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

Φαινόμενον

Περίοδος Δ' | Τεύχος 37 | Ιανουάριος 2023
ISSN: 2529-1874/2529-1875 (online)

το πρόβλημα της ισορροπίας των σπανίων γαιών
Σελίδα 20

διαρροές σε μεταλλικούς αγωγούς
ανίχνευση με χρήση ακουστικών σημάτων
Σελίδα 3

γιατί ο κόσμος μας είναι κλασικός;
...κβαντομηχανική για βιαστικούς και απρόσεκτους
Σελίδα 7

ημερολόγιο αποστολής.....part 2
το ταξίδι του Αρκτούρου συνεχίζεται: αστρονομικές και ναυτικές ιστορίες στην άλλη μεριά της Γης
Σελίδα 27

machine learning & game development
Σελίδα 12

παιχνίδια με το φως
...τα δαχτυλίδια του φωτός γύρω από τον Ήλιο και την Σελήνη
Σελίδα 16

ο παράξενος κβαντικός μας κόσμος

Σελ. 22

phenomenon.physics.auth.gr

Φαινόμενον

Περίοδος Δ΄ · Τεύχος 37
Ιανουάριος 2023
Περιοδική έκδοση του Τμήματος Φυσικής Α.Π.Θ.
(προεδρία Α. Ιωαννίδου)

συντακτική ομάδα

Επιτροπή εκδόσεων, σεμιναρίων και προβολής του Τμήματος Φυσικής

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

στο τεύχος αυτό συνεργάστηκαν

Θεμιστοκλής Ζηκόπουλος
(Φοιτητής Τμ. Φυσικής)
Μαρία Κατσικίνη
(Καθηγήτρια Τμ. Φυσικής)
Γεώργιος-Παναγιώτης Κουσιόπουλος
(Διδάκτωρ Τμ. Φυσικής)
Νίκη Λαγιόκαπα
(Απόφοιτη Τμ. Φυσικής)
Παντελής Παπαδόπουλος
(Αναπ. Καθηγητής Τμ. Φυσικής)
Τάσος Πέτκου
(Καθηγητής Τμ. Φυσικής)
Φανή Πινακίδου
(Ε.ΔΙ.Π Τμ. Φυσικής)
Χάρης Σαραφίδης
(Επίκ. Καθηγητής Τμ. Φυσικής)

Εκτύπωση
COPYCITY Ε.Π.Ε.

ψηφιακή έκδοση
http://phenomenon.physics.auth.gr
E-mail επικοινωνίας:
phenomenon@physics.auth.gr
facebook: τμήμα φυσικής απθ & περιοδικό "φαινόμενον"
ISSN: 2529-1874 · 2529-1882 (online)

σημείωμα της σύνταξης

Στο παρόν τεύχος του «ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΝ» το κεντρικό άρθρο αφορά το βραβείο Νόμπελ Φυσικής 2022. Επίσης παρουσιάζονται νέα άρθρα από φοιτητές/τριες και μέλη του Τμήματος Φυσικής για την κλασσική θεώρηση του κόσμου, την εφαρμογή της μηχανικής μάθησης στα παιχνίδια υπολογιστών, το πρόβλημα ισορροπίας των σπανίων γαιών στον πλανήτη, τα παιχνίδια του φωτός με τους παγοκρυσταλλίτες της ατμόσφαιρας και την ανίχνευση διαρροών σε μεταλλικούς αγωγούς με την χρήση ακουστικών κυμάτων. Από το τεύχος δεν λείπουν φυσικά τα επιστημονικά νέα από τον χώρο της Φυσική, με πρόσφατα επιτεύγματα που προκάλεσαν αίσθηση, και τα νέα του Τμήματος Φυσικής ΑΠΘ. Ως συνέχεια του φωτογραφικού ημερολόγιου επιστημονικής αποστολή στη Χαβάη για αστρονομικές παρατηρήσεις που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο τεύχος, σε αυτό το τεύχος παρατίθεται αναλυτικά όλη η περιπέτεια!

Η ΣΥΝΤΑΚΤΙΚΗ ΟΜΑΔΑ

περιεχόμενα

Επιστημονικά νέα	**1**
Διαρροές σε μεταλλικούς αγωγούς	**3**
Γιατί ο κόσμος είναι κλασσικός	**7**
Machine Learning & Game Development	**12**
Παιχνίδια με το φως	**16**
Το πρόβλημα της ισορροπίας των σπανίων γαιών	**20**
Ο παράξενος κβαντικός μας κόσμος	**22**
Φοιτητές του ΑΠΘ εκτοξεύουν … δορυφόρο	**26**
Ημερολόγιο αποστολής … part 2	**27**
Συνέβησαν στο Τμήμα	**31 - 32**

Εξώφυλλο: Αλέξανδρος Μυλωνάς (φοιτητής Τμ. Φυσικής)

πνευματικά δικαιώματα

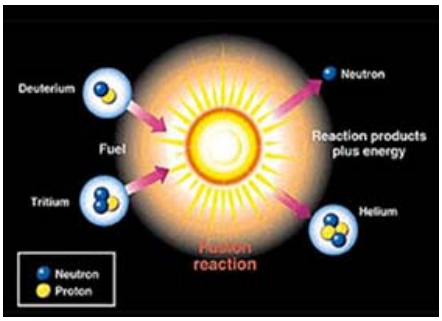
Το δημοσιευμένο υλικό στο περιοδικό αυτό προστατεύεται από Copyright. Το υλικό δημοσιεύεται υπό όρους που καθορίζονται από την Creative Commons Public License και απαγορεύεται κάθε χρήση του με διαφορετικές προϋποθέσεις από αυτές που καθορίζονται από την άδεια. Είστε ελεύθεροι να διανείμετε, αναπαράγετε,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

Δείτε αναλυτικά τους 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.

Χάρης Σαραφίδης
Επίκουρος Καθηγητής
Τμήματος Φυσικής

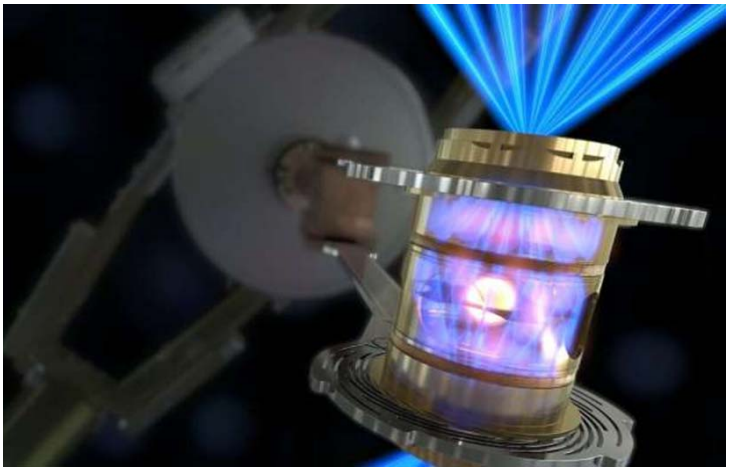
Στο πλαίσιο της προσπάθειας αξιοποίησης της σύντηξης για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της ανθρωπότητας, επιτεύχθηκε την Δευτέρα 5 Δεκεμβρίου 2022 στο Εργαστήριο Lawrence στο Livermore της California των ΗΠΑ, μία σημαντική εξέλιξη στην μελέτη της σύντηξης. Η σύντηξη είναι η αντίδραση κατά την οποία δύο άτομα υδρογόνου ενώνονται για τον σχηματισμό ενός ατόμου ηλίου. Σε αυτή τη διαδικασία, το υδρογόνο μετατρέπεται σε ενέργεια, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την πιθανότητα η τεχνική της σύντηξης να αποτελέσει στο μέλλον μια ανεξάντλητη πηγή ενέργειας. Η σύντηξη με laser, γνωστή και ως «σύντηξη με αδρανειακό περιορισμό», είναι μια μέθοδος εκκίνησης των αντιδράσεων της πυρηνικής σύντηξης μέσω θέρμανσης και συμπίεσης στόχων καυσίμου που έχουν τη μορφή σφαιριδίων και τα οποία περιέχουν δευτέριο και τρίτιο. Αποτελεί μια από τις πολλά υποσχόμενες προσεγγίσεις για την επίτευξη μια ελεγχόμενης θερμοπυρηνικής σύντηξης. Φανταστείτε την σύντηξη με laser ως το ανάλογο της προσέγγισης ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης για την απελευθέρωση πυρηνικής ενέργειας λόγω σύντηξης.



Πηγή: ***lasers.llnl.gov***

Οι προσπάθειες για επίτευξη της ελεγχόμενης σύντηξης εμποδίζονται από το υψηλό φράγμα δυναμικού που σχετίζεται με το φαινόμενο. Οι επικρατέστερες μέθοδοι για υπέρβαση του εμποδίου είναι η χρήση μαγνητικού πεδίου για παγίδευση των υπό σύντηξη ατόμων τα οποία βρίσκονται σε μορφή πλάσματος και η χρήση συστοιχιών laser υψηλής ισχύος για δημιουργία συσσωμάτων υψηλής πυκνότητας και θερμοκρασίας. Στην περίπτωση του εργαστηρίου Lawrence χρησιμοποιήθηκαν 192 δέσμες laser σε μία εγκατάσταση μεγέθους τριών γηπέδων ποδοσφαίρου, μέσω των οποίων διοχετεύθηκε ενέργεια 2,05 εκατομμυρίων Joules σε έναν μικροσκοπικό στόχο, ο οποίος στην συνέχεια λόγω σύντηξης απελευθέρωσε 3,15 εκατομμύρια Joules.

Η εξέλιξη αυτή απέδειξε ότι η επίτευξη ελεγχόμενης θερμοπυρηνικής σύντηξης με αυτή την μεθοδολογία είναι πράγματι δυνατή. Εξακολουθούν ωστόσο να υπάρχουν σημαντικά τεχνικά εμπόδια. Η διάταξη των laser του εργαστηρίου μπορεί να ενεργοποιηθεί μόνο δύο φορές την ημέρα σε πολύ σύντομους παλμούς και όχι αρκετές φορές το δευτερόλεπτο όπως θα απαιτούσε ένα εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας. Ακόμη και η μοντελοποίηση σε ηλεκτρονικό υπολογιστή της διαδικασίας για την βελτίωση της απαιτεί χρόνο μεγαλύτερο από τα πειράματα. Η προσπάθεια συνεχίζεται και όπως συμβαίνει συνήθως, τα καλύτερα έρχονται…..



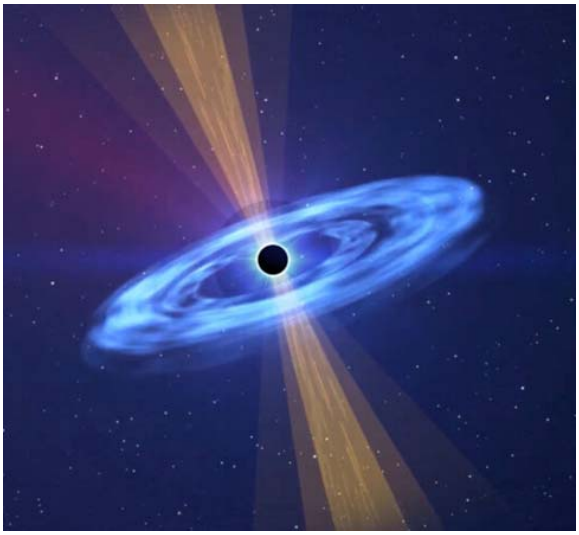
Φωτογραφία: Lawrence Livermore National Laboratory

Η αποθήκευση ενέργειας με μορφή θερμότητας είναι μια υποσχόμενη τεχνολογία, που μπορεί να συμβάλλει στην επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων για μείωση της μόλυνσης και επιβράδυνση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, τα οποία συμβάλλουν στην αύξηση της θερμοκρασίας και κατ΄ επέκταση επιταχύνουν τις κλιματικές αλλαγές. Η χρήση τετηγμένων αλάτων είναι η πιο πιθανή τεχνολογική απάντηση. Πρόκειται για στερεά υλικά τα οποία απορροφούν θερμότητα προκειμένου να τηχθούν και τα οποία μπορούν να την επιστρέψουν καθώς στερεοποιούνται. Πως όμως θα επιλεγεί το βέλτιστο υλικό, αποφεύγοντας επίπονες και χρονοβόρες πειραματικές δοκιμές υψηλού κόστους;

Φωτογραφία: Christina Nunez, Argonne National Laboratory

Για τον σκοπό αυτό, ερευνητές από το εργαστήριο Argonne στις ΗΠΑ πρότειναν την χρήση μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης (artificial intelligence). Πιο συγκεκριμένα, με την χρήση υπολογιστικών προσομοιώσεων και εφαρμογές τεχνικών μηχανικής μάθησης (machine learning) μπορεί να γίνει μία αρχική μελέτη ώστε να μειωθεί σε πρώτο στάδιο ο αριθμός των αλάτων. Σε επόμενο βήμα, επιλέγονται εκείνα με τις καλύτερες προοπτικές και τα οποία στην συνέχεια μελετώνται πειραματικά. Ο στόχος των ερευνητών περιλαμβάνει και την μελέτη μιγμάτων από διαφορετικά άλατα. Τα συγκριμένα μάλιστα θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν και στην επόμενη γενιά πυρηνικών αντιδραστήρων, ταυτοχρόνως και ως φορείς καυσίμων και ως ψυκτικά μέσα βελτιώνοντας με αυτόν τον τρόπο αμφότερες την απόδοση και την ασφάλεια.

Πριν λίγο καιρό εντοπίστηκε μία ισχυρή αναλαμπή από μία περιοχή του ουράνιου στερεώματος όπου δεν υπήρξαν παρατηρήσεις στο παρελθόν. Οι πρώτοι υπολογισμοί έδειξαν ότι η ισχύς της έκλαμψης ισοδυναμούσε με την ακτινοβολία περισσοτέρων από 1 τετράκις εκατομμυρίων αστέρων όπως ο Ήλιος! Η παρατήρηση αυτή οδήγησε σε εντατική μελέτη της περιοχής από όπου φαίνεται να προέρχεται η έκλαμψη και πρόσφατα, μία ομάδα επιστημόνων από τις ΗΠΑ πιστεύει ότι κατάφερε να ερμηνεύσει το φαινόμενο. Σύμφωνα λοιπόν με την μελέτη που δημοσιεύθηκε στην επιστημονική επιθεώρηση Nature Astronomy, η πιθανότερη εξήγηση είναι ότι μία υπερμεγέθης μελανή οπή απορρόφησε έναν γειτονικό αστέρα και η τεράστια ποσότητα ενέργειας που εκλύθηκε κατά την διαδικασία αυτή, προκάλεσε έναν πίδακα ύλης ο οποίος κινούνταν με ταχύτητες κοντά στην ταχύτητα του φωτός. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η διεύθυνση εκπομπής της ακτινοβολίας έτυχε να διέρχεται από την Γη οδηγώντας στην έντονη παρατήρηση.



Φωτογραφία: Dheeraj Pasham, Matteo Lucchini & Margaret Trippe, Kavli Institute for Astrophysics and Space Research, MIT

Δεν είναι η πρώτη φορά που παρατηρούνται τέτοιες εκλάμψεις, η συγκεκριμένη είναι η τέταρτη και η πρώτη από το 2011. Είναι και η πιο απομακρυσμένη, με την πηγή της να εντοπίζεται σε απόσταση 8.5 δισεκατομμυρίων ετών φωτός, μια απόσταση ίση περίπου με το μισό των διαστάσεων του γνωστού σύμπαντος!

διαρροές σε μεταλλικούς αγωγούς

....ανίχνευση με χρήση ακουστικών σημάτων

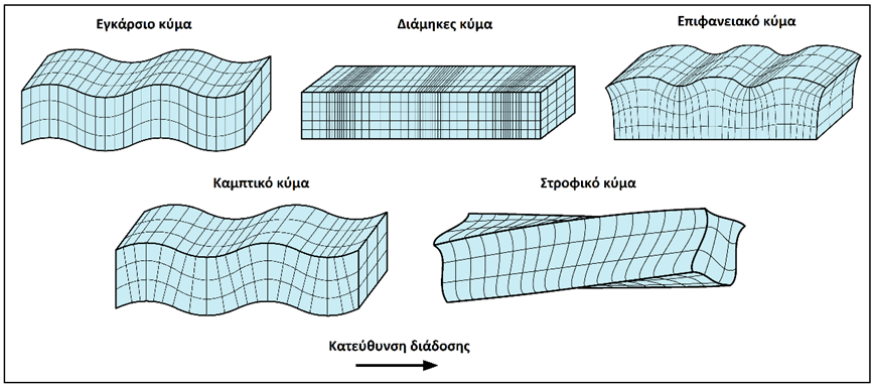
Γεώργιος - Παναγιώτης Κουσιόπουλος
Διδάκτωρ
Τμήματος Φυσικής

Το θέμα του παρόντος άρθρου αναφέρεται στην έρευνα που έγινε (στο πλαίσιο διδακτορικής διατριβής) και αφορά την σχεδίαση και την υλοποίηση εφαρμογών σε ενσωματωμένα συστήματα, οι οποίες σχετίζονται με τον εντοπισμό της θέσης και την εκτίμηση του μεγέθους διαρροών σε μεταλλικούς σωλήνες. Το φαινόμενο των διαρροών είναι ένα ιδιαίτερα σοβαρό ζήτημα τόσο για τη βιομηχανία (π.χ. σωληνώσεις διυλιστηρίων, αγωγοί μεταφοράς αργού πετρελαίου κτλ.), όσο και για τη χρήση δικτύων σωληνώσεων μέσα σε κατοικημένες περιοχές (π.χ. τα δίκτυα ύδρευσης και διανομής φυσικού αερίου). Διαρροές μπορούν να εμφανιστούν σε ένα δίκτυο αγωγών λόγω μίας πληθώρας αιτιών. Κάποια τυπικά παραδείγματα είναι η διάβρωση του μετάλλου, η ύπαρξη ελαττωματικών βανών, η κακή συντήρηση των σωληνώσεων, καθώς επίσης και εξωγενείς παράγοντες όπως βλάβες λόγω διεξαγωγής εργασιών ή ακόμη και εσκεμμένη διάτρηση σωληνώσεων από τρίτους στην προσπάθεια κλοπής του περιεχόμενου στο σωλήνα ρευστού. Πολλά προβλήματα δημιουργούνται σε ετήσια βάση από την ύπαρξη διαρροών, όπως απώλεια προϊόντος, περιβαλλοντική μόλυνση ή ακόμη και επικίνδυνα ατυχήματα (π.χ. στην περίπτωση εύφλεκτου προϊόντος στο σωλήνα). Για τον λόγο αυτό αναπτύσσονται συνεχώς συστήματα προστασίας σωληνώσεων τα οποία έχουν ως σκοπό την έγκαιρη και αξιόπιστη ανίχνευση διαρροών, καθώς και τον εντοπισμό της θέσης τους. Ο τρόπος λειτουργίας των συστημάτων αυτών μπορεί να στηρίζεται σε διάφορα φυσικά φαινόμενα, όπως οπτικά, θερμικά, ακουστικά κτλ. Στο παρόν άρθρο, ο βασικός άξονας της έρευνας η οποία διεξήχθη είναι η ανάπτυξη μη παρεμβατικών (non-invasive) ακουστικών μεθόδων εντοπισμού θέσης και εκτίμησης μεγέθους διαρροής, οι οποίες λειτουργούν σε χαμηλές συχνότητες μειώνοντας έτσι την κατανάλωση ισχύος του ενσωματωμένου συστήματος πάνω στο οποίο υλοποιούνται.

Καθώς οι αναπτυχθείσες μέθοδοι βασίζονται στη χρήση ακουστικών σημάτων διαρροής (όπως θα εξηγηθεί πιο αναλυτικά παρακάτω), πραγματοποιήθηκε ποιοτική και ποσοτική μελέτη του φαινομένου της διάδοσης ακουστικών κυμάτων, καθώς επίσης και των βασικών κυματικών τρόπων οι οποίοι μπορούν να αναπτυχθούν σε ένα μέσο. Οι διάφοροι τρόποι διακρίνονται μεταξύ τους με βάση το πώς κινούνται τα σωματίδια του μέσου διάδοσης ως προς το υλικό, αλλά και ως προς την κατεύθυνση διάδοσης του κύματος. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν οι ακόλουθοι βασικοί κυματικοί τρόποι διάδοσης ενός κύματος: α) το εγκάρσιο (shear) κύμα, β) το διάμηκες (longitudinal) κύμα, γ) το επιφανειακό (surface) κύμα, δ) το καμπτικό (flexural) κύμα και ε) το στροφικό (Torsional) κύμα. Μία σχηματική απεικόνιση των προαναφερθέντων κυματικών τρόπων παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. Όπως περιγράφεται στη βιβλιογραφία αλλά διαπιστώθηκε και πειραματικά κατά τη διάρκεια της έρευνας, τα ακουστικά κύματα που διαδίδονται σε ένα σωλήνα αποτελούν μία σύνθετη μορφή κύματος, το οποίο κυριαρχείται από τον καμπτικό κυματικό τρόπο F(1,1). Ο συγκεκριμένος τρόπος παρουσιάζει διασπορά, κάτι το οποίο ελήφθη υπόψη κατά τη σχεδίαση των μεθόδων εντοπισμού θέσης διαρροής.

