε, και πέθανε στις Συρακούσες. Με τον θάνατο του Αρχιμήδη η Ελληνιστική περίοδος πρακτικά βρίσκεται στο τέλος της.

Τελειώνω με τον Καβάφη που λέει:

«… Σαν έτοιμος από καιρό, σα θαρραλέος,

σαν που ταιριάζει σε που αξιώθηκες μια τέτοια πόλι,

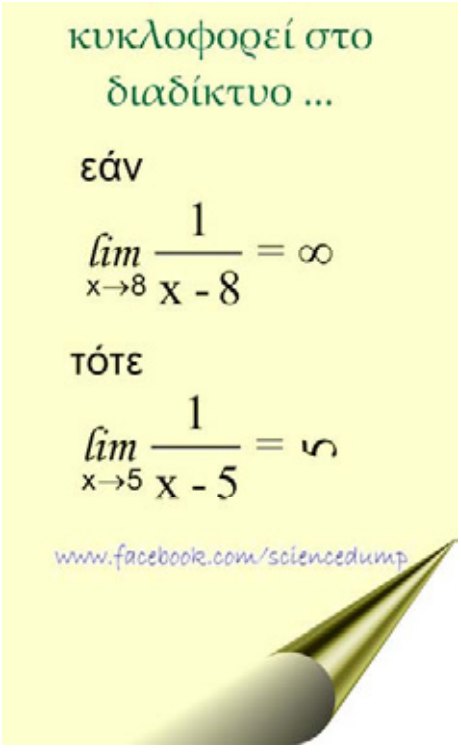
πλησίασε σταθερά προς το παράθυρο,

κι άκουσε με συγκίνησιν, αλλ' όχι με των δειλών τα παρακάλια και παράπονα,

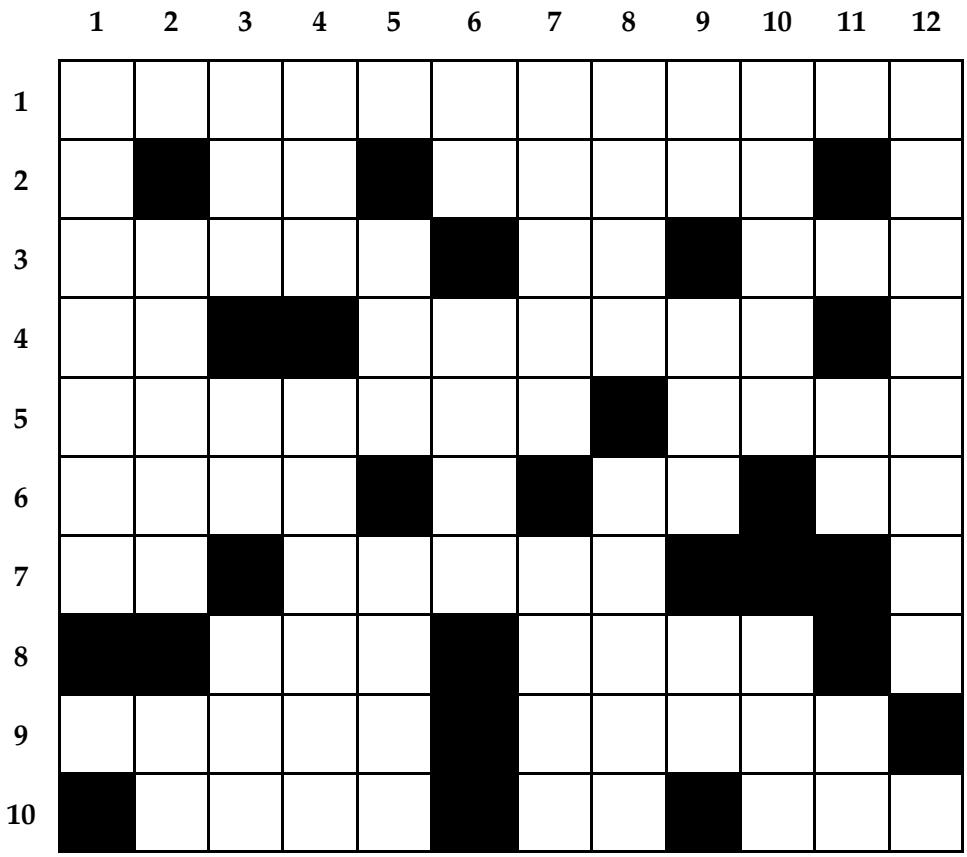
ως τελευταία απόλαυση τους ήχους,

τα εξαίσια όργανα του μυστικού θιάσου,

κι αποχαιρέτα την, την Αλεξάνδρεια που χάνεις.»