Τεχνικές επεξεργασίας σήματος

Πριν περάσουμε στην περιγραφή των αναπτυχθεισών μεθόδων, κρίνεται σκόπιμο να γίνει αναφορά στα βασικά μαθηματικά εργαλεία τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την σχεδίασή τους. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε ο Μετασχηματισμός Fourier, με τη βοήθεια του οποίου μπορούμε να μεταφέρουμε τη μελέτη ενός ακουστικού σήματος από το πεδίο



Σχήμα 1: Κυματικοί τρόποι διάδοσης.

του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας. Συγκεκριμένα, μέσω του μετασχηματισμού αυτού προσδιορίζουμε το φασματικό περιεχόμενο τόσο των ωφέλιμων σημάτων διαρροής, όσο και του θορύβου και έτσι μπορούμε να αντλήσουμε χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τις συχνοτικές περιοχές των ακουστικών σημάτων στις οποίες μπορούμε να εργαστούμε.

Μία επέκταση του παραπάνω μετασχηματισμού, η οποία χρησιμοποιήθηκε, είναι ο Μετασχηματισμός Fourier Βραχέως Χρόνου (Short Time Fourier Transform – STFT). Ο συγκεκριμένος μετασχηματισμός έχει τις ίδιες μαθηματικές βάσεις με το Μετασχηματισμό Fourier, εισάγοντας όμως ταυτόχρονα και την έννοια της χρονικής εξέλιξης. Πιο αναλυτικά, χρησιμοποιείται μία κατάλληλη συνάρτηση παραθύρου, η οποία ολισθαίνει χρονικά πάνω στο σήμα. Με την βοήθεια της συνάρτησης αυτής, το υπό εξέταση σήμα χωρίζεται σε ένα πλήθος μικρών χρονικών τεμαχίων, για καθένα από τα οποία υπολογίζεται ο Μετασχηματισμός Fourier. Με αυτόν τον τρόπο, έχουμε μία δυναμική απεικόνιση του φασματικού περιεχομένου του σήματος η οποία μας επιτρέπει να παρατηρούμε όχι μόνο ποιες αρμονικές περιλαμβάνει, αλλά και πότε εμφανίσθηκε καθεμία από αυτές.

Ένα ακόμη χρήσιμο μαθηματικό εργαλείο, το οποίο ελήφθη υπόψη, είναι η τεχνική της ετεροσυσχέτισης (Cross Correlation – CC). Η συγκεκριμένη τεχνική παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού της χρονικής διαφοράς μεταξύ δύο όμοιων αλλά χρονικά μετατοπισμένων κυματομορφών. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης *Rxy*. Συγκεκριμένα, αν *x*(*t*) και *y*(*t*) είναι δύο ακουστικά σήματα, τότε η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης που αντιστοιχεί σε αυτά είναι η εξής:

$$R_{xy}(\tau)=x(t)\otimes y(t)=\int_{-\infty}^{+\infty} x(t+\tau)y(t)dt \qquad (1)$$

Σύμφωνα με τη θεωρία, η τιμή του τ για την οποία η συνάρτηση R_{xy} φθάνει στη μέγιστη τιμή της είναι ίση με τη χρονική διαφορά Δ*t* μεταξύ των δύο σημάτων. Για την περίπτωση σημάτων διακριτού χρόνου (καθώς τα υπό μελέτη ακουστικά σήματα στην παρούσα διατριβή λαμβάνονται μέσω δειγματοληψίας), η παραπάνω μαθηματική έκφραση της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$R_{xy}(m)=x(n)\otimes y(n)=\sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n+m)y(n) \qquad (2)$$

Κατά την ίδια ακριβώς λογική και εδώ, η τιμή του *m* για την οποία η *Rxy* φθάνει στο μέγιστο ισούται με τη χρονική διαφορά Δ*n* (μετρημένη σε δείγματα) μεταξύ των δύο σημάτων. Επιπρόσθετα, η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης μπορεί να εκφραστεί και στο πεδίο της συχνότητας με τη βοήθεια του Μετασχηματισμού Fourier. Έτσι, αν *X*(*k*) και *Y*(*k*) είναι οι Μετασχηματισμοί Fourier των σημάτων *x*(*t*) και *y*(*t*), τότε η συνάρτηση *Rxy* ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$R_{xy}(m)=\sum_{k=0}^{N-1} W(k)X(k)Y^{*}(k)e^{j\frac{2\pi km}{N}} \qquad (3)$$

όπου *W*(*k*) μία κατάλληλη συνάρτηση βάρους.

Επιπρόσθετα, ένα βασικό μαθηματικό εργαλείο που βρήκε εφαρμογή στις αναπτυχθείσες μεθόδους είναι τα ψηφιακά FIR φίλτρα (Finite Impulse Response – FIR), τα λεγόμενα φίλτρα πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης. Ο συγκεκριμένος τύπος φίλτρου παρουσιάζει το σημαντικό πλεονέκτημα της γραμμικής απόκρισης φάσης, μία ιδιότητα η οποία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για εφαρμογές προσδιορισμού χρονικών διαφορών μεταξύ σημάτων μέσω της τεχνικής της ετεροσυσχέτισης, για την οποία μιλήσαμε προηγουμένως.

Μέθοδοι εντοπισμού θέσης διαρροής

Έχοντας αναφέρει τις βασικές τεχνικές επεξεργασίας σήματος οι οποίες αποδείχθηκαν χρήσιμες, μπορούμε πλέον να περάσουμε στην περιγραφή των μεθόδων που αναπτύχθηκαν. Αρχικά, θα ξεκινήσουμε από τις μεθόδους εντοπισμού θέσης διαρροής. Για την υλοποίηση των μεθόδων αυτών χρησιμοποιούνται δύο ακουστικοί αισθητήρες οι οποίοι τοποθετούνται στην εξωτερική επιφάνεια του υπό επίβλεψη σωλήνα, κοντά στα άκρα του. Όταν σε κάποιο σημείο του σωλήνα εμφανιστεί διαρροή, προκαλείται διάδοση ακουστικών κυμάτων από το σημείο αυτό προς τους αισθητήρες. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2, οι αισθητήρες είναι τοποθετημένοι σε μία απόσταση *L* μεταξύ τους, τα ακουστικά κύματα διαδίδονται με μία ταχύτητα υ και η θέση *x* του σημείου διαρροής μπορεί να εκφραστεί ως η απόσταση του από τον Αισθητήρα 1. Όσον αφορά την τιμή του *L*, να σημειωθεί ότι έχουν δοκιμαστεί επιτυχώς αποστάσεις αισθητήρων μέχρι και 81 m.

Όλες οι μέθοδοι εντοπισμού που σχεδιάστηκαν κατά τη διάρκεια της παρούσας έρευνας προσδιορίζουν τη θέση (*x*) του σημείου διαρροής στηριζόμενες σε μία από τις ακόλουθες δύο στρατηγικές:

1. **Εντοπισμός μέσω χρονικής διαφοράς:** Με βάση αυτή τη στρατηγική, ο υπολογισμός της τιμής του *x* στηρίζεται στην εύρεση της χρονικής διαφοράς άφιξης των ακουστικών κυμάτων στους δύο αισθητήρες. Συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψη τις εξισώσεις διάδοσης των κυμάτων στο σωλήνα, μπορεί να αποδειχθεί εύκολα ότι η μαθηματική έκφραση που δίνει τη θέση του σημείου διαρροής είναι η ακόλουθη:

$$x=\frac{L+\upsilon\cdot\Delta t}{2}=\frac{L}{2}+\frac{\upsilon}{2F_S}\Delta n \qquad (4)$$

όπου $\Delta t = t_1 - t_2$ η χρονική διαφορά άφιξης των κυμάτων, F_S η συχνότητα δειγματοληψίας και $\Delta n = F_S \cdot \Delta t$ η χρονική διαφορά εκφρασμένη σε δείγματα. Καθώς η απόσταση L είναι γνωστή και η ταχύτητα διάδοσης (υ) μπορεί να βρεθεί με κατάλληλα πειράματα στο σωλήνα, γίνεται φανερό από την εξίσωση (4) ότι η θέση της διαρροής μπορεί να υπολογιστεί αν προσδιορίσουμε τη χρονική διαφορά Δt. Η τιμή του Δt προκύπτει μέσω κατάλληλης επεξεργασίας των ακουστικών σημάτων διαρροής που λαμβάνονται από τους δύο αισθητήρες.

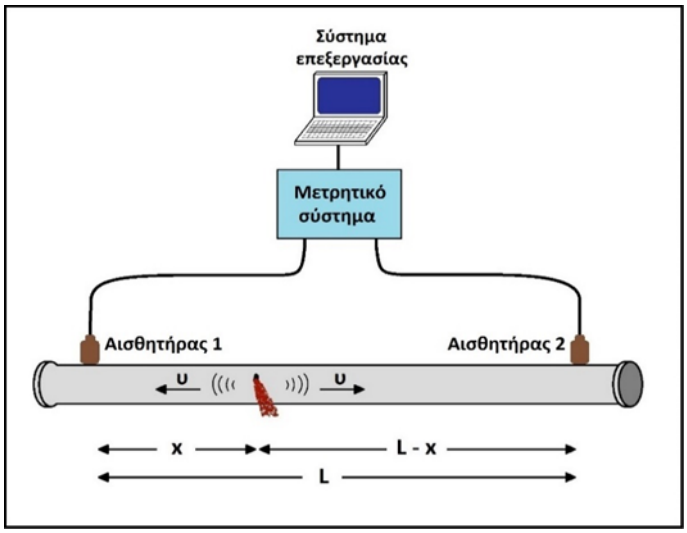
❷ **Εντοπισμός μέσω απόσβεσης σήματος:** Στην περίπτωση αυτή, η θέση της διαρροής προσδιορίζεται με τη βοήθεια του φαινομένου της απόσβεσης. Πιο αναλυτικά, όταν ένα ακουστικό κύμα διαδίδεται στο σωλήνα, η ενέργειά του μειώνεται εκθετικά με την απόσταση διάδοσης. Έτσι, αν V_1 και V_2 είναι οι ενεργές τιμές (RMS) των σημάτων που λαμβάνουν οι αισθητήρες 1 και 2, αντίστοιχα, όταν τα ακουστικά κύματα φθάσουν σε αυτούς, αποδεικνύεται ότι η θέση της διαρροής δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$x = \frac{L}{2} - \frac{1}{2\alpha}\ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \qquad (5)$$

όπου α είναι ο συντελεστής απόσβεσης, ο οποίος μπορεί να υπολογιστεί πειραματικά.

Κατά τη διάρκεια της παρούσας έρευνας σχεδιάστηκαν συνολικά επτά διαφορετικές μέθοδοι εντοπισμού θέσης διαρροής. Οι πρώτες δύο στηρίζονται στον υπολογισμό της χρονικής διαφοράς Δt, ο οποίος επιτυγχάνεται στην πρώτη από αυτές με τη βοήθεια κατάλληλων κατωφλίων ενέργειας στα δύο ληφθέντα ακουστικά σήματα, ενώ στη δεύτερη μέσω του μετασχηματισμού STFT των δύο σημάτων. Η τρίτη μέθοδος που αναπτύχθηκε βασίζεται στην απόσβεση των σημάτων, ενώ η τέταρτη στην εφαρμογή της γενικευμένης ετεροσυσχέτισης στα μετρηθέντα σήματα, με στόχο την εκτίμηση της χρονικής διαφοράς Δt.

Οι επόμενες τρεις μέθοδοι στηρίζονται στην κατάτμηση των ακουστικών σημάτων διαρροής τόσο στο πεδίο του χρόνου, όσο και στο πεδίο της συχνότητας (μέσω FIR φίλτρων) και χρησιμοποιούν την τεχνική της ετεροσυσχέτισης για τον προσδιορισμό της χρονικής διαφοράς Δt μεταξύ των σημάτων. Επιπλέον, λαμβάνουν υπόψη το φαινόμενο της ακουστικής διασποράς, τους διάφορους συντονισμούς που προκύπτουν, καθώς και την εξάρτηση της απόσβεσης των σημάτων από τη συχνότητα. Η τελευταία από αυτές τις μεθόδους παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα ως προς την ακρίβεια και την προσαρμοστικότητά της, σε διαφορετικά συστήματα σωληνώσεων και ο υπολογισμός της θέσης του σημείου διαρροής πραγματοποιείται ως εξής: τα ληφθέντα σήματα διαρροής από τους δύο αισθητήρες χωρίζονται σε συχνοτικές περιοχές και στη συνέχεια το παραγόμενο σήμα σε κάθε περιοχή κατακερματίζεται σε μικρότερα χρονικά τεμάχια. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται η τεχνική της ετεροσυσχέτισης μεταξύ των αντίστοιχων τεμαχίων των δύο σημάτων και έτσι προκύπτει ένα πλήθος τιμών Δn σε κάθε συχνοτική περιοχή. Από αυτές επιλέγεται η επικρατούσα τιμή και χρησιμοποιείται για τον σχηματισμό μίας εκτίμησης της θέσης διαρροής, η οποία θεωρείται ως αντιπροσωπευτική της συχνοτικής περιοχής. Έπειτα, η τελική τιμή για τη θέση του σημείου διαρροής προκύπτει ως ο σταθμισμένος μέσος των εκτιμήσεων από όλες τις συχνοτικές περιοχές.



Σχήμα 2: Διάταξη αισθητήρων στο σωλήνα.

Η παραπάνω διαδικασία μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά με τον ακόλουθο τρόπο: αν R_{ij} είναι η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης μεταξύ του τεμαχίου j της συχνοτικής περιοχής i του σήματος από τον Αισθητήρα 1 και του αντίστοιχου τεμαχίου του σήματος από τον Αισθητήρα 2, τότε η επικρατούσα τιμή Δn της περιοχής i είναι η

$$\Delta n_i = \underset{j=1}{\overset{N_T}{MF}}(\Delta n_{ij}) = \underset{j=1}{\overset{N_T}{MF}}\left[\arg\max(R_{ij})\right] \qquad (6)$$

όπου N_T είναι το πλήθος των χρονικών τεμαχίων ανά συχνοτική περιοχή και MF είναι ο τελεστής της επικρατούσας τιμής. Επομένως, η εκτίμηση θέσης για τη συχνοτική περιοχή i (λαμβάνοντας υπόψη και τη σχέση (4) που είδαμε πριν) θα είναι:

$$x_i = \frac{L}{2} + \frac{\upsilon_i}{2F_S}\Delta n_i = \frac{1}{2F_S}\left\{F_S L + \upsilon_i \cdot \underset{j=1}{\overset{N_T}{MF}}\left[\arg\max(R_{ij})\right]\right\} \qquad (7)$$

όπου υ_i είναι η ταχύτητα διάδοσης των ακουστικών κυμάτων που αντιστοιχεί στη συχνοτική περιοχή i. Έτσι, η τελική σχέση για τη θέση της διαρροής είναι:

$$x = \sum_{i=1}^{N_F} x_i w_i \Big/ \sum_{i=1}^{N_F} w_i \Rightarrow$$

$$x = \frac{\sum_{i=1}^{N_F}\left\{F_S L + \upsilon_i \cdot \underset{j=1}{\overset{N_T}{MF}}\left[\operatorname{argmax}(R_{ij})\right]\right\} w_i}{2F_S \cdot \sum_{i=1}^{N_F} w_i} \quad (8)$$

όπου N_F είναι το πλήθος των συχνοτικών περιοχών και w_i είναι οι συντελεστές βάρους που υπεισέρχονται στον υπολογισμό του σταθμισμένου μέσου και, μαζί με τις ταχύτητες υ_i, προσδιορίζονται πειραματικά.

Μέθοδος εκτίμησης μεγέθους διαρροής

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, εκτός από τις μεθόδους εντοπισμού θέσης διαρροής, κατά την διάρκεια της παρούσας έρευνας αναπτύχθηκε και μία ακουστική μέθοδος εκτίμησης του μεγέθους της διαρροής. Η μέθοδος αυτή έχει ως στόχο την κατάταξη μίας διαρροής σε μία από τις τρεις διαθέσιμες κατηγορίες: α) Μικρή διαρροή, β) Μεσαία διαρροή και γ) Μεγάλη διαρροή. Αυτό επιτυγχάνεται με το συνδυασμό της (ήδη υπάρχουσας) πληροφορίας για τη θέση του σημείου διαρροής με την τεχνική της Πολλαπλής Γραμμικής Προσαρμογής (Multiple Linear Regression), καθώς και με κατάλληλο φιλτράρισμα του εξωγενούς θορύβου. Η Πολλαπλή Γραμμική Προσαρμογή συνεισφέρει στην εξαγωγή των κατωφλίων που χωρίζουν τις τρεις προαναφερθείσες κατηγορίες διαρροών.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί ότι για την ανάπτυξη των μεθόδων εντοπισμού θέσης και εκτίμησης μεγέθους διαρροής χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά LabVIEW και Matlab. Επιπλέον, κάποιες επιλεγμένες μέθοδοι από αυτές που αναφέρθηκαν παραπάνω υλοποιήθηκαν σε C++ πάνω σε ένα ενσωματωμένο σύστημα το οποίο έχει ως βάση την πλατφόρμα Raspberry Pi 4B, που απεικονίζεται στο Σχήμα 3. Η συγκεκριμένη πλατφόρμα περιλαμβάνει τετραπύρηνο επεξεργαστή ARM στα 1.5 GHz, 4GB μνήμη RAM, μία κάρτα micro-SD για την αποθήκευση των δεδομένων και τη φόρτωση του λειτουργικού συστήματος, καθώς επίσης και διάφορα άλλα περιφερειακά στοιχεία. Πάνω σε αυτήν την πλατφόρμα πραγματοποιήθηκε μελέτη της ακρίβειας των μεθόδων, του χρόνου εκτέλεσης των αλγορίθμων και της κατανάλωσης μνήμης και έγινε συσχέτιση αυτών με τις τιμές των βασικών παραμέτρων του συστήματος.

Σχήμα 3: Η πλατφόρμα Raspberry Pi 4B.

Κλείνοντας, να σημειώσουμε ότι η εκτίμηση της θέσης και του μεγέθους διαρροών σε δίκτυα σωληνώσεων είναι ένα ιδιαίτερα εκτεταμένο ζήτημα. Έτσι, η έρευνα που παρουσιάσθηκε στο παρόν άρθρο μπορεί να συνεχιστεί, προσανατολιζόμενη προς διάφορες κατευθύνσεις, όπως η βελτιστοποίηση των επιδόσεων των μεθόδων, η επέκτασή τους ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν και σε σωληνώσεις διαφορετικού τύπου (π.χ. πλαστικές, κεραμικές), αλλά και η ανάπτυξη τεχνικών που επιτρέπουν την τοποθέτηση των αισθητήρων σε μεγαλύτερες αποστάσεις

Πηγές

- *Γεώργιος-Παναγιώτης Κουσιόπουλος, «Ανάπτυξη εφαρμογών σε ενσωματωμένα συστήματα: Εκτίμηση θέσης-μεγέθους διαρροής σε μεταλλικούς σωλήνες», Διδακτορική διατριβή, Νοέμβριος 2022. https://www.didaktorika.gr/eadd/handle/10442/52740.*
- *Reuters Staff, "TIMELINE: Deadly Nigerian pipeline disasters", Reuters, 15 May 2008. www.reuters.com/article/us-nigeria-pipelinedisasters-idUSL1566948020080515.*
- *"Alta. oil pipeline leaked 28,000 barrels", CBC News, 3 May 2011. www.cbc.ca/news/canada/edmonton/alta-oil-pipeline-leaked-28-000-barrels-1.1015125*
- *M. Cohen, "Portion of Keystone Pipeline shut down after 380,000-gallon oil leak in North Dakota", USA Today. eu.usatoday.com/story/news/nation/2019/11/01/keystone-pipeline-leak-oil-spilled-north-dakota/4121954002.*
- *P.S. Murvay, I. Silea, "A survey on gas leak detection and localization techniques", J. Loss Prev. Process Ind., 25 (2012) 966.*
- *L. Boaz, S.Kaijage, R. Sinde, "An overview of pipeline leak detection and location systems", Proc. 2nd Pan Afr. Inter. Conf. Sci., Comp. Telecomm., 14-18 July 2014, Arusha, Tanzania.*
- *A. Soldevila, J. Blesa, R. M. Fernandez-Canti, S. Tornil-Sin, V. Puig, "Data-Driven Approach for Leak Localization in Water Distribution Networks Using Pressure Sensors and Spatial Interpolation", Water, 11 (2019) 1500.*
- *Y. Gao, F. Piltan, J.M. Kim, "A Hybrid Leak Localization Approach Using Acoustic Emission for Industrial Pipelines", Sensors, 22 (2022) 3963.*
- *S.Li, Y. Wen, P. Li, J. Yang, X. Dong, Y. Mu, "Leak location in gas pipelines using cross-time-frequency spectrum of leakage-induced acoustic vibrations", Journal of Sound and Vibration, 333 (2014) 3889.*
- *Q. Xiao, J. Li, Jiedi Sun, H. Feng, S. Jin, "Natural-gas pipeline leak location using variational mode decomposition analysis and cross-time-frequency spectrum", Measurement, 124 (2018) 163.*
- *O. M. Aamo, "Leak Detection, Size Estimation and Localization in Pipe Flows", IEEE Trans. Automat. Contr., 61 (2016) 246.*

γιατί ο κόσμος μας είναι κλασικός;

……κβαντομηχανική για βιαστικούς και απρόσεκτους

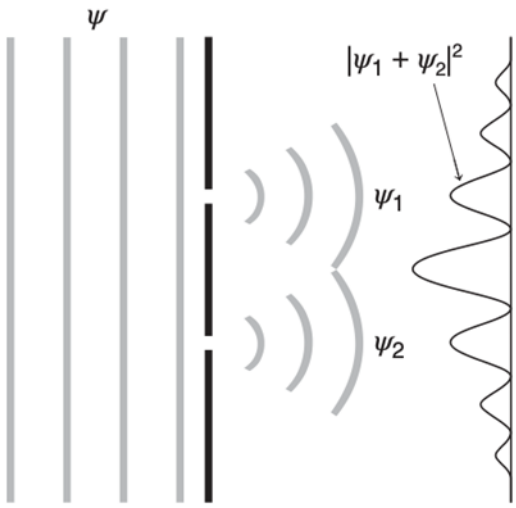
Θεμιστοκλής Ζηκόπουλος
Φοιτητής Τμήματος Φυσικής

Γάτες, Διπλές Σχισμές και άλλα παράξενα

Δεδομένου ότι στην Κβαντομηχανική (και στο χώρο Hilbert) ισχύει η αρχή της επαλληλίας, και δεδομένου πως για μια γάτα τόσο η κατάσταση ζωής (στο γνωστό νοητικό πείραμα) όσο και η κατάσταση θανάτου είναι πραγματοποιήσημες, γιατί κανένας μας δεν έχει δει ποτέ του μια γάτα σε μια ενδιάμεση κατάσταση; Δηλαδή σε έναν γραμμικό τους συνδυασμό; Με αυτό το σκεπτικό, γιατί κανένας άνθρωπος δεν έχει παρατηρήσει ποτέ κάποια επαλληλία στον καθημερινό κόσμο; Ας περιπλέξουμε λίγο ακόμα τα πράγματα, συζητώντας ένα πολύ διάσημο πείραμα.

Το πείραμα της διπλής σχισμής αποτελεί ένα από τα πιο συναρπαστικά εννοιολογικά ζητήματα που αντιμετώπισε ποτέ ο ανθρώπινος νους, καθώς αντανακλά σε βάθος τον περίεργο - για τα διαισθητικά μας δεδομένα- τρόπο με τον οποίο συμπεριφέρεται η φύση σε θεμελιώδες επίπεδο. Το πείραμα έχει ως εξής. Στην διάταξη του περάματος της διπλής σχισμής (Σχήμα 1) προσπίπτουν πανομοιότυπα σωματίδια (π.χ. ηλεκτρόνια), ενώ σε ορισμένη απόσταση από τις οπές υπάρχει ένα πέτασμα ανίχνευσης. Κάθε φορά που ένα ηλεκτρόνιο προσπίπτει σε κάποιο σημείο του πετάσματος, μια κουκίδα αποτυπώνεται στο πέτασμα. Στέλνουμε λοιπόν προς την διάταξη ηλεκτρόνια και σταδιακά παρατηρούμε να σχηματίζεται στο πέτασμα το γνωστό πρότυπο συμβολής. Αυτό επιβεβαιώνει την περιγραφή των υποατομικών σωματιδίων από μαθηματικές ποσότητες - τις κυματοσυναρτήσεις - που παρουσιάζουν κυματική συμπεριφορά. Ενθουσιασμένοι από την εικόνα συμβολής που παρατηρούμε στο πέτασμα, οδηγούμαστε - βιαστικά - στο συμπέρασμα ότι τα ηλεκτρόνια συμβάλλουν μεταξύ τους, ακριβώς όπως συμβάλλουν δύο κύματα και δημιουργούν τους χαρακτηριστικούς κροσσούς συμβολής. Εάν συνεπώς συνεχίζοντας τον συλλογισμό μας, στείλουμε τα ηλεκτρόνια προς τις οπές με εξαιρετικά χαμηλό ρυθμό - ένα την φορά - τότε δεν θα παρατηρήσουμε συμβολή. Πραγματοποιούμε το πείραμα με αυτή την ασθενή δέσμη και το αποτέλεσμα είναι απρόσμενο. Και πάλι, το πρότυπο συμβολής είναι ίδιο! Αλλά αφού στέλνουμε ένα-ένα τα ηλεκτρόνια, ποιός συμβάλλει με ποιόν!;

Για να δραματοποιήσουμε ακόμη περισσότερο την κατάσταση, αλλά και για να προσπαθήσουμε να καταλάβουμε τι ακριβώς συμβαίνει, έχουμε την ιδέα να τοποθετήσουμε έναν ανιχνευτή πίσω από κάθε οπή, με την ιδιότητα να φωτοβολεί σε περίπτωση που το ηλεκτρόνιο διέλθει από την συγκεκριμένη οπή. Εκτελούμε εκ νέου το πείραμα με ασθενή δέσμη ηλεκτρονίων. Τι περιμένουμε να δούμε; Μάλλον όχι αυτό που παρατηρούμε. Η εικόνα στο πέτασμα δεν εμφανίζει πλέον τους κροσσούς συμβολής του Σχήματος 1. Τουναντίον, παρατηρούμε μπροστά από κάθε οπή μια κατανομή, σαν η να ήταν κλειστή άλλη οπή. Η πληροφορία που αποκτήσαμε με τους ανιχνευτές δηλαδή (μέτρηση), τροποποιεί την έκβαση του πειράματος;



Σχήμα 1: Οταν και οι δύο οπές είναι ανοιχτές, η συνολική κυματοσυνάρτηση που φτάνει στο πέτασμα είναι το άθροισμα της αντίστοιχης από κάθε σχισμή ($\Psi = \Psi_1 + \Psi_2$). Συνεπώς από τον Κανόνα του Born, αναμένουμε να υπάρχει και ένας πρόσθετος όρος συμβολής - και να μην έχουμε μόνο $|\Psi_1|^2 + |\Psi_2|^2$.

Ας πάρουμε τα πράγματα με την σειρά. Τα ηλεκτρόνια ανιχνεύονται στο πέτασμα ως ακέραιες και αδιαίρετες μονάδες. Άρα διατηρούν τον σωματιδιακό τους χαρακτήρα. Σύμφωνα όμως με την Αρχή του Κυματοσωματιδιακού Δυϊσμού, υπάρχει και

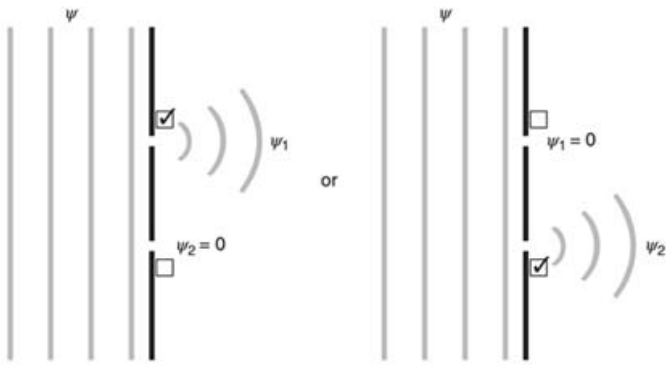
ένας παράλληλος κυματικός χαρακτήρας. Από την άλλη πλευρά, οι ανιχνευτές σε καμία περίπτωση δεν άναβαν ταυτόχρονα, αλλά ένας για κάθε ηλεκτρόνιο - δηλαδή δεν περνάει κάτι ταυτόχρονα και από τις δύο οπές. Αυτό σημαίνει πως δεν πρόκειται για ένα φυσικό κύμα. Και τότε, ανακύπτει αμέσως το ερώτημα, για τι κύμα πρόκειται; Πρόκειται για κύμα πληροφορίας, πιθανοκρατικού χαρακτήρα (!),[1] υιοθετώντας την κλασική πλέον ερμηνεία της σχολής της Κοπεγχάγης. Μόνο με αυτόν τον τρόπο συμβιβάζονται οι φαινομενικά ασυμβίβαστες όψεις του σωματιδιακού και του κυματικού χαρακτήρα. Το σωματίδιο διατηρεί την υπόσταση του αφού ανιχνεύεται πάντα ακέραιο, και παράλληλα η κυματοσυνάρτηση μας πληροφορεί για την πιθανότητα να βρίσκεται το σωματίδιο εδώ ή εκεί - αλλά ποτέ εδώ κι εκεί ταυτόχρονα.

Η πιθανοκρατική αυτή ερμηνεία έχει βέβαια μια θεμελιώδη συνέπεια στο ζήτημα της μέτρησης. Ας υποθέσουμε πως το σωματίδιο μας βρίσκεται σε μια επαλληλία ιδιοσυναρτήσεων. Θα είναι δηλαδή $\Psi = \sum c_n \psi_n$, με τις ιδιοσυναρτήσεις να ικανοποιούν την εξίσωση ιδιοτιμών του τελεστή $\hat{A}\psi_n = a_n\psi_n$. Οι συντελεστές c_n σχετίζονται, σύμφωνα με τον Κανόνα του Born, με την πιθανότητα το σωματίδιονα βρίσκεται στην εκάστοτε ιδιοσυνάρτηση ψ_n ως $P_n = |c_n|^2$ και οι μόνες πιθανές τιμές του οποιουδήποτε φυσικού μεγέθους (που αντιστοιχεί στον κβαντομηχανικό τελεστή $\hat{A}$) σε μια μέτρηση, είναι οι ιδιοτιμές του a_n (με πιθανότητα όπως είπαμε $|c_n|^2$). Αυτή είναι η καρδιά της στατιστικής ερμηνείας της Κοπεγχάγης. Έστω λοιπόν πως μετά από μια μέτρηση βρίσκουμε την ιδιοτιμή a_n. Εάν επαναλάβουμε την μέτρηση (προτού η χρονική εξέλιξη έχει κάποια επίδραση στο κβαντικό μας σύστημα) περιμένουμε να λάβουμε την ίδια τιμή α_n για το μετρούμενο φυσικό μέγεθος, με πιθανότητα 100 %. Γνωρίζουμε όμως, πως οι ιδιοσυναρτήσεις των κβαντομηχανικών τελεστών αποτελούν καταστάσεις μηδενικής αβεβαιότητας. Από αυτό συνεπάγεται πως η μόνη περίπτωση να έχουμε επαναληψημότητα του αποτελέσματος, που είναι και το ζητούμενο, είναι το σύστημα μας μετά την μέτρηση να βρίσκεται στην ιδιοσυνάρτηση ψ_n. Διαφορετικά δεν μπορούμε να εγγυηθούμε πως η επόμενη διαδοχική μέτρηση θα δώσει πάλι την τιμή α_n, αλλά μόνο ότι θα δώσει την τιμή α_n με πιθανότητα $|c_n|^2$. Αυτή είναι η περίφημη Αρχή της Κατάρρευσης της Κυματοσυνάρτησης κατά την μέτρηση:

$$\Psi \equiv (\sum c_m \psi_m) \overset{\text{μέτρηση}}{\rightarrow} \psi_n \qquad (1)$$

[1] *Υπάρχουν κι άλλοι λόγοι για τους οποίους το κύμα που αντιπροσωπεύει η κυματοσυνάρτηση Ψ δεν μπορεί να είναι φυσικό, βλ. Τραχανάς Στέφανος (2021), «Οι ερμηνείες της Κβαντομηχανικής».*

Ας δούμε τώρα πως το μετρητικό αξίωμα της Κοπεγχάγης ερμηνεύει πλήρως τα παράδοξα του πειράματος της διπλής σχισμής . Στην πρώτη περίπτωση που δεν κάνουμε κάποια μέτρηση (Σχήμα 1), η ολική κυματοσυνάρτηση βρίσκεται στην επαλληλία $\psi_1 + \psi_2$. Επομένως, τα ηλεκτρόνια προσπίπτουν στο πέτασμα με πιθανότητα $|\psi_1 + \psi_2|^2$ και για αυτό βλέπουμε πρότυπο συμβολής. Αντίθετα, όταν τοποθετούμε τους ανιχνευτές, αλληλεπιδρούμε με τα σωματίδια (Σχήμα 2). Συνεπώς, όταν για παράδειγμα φωτοβολεί ο ανιχνευτής της οπής 1, γνωρίζουμε πως το ηλεκτρόνιο πέρασε από αυτή την σχισμή και άρα η κυματοσυνάρτηση επαλληλίας καταρρέει στην ψ_1 (για να συμμορφωθεί η κυματοσυνάρτηση - ως κύμα πληροφορίας - με την πληροφορία που αποκτήθηκε κατά την μέτρηση). Αυτό σημαίνει πως πλέον το ηλεκτρόνιο φτάνει στο πέτασμα με πιθανότητα $|\psi_1|^2$. Εντελώς αντίστοιχο σκεπτικό ισχύει και για την δεύτερη σχισμή, με τελική εικόνα στο πέτασμα και από τις δύο οπές $|\psi_1|^2 + |\psi_2|^2$. Ελπίζουμε να έγινε εμφανές πως, για την Κοπεγχάγη, το πείραμα των δύο σχισμών κάθε άλλο παρά μη ευλογοφανές είναι, ενώ υπερθεματίζει την νέα θέαση του κόσμου που έδωσε η Κβαντομηχανική.



Σχήμα 2: Για κάθε προσπίπτον ηλεκτρόνιο φωτοβολεί μονάχα ένας από τους δύο ανιχνευτές. Η αποτύπωση στο πέτασμα είναι ίση με $|\Psi_1|^2 + |\Psi_2|^2$, πράγμα που σημαίνει πως έχει καταστραφεί η συμβολή.

Μια μικρή λεπτομέρεια που κρύβεται στα παραπάνω, είναι πως για την σχολή της Κοπεγχάγης η μετρητική συσκευή πρέπει να είναι καθαρά κλασικό αντικείμενο, δηλαδή να μην υπόκειται στην Αρχή της Επαλληλίας. Και αυτό γιατί εάν το όργανο που πραγματοποιεί μια μέτρηση μπορεί να βρίσκεται και σε επαλληλία πιθανών τιμών, τότε θα χρειαζόταν κάτι έξω από αυτό για να οδηγήσει σε κατάρρευση σε μια τιμή κ.ο.κ. Εδώ ακριβώς αρχίζουν τα προβλήματα.

Πρώτον, τι ακριβώς σημαίνει κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης; Και ποιός μπορεί να προκαλέσει κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης; [2] Δεύτε-

ρον, εφόσον η εξίσωση του Schrödinger περιγράφει μοναδιαία εξέλιξη, τι συμβαίνει κατά την μέτρηση; Όπου έχουμε - πριν την μέτρηση - πιθανότητα να βρεθούμε στην ιδιοκατάσταση ψ_n ίση με $|c_n|^2$ και μετά τη μέτρηση πιθανότητα 100 %; Ενώ η εξίσωση του Schrödinger είναι απολύτως αιτιοκρατική (με μια αρχική συνθήκη μπορούμε να προβλέψουμε πλήρως την εξέλιξη του συστήματος), η μέτρηση είναι θεμελιωδώς πιθανοκρατική,[3] αφού μπορούμε να γνωρίζουμε μόνο τις σχετικές πιθανότητες (από τον τύπο του Born) . Με άλλα λόγια, η εξέλιξη των συστημάτων γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση του Schrödinger και η κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης όχι (αφού δεν είναι συμβιβαστή); Άλλοι φυσικοί νόμοι ισχύουν κατά την εξέλιξη και άλλοι κατά την μέτρηση; Και τρίτον, σαν να μην έφταναν όλα αυτά, πως είναι δυνατόν να απαιτείται κλασική μετρητική συσκευή; Δηλαδή, προκειμένου η Κβαντομηχανική να θεμελιωθεί ως θεωρία, απαιτεί στα αξιώματα της (μετρητικό αξίωμα) την ύπαρξη κλασικού κόσμου (αφού το πειραματικό όργανο είναι κλασικό), ο οποίος κλασικός κόσμος προκύπτει μετά ως όριο της; Δεν παραβιάζεται με αυτό τον τρόπο η λογική αυτοσυνέπεια της θεωρίας; Εάν έχετε αρχίσει να νομίζετε πως υπάρχει πρόβλημα στην κβαντομηχανική θεώρηση της μέτρησης, τότε έχουμε πετύχει τον σκοπό μας.

Προσπαθώντας να εξιχνιάσουμε το 'μυστήριο', θα υποθέσουμε πως η μετρητική μας συσκευή είναι ένα κβαντικό σύστημα και πως η οποιαδήποτε διαδικασία διέπεται από την κυματική εξίσωση του Schrödinger. Η παραδοχή που κάνουμε δηλαδή, είναι πως για κάθε φυσική διαδικασία ισχύουν οι Νόμοι της Κβαντομηχανικής. Έστω λοιπόν πως έχουμε ένα κβαντικό σύστημα (θα μπορούσε να είναι ένα σωματίδιο ή οτιδήποτε άλλο), το οποίο βρίσκεται στην επαλληλία ιδιοσυναρτήσεων $c_1\psi_1+c_2\psi_2$,[4] και πως η μετρητική μας συσκευή (η οποία πλέον δεν θεωρείται κλασικό σύστημα αλλά κβαντικό) μπορεί να βρίσκεται σε τρείς ιδιοσυναρτήσεις Φ_0, Φ_1 και, Φ_2 ή φυσικά και σε οποιονδήποτε γραμμικό συνδυασμό αυτών. Η κατάσταση Φ_0 αντιπροσωπεύει την κατάσταση ετοιμότητας της συσκευής πριν την μέτρηση, ενώ οι καταστάσεις Φ_1 και Φ_2 αντιπροσωπεύουν το εάν μετά την μέτρηση, το σύστημα βρέθηκε στην ιδιοκατάσταση του ψ_1 ή ψ_2 αντίστοιχα. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η ολική κυματισυνάρτηση, μετρούμενου συστήματος και περιβάλλοντος - μετρητικής συσκευής, πριν την μέτρηση θα ισούται με:

$$\Psi_0=(c_1\psi_1+c_2\psi_2)\Phi_0 \qquad (2)$$

Ο λόγος που η μορφή της συνολικής κυματοσυνάρτησης είναι το γινόμενο των επιμέρους, έχει να κάνει με το ότι πριν την μέτρηση δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ οργάνου και συστήματος. Εάν, κατόπιν, εξελίξουμε χρονικά την (2), θα οδηγηθούμε στην *σύμπλεκτη κατάσταση* (*entangled state*):

$$\Psi=c_1\psi_1\Phi_1+c_2\psi_2\Phi_2 \qquad (3)$$

Ας υπολογίσουμε τώρα την μέση τιμή ενός τυχόντος φυσικού μεγέθους A, μέσω προφανώς του αντίστοιχου κβαντομηχανικού του τελεστή Â. Θα είναι τότε: [5]

$$\begin{aligned}\langle\hat{A}\rangle &= (\Psi,\hat{A}\Psi)=(c_1\psi_1\Phi_1+c_2\psi_2\Phi_2,\hat{A}(c_1\psi_1\Phi_1+c_2\psi_2\Phi_2))\\ &=|c_1|2(\psi_1,\hat{A}\psi_1)(\Phi_1,\Phi_1)+c_1^*c_2(\psi_1,\hat{A}\psi_2)(\Phi_1,\Phi_2)\\ &+c_1c_2^*(\psi_2,\hat{A}\psi_1)(\Phi_2,\Phi_1)+|c_2|^2(\psi_2,\hat{A}\psi_2)(\Phi_2,\Phi_2) \qquad (4)\end{aligned}$$

Προφανώς ο τελεστής Â δεν δρα πάνω στις ιδιοσυναρτήσεις του οργάνου, αφού αυτές εξαρτώνται από μεταβλητές διαφορετικές από τις αντίστοιχες του μετρούμενου συστήματος. Επειδή όμως θα πρέπει, για να μπορεί να πραγματοποιηθεί η μέτρηση, οι καταστάσεις Φ1 και Φ2 να είναι φυσικά διαχωρίσιμες, θα είναι και ορθογώνιες μεταξύ τους - δηλαδή (Φ1, Φ2) = (Φ2, Φ1) = 0. Επομένως, οι ενδιάμεσοι όροι συμβολής στην (4) μηδενίζονται και έχουμε τελικά:

$$\langle\hat{A}\rangle=P_1<\hat{A}>_{\psi_1}+P_2<\hat{A}>_{\psi_2} \qquad (5)$$

Και βρισκόμαστε πλέον μπροστά σε ένα συγκλονιστικό συμπέρασμα. Ακριβώς επειδή το κβαντικό μας σύστημα βρέθηκε σε κατάσταση κβαντι-

[2] *Υπήρξε μια τεράστια παραφιλολογία, με πρωτεργάτες Φυσικούς όπως ο Wheeler, σχετικά με την ανάγκη ύπαρξης συνειδητών παρατηρητών για την κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης - την οποία όμως θα αποδομήσουμε σε λίγο.*

[3] *Μετά και το φετινό Βραβείο Nobel που έβαλε τίτλους τέλους στην επί δεκαετίες σχετική διαμάχη.*

[4] *Χρησιμοποιούμε επαλληλία δύο καταστάσεων για απλούστευση των πράξεων, αλλά ότι θα ακολουθήσει γενικεύεται σε οποιοδήποτε πλήθος ιδιοσυναρτήσεων - ακόμα και άπειρο.*

[5] *Ολα τα παρακάτω γίνονται, από μαθηματικής άποψης, εξαιρετικά διαυγέστερα σε συμβολισμό Dirac και με χρήση του πίνακα πυκνότητας (density matrix). Εντούτοις επιλέγουμε να κρατήσουμε τον φορμαλισμό σε στοιχειώδες επίπεδο ώστε οι ιδέες να αποτυπώνονται καθαρά .*