ΣΤΑΥΡΟΛΕΞΟ



Χρήστος Παπαπαντελής • *Φοιτητής Τμ. Φυσικής*

ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ

1. Διάσημος αλλά λίγο… αβέβαιος φυσικός.

2. Το σύμβολο ευγενούς αερίου. – Ισχύς AC που αποροφάται λόγω αυτεπαγωγής ή χωρητικότητας.

3. Τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. – Μέταλλο… περίεργο (σύμβ.) – Σταματάει… αντίστροφα.

4. Το σύμβολο του Ταντάλιου. – Σχήμα …: χρησιμοποιείται στη διαίρεση πολυωνύμων.

5. Αέριο που υπακούει απόλυτα στην καταστατική εξίσωση – Μονάδα ισχύος (παλιότερη γραφή).

6. Πρόθεμα για χιλιαπλάσια – Συμπιεσμένη… μάζα – Πολλαπλάσιο του Ohm.

7. Ατομικό τροχιακό στα αγγλικά (αρχικά) – Λάτιν χορός (υπάρχουν κι άλλα ωραία εκτός από τη φυσική!).

8. Στους ημιαγωγούς κινούνται σε αντίθετη κατεύθυνση από τα ηλεκτρόνια (ενικός) – Μέγεθος που ο ρυθμός μεταβολής του ισούται με τη δύναμη.

9. Μονάδα έντασης μαγνητικού πεδίου (αντίστροφα) – Σχηματίζονται σε ρευστά.

10. Νευτώνειο… φρούτο – Η βάση του αριθμητικού μας συστήματος (οπτικά) – Το αντίστροφο του επί.

ΚΑΘΕΤΑ

1. Τέτοια φυσικά συστήματα δεν είναι προβλέψιμα μακροπρόθεσμα.

2. Ανακαλύφθηκε από το ζεύγος Κιουρί – Συνεχόμενα στο αλφάβητο.

3. Η οπτική χρησιμοποιείται κυρίως για μετάδοση πληροφοριών – Το πρώτο συνθετικό αραβικής λέξης, από την οποία προήλθε ο όρος άλγεβρα – Αναφορική αντωνυμία (θηλ.).

4. Ο άξονας της τρίτης διάστασης. – Σουηδός εφευρέτης, αγαπητός στους επιστήμονες.

5. Παίζει ο Θεός ζάρια; Ο Αϊνστάιν είπε… – Πέταξε και ο Βενιαμίν Φραγκλίνος (μια γραφή).

Επιτροπές Τμήματος Φυσικής 2014—2015

Επιτροπή Συμβούλων Σπουδών & Υποδοχής Πρωτοετών Φοιτητών: **Βίγκα,** Αγγελακέρης, Αρβανιτίδης, Βόλος, Βουρλιάς, Βουρουτζής, Βυρσωκινός, Γιώτη, Γούδος, Δημητρακόπουλος, Δόνη, Καλλέρη, Κατσικίνη, Κεχαγιάς, Κιοσέογλου, Κορδάς, Μελέτη, Μελετλίδου, Μουστακίδης, Μπαλής, Πατσαλάς, Παυλίδου, Πέτκου, Πολάτογλου, Σαββίδης, Σαμαράς Θ., Σαμψωνίδης, Σαραφίδης, Στούλος, Στούμπουλος, Τάσσης.

Επιτροπή Φοιτητικών Θεμάτων: **Ευθυμιάδης,** Βίγκα, Δημητρακόπουλος, Σαββίδης, Στούμπουλος, Βουγιατζής, Νικολαΐδης Σπ. *Συμμετέχουν* δύο εκπρόσωποι φοιτητών.

Επιτροπή Προγράμματος Σπουδών: **Κίτης Γ.** και [ορίστηκαν από Τομείς]: Κεχαγιάς, Τσιγάνης, Στούμπουλος, Νικολαίδης Σπ., Πέτκου. Αναπληρωματικοί: Βες, Στεργιούλας, Σαμαράς Θ., Σίσκος, Κορδάς Κ. *Συμμετέχουν* και δύο εκπρόσωποι φοιτητών.