κής σύμπλεξης με την μετρητική συσκευή, καταστράφηκαν οι όροι συμβολής, και οι μόνες δυνατές παρατηρήσιμες καταστάσεις είναι οι μέσες τιμές του μεγέθους A ως προς την κάθε κατάσταση, αλλά όχι ο γραμμικός τους συνδυασμός. Η μέτρηση, κατά συνέπεια, μπορεί να θεωρηθεί απλά ως μια σύμπλεκτη κατάσταση μεταξύ του μετρούμενου συστήματος και της μετρητικής συσκευής. Και γιατί δεν παρατηρούμε καταστάσεις επαλληλίας ή - στην κοπεγχαγιανή γλώσσα- γιατί η κυματοσυνάρτηση δεν 'καταρρέει' ποτέ σε επαλληλίες; Μα απλούστατα γιατί οι όροι που δίνουν την επαλληλία, οι όροι συμβολής, εξαφανίζονται εξαιτίας αυτού του νέου, καθαρά κβαντικού, φαινομένου, τη λεγόμενη *κβαντική αποσυμφώνηση (quantum decoherence)*.[6]

Υπάρχει όμως και ένας άλλος μηχανισμός αποσυμφώνησης, πέραν από την κβαντική σύμπλεξη. Και αυτός έχει να κάνει με την συμπερίληψη της επίδρασης του περιβάλλοντος στους υπολογισμούς μας, καθώς αυτό έχει εξαιρετικά μεγάλους βαθμούς ελευθερίας. Ας θεωρήσουμε ένα κβαντικό σύστημα, και πάλι χάριν απλότητας σε επαλληλία δυο ιδιοκαταστάσεων του. Ας υπολογίσουμε την μέση τιμή ενός τυχόντος κβαντομηχανικού τελεστή, με τις δυο ιδιοκαταστάσεις να μην είναι απαραίτητα και ιδιοσυναρτήσεις του (όπου $A_{ij} = (\psi_i, \hat{A}\psi_j)$ τα στοιχεία πίνακα του τελεστή).

$$
\begin{aligned}
&\langle\hat{A}\rangle = (c_1\psi_1 + c_2\psi_2, \hat{A}(c_1\psi_1 + c_2\psi_2)) = \\
&(c_1\psi_1, c_1\hat{A}\psi_1) + (c_2\psi_2, c_2\hat{A}\psi_2) + (c_1\psi_1, c_2\hat{A}\psi_2 + (c_2\psi_2, c_1\hat{A}\psi_1) \\
&= |c_1|^2 \langle\hat{A}\rangle_{\psi_1} + |c_2|^2 \langle\hat{A}\rangle_{\psi_2} + c_1^* c_2 A_{12} + c_1 c_2^* A_{21} \\
&= P_1 \langle\hat{A}\rangle_{\psi_1} + P_2 \langle\hat{A}\rangle_{\psi_2} + c_1^* c_2 A_{12} + c_1 c_2^* A_{21} \qquad (6)
\end{aligned}
$$

Είναι φανερό πως οι πρώτοι δυο όροι είναι αυτοί που θα αναμέναμε και σε μια κλασική στατιστική περιγραφή. Υπάρχουν όμως όπως και προηγουμένως, δυο επιπρόσθετοι όροι συμβολής. Κι αυτή ακριβώς είναι η διαφορά των κβαντικών πιθανοτήτων από τις κλασικές πιθανότητες. Οι κβαντικές πιθανότητες υποδαυλίζονται από κύματα, τα οποία έχουν την δυνατότητα να συμβάλουν. Αυτοί οι όροι συμβολής είναι που συντηρούν τις επαλληλίες και είναι υπεύθυνοι για όλα τα 'παράξενα' - για τον κλασικό εαυτό μας - φαινόμενα του κβαντικού κόσμου (διπλή σχισμή κ.λπ.). Βέβαια το ερώτημα παραμένει ακλόνητο. Γιατί ο κόσμος στον όποιον ζούμε είναι κλασικός και δεν παρατηρούμε επαλληλίες; Γιατί δηλαδή υπάρχει μακρόκοσμος, ενώ τα πάντα κυβερνώνται από κβαντικούς νόμους; Ας δούμε τι θα συμβεί αν λάβουμε υπόψιν και την επίδραση του περιβάλλοντος στο μετρούμενο σύστημα, αφού πλήρως απομονωμένο φυσικό σύστημα δεν νοείται. Καταρχάς, ας μετασχηματίσουμε ελαφρά την (6), λαμβάνοντας υπόψιν πως οι σταθερές c_1 και c_2 είναι μιγαδικοί εν γένει αριθμοί, οπότε $c_1 = |c_1|e^{i\varphi_1}$ και $c_2 = |c_2|e^{i\varphi_2}$, και πως οι όροι συμβολής οφείλουν να είναι αμοιβαία συζυγείς - ώστε η μέση τιμή να είναι ένας πραγματικός αριθμός ($\delta = \varphi_1 - \varphi_2$).

$$
\begin{aligned}
\langle\hat{A}\rangle &= P_1\langle\hat{A}\rangle_{\psi_1} + P_2\langle\hat{A}\rangle_{\psi_2} + c_1^* c_2 A_{12} + c_1 c_2^* A_{21} \\
&= P_1\langle\hat{A}\rangle_{\psi_1} + P_2\langle\hat{A}\rangle_{\psi_2} + |c_1 c_2| e^{-i\phi_1} e^{i\phi_2} A_{12} + |c_2 c_1| e^{i\phi_1} e^{-i\phi_2} A_{21} \\
&= P_1\langle\hat{A}\rangle_{\psi_1} + P_2\langle\hat{A}\rangle_{\psi_2} + |c_1 c_2| e^{i(\phi_1 - \phi_2)} (A_{21} - A_{12}) \\
&= P_1\langle\hat{A}\rangle_{\psi_1} + P_2\langle\hat{A}\rangle_{\psi_2} + |c_1 c_2| e^{i\delta} (A_{21} - A_{12}) \qquad (7)
\end{aligned}
$$

Το περιβάλλον είναι ένα σύστημα με εξαιρετικά μεγάλο αριθμό βαθμών ελευθερίας. Για παράδειγμα, ένα δωμάτιο έχει περίπου 10^{23} άτομα αέρα. Και αυτά αλληλεπιδρούν με το σύστημα μας κατά έναν τυχαίο τρόπο - δεν υπάρχει συγκεκριμένη προτίμηση από άτομο σε άτομο. Για να μιλήσουμε συνεπώς για την μέση τιμή του κβαντομηχανικού τελεστή μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, θα πρέπει να πάρουμε την μέση χρονική τιμή του κατά έναν τυχαίο τρόπο ως προς τις εξωτερικές αλληλεπιδράσεις του περιβάλλοντος. Για την περίπτωση της φάσης δ (αναλυμένης κατά τα γνωστά σε συνημίτονα και ημίτονα), αυτό σημαίνει πως επηρεάζεται τυχαία για όλες τις γωνιές, όποτε και η μέση τιμή της θα είναι μηδέν (με κάποια εκθετική ευαισθησία ανάλογη του αριθμού των βαθμών ελευθερίας του περιβάλλοντος βλ. Messiah Albert (2014)). Έπεται επομένως ότι:

$$
\langle\hat{A}\rangle = P_1\langle\hat{A}\rangle_{\psi_1} + P_2\langle\hat{A}\rangle_{\psi_2} \qquad (8)
$$

Και πάλι παρατηρούμε το φαινόμενο της αποσυμφώνησης, το οποίο όμως αυτή τη φορά οφείλεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ του περιβάλλοντος και του συστήματος (και προφανώς της μετρητικής συσκευής). Να λοιπόν γιατί ο κόσμος μας είναι κλασικός. Απλούστατα γιατί οι υπερθέσεις καταστάσεων καταστρέφονται - ταχύτητα - λόγω της παρουσίας του περιβάλλοντος (εξαιτίας φυσικά των πολύ μεγάλων βαθμών ελευθερίας που διαθέτει). Και είναι ιδιαίτερα ανακουφιστικό πως η πληρέστερη θεωρία, η Κβαντομηχανική δηλαδή,

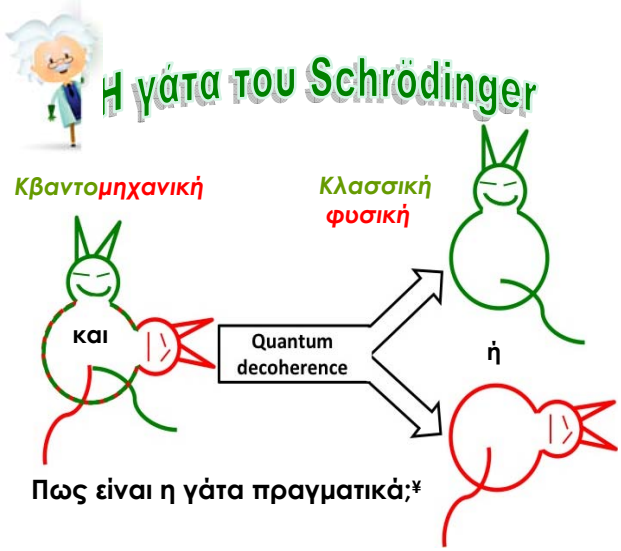
[6] *Με το διαχρονικό πρόβλημα να μην έχει συμφωνηθεί μια επίσημη μετάφραση ορισμένων επιστημονικών όρων στα ελληνικά, εδώ υιοθετούμε την πρόταση του Σ. Τραχανά .*

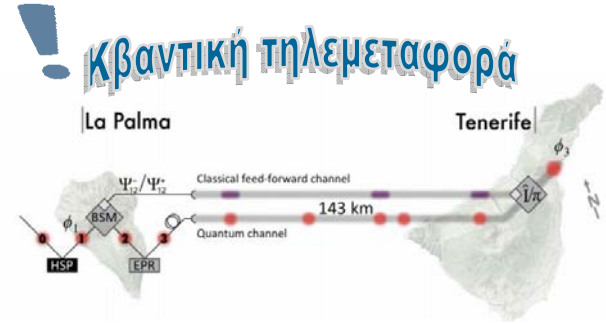
εξηγεί το γεγονός αυτό. Για να το κάνουμε απολύτως κατανοητό, χάρη στην κβαντική αποσυμφώνηση, δεν απαιτούνται κλασικές μετρητικές συσκευές. Το βασικό επιχείρημα για την εισαγωγή τους, ότι δηλαδή μια μέτρηση κατάστασης επαλληλίας είναι μη-αναγνώσιμη, καταρρίπτεται αφού εξαιτίας της αποσυμφώνησης, τέτοιες καταστάσεις δεν επιβιώνουν της αλληλεπίδρασης συστήματος - μετρητικής συσκευής - περιβάλλοντος, ούτε φυσικά υπάρχει κάποια μυστήρια έννοια «κατάρρευσης της κυματοσυνάρτησης» κατά την μέτρηση. Όλα αυτά οφείλονται σε ένα φαινόμενο βασισμένο στην ήδη υπάρχουσα κβαντική θεωρία. Όσο για απόψεις σαν αυτή του Wheeler, τα λόγια περιττεύουν. Λυπούμαστε, αλλά δεν απαιτούνται συνειδητοί παρατηρητές για να έχει νόημα η Κβαντομηχανική. Και πως θα μπορούσαν να απαιτούνται, άλλωστε. Δηλαδή, πως εξελισσόταν το σύμπαν και έφτασε στην σημερινή μορφή του, προτού υπάρξει ζωή στην Γη; Ή οπουδήποτε αλλού.

Δείξαμε συνεπώς, ότι η κβαντική αποσυμφώνηση μαζί με την κβαντική σύμπλεξη αποτελούν τα κατεξοχήν κβαντικά φαινόμενα. Δίνουν θεμελιώδεις εξηγήσεις για κορυφαία εννοιολογικά ζητήματα όπως αυτό της μέτρησης στην κβαντομηχανική, αλλά και για το γιατί υπάρχει ένας κλασικός κόσμος - οι γάτες είναι ασφαλείς Erwin! Από την άλλη μεριά, αφήνουν αναπάντητα ερωτήματα και φυσικά δημιουργούν νέα. Όπως ποιός είναι ο απαραίτητος αριθμός βαθμών ελευθερίας για να προκληθεί η αποσυμφώνηση; Ποιο είναι με άλλα λόγια, το όριο το οποίο διαχωρίζει τον κβαντικό κόσμο από την κλασική πραγματικότητα που αντιλαμβανόμαστε; Και αφού υπάρχει τόσο μεγάλος αριθμός βαθμών ελευθερίας στο σύμπαν, μπορεί κάποιο κβαντικό σύστημα να εξελιχθεί για κάποιο διάστημα στην επαλληλία ή αποσυμφωνείται άμεσα; Ή για το ποιος ήταν ο ρόλος της κβαντικής αποσυμφώνησης στο πρώιμο σύμπαν; Επιλέγουμε, πάραυτα, να σταματήσουμε εδώ και να αφήσουμε τα υπόλοιπα σε εσάς. Ούτως ή άλλως, η θεμελιώδης επιστήμη συνήθως θέτει τα καλά και βαθιά ερωτήματα για τον κόσμο, απαντώντας τα πλήρως μάλλον σπάνια. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον μεγάλο δάσκαλο και κβαντομηχανικό Στέφανο Τραχανά για τις πολύωρες συζητήσεις μας σε στυλ χαβαλέ...Φυσικής! από τις οποίες αναδύθηκαν και πολλές από τις ιδέες που παρουσιάζονται εδώ.

Πηγές

- ***Trachanas Stefanos (2018), «An introduction to quantum physics: a first course for physicists, chemists, materials scientists and engineers», John Wiley & Sons.***
- ***Τραχανάς Στέφανος (2021), «Οι ερμηνείες της Κβαντομηχανικής», Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.***
- ***Feynman Richard (1967), «Ο χαρακτήρας του φυσικού νόμου», Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης***
- ***Messiah Albert (2014), «Quantum mechanics», Courier Corporation.***

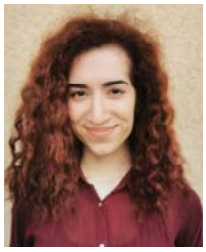




Μεταφορά πληροφορίας σε απόσταση 143 km μεταξύ δυο νησιών στα Κανάρια νησιά.§

§ X.-S. Ma et al., "Quantum teleportation over 143 kilometres using active feed-forward", Nature 489 (2012) 269 .
¥ M. Sarovar "Quantum effects in biological systems", Proc. SPIE 7561, Optical Biopsy VII (2010) 75610D.

machine learning & game development



Νίκη Λαγιόκαπα
Απόφοιτος Τμήματος Φυσικής

Η μηχανική μάθηση (Machine Learning - ML) έχει αρχίσει να εισάγεται στα παιχνίδια υπολογιστών μόλις τα τελευταία χρόνια. Παρόλο που τα παιχνίδια χρησιμοποιούνται συχνά για τον έλεγχο εφαρμογών της τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Intelligence - AI), η χρήση τεχνητής νοημοσύνης για τον έλεγχο και την εξέλιξη video games είναι λιγότερο κοινή. Στο άρθρο αυτό, θα γίνει μία ανασκόπηση στις υπάρχουσες τεχνικές και μεθόδους καθώς και τις μελλοντικές εφαρμογές της μηχανικής μάθησης στο συγκεκριμένο πεδίο. Τέλος, θα συζητηθεί ο ρόλος του φυσικού στα παιχνίδια υπολογιστών.

Το ML σε παιχνίδια ξεκίνησε από τα επιτραπέζια που όλες οι πληροφορίες και οι κανόνες του παιχνιδιού ήταν γνωστά σε όλους τους παίκτες (σκάκι, Go). Αυτό εξελίχθηκε γρήγορα σε video games μέσω των απλών arcade games, κοινώς προσομοιωμένες εκδόσεις αυτών στην πλατφόρμα Atari ή παιχνίδια παρόμοια ή βασισμένα σε αυτά.

Τώρα κυριαρχεί σε τέσσερις κλάδους, προσαρμόσιμοι Non Playable Characters (NPCs), AI ως παίκτης, AI για διαχείριση παιχνιδιού και παραγωγή έξυπνου περιεχομένου.

Προσαρμόσιμοι NPCs

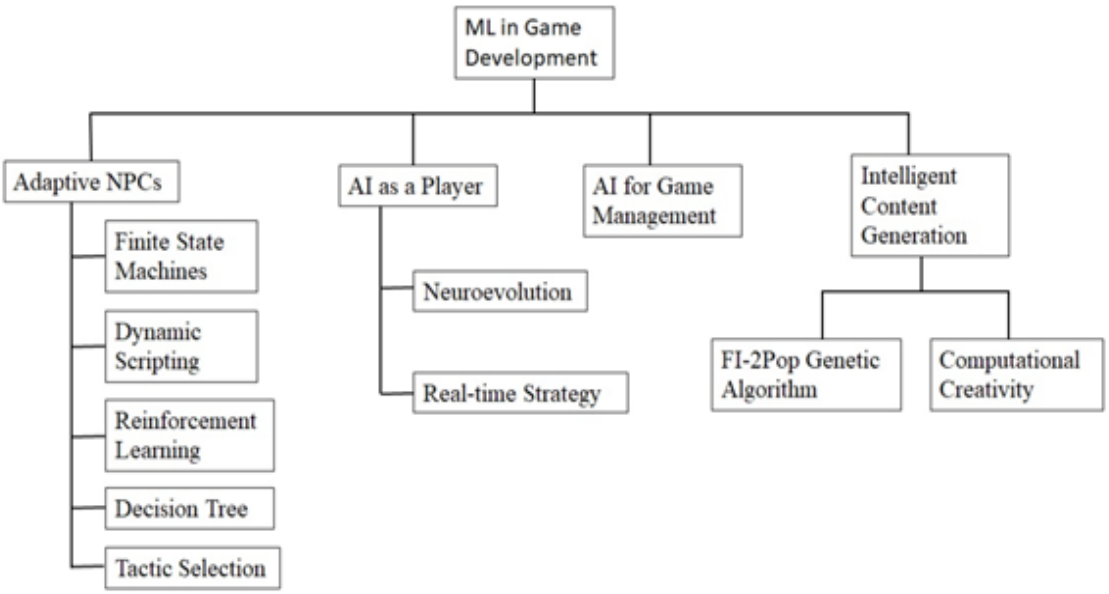
Εδώ και πολύ καιρό, οι NPCs αποτελούν ερευνητικό αντικείμενο μεγάλου ενδιαφέροντος στη βιομηχανία του gaming.[1] Και αυτό γιατί είναι δυνατόν να καταστρέψουν την «πειστικότητα» του παιχνιδιού αν δεν έχουν γίνουν σωστά. Για τη δημιουργία ενός προσαρμόσιμου και ευφυή NPC απαιτούνται πολλές διαφορετικές τεχνικές καθώς επίσης και το να συμπεριληφθεί μία πληθώρα θεωριών:

Finite State Machines/ Μηχανές πεπερασμένης κατάστασης:

Οποιαδήποτε στιγμή, ο NPC μπορεί να βρίσκεται σε έναν από τον πεπερασμένο αριθμό καταστάσεων και ανάλογα από την 'είσοδο' του παίκτη ή του παιχνιδιού, αυτή η κατάσταση μπορεί να αλλάξει. (Άκαμπτη τεχνική σε δύσκολες προγραμματιστικά καταστάσεις)

Dynamic Scripting:

Τεχνική μη-επιβλεπόμενης μάθησης, το AI προσαρ-



Η ταξινόμηση της μηχανικής μάθησης στο game development (G. Edwards et. al.)

[1] *Χαρακτήρες του παιχνιδιού που δεν ελέγχονται από τον παίκτη*

[2] *Σύμφωνα με paper των Risi et. al.*

[3] *Συμμετρία πληροφορίας: όλοι οι παίκτες έχουν την ίδια πληροφορία για την τρέχουσα κατάσταση του παιχνιδιού*

μόζεται εν εξελίξει. Αυτή η τεχνική συχνά εφαρμόζεται σε παιχνίδια στρατηγικής και όχι μόνο (σκάκι, checkers, StarCraft).

Reinforcement Learning (RL):
Τεχνική που βρίσκεται σε πρώιμα στάδια έρευνας. Το RL στοχεύει να μάθει στον AI-NPC για το παιχνίδι με έναν σχετικά μη-επιβλεπόμενο τρόπο και χωρίς πλήρη εικόνα του εικονικού κόσμου στον οποίο βρίσκεται.

Decision Trees (DT):
Κάθε leaf node είναι μία πιθανή απόφαση που μπορεί να λάβει ο NPC. (Ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική, γρήγορη, εύκολα τροποποιήσιμη και εύκολη στη χρήση.)

Tactic Selection:
Τακτικά προσαρμοστικός NPC. Ερευνητές έχουν δημιουργήσει μία Tactic Selection Architecture (TSA) που επιτρέπει στον NPC να μαθαίνει με τον καιρό ποιες τακτικές αποδείχθηκε πως είχαν το καλύτερο αποτέλεσμα στο παιχνίδι και να προσαρμόζεται σε αυτές.

Τέλος, η μελέτη complex social behaviors προσδίδει περισσότερο ανθρώπινα χαρακτηριστικά στους NPCs με αποτέλεσμα να δίνεται ένα πιο πειστικό και απολαυστικό παιχνίδι. Οι NPCs αδιαμφισβήτητα δημιούργησαν μία ερευνητικά πολλά υποσχόμενη περιοχή.

AI ως παίκτης

Τα σύγχρονα παιχνίδια είναι γνωστά για τα όμορφα γραφικά τους, τα οποία και εντυπωσιάζουν τους παίκτες και τους κάνουν πιο συγκεντρωμένους στο παιχνίδι. Η εκτέλεση και η υλοποίηση του AI ως έναν πιστευτό παίκτη είναι ένα απαραίτητο βήμα την επίτευξη του . Κάποια παιχνίδια με AI παίκτες είναι το StarCraft, ενώ με αντίπαλους AI είναι το σκάκι, checkers, go και το πόκερ.

Μία άλλη μορφή του AI ως παίκτη μπορεί να προγραμματιστεί ως *μίμηση του ανθρώπινου μυαλού* και της δυνατότητας λήψης αποφάσεων (NeuroEvolution - NE). AI που χρησιμοποιούν τεχνητά νευρωνικά δίκτυα πραγματοποιούν υψηλότερα ρεκόρ,[2] έχουν ευρύ πεδίο εφαρμογών, επεκτασιμότητα και ποικιλία. Παίκτες AI με NE concepts λειτουργούν κυρίως με συμμετρία πληροφορίας.[3] Για παιχνίδια με ασύμμετρη πληροφορία χρησιμοποιείται η μέθοδος DeepStack (πχ. no-limit Texas hold'em).

Για τη δημιουργία ενός AI με player-like συμπεριφορές, υπάρχουν 7 κριτήρια που πρέπει να πληρούνται, Human Likeness (HL), Decision Making (DM), Production (PD), Operation (OP), Build Order (BO), Micro Control (MC), Performance (PM), με την λήψη αποφάσεων (DM) και την λειτουργία (OP) να είναι τα σημαντικότερα. Τα παιχνίδια λοιπόν, θεωρούνται πιο διασκεδαστικά, καινοτόμα και ελκυστικά όταν εφαρμόζονται πιο ζωντανοί και human-like AI παίκτες.

AI για Game management

Ο όρος "game management" αναφέρεται στον έλεγχο του συστήματος του παιχνιδιού κατά τη διάρκεια του, όπως διαχείριση πόρων ή της συμπεριφοράς των agents ή των εσωτερικών μηχανισμών, έτσι ώστε να παρέχεται στον παίκτη μία καλύτερη συνολικά εμπειρία. Οι στόχοι της έρευνας στο συγκεκριμένο πεδίο περιλαμβάνουν προσαρμογές στη δυναμική δυσκολία, ρεαλιστικές συμπεριφορές του AI και βελτίωση της απόδοσης του παιχνιδιού.

Από τις μεγαλύτερες προκλήσεις και κυρίαρχες περιοχές έρευνας του AI είναι τα παιχνίδια προσαρμοσμένης δυσκολίας, που μεταβάλλουν το επίπεδο δυσκολίας του παιχνιδιού ανάλογα με την εξέλιξη ικανοτήτων του παίκτη. Μία εφαρμογή αυτού είναι στο AI των NPCs εχθρών. Επιπλέον έχουν γίνει μελέτες για τη χρήση AI με στόχο τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του παιχνιδιού (όπως tonetwork traffic σε MMOs).

Μία άλλη χρήση του AI για το game management είναι η ρύθμιση των διαλόγων εν μέσω του παιχνιδιού. Μέσω Sentiment Analysis αναλύονται μηνύματα που στέλνονται κατά τη διάρκεια παιχνιδιών, με τον σκοπό την αναγνώριση και το φιλτράρισμα 'τοξικής' συμπεριφοράς (cyberbullying). Το AI εκπαιδεύεται με το να διαχωρίζει τα σχόλια με βάση τα tags 'isHateful', 'isPositive' και 'isRacist', καθώς και το να αναγνωρίζει την ένταση του συναισθήματος πίσω από κάθε μήνυμα.

Βέβαια υπάρχουν κάποιοι έντονοι περιορισμοί όπως η δυσκολία του να καταλαβαίνει ή να ερμηνεύσει την αργκό/συντομογραφίες που μπορεί να χρησιμοποιούνται στα online παιχνίδια. Παρόλα αυτά, μετά από πειράματα φάνηκε πως το AI μπορεί να αναγνωρίσει μία τάση 'κλειδί' τοξικής συμπεριφοράς: μηνύματα κατηγοριοποιούνταν ως μηνύματα μίσους σχεδόν πάντα μετά τον θάνατο κάποιου παίκτη. Ενας άμεσος τρόπος για την αντιμετώπιση του είναι να απενεργοποιηθεί για ένα σύντομο διάστημα μετά τον θάνατο ενός χαρακτήρα, η δυνατότητα του παίκτη να χρησιμοποιήσει τη συνομιλία.

Intelligent Content Generation/ Δημιουργία έξυπνου περιεχομένου

Intelligent Content Generation (ICG) είναι η αυτοματοποιημένη γενιά του περιεχομένου του παιχνιδιού που πραγματοποιείται μέσω της διαρκούς εξέλιξης του ML/AI. Το παραγόμενο περιεχόμενο θα μπορούσε να περιλαμβάνει επίπεδα του παιχνιδιού, υφές, NPCs, στοιχεία της ιστορία και ακόμα και ολόκληρα παιχνίδια αν το ICG εφαρμοστεί στο πλήρες

δυναμικό του.

Μία πρόσφατη τεχνική που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία για την εφαρμογή ICG είναι ο γενετικός αλγόριθμος Feasible - Infeasible Two-Population (FI-2Pop), που χρησιμοποιείται για την παραγωγή επιπέδων για διαφορετικά είδη παιχνιδιών, όπως 2D-platformer και εξερεύνησης top-down. Αυτός ο αλγόριθμος απαιτεί ο προγραμματιστής να διευκρινίζει επιθυμητές ιδιότητες των παραγόμενων επιπέδων ώστε να δημιουργήσει το επίπεδο μόνος του.

Ενας άλλος τρόπος με τον οποίο η βιομηχανία μπορεί να εφαρμόσει ICG, είναι μέσω μίας άλλης αυτοματοποιημένης διαδικασίας παραγωγής επιπέδων μέσω AI που ονομάζεται 'Tanagra'. Η Tanagra στοχεύει στο να βοηθήσει τους προγραμματιστές αναλαμβάνοντας βάρος των ευθυνών και τους χρονικούς περιορισμούς που έχουν.

Το ICG είναι πολύ δύσκολο να εφαρμοστεί στα σημερινά παιχνίδια λόγω των προκλήσεων που προκύπτουν από την έλλειψη γνώσεων στο πεδίο της μηχανικής μάθησης. Ωστόσο, μπορεί να εισάγει τον παίκτη σε μία μοναδική, καθηλωτική εμπειρία που μπορεί να στοχεύσει στο να βελτιώσει τα αδύναμα σημεία του παίκτη αλλά και να τονίσει τα δυνατά του σημεία.

Μελλοντικές χρήσεις και κατευθύνσεις του AI/ ML

Η τεχνητή νοημοσύνη ως πεδίο είναι αρκετά νέα, με αποτέλεσμα οι εφαρμογές της στα παιχνίδια να είναι περιορισμένες. Για αυτό έχουν πραγματοποιηθεί μόνο κάποια πρώιμα βήματα. Κάποιες εφαρμογές που αναμένονται να γίνουν άμεσα αφορούν:

- ***Την τυποποίηση στοιχείων*** που χρησιμοποιούνται στη σχεδίαση του παιχνιδιού καθώς και τη δημιουργία τυποποιημένων βιβλιοθηκών, ώστε να ελαττωθεί ο φόρτος του προγραμματιστή για μελλοντικές εφαρμογές, καθώς και να εξοικονομηθεί χρόνος κατά το προγραμματιστικό κομμάτι.
- ***Την χρήση AI ως παίκτη*** για το παιχνίδι, με αποτέλεσμα να είναι εφικτό ένα μόνο άτομο να μπορεί να παίζει παιχνίδια πολλαπλών παικτών ακόμα και αν δεν έχει τον κατάλληλο αριθμό συμπαικτών.
- ***Την παρακολούθηση της εμπειρίας του χρήστη.*** Από την ανάλυση της ψυχολογικής κατάστασης του χρήστη και από τη σύνδεση της δυναμικής δυσκολίας ή της αισθητικής του περιβάλλοντος, είναι δυνατή η εφαρμογή της τεχνητής νοημοσύνης ώστε να γίνει μία προσπάθεια να ελεγχθεί η συναισθηματική ανταπόκριση του χρήστη και να παραχθούν καλύτερα παιχνίδια.
- ***Την πρόβλεψη του νικητή σε αθλητικά παιχνίδια*** ώστε να υπάρχει καλύτερη δυναμική στη δυσκολία και στη δημιουργία ζευγαριών (matchmaking).

Η μηχανική μάθηση έχει κάποιες εφαρμογές υπό εξέλιξη σε κάποια παιχνίδια, που παρουσιάζουν έντονο ενδιαφέρον. Θα αναφερθούν ορισμένα από αυτά αμέσως παρακάτω.

FIFA ultimate team mode

Στο FIFA, υπολογίζεται η χημεία της ομάδας που φτιάχνει ο χρήστης με βάση το πόσο οι προσωπικότητες της ομάδας είναι συμβατές ή όχι, επηρεάζοντας με αυτόν τον τρόπο την απόδοση της. Κατά τη διάρκεια του παιχνιδιού, το ηθικό της ομάδας πέφτει αν η ομάδα χάνει ή αν κάνει μικρά λάθη καθώς και το αντίστροφο.

Ρεαλιστικότερες αλληλεπιδράσεις

Στα σύγχρονα παιχνίδια, η συνομιλία με τους NPCs εξελίσσεται βάση σεναρίου. Με τη χρήση φυσικής γλώσσας, στο μέλλον ο παίκτης θα μπορεί να μιλάει δυνατά και να λαμβάνει άμεσα πραγματικές

FIFA δημιουργία ομάδας, πηγή gamedeveloper.com

απαντήσεις όπως με την Siri. Επιπλέον, οι εχθροί NPCs θα εκπαιδεύονται από το παίξιμο του παίκτη, με αποτέλεσμα να είναι λιγότερο προβλέψιμοι, να γίνονται εξυπνότεροι και το παιχνίδι αναλογικά δυσκολότερο.

Δημιουργία σύμπαντος εν εξελίξει

Η δημιουργία συμπάντων κατά τη διάρκεια του παιχνιδιού είναι μια από τις πιο υποσχόμενες εφαρμογές του ML στο game development. Είχε πραγματοποιηθεί μία πρώιμη τέτοια απόπειρα από το No Man's Sky στο παρελθόν, το οποίο παρείχε άπειρο αριθμό συμπάντων τα οποία δημιουργούνταν on the fly.

Ο ρόλος του φυσικού στο game development

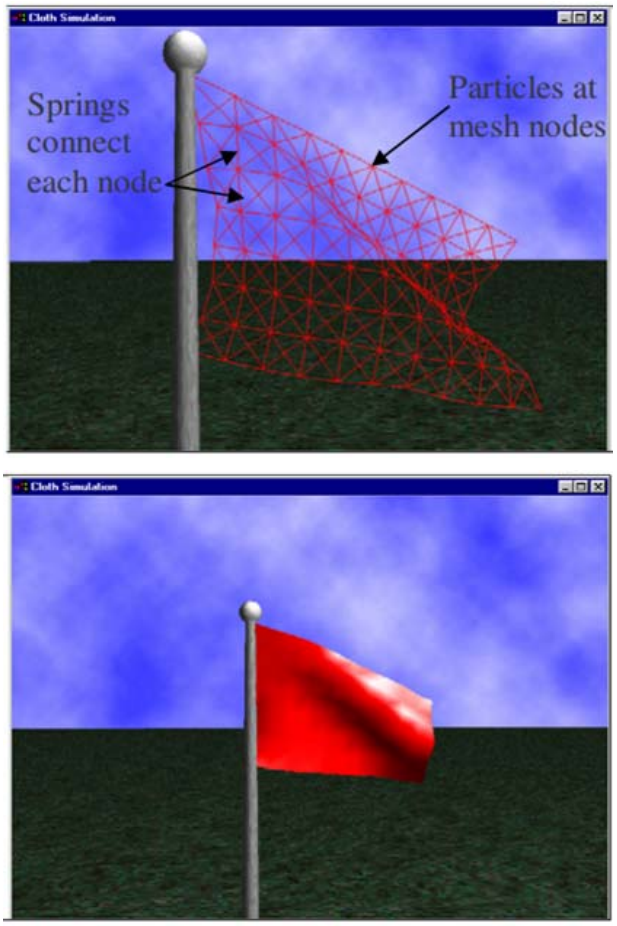
Τα σύγχρονα video games χρησιμοποιούν φυσική ώστε να επιτύχουν ρεαλιστικές συμπεριφορές και ειδικά εφέ. Ο ζητούμενος στόχος είναι το παιχνίδι να είναι όσο πιο καθηλωτικό γίνεται για τον παίκτη (immersive). Οτιδήποτε, από το μπιλιάρδο μέχρι την κίνηση του καπνού ή των βλημάτων, προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας θεμελιώδεις αρχές της δυναμικής.

Πιο συγκεκριμένα, για κάθε αντικείμενο που δημιουργείται, πρέπει πρώτα να επιλεγεί η μάζα του σώματος και να υπολογιστούν οι ιδιότητες της. Στη συνέχεια και ανάλογα με το αντικείμενο, για παράδειγμα αν είναι αεροπλάνο ή αυτοκίνητο αγώνων, αφιερώνεται αρκετός χρόνος ώστε να υπολογιστούν οι δυνάμεις και οι ροπές που θα ασκηθούν στο σώμα και θα καθορίσουν την συμπεριφορά του αντικειμένου.

Κάθε παιχνίδι έχει μία physics engine, που αποτελείται από δύο κύριες συνιστώσες: το σύστημα ανταπόκρισης στην ανίχνευση σύγκρουσης/κρούσης και τη συνιστώσα δυναμικής προσομοίωσης που ευθύνεται για τον υπολογισμό των δυνάμεων που επηρεάζουν το εκάστοτε αντικείμενο. Τέλος, η ρύθμιση για την τελειοποίηση του παιχνιδιού περιλαμβάνει μία χρονοβόρα διαδικασία trial and error που αποσκοπεί στην δημιουργία ενός διασκεδαστικού και ρεαλιστικού αποτελέσματος.

Συμπεράσματα

Υπάρχουν ακόμα πολλές προκλήσεις τις οποίες καλείται να αντιμετωπίσει η μηχανική μάθηση στον χώρο των παιχνιδιών, όπως η έλλειψη δεδομένων, οι πιο περίπλοκοι αλγόριθμοι κλπ. Γεγονός το οποίο είναι φυσικό καθώς είναι ένα πολύ νέο πεδίο. Η συνεισφορά του ML στα παιχνίδια υπολογιστών μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις οικογένειες: προσαρμόσιμοι NPCs, AI ως παίκτης, AI στο game management και Intelligent Content Generation. Στην κάθε μία από αυτές υπάρχει ήδη τόσο μία σημαντική συνεισφορά όσο και μία μεγάλη βάση για μετέπειτα έρευνα.



Ο φυσικός στο game development

Το σίγουρο είναι πως πρόκειται για έναν κλάδο που συνεχίζει και θα συνεχίσει να απασχολεί τόσο την επιστημονική κοινότητα, όσο και τους παίκτες και λάτρεις των παιχνιδιών. Και αυτό γιατί παρέχει πολλά ενδιαφέρονται ερευνητικά αντικείμενα που εκτείνονται από ψυχολογικές μελέτες μέχρι και αντικείμενα φυσικής, αλλά ταυτόχρονα παρέχει ένα διασκεδαστικό αποτέλεσμα που 'τραβάει' τον κάθε παίκτη στον κόσμο του!

Πηγές

- *G. Edwards et. al., "The Role of ML in Game Development Domain- A Review of Current Trends and Future Directions", 2021, Digital Image Computing: Techniques and Applications (DACTA), Gold Coast, Australia, pp. 01-07.*
- *S. Risi, M. Preuss, "From Chess and Atari to StarCraft an Beyond: How Game AI is Driving the World of AI", Kunstl. Intell. 34 (2020) 7-17 .*
- *John Stephenson, "6 Ways ML will be used in Game Development", www.logikk.com, November 2018.*
- *John Wordsworth, "How ML is used for game development: Interview with JW", hyperlight, 2021.*
- *D. M. Bourg, "How Physics is used in Video Games", Phys. Educ. 39 (2004) 401.*

παιχνίδια με το φως

...τα δαχτυλίδια του φωτός γύρω από τον Ήλιο και την Σελήνη

Φανή Πινακίδου
Ε.ΔΙ.Π
Τμήματος Φυσικής

Η άλως των 22°

Η *άλως* (halos) των 22° είναι ένα οπτικό ατμοσφαιρικό φαινόμενο. Είναι ένα «δαχτυλίδι» ή διαφορετικά ένα φωτοστέφανο, λευκό ή ελαφρώς χρωματιστό που σχηματίζεται συνήθως γύρω από τον Ήλιο ή πιο σπάνια γύρω από τη Σελήνη και έχει φαινόμενη ακτίνα ίση περίπου με 22°. Όταν είναι ορατή γύρω από τη Σελήνη, είναι γνωστή ως **ο δακτύλιος της Σελήνης ή η χειμερινή άλως**. Σχηματίζεται όταν το φως του Ηλίου ή το φως της Σελήνης διαθλάται από εκατομμύρια εξαγωνικούς κρυστάλλους πάγου (παγοκρυσταλλίτες) που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα με την μορφή νεφών, σε ορισμένο ύψος από την Γη.

Οι παγοκρυσταλλίτες εμφανίζονται στην ατμόσφαιρα κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας σε δύο κύριες μορφές: α) σαν εξαγωνικοί στυλίσκοι με μεγάλο μήκος κατά τον άξονά τους και μικρή διατομή β) σαν εξαγωνικά πλακίδια που έχουν διατομή μεγάλης διαμέτρου και άξονα μικρού μήκους. Η διάμετρος αυτών των κρυσταλλιτών είναι μικρότερη από 20,5 μm. Συνδυασμοί από διαθλάσεις και ανακλάσεις μέσω των διαφόρων επιφανειών αυτών των κρυσταλλιτών, μπορούν να δημιουργήσουν μια μεγάλη ποικιλία ατμοσφαιρικών φαινομένων, με ένα από αυτά να εμφανίζεται με τη μεγαλύτερη συχνότητα και να είναι η άλως των 22°.

Λίγη ιστορία....

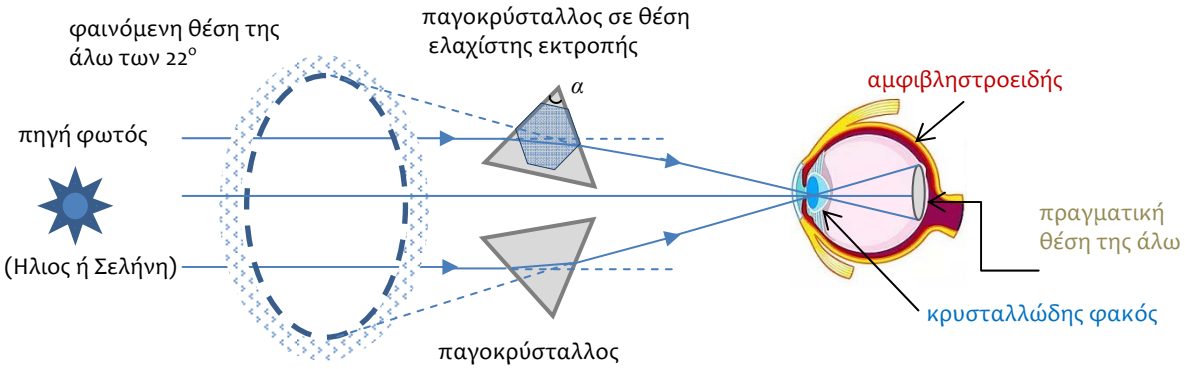
Αν ανατρέξουμε στην αρχαιότητα θα βρούμε αναφορά σε αυτούς τους δακτυλίους από τον Αριστοτέλη, ενώ οι πρώτες ευρωπαϊκές περιγραφές ήταν αυτές που έγιναν από τους Christoph Scheiner στη Ρώμη (1630), Johannes Hevelius στο Danzig (1661) και Tobias Lowitz στην Αγία Πετρούπολη (1794). Κινέζοι παρατηρητές είχαν καταγράψει τα φαινόμενα αυτά το 637 μΧ, με πρώτη αναφορά τους σε μια ενότητα (το 'Ten Haloes') στο «Επίσημη Ιστορία της Δυναστείας των Τσιν» (Τσιν Σου)

Πολύ πριν από την ανάπτυξη της Μετεωρολογίας, το φαινόμενο αυτό της άλω (όπως και άλλα φαινόμενα της ατμόσφαιρας), χρησιμοποιήθηκε σαν μια μορφή εμπειρικής πρόβλεψης του καιρού. Σε αυτή την περίπτωση, η πρόβλεψη ήταν αναμονή βροχής μέσα στο 24ωρο της εμφάνισης του φαινομένου. Πράγματι, τα υψηλά νέφη που δημιουργούν αυτούς τους δακτυλίους υποδηλώνουν ότι πλησιάζει ένα μετωπικό σύστημα. Η αλήθεια είναι ωστόσο ότι δεν μπορεί να αποτελέσει ένα ασφαλές προγνωστικό κριτήριο καιρού. Στις περισσότερες περιπτώσεις το μέτωπο αυτό μπορεί να είναι ανενεργό ή ακόμη και να αλλάξει πορεία οπότε τελικά να μην δημιουργηθεί βροχή.