Επιτροπή Εργαστηρίων: **Αγγελακέρης,** Σαμψωνίδης, Αρβανιτίδης, Βουρλιάς, Κυπριανίδης, Παυλίδου, Κίτης, Σίσκος, Κατσικίνη, Τσιγάνης, Χατζηκρανιώτης.

Επιτροπή Βιβλιοθήκης: **Βλάχος Ν.**, Μελετλίδου, Δημητριάδης, Χατζηκρανιώτης. *Συμμετέχει*: Εμμανουήλ Κυριακή.

Επιτροπή Σεμιναρίων: **Σαββίδης**, Μουστακίδης, Κορδάς.

Επιτροπή Ωρολογίου Προγράμματος & Αιθουσών: **Ιωαννίδου**, Παυλίδου. *Συμμετέχει*: Η. Παππάς.

Επιτροπή Εκδόσεων & Ηλεκτρονικής Προβολής του Τμήματος: **Δημητρακόπουλος,** Κατσικίνη, Στούλος, Μελέτη, Στούμπουλος. *Συμμετέχει*: Κ. Λιακάκης.

Επιτροπή ERASMUS-ECTS/DS: **Παλούρα** και [Ορίστηκαν από Τομείς]: Πατσαλάς, Κατσικίνη, Νικολαίδης Σπ., Ιωαννίδου, Βουγιατζής.

Επιτροπή Κτιριακής Υποδομής, Πολιτικής Προστασίας, Υγιεινής & Ασφάλειας: **Πολάτογλου**

Επιτροπή Οικονομικών: **Κεχαγιάς,** Βουγιατζής, Νικολαΐδης Σπ., Βαφειάδης, Στούλος.

Επιτροπή Υπολογιστικής Υποδομής: **Σαμαράς Θ.** Αγγελακέρης, Αρβανιτίδης, Σαμαράς Γ, Τσιγάνης, Βλάχος Ν., Γούδος. *Συμμετέχει*: Τ. Χατζηαντωνίου.

Επιτροπή Οργάνωσης Συλλογής Στοιχείων Εκθέσεων Δραστηριότητας & Διδακτικής Ικανότητας: **Μπάης**, Κιοσέογλου, Λιούτας, Τάσσης, Στεργιούλας, Πατσαλάς.

Επιτροπή Ερευνητικής Πολιτικής & Υποδομών του Τμήματος: **Κομνηνού,** Βλάχος Λ., Λογοθετίδης, Πετρίδου, Μπάης, Σίσκος.

Επιτροπή Διασύνδεσης με την Εκπαίδευση: **Μπαλής,** Πολάτογλου, Χατζηκρανιώτης, Καλλέρη.

Επιτροπή Μαθηματικών: **Βλάχος Ν.** *Συμμετέχουν* όλοι οι διδάσκοντες.

Επιτροπή Γεν. Φυσικής: **Φράγκης Ν.** *Συμμετέχουν* όλοι οι διδάσκοντες

---

6. Ανήκει στα αλκάλια (σύμβολο). – Ξυράφι του …: επιστημονική αρχή της οικονομίας.

7. Μονάδα θεμελιώδους μεγέθους της φυσικής – Μονάδα μήκους των αρχαίων Ελλήνων αλλά και των ΗΠΑ.

8. Επίρρημα για $t<t_0$ – Έχει μέγεθος, συνήθως, από ελάχιστα έως δεκάδες angstrom.

9. Το πρώτο γράμμα εμφανίζεται, ενώ το δεύτερο εξαφανίζεται, κατά τη δίδυμη γένεση – Ελληνική βιομηχανία ζάχαρης – Συνεχόμενα στο αλφάβητο.

10. Όρος συμφωνίας ή συμβολαίου – Αναφέρεται ως δύναμη, αλλά έχει μονάδα το Volt (συντομογρ.).

11. $\{\tau,\iota,\kappa\} \cap \{\tau,\alpha,\kappa\} =?$ – Άθροισμα εντάσεων ρευμάτων (σύμβ.).

12. Έννοια που εισήγαγε ο Πλανκ.

Σεμινάρια του Τμήματος

Όπως κάθε χρόνο έτσι και στη διάρκεια του ακαδημαϊκού έτους 2013-2014, πραγματοποιήθηκαν τα Σεμινάρια «της Τετάρτης» από διακεκριμένους επιστήμονες. Τα σεμινάρια αποτελούν θεσμό στο Τμήμα και απευθύνονται σε προπτυχιακούς και μεταπτυχιακούς φοιτητές, ερευνητές και μέλη ΔΕΠ του Τμήματος.