Διάθλαση του φωτός

Το φαινόμενο της άλω των 22° οφείλεται στους παγοκρυσταλλίτες με τη μορφή των στυλίσκων. Πιο συγκεκριμένα, δημιουργείται λόγω της διάθλασης των ακτίνων του φωτός που προσπίπτουν σε μια έδρα του κρυσταλλίτη και εξέρχεται από μια άλλη έδρα (Σχήμα 1). Τέτοιους παγοκρυσταλλίτες συναντάμε σε αρκετά μεγάλο υψόμετρο (άνω των 7000 m) και πρόκειται για τα γνωστά μας θυσανοστρώματα (cirrostratus), αραιά νέφη που σχηματίζονται από τη συγκέντρωση τους. Αυτά τα νέφη παρεμβάλλονται μεταξύ της Σελήνης (ή του Ήλιου) και ενός παρατηρητή στη Γη. Γενικά οι κρυσταλλίτες έχουν τυχαίο προσανατολισμό στο χώρο, ωστόσο αρκετοί από αυτούς είναι τοποθετημένοι παράλληλα προς επίπεδα τα οποία με την σειρά τους είναι κάθετα στη διεύθυνση της πηγής του φωτός και παρατηρητή. Ένα τέτοιο επίπεδο είναι αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 2. Αυτοί οι κρύσταλλοι κινούνται σαν να περιστρέφονται γύρω από έναν άξονα κατά μήκος της μεγάλης τους διάστασης (κάθετα

Σχήμα 1: Προσανατολισμός του παγοκρυστάλλου στην άλω των 22°.



Σχήμα 2: Σχηματισμός της άλω των 22° από κρυσταλλίτες πάγου.

στο επίπεδο του σχήματος) και μπορούν να λάβουν όλες τις δυνατές θέσεις. Αυτό έχει σαν συνέπεια οι γωνίες πρόσπτωσης των ακτινών στις επιφάνειες των κρυσταλλιτών να μπορούν να έχουν οποιαδήποτε τιμή μεταξύ 0° και 90°. Με την αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης, η γωνία εκτροπής δ (η γωνία δηλ. που σχηματίζει η διεύθυνση της προσπίπτουσας ακτίνας με την εξερχόμενη από τον κρυσταλλίτη ακτίνα) δεν μειώνεται μονότονα. Ενώ αρχικά ελαττώνεται, φτάνει σε μια ελάχιστη τιμή και στην συνέχεια αυξάνεται. Αυτή η γωνία ελαχίστης εκτροπής, που συμβολίζεται με δ_m, σχετίζεται με τον δείκτη διάθλασης n του κρυσταλλίτη (δηλαδή του πρίσματος) και την διαθλαστική του γωνία α, με την γνωστή σχέση:

$$n = \sin\frac{\alpha+\delta_m}{2} \Big/ \sin\frac{\alpha}{2}$$

Αν σε αυτή τη σχέση αντικαταστήσουμε το n με την τιμή 1,3121 που αποτελεί μια πολύ καλή μέση τιμή για τον δείκτη διάθλασης των παγοκρυσταλλιτών, βρίσκουμε ότι η γωνία ελάχιστης εκτροπής είναι ίση με $\delta_m \approx 22°$. Για όλους λοιπόν τους κρυσταλλίτες, η γωνία εκτροπής των 22° θα είναι και η γωνία ελαχίστης εκτροπής. Αν τώρα προεκτείνουμε τις ακτίνες που εξέρχονται από αυτούς μέχρι το ανθρώπινο μάτι (Σχήμα 2), τότε θα σχηματιστούν τα εσωτερικά σαφή όρια του φαινόμενου δακτυλίου της άλω των 22° (Σχήμα 3).

Χρώματα της άλω

Γιατί όμως ο δακτύλιος της άλω εμφανίζει μια χρωματική αλληλουχία; Αυτή η χρωματική αλληλουχία σχετίζεται με το φαινόμενο του διασκεδασμού του φωτός. Στον διασκεδασμό, όταν μια δέσμη λευκού φωτός συναντήσει ένα πρίσμα υπό μια συγκεκριμένη γωνία αναλύεται, με το ιώδες να παρουσιάζει την μεγαλύτερη γωνία εκτροπής και το κόκκινο τη μικρότερη - τα δυο αυτά χρώματα συνιστούν και τα χρωματικά άκρα του ορατού φάσματος. Δεδομένου όμως ότι και στην περίπτωση αυτή το μάτι μας βλέπει κατά την προέκταση των ακτινών του φωτός που δέχεται, η απόχρωση του εσωτερικού τμήματος του δακτυλίου της άλω θα είναι το κόκκινο. Και όσον αφορά τη διαδοχή των χρωμάτων, αυτά θα ακολουθούν τυπικά αυτή των χρωμάτων της ίριδας. Η χρωματική αυτή αλληλουχία φαίνεται αρκετά ευδιάκριτα, στην φωτογραφία της

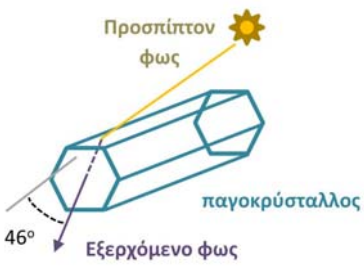
Σχήμα 3: Η άλως των 22° γύρω από τον ήλιο (αριστερά) στο Großkrotzenburg της Γερμανίας και γύρω από τη σελήνη (δεξιά) στην Τασμανία.

Σχήμα 4: Η χρωματική αλληλουχία της άλω των 22° γύρω από τον ήλιο. Φωτογραφία που τραβήχτηκε στο Hyderabad της Ινδίας.

άλω των 22° του Σχήματος 4 (με πηγή φωτισμού τον Ηλιο). Φαίνεται ξεκάθαρα η διαδοχή του κόκκινου, πορτοκαλί και κίτρινου, με τα υπόλοιπα χρώματα να διαχέονται στην λευκή αχλή (την λεπτή δηλ. ομίχλη από μικροσκοπικά σταγονίδια νερού) που περιβάλλει την άλω.

Η άλως των 46°

Υπάρχει όμως και ένα δεύτερο οπτικό φαινόμενο, πολύ σπάνιο μεν, εξαιρετικά μεγάλο δε σε διαστάσεις. Αυτό είναι το «φωτοστέφανο» που δημιουργείται μόνο γύρω από τον Ήλιο και ονομάζεται *άλως των 46°*. Οφείλεται και αυτό στην παρουσία των παγοκρυστάλλων και έχει διάμετρο πολύ πιο μεγάλη από την άλω των 22°. Τα χρώματα της ωστόσο είναι πολύ πιο αχνά. Τι την διαφοροποιεί από την άλω των 22°; Το γεγονός ότι οι ακτίνες του Ηλίου όταν συναντήσουν τον παγοκρύσταλλο και διαδοθούν μέσα από αυτόν βρίσκουν διαφορετική διέξοδο. Πιο συγκεκριμένα, οι ακτίνες του φωτός συναντούν τις έδρες των παγοκρυστάλλων, αλλά αυτή τη φορά διαθλώνται μέσω των βάσεων τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5. Η διαφορά που χαρακτηρίζει



Σχήμα 5: Προσανατολισμός του παγοκρυστάλλου στην άλω των 46°.

την πρώτη από την δεύτερη περίπτωση άλω (δηλ. των 22° και 46°) είναι ότι στην μεν πρώτη περίπτωση η διαθλαστική γωνία α των κρυσταλλιτών είναι 60°, ενώ στην δεύτερη είναι 90°. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, από τη σχέση που αναφέραμε προηγουμένως (σύνδεση του δείκτη διάθλασης, με την διαθλαστική γωνία α και για ίδιο δείκτη διάθλασης-ίδιος παγοκρυσταλλίτης) προκύπτει ότι σε αυτή την περίπτωση η γωνία ελάχιστης εκτροπής δ_m γίνεται ίση περίπου με 46°.

Στα νέφη των παγοκρυσταλλιτών, το ποσοστό των κρυσταλλιτών με αυτόν το προσανατολισμό είναι εξ' ίσου μεγάλο, οπότε εκτός της άλω των 22° είναι πιθανή και η δημιουργία της άλω των 46°. Θα σχηματίζεται δηλαδή στον ουρανό και ένας δεύτερος δακτύλιος με φαινόμενη γωνία 46°, ο οποίος και θα περιβάλλει τον πρώτο με τα ίδια χαρακτηριστικά και την ίδια χρωματική διαδοχή. Στο Σχήμα 6 μπορούμε να διακρίνουμε την συνύπαρξη και των δυο αυτών φαινομένων σε ένα μικρό τμήμα του ουρανού. Συνήθως η άλως των 46° δεν γίνεται ορατή επειδή η ένταση της είναι πολύ μικρή. Η χαμηλή ένταση οφείλεται αφενός μεν στο ότι στους κρυσταλλίτες αυτούς (με διαθλαστική γωνία 90°), το εύρος των γωνιών πρόσπτωσης των ακτινών που μπορούν να διαθλαστούν χωρίς να υποστούν ολική ανάκλαση στη δεύτερη επιφάνεια είναι πολύ μικρό και αφετέρου δε, στο ότι η άλως των 46° κατανέμεται σ' ένα πολύ μεγάλο εύρος του ουρανού.

Σχήμα 6: Η άλως των 22° και των 46° που σχηματίζεται γύρω από τη σελήνη. Φωτογραφία από την Καλκούτα της Ινδίας.

Πολλές φορές μαζί με την άλω των 22°, εμφανίζονται φωτεινά τόξα εφαπτόμενα σε αυτήν. Πρόκειται και πάλι για ένα ατμοσφαιρικό οπτικό φαινόμενο, ένα τόξο δηλαδή το οποίο σχηματίζεται πάνω και κάτω από τον παρατηρούμενο Ήλιο ή την Σελήνη και το οποίο εφάπτεται στο φωτοστέφανο των 22°. Στο Σχήμα 7, το τόξο εμφανίζεται στο επάνω μέρος της άλω των

Σχήμα 7: Η άλως των 22° και των 46° που σχηματίζεται γύρω από τον ήλιο με ένα πάνω εφαπτόμενο τόξο. Φωτογραφία από το Greenland Summit Station στην Γροιλανδία.

22°, μπορεί ωστόσο να σχηματιστεί και στο κάτω μέρος αλλά αυτό το φαινόμενο είναι εξαιρετικά σπάνιο. Βασική προϋπόθεση για την δημιουργία αυτών των τόξων είναι οι εξαγωνικοί κρύσταλλοι πάγου σε σχήμα ράβδου να έχουν τον μεγάλο τους άξονα ευθυγραμμισμένο οριζόντια.

Πηγές

- *https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moon_ring_over_Tasmania.jpg*
- *https://en.wikipedia.org/wiki/File:Halo-Gro%C3%9Fkrotzenburg-2020.09.06.jpg*
- *https://earthsky.org/earthsky-community-photos/entry/40307/*
- *https://www.flickr.com/photos/noaaphotolib/24104827192/ Photographer: Lieutenant Commander Heather Moe, NOAA Corps, Greenland Summit Station, the Greenland Environmental Observatory, NOAA photo library,*
- *https://earthsky.org/earthsky-community-photos/entry/43295/*
- *Ε. Βανίδης, «Μαθήματα Οπτικής με εισαγωγή στην Κυματική», Κεφ. 7, https://users.auth.gr/vanidhis/books.html*
- *H. Ping-Yü, J. Needham "Ancient Chinese Observations of Solar Haloes and Parhelia", Weather, 14 (1959) 124.*
- *https://www.iefimerida.gr/ellada/samos-spanio-meteorologiko-fainomeno-pythagoreio*
- *https://www.athensvoice.gr/epikairotita/ellada/498680/iliaki-alos-dahtylidi-toy-ilioy-ston-oyrano-toy-agrinioy-eikones/*
- *https://www.typosthes.gr/viral-news/214693_iliaki-alos-spanio-fainomeno-irthe-tin-m-paraskeyi-sti-thessaloniki*

Σε γεωγραφικά πλάτη όπως της Ελλάδας, η άλως των 22° δεν είναι σπάνια. Υπάρχουν αρκετές πρόσφατες αναφορές καταγραφής της. Ενδεικτικά παρουσιάζονται οι παρακάτω φωτογραφίες.

Θεσσαλονίκη 2020

το πρόβλημα της ισορροπίας των σπανίων γαιών

Χάρης Σαραφίδης
Επίκουρος Καθηγητής
Τμήματος Φυσικής

Είναι γενικά αποδεκτό ότι η εξόρυξη μετάλλων είναι μία διαδικασία επίπονη, προβληματική με περιβαλλοντικούς όρους αλλά αναγκαία, τόσο για την διατήρηση του επιπέδου ζωής των ανεπτυγμένων κοινωνιών όσο και για την βελτίωση του επιπέδου ζωής των λιγότερο ανεπτυγμένων. Πολλά τεχνολογικά αγαθά, πρώτης ανάγκης ή μη, βασίζονται στις πρώτες ύλες που μας προσφέρει η Γη. Μία κατηγορία τέτοιων αγαθών, ολοένα και αυξανόμενης σημασίας, είναι οι **σπάνιες γαίες** (rare earths).

Ως σπάνιες γαίες χαρακτηρίζουμε μία σειρά χημικών στοιχείων της 6^{ης} ομάδας του περιοδικού πίνακα από το **λανθάνιο (La)** ως το **λουτέτσιο (Lu)**, στην οποία κάποιες φορές συμπεριλαμβάνονται το **σκάνδιο (Sc)** και το **ύττριο (Y),** αθροίζοντας συνολικά 17 στοιχεία. Ενα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της βασικής σειράς είναι ότι καθώς ο ατομικός αριθμός αυξάνεται , τα επιπλέον ηλεκτρόνια που αντισταθμίζουν το φορτίο του πυρήνα διευθετούνται στα 4f ηλεκτρονικά τροχιακά και όχι στα τροχιακά που συμμετέχουν στον χημικό δεσμό. Λόγω αυτής της ιδιότητας, οι σπάνιες γαίες παρουσιάζουν δύο ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Το πρώτο είναι ότι εμφανίζουν παρόμοια χημική συμπεριφορά και συνεπώς μπορούν να αντικαθιστούν εύκολα η μία την άλλη σε ανάλογες χημικές ενώσεις, χωρίς φυσικά αυτό να συνεπάγεται ότι οι φυσικές ιδιότητες των διαφορετικών ενώσεων είναι ίδιες. Το δεύτερο είναι η γνωστή «συστολή των λανθανίδων»: η ατομική ακτίνα μειώνεται με την αύξηση του ατομικού αριθμού αντί για το αντίθετο. Αυτό το δεύτερο χαρακτηριστικό επιδρά σημαντικά στην κρυσταλλική δομή των ενώσεων στις οποίες συμμετέχουν. Αύξηση του ατομικού αριθμού συνεπάγεται γενικά και μικρότερη αφθονία για το αντίστοιχο στοιχείο, σε σύγκριση με τα υπόλοιπα της σειράς.

Παρά το όνομα τους, η πατρότητα του οποίου οφείλεται στον Φινλανδό χημικό Ιωάννη Γαδολίνο (1794), οι σπάνιες γαίες δεν έχουν καθόλου σπάνια παρουσία στον φλοιό της Γης. Εκτός του ραδιενεργού προμήθειου, οι υπόλοιπες απαντώνται σε σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις. Η κατάσταση όμως αλλάζει αν συνυπολογίσουμε την τεράστια δυσκολία απομόνωσης αυτών των στοιχείων από τα ορυκτά που τις περιέχουν καθώς επίσης και την αφθονία εκμεταλλεύσιμων αποθεμάτων αυτών των ορυκτών.

Εκτός από τα διαθέσιμα αποθέματα, μία άλλη παράμετρος που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι η κρισιμότητα της πρώτης ύλης. Ο όρος αυτός αφορά στην ασφάλεια της αλυσίδας προμήθειας, από πολιτικές διαταραχές ή και άλλης φύσης. Για παράδειγμα, όταν η εξόρυξη της πρώτης ύλης πραγματοποιείται παγκοσμίως σε λίγα ορυχεία, τότε κάποιο τυχαίο γεγονός όπως για παράδειγμα ένα ατύχημα μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρή διαταραχή της προμήθειας.

Τα ορυκτά από τα οποία εξάγονται οι σπάνιες γαίες, μια διαδικασία επίπονη και ταυτόχρονα ενεργοβόρα, είναι συνήθως σε μορφή οξειδίων όπως ο μονανζίτης και ο μποστανζίτης. Αυτά τα ορυκτά είναι δυνατό να περιέχουν διάφορες σπάνιες γαίες. Η παγκόσμια παραγωγή έχει διπλασιαστεί τα τελευταία είκοσι χρόνια και αγγίζει πλέον τους 140 χιλιάδες τόνους, με το μεγαλύτερο ποσοστό να προέρχεται από την Λαϊκή Δημοκρατία της Κίνας. Οι ποσότητες των επιμέρους σπανίων γαιών διαφέρουν από κοίτασμα σε κοίτασμα, ακολουθώντας την γενική τάση για μείωση της ποσότητας με την αύξηση του ατομικού αριθμού. Ομως, εκτός των διαφορετικών ποσοτήτων από πλευράς παραγωγής, υπάρχει και σοβαρή ανομοιογένεια και από πλευράς ζήτησης. Οι ανάγκες είναι διαφορετικές, με κάποια στοιχεία να ζητούνται σε μεγάλο όγκο ενώ κάποια άλλα κυριολεκτικά να περισσεύουν, με αποτέλεσμα η προσφορά να υπερβαίνει την ζήτηση. Τα συγκεκριμένα στοιχεία, κυρίως το δημήτριο (Ce) αλλά και άλλα όπως το λανθάνιο, συχνά αναφέρονται στην βιβλιογραφία ως **«δωρεάν σπάνιες γαίες»**. Αυτή κατάσταση ονομάζεται *πρόβλημα ισορροπίας των σπανίων γαιών* (Rare Earths Balancing Problem).

Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η αντιμετώπιση

Σχηματική παράσταση της σημασίας για την ύπαρξη τεχνολογιών καθαρής ενέργειας διαφόρων πρώτων υλών και της κρισιμότητας στην προμήθειά τους.

του προβλήματος ισορροπίας, η εξίσωση δηλαδή παραγωγής και ζήτησης σε όλο το φάσμα των στοιχείων της σειράς των σπανίων γαιών, θα ήταν πολλαπλά ωφέλιμη για το περιβάλλον, την βιώσιμη και αειφόρο ανάπτυξη καθώς επίσης και την παγκόσμια οικονομία. Είναι όμως επίσης εύκολο να αντιληφθεί κανείς και την περιπλοκότητα μιας τέτοιας προσπάθειας, η οποία εξαρτάται από πολλές παραμέτρους. Για παράδειγμα μια από αυτές είναι η μεταβολή των τεχνολογικών δεδομένων. Για παράδειγμα, οι φωσφόροι των παλαιότερων λαμπτήρων αποτελούσαν σημαντική αγορά για τις σπάνιες γαίες απορροφώντας το 7% του συνολικού όγκου παραγωγής, το οποίο μάλιστα αντιστοιχούσε στο 30% της αξίας. Η απόσυρση ωστόσο των παλαιότερης τεχνολογίας λαμπτήρων μείωσε σημαντικά τις ανάγκες σε φωσφόρους. Την ίδια στιγμή οι απαιτήσεις στα στοιχεία που χρησιμοποιούνται στους μόνιμους μαγνήτες αυξάνονται διαρκώς λόγω εφαρμογών όπως η ηλεκτροκίνηση ή η ρομποτική, οι οποίες γνωρίζουν αλματώδη ανάπτυξη. Αυτός είναι ο λόγος που πριν από μια δεκαετία κάποιες σπάνιες γαίες με ατομικό αριθμό μεγαλύτερο του 62, γνωστές ως «βαριές» σπάνιες γαίες, θεωρούνταν ότι έχουν μεγαλύτερη κρισιμότητα από τις υπόλοιπες. Όμως πλέον η κατάσταση έχει αντιστραφεί. Εξαίρεση αποτελεί το δυσπρόσιο (Dy), το οποίο έχει μεγάλη σημασία στην παραγωγή μονίμων μαγνητών.

Φωτογραφία: Kindel Media

Οι σπάνιες γαίες αποτελούν σημαντικές πρώτες ύλες για μεγάλο αριθμό τεχνολογικών εφαρμογών. Η πιο σημαντική, η οποία μάλιστα απαιτεί και μεγάλες ποσότητες, είναι οι μόνιμοι μαγνήτες. Οι ηλεκτροκινητήρες που βασίζονται σε μόνιμους μαγνήτες είναι η πιο αποδοτική μέθοδος μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας σε κινητική. Εφαρμογές ρομποτικής, εφαρμογές κινητικότητας όπως τα ηλεκτρικά και τα υβριδικά οχήματα, και πολλές άλλες πρακτικά δεν μπορούν να υλοποιηθούν χωρίς τη χρήση υψηλής απόδοσης μόνιμων μαγνητών. Οι τελευταίοι βασίζονται σε διαμεταλλικές ενώσεις όπως το $SmCo_5$ και το $Nd_2Fe_{14}B$, ενώ στην δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιούνται και σημαντικές ποσότητες κυρίως Dy και Tb. Δεδομένης της μεγάλης ζήτησης σε Co για άλλες εφαρμογές καθώς επίσης και της μεγαλύτερης απόδοσης των μαγνητών με βάση το Nd, αναμένεται ότι σε λίγα χρόνια το Nd θα αποτελεί την πιο σημαντική σπάνια γαία και μία από τις πιο κρίσιμες πρώτες ύλες παγκοσμίως. Αυτό ισχύει και για το Dy και το Tb, λόγω του μικρού όγκου παραγωγής τους.