15/1/2014

«The Inner Heliosphere in 3D: Observations of Coronal Mass Ejections, Solar Wind, and Comets during the Maximum of Solar Activity»

Δρ. Άγγελος Βουρλίδας

Naval Research Laboratory, USA.

29/1/2014

«Impact of Nanosciences and Nanoengineering on Emerging Technology and Biomedical Fields »

Καθ. Κυριάκος Κομβόπουλος

University of California, Berkeley.

12/2/2014

«Advanced manufacturing techniques for mass production of nano scale structures »

Δρ. Νίκος Κεχαγιάς

Institute of Nanosciences and Nanoengineering, Bellaterra (Barcelona), Spain.

19/2/2014

«ASTRONEU, a multi-messanger astroparticle physics project and its contribution to the physics education»

Καθ. Σπύρος Τζαμαρίας,

Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.

26/2/2014

«Δυναμική των Μικρών Σωμάτων και εξελικτική πορεία του Ηλιακού Συστήματος »

Επικ. Καθ. Κλεομένης Τσιγάνης

Τμήμα Φυσικής Α.Π.Θ.

5/3/2014

«Thermal structure at the Nanoscale»

Δρ. Κων/νος Τερμεντζίδης

CNRS, Laboratoire LEMTA - Université de Lorraine, France.

19/3/2014

«Organic Bioelectronics in neuroscience and tissue engineering»

Prof. George Malliaras

Department of Bioelectronics, Microelectronics Center of Provence, France.

2/4/2014

«Delay Tolerant Networking, and an implementation for disseminating and exploiting scientific data »

Αναστάσιος Μαλκότσης

Director of Space Internetworks Ltd

9/4/2014

«Control and Monitoring of Cells with Organic Electronics»

Prof. Roisin M. Owens

Department of Bioelectronics, Microelectronics Center of Provence, France.

14/5/2014

«Δυναμική των μαγνητικών καταιγίδων και των ζωνών Van Allen»

Καθ. Ιωάννης Δαγκλής

Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

21/5/2014

«The Relativistic World of Graphene»

Prof. Gordon Semenoff

University of British Columbia

28/5/2014

«Organic Photovoltaics: Hybrid interfaces and organic structures»

Dr. Konstantinos Fostiropoulos

Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie

Συνέβησαν στο Τμήμα

Ορκωμοσία διδακτόρων

Στις 24/11/2014 ορκίστηκαν οι νέοι διδάκτορες του Τμήματος Φυσικής.

ΔΙΔΑΚΤΟΡΑΣ	ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ	ΘΕΜΑ
Αντωνιάδου Κυριακή	Γ. Βουγιατζής	Dynamics of planetary systems in resonances: from the planar to the spatial case
Ζορμπάς Γεώργιος	Θ. Σαμαράς	Σχεδιασμός θεραπείας για την καρκινοθεραπεία με ραδιοσυχνοτικό θερμοκαυτηριασμό
Κουρτέσης Αλέξανδρος	Χ. Τσάγκας	Εξέλιξη και δράση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε καμπύλους χώρους

Συνταξιοδοτήσεις

Γεώργιος Θεοδώρου

Καθηγητής του Τομέα Φυσικής Στερεάς Κατάστασης.

Αυτοί που έφυγαν...

Το Νοέμβριο του 2014 έφυγε από κοντά μας η Μεταξία Μανωλοπούλου, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια του Τμήματος Φυσικής.

ΛΥΣΗ ΣΤΑΥΡΟΛΕΞΟΥ

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Χ	Α	Ι	Ζ	Ε	Ν	Μ	Π	Ε	Ρ	Γ	Κ
2	Α	■	Ν	Ε	■	Α	Ε	Ρ	Γ	Η	■	Β
3	Ο	Ρ	Α	Τ	Ο	■	Τ	Ι	■	Τ	Λ	Α
4	Τ	Α	■	■	Χ	Ο	Ρ	Ν	Ε	Ρ	■	Ν
5	Ι	Δ	Α	Ν	Ι	Κ	Ο	■	Β	Α	Τ	Τ
6	Κ	Ι	Λ	Ο	■	Α	■	Μ	Ζ	■	Κ	Ω
7	Α	Ο	■	Μ	Α	Μ	Π	Ο	■	■	■	Σ
8	■	■	Ο	Π	Η	■	Ο	Ρ	Μ	Η	■	Η
9	Α	Λ	Σ	Ε	Τ	■	Δ	Ι	Ν	Ε	Σ	■
10	■	Μ	Η	Λ	Ο	■	Ι	Ο	■	Δ	Ι	Α