Φωτογραφία: Mika Baumeister

Από τα παραπάνω, προκύπτει το συμπέρασμα ότι χρειάζονται πολλές και διαφορετικές δράσεις ώστε η ανθρωπότητα να κατευθυνθεί σε πιο βιώσιμες τεχνολογίες και να βελτιωθεί το επίπεδο της ζωής μας, προστατεύοντας ταυτόχρονα το περιβάλλον. Χρειάζεται σοβαρή ερευνητική προσπάθεια στον τομέα της φυσικής της συμπυκνωμένης ύλης, έτσι ώστε να ανακαλυφθούν καινούργια, προηγμένα υλικά, τα οποία θα συνδυάζουν τις επιθυμητές ιδιότητες με χημική σύσταση συμβατή με τις ιδιαιτερότητες της παραγωγής των πρώτων υλών. Επίσης, πρέπει να επιταχυνθούν οι προσπάθειες για την ανακάλυψη νέων τεχνικών ανάκτησης και ανακύκλησης πρώτων υλών, καθώς πολλά τελικά προϊόντα τα οποία βασίζονται σε σπάνιες γαίες δεν μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν ενώ δεν είναι η δυνατή η εξαγωγή από αυτά των πρώτων υλών με οικονομικά βιώσιμο τρόπο. Πρέπει η εκμετάλλευση των ορυκτών πόρων να πραγματοποιείται με τον περιβαλλοντικά βέλτιστο τρόπο. Επίσης, πρέπει να ενταθούν οι προσπάθειες για εξάλειψη των οικονομικών ανισοτήτων και των πολιτικών που τις δημιουργούν και συχνά διαταράσσουν την ομαλή ροή της παραγωγής. Η διακρατική συνεργασία και η αποφυγή συγκρούσεων είναι απαραίτητες προϋποθέσεις ώστε η ανθρωπότητα να αντιμετωπίσει την κλιματική αλλαγή και να προχωρήσει σε ένα καλύτερο μέλλον.

Πηγές

- *L. Erdmann et al. Environ. Sci. Technol. 45 (2011) 7620–7630.*
- *A. Greenfield et al. Resour. Conserv. Recycl. 74 (2013) 1–7.*
- *K. Binnemans et al. J. Sustain. Metall. 4 (2018) 126–146.*
- *A. Filippas et al. Mater. Today Proc. 37, 4058–4063.*
- *Q. C. Wang et al. Resour. Conserv. Recycl. 184 (2022) 106417.*

Αφιέρωμα - Βραβείο Νόμπελ Φυσικής 2022

ο παράξενος κβαντικός μας κόσμος

Τάσος Χρ. Πέτκου
Καθηγητής
Τμήματος Φυσικής

Το **βραβείο Nobel φυσικής για το 2022** απονεμήθηκε στους **Alain Aspect, John Clauser** και **Anton Zeilinger** για πειράματα **κβαντικής σύμπλεξης** *με φωτόνια τα οποία κατέδειξαν την παραβίαση των ανισοτήτων του Bell και άνοιξαν τον δρόμο για την επιστήμη της κβαντική πληροφορίας.*

Εισαγωγή

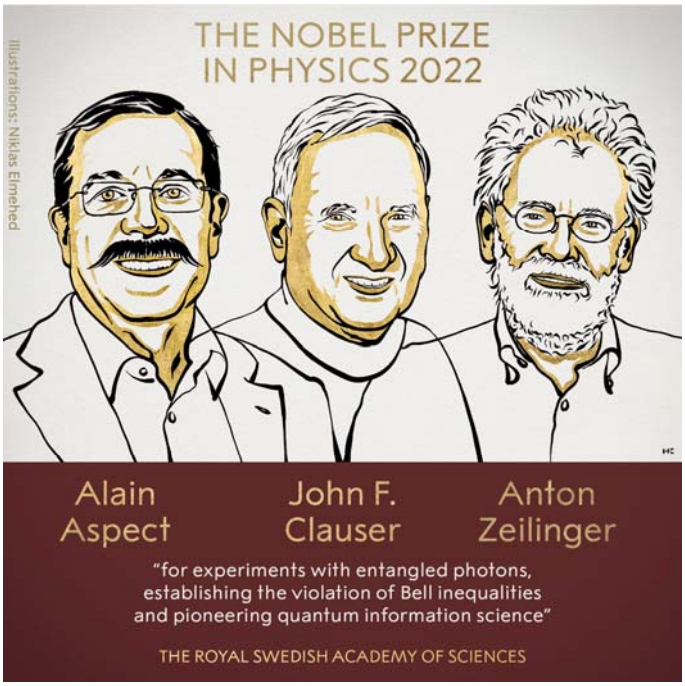
Η τεράστια πρόοδος της επιστήμης και της τεχνολογίας στις αρχές του 20ου αιώνα χρωστάει πολλά στην προγενέστερη της - και τελικά λανθασμένη - μηχανιστική αντίληψη για τον υλικό κόσμο όπως αυτή είχε διαμορφωθεί μετά την Αναγέννηση και τον Διαφωτισμό. Πράγματι, ήταν τέτοια η επιστημονική ορμή του νεωτεριστικού κόσμου στα τέλη του 19ου αιώνα που ήταν ζήτημα ορθολογικής τιμής να εξηγηθούν όλα ανεξαιρέτως τα τότε γνωστά φυσικά φαινόμενα με τις υπάρχουσες επιστημονικές θεωρίες. Η συνέχεια είναι γνωστή και διδάσκεται - μάλλον κακώς - ως «παλιά κβαντική θεωρία». Κεντρικός πρωταγωνιστής αυτής της περιόδου ήταν ο Max Planck του οποίου η κβαντική εξήγηση για την ακτινοβολία του μέλανος σώματος αποτελεί ένα από τα διαχρονικά πρότυπα επιστημονικής προόδου: ο ορθολογικός ιδεαλισμός υποκύπτει τελικά στην αντικειμενική φυσική πραγματικότητα.

Αμέσως μετά τον Planck, η νέα κβαντική αντίληψη για την δομή και λειτουργία της φύσης μπήκε σε στέρεες βάσεις ως αποτέλεσμα της συλλογικής δουλείας πολλών φωτισμένων επιστημόνων. Τα αποτελέσματα ήταν τόσο πολλά, τόσο προφανή και τόσο σημαντικά - στην χημεία, την φυσική της στερεάς κατάστασης, την πυρηνική φυσική μέχρι και την αστροφυσική - που δεν υπήρξε ποτέ χρόνος για μια σοβαρή επιστημονική συζήτηση που θα αφορούσε την ειδοποιό διαφορά της κβαντικής φυσικής σε σχέση με τον κλασικό μηχανιστικό κόσμο. Παρά τις αρχικές αψιμαχίες μεταξύ των ιερών τεράτων Bohr - Einstein, η κυρίαρχη αντίληψη για πολλές δεκαετίες συνοψίζονταν με το Αγγλοσαξωνικό *shut up and calculate* του Αμερικανού R. Feynman. Και όχι εντελώς άδικα: ότι και να υπολόγιζε σωστά κανείς με την κβαντική φυσική ήταν καινούργιο, ενδιαφέρον και κυρίως πειραματικά επιβεβαιώσιμο! Ειδικότερα μετά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο και την τρομακτική ανάπτυξη της επιστήμης των στοιχειωδών σωματιδίων αλλά και της τεχνολογίας των ημιαγωγών, η κβαντική επιστήμη έγινε η αδιαμφισβήτητη βασίλισσα των φυσικών επιστημών. Η κυριαρχία της μάλιστα έγινε τόσο μεγάλη που οδήγησε μερικούς από τους κορυφαίους σύγχρονους θεωρητικούς όπως ο E. Witten να απορρίπτουν απαξιωτικά την απονομή του βραβείου Nobel σε κάτι που «απλά θα επαναβεβαιώνει την κβαντομηχανική».

Το παράδοξο των Einstein-Podolsky-Rosen/Bohm και η κβαντική συμπλοκή

Η παραπάνω αντίληψη ίσως εξηγείται εν μέρη από την ρήση του ίδιου του Feynman που ομολογούσε ότι «*κανείς δεν καταλαβαίνει την κβαντομηχανική*». Ετσι, οι διάφορες προσπάθειες για την «κατανόηση» της κβαντομηχανικής αντιμετωπίζονταν για πάνω από μισό αιώνα περίπου ως φιλοσοφικές αναζητήσεις παρά ως επιστημονική έρευνα. Οπως όμως συνέβη και στις αρχές του 20ου αιώνα, η επιμονή για την «εξήγηση των πάντων» είναι μια βαθιά ριζωμένη αντίληψη στον νεωτερικό επιστημονικό κόσμο. Και όπως ακριβώς και στις πρώτες δεκαετίες του 1900, η αντίληψη αυτή οδήγησε σε μια αναπάντεχη πρόοδο προς μια κατεύθυνση διαμετρικά αντίθετη με τον αρχικό στόχο!

Ενα από τα πρώτα πράγματα που μαθαίνει κανείς στην κβαντομηχανική είναι ότι οι τιμές των φυσικών μεγεθών αντιστοιχούν σε ιδιοτιμές Ερμιτιανών τελεστών. Βασική αρχή της κβαντομηχανικής είναι ότι φυσικά μεγέθη που αντιστοιχούν σε τελεστές που δεν μετατίθενται, δεν μπορούν να μετρηθούν ταυτόχρονα: π.χ. δεν είναι δυνατόν να γνωρίζουμε την θέση και την ορμή ενός κβαντικού σωματίου. Σε μια διάσημη πλέον δημοσίευση το 1935, οι Einstein, Podolsky και Rosen σχεδίασαν ένα ιδεα-



τό πείραμα Gendankenexperiment που οδηγούσε σε κάποια εντελώς παράλογα - κατά την άποψή τους - συμπεράσματα. Η απλούστερη παρουσίαση της ιδέας των EPR έγινε μερικές δεκαετίες αργότερα από τον Bohm και είναι εύκολα εξηγήσιμη σε φοιτητές που έχουν διδαχθεί στοιχειώδη κβαντομηχανική. Θεωρούμε ένα σύστημα δύο σωματιδίων με σπιν 1/2 (π.χ. ηλεκτρονίων) στην κατάσταση singlet με ολικό σπιν μηδέν:

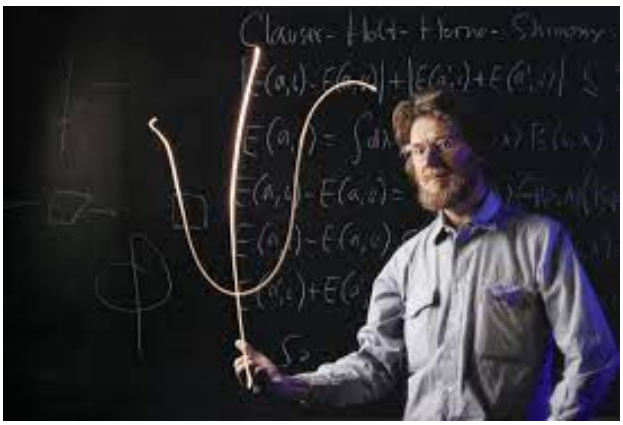
$$\psi = \frac{1}{\sqrt{2}}(\chi_+^{(1)}\chi_-^{(2)} - \chi_-^{(1)}\chi_+^{(2)}) \qquad (1)$$

Φανταζόμαστε μια διάταξη που παράγει τα δύο αυτά ηλεκτρόνια και τα οποία κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις. Μετά από ικανό χρόνο θα έχουν απομακρυνθεί αρκετά ώστε να θεωρήσουμε ότι δεν είναι δυνατόν να υπάρξει ακαριαία επικοινωνία μεταξύ τους. Οι φυσικές ιδιότητες των δύο απομακρυσμένων ηλεκτρονίων μετρούνται από δύο διαφορετικούς παρατηρητές που συνήθως αναφέρονται ως (A)lice και (B)ob. Αν η Alice μετρήσει το σπιν του ηλεκτρονίου (1) στην κατεύθυνση του άξονα z) και το βρει π.χ. 1/2, τότε αυτόματα ο Bob είναι βέβαιος ότι η δική του μέτρηση του σπιν στο ηλεκτρόνιο (2) κατά τον άξονα z θα δώσει ως αποτέλεσμα -1/2. Ομως η ιδιαίτερη μορφή της κατάστασης singlet μας επιτρέπει να την γράψουμε χρησιμοποιώντας ιδιοκαταστάσεις του σπιν γύρω από κάθε τυχαίο άξονα π.χ. γύρω από τον άξονα x ως:

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{2}}(\omega_+^{(1)}\omega_-^{(2)} - \omega_-^{(1)}\omega_+^{(2)}) \qquad (2)$$

Από το παραπάνω είναι προφανές ότι εάν η Alice μετρήσει το σπιν του ηλεκτρονίου (1) στην κατεύθυνση x και το βρει π.χ. 1/2, τότε ο Bob θα είναι βέβαιος ότι το ηλεκτρόνιο (2) έχει σπιν -1/2 στην ίδια διεύθυνση. Τα παραπάνω δημιουργούν το εξής παράδοξο: μετρώντας η Alice το σπιν του ηλεκτρονίου (1) στην διεύθυνση z δίνει στην ουσία την πληροφορία ότι το σπιν του ηλεκτρονίου (2) είναι -1/2 στην ίδια διεύθυνση. Αυτό φαίνεται να απαγορεύει στον Bob να μετρήσει το σπιν του ηλεκτρονίου (2) στην κατεύθυνση x, γιατί τότε θα μπορούσε να ξέρει ταυτόχρονα την τιμή του σπιν για το ηλεκτρόνιο του τόσο στον άξονα z όσο και στον άξονα x! πράγμα που απαγορεύεται από την κβαντομηχανική αφού οι τελεστές του σπιν σε διαφορετικούς άξονες δεν μετατίθενται!

Πως είναι δυνατόν να γνωρίζει ο Bob αν η Alice έχει μετρήσει το σπιν στον άξονα z έτσι ώστε να μην μπορεί να μετρήσει αυτός το σπιν στον άξονα x; Με άλλα λόγια, πως μεταφέρεται η κβαντική πληροφορία από την Alice στον Bob έτσι ώστε να συνεχίζει να ισχύει η κβαντομηχανική. Οι EPR οδηγήθηκαν σε δύο πιθανότητες: α) είτε η πληροφορία μεταδίδεται ακαριαία από την Alice στον Bob όσο μακριά και να βρίσκονται, β) είτε υπάρχουν «κρυφές μεταβλητές» στην κβαντομηχανική που επιτρέπουν στον Bob να γνωρίζει ακριβώς εάν η Alice έχει κάνει την μέτρηση ή όχι. Η πρώτη πιθανότητα είναι ασύμβατη με την σχετικιστική αιτιότητα η οποία μας λέει ότι δεν είναι δυνατόν να υπάρξει ακαριαία μετάδοση πληροφορίας σε χωρικά απομακρυσμένους παρατηρητές. Η δεύτερη πιθανότητα φαίνονταν πολύ πιο λογική στους EPR γιατί είναι μια έκφραση του «τοπικού ρεαλισμού» που είναι στην ουσία η μηχανιστική αντίληψη που μας λέει ότι είναι καταρχήν δυνατόν να γνωρίζουμε με απόλυτη βεβαιότητα την τιμή των φυσικών μεταβλητών του συστήματος μας έστω και αν αυτές δεν έχουν μετρηθεί. (Ο Einstein έλεγε χαριτολογώντας ότι θα ήθελε να γνωρίζει αν το φεγγάρι είναι στην θέση του ακόμη και αν δεν το κοιτάζει). Ετσι και ο Bob θα έπρεπε να ξέρει με κάποιον τρόπο αν μπορεί ή όχι να μετρήσει το σπιν του ηλεκτρονίου (2) στον άξονα των x! Η παραπάνω ιδέα του «τοπικού ρεαλισμού» θα έλυνε επίσης και το ¨παράδοξο' της γάτας του Schroedinger γιατί θα βρίσκονταν τρόπος μέσω των «κρυμμένων μεταβλητών» να γνωρίζουμε ακριβώς αν η γάτα είναι ζωντανή ή όχι.



Η ανισότητα Bell

Το παραπάνω παράδοξο δημιουργείται από την ιδιαίτερη μορφή της κατάστασης singlet των δύο ηλεκτρονίων. Η κατάσταση αυτή δεν μπορεί να γραφεί σαν ένα απλό τανυστικό γινόμενο των καταστάσεων των δύο σωματιδίων, και για αυτό τον λόγο ονομάζεται κατάσταση κβαντικής σύμπλεξης. Στην σύγχρονη γλώσσα της κβαντικής πληροφορίας τα δύο συμπλεγμένα ηλεκτρόνια είναι qubits και η μέτρηση της Alice λέμε ότι προετοιμάζει την στατιστική συλλογή των μετρήσεων του Bob.

Η παραπάνω συζήτηση ακούγεται αρκετά φιλοσοφική, έχει όμως ένα ουσιαστικό φυσικό νόημα το οποίο μπορεί να ελεγχθεί πειραματικά. Ολοι μας μαθαίνουμε ότι η μέγιστη δυνατή πληροφορία που μας δίνει η κβαντομηχανική για ένα φυσικό σύστημα είναι η **πιθανότητα** να βρούμε μια συγκεκριμένη τιμή ενός φυσικού μεγέθους όταν προσπαθήσουμε να το μετρήσουμε. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να θεωρηθεί η κβαντομηχανική ως απλά μια στατιστική περιγραφή της φύσης, σε απόλυτη αναλογία με την περιγραφή π.χ. της συμπεριφοράς ενός εκλογικού σώματος στις εκλογές. Είναι όμως έτσι; Οι EPR αλλά και πολλοί άλλοι διάσημοι επιστήμονες όπως για παράδειγμα ο Νομπελίστας G. 't Hooft δεν μπορούν να συμβιβαστούν με την ιδέα ότι είναι εντελώς αδύνατη η πλήρης κατανόηση ενός συστήματος το οποίο είναι χωρικά απομονωμένο και δεν έχει καμιά δυνατή επαφή με το περιβάλλον του. Ας πάρουμε για παράδειγμα ένα σωμάτιο με σπιν 1/2. Γνωρίζουμε ότι η γενική μορφή της κυματοσυνάρτηση (spinor) του είναι:

$$\chi = \cos\frac{\vartheta}{2}\chi_{+} + e^{i\varphi}\sin\frac{\vartheta}{2}\chi_{-} \qquad (3)$$

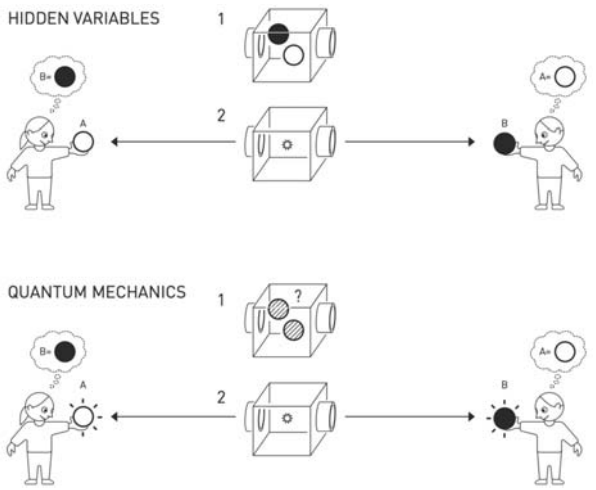
όπου $\chi_{\pm}$ είναι οι ιδιοσυναρτήσεις της z-συνιστώσας του σπιν και θ, φ οι πολικές και αζιμουθιακές γωνίες στον χώρο του σπιν. Η κβαντομηχανική μας λέει ότι η μέτρηση του σπιν στον άξονα των z θα μας δώσει τις τιμές ± ħ/2 με αντίστοιχες πιθανότητες $\cos^2(\vartheta/2)$ και $\sin^2(\vartheta/2)$. Αν όμως υπήρχε μια **κρυμμένη μεταβλητή λ** η οποία χαρακτήριζε την παραπάνω κατάσταση του σπιν και η οποία ήταν μια τυχαία στατιστική μεταβλητή έτσι ώστε

$$0 \le \lambda \le \cos^2(\vartheta/2)\,, \rightarrow \hbar/2$$

$$\vartheta/2 \le \lambda \le 1\,, \rightarrow -\hbar/2$$

τότε πράγματι η κβαντομηχανική θα ήταν εντελώς ισοδύναμη με μια απλή στατιστική ανάλυση. (Παρεμπιπτόντως, η παραπάνω απλοϊκή περιγραφή είναι αρκετή για να περιγράψει με αρκετή ακρίβεια ένα εκλογικό αποτέλεσμα αν παραμετροποιήσουμε το πρόβλημα με έναν μικρό αριθμό τυχαίων μεταβλητών λ και τους δώσουμε γνωστές στατιστικές κατανομές).

Εάν λοιπόν κάθε κβαντικό φαινόμενο μπορεί να παραμετροποιηθεί με κάποιες, έστω και αυτήν την στιγμή άγνωστες σε εμάς, **κρυμμένες μεταβλητές**, τότε η κβαντομηχανική δεν θα ήταν παρά στατιστική ανάλυση. Η συνεισφορά του J. S. Bell ήταν στο να προτείνει ένα ξεκάθαρο μαθηματικό και πιθανόν πειραματικό σχήμα όπου θα μπορούσε να ελεγχθεί η διαφορά στατιστικής ανάλυσης με την κβαντομηχανική περιγραφή .