Συνέβησαν στο Τμήμα

Ορκωμοσίες πτυχιούχων

Τη Δευτέρα 24/11/2014 πραγματοποιήθηκε στην Αίθουσα Τελετών του Α.Π.Θ. ορκωμοσία νέων πτυχιούχων του Τμήματος Φυσικής.

ΟΙ ΝΕΟΙ ΠΤΥΧΙΟΥΧΟΙ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΑΛΕΞΑΝΔΡΗ	ΦΑΝΗ
ΑΛΤΟΥΒΑ	ΧΡΙΣΤΙΑΝΝΑ
ΑΝΑΓΝΟΣ	ΘΕΟΔΩΡΟΣ
ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ	ΓΕΩΡΓΙΟΣ
ΑΡΑΜΠΑΤΖΗΣ ΖΙΑΜΟΣ	ΠΑΡΗΣ
ΑΣΛΑΝΙΔΟΥ	ΣΟΦΙΑ
ΒΑΒΡΙΤΣΑ	ΜΑΡΓΑΡΙΤΑ ΣΤΕΦΑΝΙΑ
ΒΑΣΙΛΕΙΑΔΗΣ	ΙΣΑΑΚ
ΒΙΛΟΥΡΑΣ	ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ
ΒΛΑΧΑΚΗ	ΙΩΑΝΝΑ
ΓΑΝΩΣΗ	ΑΓΓΕΛΙΚΗ
ΓΑΡΥΦΑΛΛΟΣ	ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ
ΓΕΩΡΓΑΝΤΑ	ΜΑΡΙΑ
ΓΕΩΡΓΙΑΔΗΣ	ΑΓΓΕΛΟΣ
ΓΕΩΡΓΟΠΟΥΛΟΣ	ΣΠΥΡΙΔΩΝ
ΓΙΑΝΝΕΛΟΣ	ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ
ΓΚΕΡΤΣΙΟΥ	ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ
ΓΚΟΤΖΙΟΥ	ΜΑΡΙΑ
ΓΚΟΤΟΒΟΥ	ΙΩΑΝΝΑ
ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΗΣ	ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
ΓΡΗΓΟΡΙΑΔΗΣ	ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ
ΔΑΛΑΜΠΙΡΑΣ	ΠΑΣΧΑΛΗΣ
ΔΑΡΔΑΝΗ	ΖΩΗ
ΔΗΜΑΡΑΚΗ	ΘΕΟΔΩΡΑ
ΔΗΜΟΥΔΗΣ	ΣΠΥΡΙΔΩΝ
ΔΟΥΛΓΕΡΙΔΟΥ	ΓΕΩΡΓΙΑ
ΕΜΜΑΝΟΥΗΛΙΔΗΣ	ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ
ΕΥΦΡΑΙΜΙΔΗΣ	ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ
ΘΩΜΑ	ΙΩΑΝΝΑ
ΚΑΘΑΡΟΠΟΥΛΟΣ	ΙΩΑΝΝΗΣ
ΚΑΜΠΕΡΗΣ	ΕΥΣΤΑΘΙΟΣ
ΚΑΡΑΚΩΣΤΑΣ	ΙΩΑΝΝΗΣ
ΚΑΡΑΝΑΣΙΟΥ	ΕΙΡΗΝΗ
ΚΑΡΥΟΦΙΛΗΣ	ΑΝΔΡΕΑΣ
ΚΟΖΑΛΑΚΗΣ	ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ
ΚΟΚΚΙΝΟΣ	ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
ΚΟΣΕΟΓΛΟΥ	ΠΑΥΛΟΣ
ΚΟΥΣΙΟΠΟΥΛΟΣ	ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ
ΚΥΡΙΑΚΙΔΟΥ	ΑΛΕΞΑΝΔΡΑ
ΛΕΙΒΑΔΑΡΑΣ	ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ
ΛΥΜΠΕΡΗΣ	ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ
ΛΥΤΡΟΣΥΓΓΟΥΝΗΣ	ΧΡΗΣΤΟΣ
ΜΑΓΓΕΝΑΚΗΣ	ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ
ΜΑΛΑΝΔΡΗΣ	ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ
ΜΑΥΡΟΥΔΗΣ	ΘΩΜΑΣ
ΜΕΛΙΔΗΣ	ΗΛΙΑΣ
ΜΙΧΑΛΟΥΔΗΣ	ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ
ΜΠΑΛΩΜΕΝΑΚΗΣ	ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ
ΜΠΕΤΑ	ΒΑΣΙΛΙΚΗ
ΜΠΟΥΛΑΚΗ	ΠΑΣΧΑΛΙΑ
ΜΠΟΧΩΡΙΔΗΣ	ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ
ΜΥΛΩΝΑ	ΣΟΦΙΑ
ΝΙΚΗΤΑΡΗΣ	ΜΙΧΑΗΛ ΠΑΝΟΡΜΙΤΗΣ
ΝΙΚΟΛΑΚΑΚΗΣ	ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ
ΝΙΚΟΛΑΟΥ	ΧΡΗΣΤΟΣ
ΟΙΚΟΝΟΜΟΥ	ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ
ΠΑΪΠΑΗΣ	ΓΕΩΡΓΙΟΣ
ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ	ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ
ΠΑΠΑΕΥΑΓΓΕΛΟΥ	ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Συνέβησαν στο Τμήμα

ΠΑΠΟΥΛΙΑ	ΧΡΥΣΑΝΘΗ
ΠΑΠΟΥΤΣΗΣ	ΙΩΣΗΦ
ΠΑΡΛΙΑΡΗ	ΔΑΦΝΗ
ΠΕΤΡΙΔΗΣ	ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ
ΠΕΤΡΟΥ	ΧΡΙΣΤΙΝΑ
ΡΑΦΤΗ	ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΑ
ΚΟΥΖΟΥΤΖΑΚΟΓΛΟΥ	
ΣΑΚΕΛΛΑΡΙΟΥ	ΕΥΡΙΠΙΔΗΣ
ΣΑΤΑΝΑΚΗΣ	ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ
ΣΕΚΕΡΟΓΛΟΥ	ΓΕΜΕΝΙΩ
ΣΙΔΗΡΟΠΟΥΛΟΣ	ΤΡΑΪΑΝΟΣ
ΣΚΟΡΔΑ	ΕΛΕΝΗ
ΣΩΤΗΡΙΟΥ	ΧΡΥΣΩ
ΤΣΑΤΑΛΗΣ	ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ
ΦΑΣΛΑ	ΘΑΛΕΙΑ
ΦΙΛΙΠΠΟΥ	ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ
ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ	ΑΛΙΚΗ
ΧΡΥΣΟΥΛΑ	ΘΕΟΔΩΡΑ

Το ΝΟΗΣΙΣ έκλεισε τα 10!

Στις 27/10/2004 ο Κ. Στεφανόπουλος με την ιδιότητα του Προέδρου της Δημοκρατίας, εγκαινίαζε το Κέντρο Διάδοσης Επιστημών και Μουσείο Τεχνολογίας. Ο Πρόεδρος είχε ήδη εκφράσει την ευαρέσκεια του για το έργο που είχε προηγηθεί, κατά την επίσκεψη του στο εκθετήριο του Τεχνικού Μουσείου στη Σίνδο και είχε απονείμει στον Πρόεδρο του Μουσείου, τον αείμνηστο καθηγητή Ν. Οικονόμου, το παράσημο του Ταξιάρχη της Τιμής. Από την ημέρα των εγκαινίων άνοιξε ένας νέος κύκλος που πρόσφατα συμπλήρωσε δεκαετία. Σε αυτό το χρονικό διάστημα:

- εκατοντάδες χιλιάδες επισκεπτών ξεναγήθηκαν στις 3 μόνιμες και στις 18 περιοδικές εκθέσεις του ιδρύματος,
- περισσότερες από 1.200 σχολικές ομάδες παρακολούθησαν εκπαιδευτικά προγράμματα για την πυραυλική, τη μαγεία της επιστήμης, την επιστήμη στην κουζίνα, τις εναλλακτικές πηγές ενέργειας,
- παράχθηκε η πρώτη ελληνική παραγωγή πλανηταρίου με μη αστρονομικό περιεχόμενο,
- παρουσιάσθηκαν δεκάδες καφέ της επιστήμης, με τη συνεργασία του Γαλλικού Ινστιτούτου και του Βρετανικού Συμβουλίου, σε θέματα από την ηθική της τεχνολογίας έως τα μαμούθ των Γρεβενών,
- ομάδες ενδιαφερομένων εκπαιδεύτηκαν στη ρομποτική, τον αερομοντελισμό, την εκλαΐκευση της επιστήμης,
- οργανώθηκαν και υλοποιούνται τα γενέθλια και οι θερινές κατασκηνώσεις του επιστήμονα,
- δοκιμάστηκε η παραγωγή επιστημονικής θεατρικής παράστασης,
- το ΝΟΗΣΙΣ συνεργάσθηκε με την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος και συνδέθηκε ζωντανά με τον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό δίνοντας ευκαιρία σε μαθητές να μιλήσουν με αστροναύτες,
- κάλεσε κορυφαίες προσωπικότητες όπως οι καθηγητές Κριμιζής και Τάσσιος να μιλήσουν για το χθες και το αύριο,
- πραγματοποιήθηκαν αφιερώματα και πρεμιέρες ταινιών επιστημονικής φαντασίας, μουσικές εκδηλώσεις με μοναδικές παραστάσεις της κρατικής ορχήστρας,
- δόθηκε βήμα στον εθελοντισμό και ευκαιρίες για ανάπτυξη πρακτικής άσκησης για φοιτητές από όλη την Ελλάδα,
- το ΝΟΗΣΙΣ συμμετείχε σε ερευνητικά προγράμματα συνδράμοντας στην επίτευξη εθνικών και ευρωπαϊκών στόχων,
- περισσότεροι από 1.300.000 άνθρωποι, κυρίως νέοι, βημάτισαν στις φιλόξενες και ευρύχωρες αίθουσες του, αναζητώντας κάτι περισσότερο ή κάτι διαφορετικό από την τηλεόραση, τη σχολική τάξη ή το εμπορικό κέντρο. Άνθρωποι που θέλουν να μάθουν, να ψυχαγωγηθούν αλλιώς, να διευρύνουν τα όρια των αναζητήσεων τους για επαγγελματικό προσανατολισμό, καινοτομική σκέψη, που επιθυμούν να συναντηθούν με ανθρώπους κοινών ενδιαφερόντων γύρω από την επιστήμη, την τεχνολογική και βιομηχανική κληρονομιά. Άνθρωποι που γοητεύονται στην ιδέα της τεχνολογίας στην Αρχαία Ελλάδα και στη θέα μιας μοτοσικλέτας του 1920, άνθρωποι που πιστεύουν ότι τα υλικά της επιστήμης και της τεχνολογίας είναι κυρίαρχα στην οικοδόμηση του κόσμου. Άνθρωποι που δηλώνουν αδιάφοροι αλλά συγκινούνται βλέποντας το αυτοκίνητο που αγόρασαν μεταχειρισμένο σαν φοιτητές, που εκπλήσσονται από την αποκάλυψη της λειτουργίας του κινηματογράφου και την τρισδιάστατη προβολή. Γονείς που συνοδεύουν τα παιδιά τους και δάσκαλοι τους μαθητές τους.

«ComputeRevolution-Η εξέλιξη των υπολογιστών»: περιοδική έκθεση στο Noesis

Έχετε χρησιμοποιήσει Spectrum ή Commodore; Έχετε παίξει με Atari ή Nintendo; Η μήπως δεν έχετε ακούσει ποτέ γι' αυτά; Ελάτε στο ΝΟΗΣΙΣ για να θυμηθείτε οι παλιότεροι και να μάθετε οι νεότεροι. Ακολουθήστε τη χρονογραμμή και χαθείτε στον μαγευτικό κόσμο των ηλεκτρονικών υπολογιστών και των παιχνιδομηχανών βλέποντας την εξέλιξή τους μέσα στα χρόνια.

Παρακολουθήστε στιγμιότυπα από τα δημοφιλέστερα video games και παίξτε σε πραγματικά arcades. Θυμηθείτε διαφημίσεις από μια άλλη εποχή και φυλλομετρήστε τεύχη του Pixel, του PCMaster και του User. Δείτε τον γίγαντα IBM 1620, τον πρώτο υπολογιστή που ήρθε στην Βόρεια Ελλάδα, μεγέθους δύο δωματίων.

Διάρκεια έκθεσης: από **20/12/2014** μέχρι **31/3/2015**.

** Πληροφορίες από την ιστοσελίδα του ιδρύματος.*