Ενα κβαντικό παιχνίδι

Η Alice και ο Bob παίζουν ένα παιχνίδι όπου ο καθένας τους έχει από τρία διαφορετικά νομίσματα 1,2,3, με δύο όψεις, (Κ)ορώνα και (Γ)ράμματα μέσα σε ένα μαύρο κουτί. Καθένας τους έχει την δυνατότητα να διαλέξει ένα από τα τρία νομίσματα του και να διαβάσει τι βρήκε: π.χ. αν η Alice διαλέξει το νόμισμα 1 και η πάνω μεριά του είναι Γράμματα, τότε λέμε ότι έκανε την παρατήρηση (1,Γ). Ο κανόνας του παιχνιδιού είναι μόλις ένας τους κάνει την παρατήρηση για το ένα νόμισμα του, τα άλλα δύο νομίσματα του καταστρέφονται και δεν έχει καμιά δυνατότητα να διαβάσει σε τι κατάσταση (Κ) ή (Γ) ήταν. Αφού κάνουν το πείραμα πολλές φορές είναι ξεκάθαρο ότι θα βρίσκουν Κ ή Γ - ανεξάρτητα από το ποιο νόμισμα παρατήρησαν - με την ίδια ακριβώς πιθανότητα. (Π.χ. σε 1.000.000 παρατηρήσεις οι μισές περίπου θα είναι Κ και οι άλλες μισές Γ).

Μια βασική προϋπόθεση του πειράματος είναι ότι η Alice και ο Bob είναι τόσο μακριά ώστε οι παρατηρήσεις τους να είναι εντελώς ανεξάρτητες. Επομένως αν υποθέσει κανείς ότι οι παρατηρήσεις τις Alice καθορίζονται μόνο από τους νόμους τις στατιστικής ανάλυσης, τότε θα πρέπει να υπάρχει μια κατανομή πιθανότητας η οποία να τις εξηγεί. Η Alice, μπορώντας να διαλέξει μόνο το ένα από τα νομίσματα την κάθε φορά, δεν φαίνεται να έχει καμιά δυνατότητα να ανακαλύψει την κρυμμένη στατιστική κατανομή των νομισμάτων της. Ομως, ίσως ο Bob να μπορεί να την βοηθήσει - και εδώ έρχεται η κβαντική σύμπλεξη!

Αν λοιπόν υποθέσουμε ότι τα δύο σετ των νομισμάτων είναι κβαντικά συμπλεγμένα, τότε η μέτρηση που θα κάνει ο Bob θα καθορίσει μια από τις μετρήσεις της Alice. Για παράδειγμα, αν ο Bob παρατηρήσει την κατάσταση (3,Κ), τότε η Alice είναι απολύτως βέβαιη ότι αν σηκώσει το νόμισμα 3 θα το βρει στην κατάσταση Γράμματα! Θυμηθείτε τα δύο συμπλεγμένα ηλεκτρόνια: όταν το ένα βρίσκονταν στην κατάσταση με σπιν 1/2, το άλλο είναι αναγκαστικά στην κατάσταση με σπιν -1/2. Η παραπάνω υπόθεση της κβαντικής σύμπλεξης είναι η αδιαμφισβήτητη σφραγίδα της κβαντικής υπόστασης τους συστήματος μας.

Ο J. S. Bell προσπάθησε να εξηγήσει το κβαντικό σύστημα της Alice με στατιστική ανάλυση. Κάθε μέτρηση/παρατήρηση της Alice εμφανίζεται με μια αντίστοιχη πιθανότητα $P(a, b, c)$ - το νόμισμα 1 είναι στην κατάσταση a, το νόμισμα 2 στην b και το νόμισμα 3 στην c. Οι πιθανότητες των οκτώ (2^3) διαφορετικών παρατηρήσεων πρέπει να αθροίζονται στην μονάδα

$$\sum_{a=\{K,\Gamma\}} P(a,b,c) = 1 \qquad (4)$$

Θυμόμαστε τώρα ότι με την βοήθεια του Bob, η Alice μπορεί (α) να παρατηρήσει ένα από τα τρία νομίσματα και (β) να γνωρίζει ταυτόχρονα την παρατήρηση ενός δευτέρου νομίσματος - γιατί ο Bob έκανε ήδη την παρατήρηση και έχει καθορίσει το αποτέλεσμα για αυτό το δεύτερο. Επομένως η Alice μπορεί να παρατηρήσει δύο από τα νομίσματα της, το ένα άμεσα και το άλλο έχοντας πάρει την πληροφορία από τον Bob.

Η Alice θα ήθελε να δει ποια είναι η πιθανότητα να βρει στην ίδια κατάσταση, Κ, ή Γ, δύο από τα νομίσματα. Για τα τρία διαφορετικά ζεύγη νομισμάτων οι πιθανότητες είναι:

$$\tilde{P}(1,2) = P(K,K,K) + P(K,K,\Gamma) + P(\Gamma,\Gamma,\Gamma) + P(\Gamma,\Gamma,K)$$

$$\tilde{P}(1,3) = P(K,K,K) + P(K,\Gamma,K) + P(\Gamma,\Gamma,\Gamma) + P(\Gamma,K,\Gamma)$$

$$\tilde{P}(2,3) = P(K,K,K) + P(\Gamma,K,K) + P(\Gamma,\Gamma,\Gamma) + P(K,\Gamma,\Gamma)$$

Επομένως:

$$\tilde{P}(1,2)+\tilde{P}(1,3)+\tilde{P}(2,3) = 1 + 2P(K,K,K) + 2P(\Gamma,\Gamma,\Gamma) \ge 1 \quad (5)$$

- οι πιθανότητες είναι πάντα θετικοί αριθμοί! Το παραπάνω συμπέρασμα είναι ισοδύναμο με την απλή παρατήρη-

ση ότι τουλάχιστον δύο από τα τρία νομίσματα πρέπει να βρίσκονται στην ίδια κατάσταση: είτε στην Κ είτε στην Γ.

Τι προβλέπει η κβαντομηχανική για το παραπάνω πείραμα/παιχνίδι; Η Alice και ο Bob μελετάνε δύο ηλεκτρόνια που περιγράφονται από την κατάσταση σύμπλεξης (1). Για την ακρίβεια, μπορούμε να σκεφτούμε ότι έχουμε φτιάξει μια μηχανή που παράγει αυτό το ζεύγος την συμπλεγμένων ηλεκτρονίων τα με τα οποία πειραματίζονται η Alice και ο Bob ευρισκόμενοι σε δύο διαφορετικά εργαστήρια μακριά το ένα από το άλλο ώστε οι τα πειράματα του ενός να επηρεάσουν τα πειράματα του άλλου. Αυτή ακριβώς ήταν και η ουσία των πειραμάτων με συμπλεγμένα φωτόνια που έδωσε το Nobel στους Aspect, Clauser και Zeilinger!

Οι Alice και Bob έχουν στην διάθεσή τους μετρητές τύπου Stern - Gerlach που μετρούνε το σπιν των ηλεκτρονίων που εισέρχεται στο εργαστήριο τους στο επίπεδο *x-z* και στην διεύθυνση ενός τυχαίου άξονα με μοναδιαίο διάνυσμα $\hat{n}$. Από την βασική μας γνώση της κβαντομηχανικής μαθαίνουμε ότι οι επαναλαμβανόμενες μετρήσεις σε κβαντικά συστήματα που περιγράφονται από την ίδια κατάσταση, ενός φυσικού μεγέθους που αντιστοιχεί σε κάποιον Ερμιτιανό τελεστή, δίνονται από την μέση τιμή του τελεστή στην αντίστοιχη κατάσταση. Στην περίπτωση της Alice και του Bob οι μετρήσεις τους θα δίνονται από την μέση τιμή τελεστών της μορφής $\hat{n}\cdot\vec{\sigma}$ όπου $\vec{\sigma}$ είναι οι πίνακες του Pauli στην κατάσταση σύμπλεξης (1). Πιο συγκεκριμένα, οι μετρήσεις τους αντιστοιχούν στις μέσες τιμές των προβολικών τελεστών της μορφής:

$$\Pi(\hat{n},\pm)=\frac{1}{2}(1\pm\hat{n}\cdot\vec{\sigma})$$

στις δύο κατευθύνσεις που ορίζονται από την διεύθυνση του διανύσματος $\hat{n}$. Επιπλέον, επειδή η κατάσταση (1) έχει ολικό σπιν ίσο με μηδέν ισχύει

$$(\sigma_i^{(A)}+\sigma_i^{(B)})\psi=0, \qquad i=x,y,z$$

πράγμα που σημαίνει ότι αντικαθιστώντας τον τελεστή $\sigma_i^{(B)}$ με $-\sigma_i^{(A)}$ μπορούμε να υπολογίσουμε την πιθανότητα δύο μετρήσεων σε δυο διαφορετικούς άξονες της Alice (ή του Bob αντίστοιχα). Αυτές ακριβώς τις πιθανότητες χρειαζόμαστε για να συγκρίνουμε με την στατιστική ανάλυση της (5) !

Έστω ότι ζητώ τις κβαντομηχανικές πιθανότητες να μετρήσει η Alice το σπιν του σωματίου της στις κατευθύνσεις δύο διαφορετικών αξόνων με μοναδιαία διανύσματα $\hat{a}$ και $\hat{b}$. Αυτές είναι οι:

$$P(+,+)=\left\langle\chi\middle|\Pi(\hat{a},+)\Pi(\hat{b},+)\middle|\chi\right\rangle=\frac{1}{4}(1-\cos\vartheta)$$

$$P(-,-)=\left\langle\chi\middle|\Pi(\hat{a},-)\Pi(\hat{b},-)\middle|\chi\right\rangle=\frac{1}{4}(1-\cos\vartheta)$$

$$P(+,-)=\left\langle\chi\middle|\Pi(\hat{a},+)\Pi(\hat{b},-)\middle|\chi\right\rangle=\frac{1}{4}(1+\cos\vartheta)$$

$$P(-,+)=\left\langle\chi\middle|\Pi(\hat{a},-)\Pi(\hat{b},+)\middle|\chi\right\rangle=\frac{1}{4}(1+\cos\vartheta)$$

όπου $\vartheta = \hat{a}\cdot\hat{b}$. Βλέπουμε ότι οι πιθανότητες να βρει η Alice τις ίδιες ή τις αντίθετες τιμές Κ ή Γ είναι αντίστοιχα ίσες με:

$$P_s = P(+,+)+P(-,-)=\frac{1}{2}(1-\cos\vartheta)$$

$$P_d = P(+,-)+P(-,+)=\frac{1}{2}(1+\cos\vartheta)$$

Πρέπει αυτή τη στιγμή να είναι φανερό ότι οι διαφορετικές διευθύνσεις των αξόνων του πειράματος Stern-Gerlach της Alice και του Bob αντιστοιχούν στα διαφορετικά νομίσματα του προηγούμενου παιχνιδιού, και οι δύο διαφορετικές κατευθύνσεις του κάθε άξονα στις καταστάσεις Κ ή Γ. Εχοντας λοιπόν την δυνατότητα να διαλέξει τρεις διευθύνσεις για το πείραμα Stern-Gerlach που πραγματοποιεί, επιλέγει στο επίπεδο *x-z* τον άξονα των *z* και δύο άλλους άξονες που σχηματίζουν γωνίες ±π/3 με τον θετικό άξονα των *z*. Αυτοί οι άξονες αντιστοιχούν σε 6 διαφορετικά μοναδιαία διανύσματα. Αν τώρα επιλέξει η Alice να μετρήσει το σπιν κατά μήκος τριών διαφορετικών ζευγών των παραπάνω 6 μοναδιαίων διανυσμάτων, έτσι ώστε ανά δύο να σχηματίζουν γωνίες π/3, τότε οι 3 διαφορετικές μετρήσεις που θα κάνει θα δώσουν την ίδια τιμή Κ ή Γ με πιθανότητα 1/4 η καθεμιά τους! Στην πράξη, ή Alice μετράει πάρα πολλές φορές το σπιν στις 6 διαφορετικές κατευθύνσεις (αυτό μπορεί να κάνει μόνο πειραματικά) και καταγράφει τα αποτελέσματα. Ομαδοποιεί τις μετρήσεις της που δίνουν το ίδιο Κ ή Γ στις κατευθύνσεις δύο διαφορετικών αξόνων και παρατηρεί ότι αυτές αντιστοιχούν στα 3/4 των συνολικών παρατηρήσεων! Αυτό είναι βέβαια σε πλήρη αντίθεση με την στατιστική ανάλυση που οδήγησε στην ανισότητα Bell (5)!

Η ανισότητα Bell (5) είναι μια εξαιρετικά απλή εφαρμογή των βασικών νόμων των πιθανοτήτων. Η παραβίαση της μας οδηγεί αναγκαστικά στο συμπέρασμα ότι τα κβαντικά συστήματα δεν περιγράφονται από στατιστικούς νόμους: η κβαντομηχανική δεν είναι στατιστική ανάλυση! Η ειδοποιός διαφορά της κβαντομηχανικής από την κλασική φυσική είναι η **κβαντική σύμπλεξη.** Τα πειράματα των Clauser, Aspect και Zeilinger έδειξαν με τον πιο κατηγορηματικό τρόπο ότι τα κβαντικά συμπλεγμένα συστήματα δεν μπορούν να περιγράφουν από στατιστικές κατανομές και επομένως απέρριψαν οριστικά τις θεωρίες των κρυμμένων μεταβλητών. Αν απορρίψουμε την δυνατότητα ανταλλαγής πληροφορίας μεταξύ της Alice και του Bob με ταχύτητα μεγαλύτερη του φωτός, τότε η μόνη δυνατή εξήγηση που φαίνεται να υπάρχει είναι η ιδιότητα της μη-τοπικότητας (non-locality) της κβαντικής σύμπλεξης. Επομένως, για μια φορά ακόμη επιβεβαιώνονται οι πατέρες της κβαντομηχανικής, σαν τον Bohr και τον Schrodinger που διατύπωσαν το αξίωμα ότι κανένα κβαντικό σύστημα δεν έχει φυσικό νόημα χωρίς να ληφθεί υπόψιν η μετρητική μηχανή π.χ. ο άνθρωπος. Ίσως τελικά το φεγγάρι να μην είναι εκεί όταν δεν το παρατηρούμε …… αλλά αυτό θα το κρίνει η επιστημονική πρόοδος του μέλλοντος.

Πηγές

- *N.D. Mermin "Bringing home the atomic world: Quantum mysteries for anybody", Am. J. Phys. 49 (1981) 940–943.*
- *A. Aspect, "Bell's inequality test: more ideal than ever", Nature 398 (1999) 189–190.*

φοιτητές του ΑΠΘ εκτοξεύουν ...δορυφόρο

Στις αρχές Δεκεμβρίου 2022 εγκρίθηκε η συμμετοχή του νανοδορυφόρου AcubeSAT της φοιτητικής ομάδας ASAT του Α.Π.Θ. στο πρόγραμμα «Fly Your Satellite!» του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (ESA). Πρόκειται για μία από τις τρεις αποστολές που εγκρίθηκαν πανευρωπαϊκά, μέσα από μια απαιτητική διαδικασία επιλογής – ουσιαστικά, το σχεδιασμό από το μηδέν μιας κανονικής διαστημικής αποστολής.

Η ομάδα ASAT που σχεδίασε και θα υλοποιήσει το νανοδορυφόρο αποτελείται από 35 προπτυχιακούς φοιτητές του Α.Π.Θ., **11 εκ των οποίων προέρχονται από το Τμήμα Φυσικής**. Πρόκειται για τους:

Ανθόπουλο Ασημάκη, Γεωργούση Μαίρη, Λίτσιου Ευδοξία, Μακρή Γρηγόριο, Μιμίκο Κυριάκο, Παρπλαπάνη Ζωή, Παυλίδη Βασίλειο, Ρετσέλη Αναστάσιο - Φαίδων, Στούπη Δημήτριο και Χαδόλια Μιχαήλ.

Η αποστολή του AcubeSAT είναι να μελετήσει την επίδραση του διαστημικού περιβάλλοντος σε ευκαρυωτικά κύτταρα. Εφόσον περάσει με επιτυχία όλες τις προβλεπόμενες δοκιμές, το AcubeSAT θα είναι ο πρώτος δορυφόρος που θα υλοποιηθεί εξ' ολοκλήρου στο Α.Π.Θ. και θα εκτοξευθεί στα τέλη του 2022 με αρχές 2023 από την πλατφόρμα του Διεθνούς Διαστημικού Σταθμού (ISS). Λεπτομέρειες για την αποστολή βρίσκονται στον ακόλουθο σύνδεσμο: **https://asat.gr/cubesat/**

Πέρα από τη συμμετοχή των φοιτητών του Α.Π.Θ. στην ASAT, το τμήμα Φυσικής έπαιξε συμβουλευτικό ρόλο στην υλοποίηση αυτής της προσπάθειας. Την προσπάθεια των φοιτητών στήριξαν έμπρακτα οι καθηγητές του τομέα Αστρονομίας, Αστροφυσικής και Μηχανικής, **Γιώργος Βουγιατζής** και **Μένιος Τσιγάνης** και του τομέα Πυρηνικής Φυσικής και Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων **Χρήστος Ελευθεριάδης**, **Αναστάσιος Λιόλιος** και **Στυλιανός Στούλος**.

The SpaceDot Team is composed of students from the Aristotle University of Thessaloniki. SpaceDot is developing a CubeSat to conduct a biological experiment that investigates molecular mechanisms that are affected by the space conditions. In particular, they will probe the dynamic regulation of gene expression of eukaryotic cells in Low Earth Orbit, using advances in Synthetic Biology and micro-electro-mechanical systems (MEMS).

https://spacedot.gr/

Θερμά συγχαρητήρια στους φοιτητές του τμήματος για την μεγάλη αυτή επιτυχία και καλή επιτυχία στην υλοποίηση της αποστολής και ακόμη μεγαλύτερες επιτυχίες στο μέλλον! Συγχαρητήρια επίσης και στους καθηγητές του τμήματος που στηρίζουν αυτή τη σπουδαία προσπάθεια.

Πληροφορίες στο σύνδεσμο: www.esa.int/Education/CubeSats_-_Fly_Your_Satellite/New_CubeSat_missions_selected_for_the_third_cycle_of_Fly_Your_Satellite

ημερολόγιο αποστολής.....part 2

το ταξίδι του Αρκτούρου συνεχίζεται: αστρονομικές και ναυτικές ιστορίες στην άλλη μεριά της Γης

Παντελής Παπαδόπουλος
Αναπληρωτής Καθηγητής
Τμήματος Φυσικής

Ήταν άλλη μια αποστολή στα Αστεροσκοπεία του Mauna Kea στο νησί Χαβάη στα 4100 μέτρα υψόμετρο για παρατηρήσεις σε πολύ υψηλές συχνότητες με το James Clerk Maxwell Telescope (JCMT), ένα ραδιοτηλεσκόπιο κατασκευασμένο από Ηνωμένο Βασίλειο, Καναδά και Ολλανδία και μετά με το συμβολόμετρο SMA (Smithsonian Millimeter Array) του Harvard (Smithsonian Institute) και της Ταιβάν.

Άρχισε όπως συνήθως, με ένα email από την TAC (Time Allocation Committee) ότι έχει δοθεί χρόνος παρατηρήσεων στο πρόγραμμά μας, μετά από αξιολόγηση του από 5-6 ανώνυμους διαιτητές, μαζί με εκατοντάδες άλλα προγράμματα. Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα απαιτητική αφού στα μεγάλα τηλεσκόπια αιχμής όπως αυτά στο Mauna Kea, ή στην έρημο Ατακάμα στην Βόρεια Χιλή, μόνο περίπου 1 στα 10 προγράμματα γίνονται αποδεκτά. Όταν αυτό συμβεί τότε το Πανεπιστήμιο ή το ερευνητικό κέντρο στο οποίο είναι βασισμένος ο ερευνητής χρηματοδοτεί αυτόματα όλη την αποστολή (μεταφορικά συν διαμονή στις βάσεις των διαφόρων τηλεσκοπίων). Πολλές φορές η υποχρέωση όμως είναι ότι ο ερευνητής και τα διάφορα μέλη της ομάδας του θα πρέπει να εκτελέσουν και τα προγράμματα άλλων ερευνητικών ομάδων. Σε ένα τυπικό Observing Run το πλήρωμα στην αίθουσα ελέγχου ενός μοντέρνου ττηλεσκοπίου αποτελείται από ερευνητές που έχουν έρθει από τα διάφορα Πανεπιστήμια και Ερευνητικά κέντρα, αλλά και από προσωπικό υποστήριξης από την τεχνική βάση του τηλεσκοπίου. Στην περίπτωση του JCMT αυτή ήταν το Joint Astronomy Center (JAC) στην πόλη του Hilo, στο ανατολικό τμήμα της Χαβάης.

Ακτογραμμή από την μεριά της ακτής Hamakua.

Ο Αρκτούρος (Hokulea), στα ανοιχτά κάπου στην ακτή της Hamakua, Ειρηνικός Ωκεανός, Χαβάη.

Μετά μια 20+2 ώρες πτήση από το βροχερό Άμστερνταμ στο Hilo, μέσω Los Angeles και Honolulu στο Oahu (νησί του νησιωτικού συμπλέγματος της Χαβάης) φτάσαμε στο μικρό αεροδρόμιο του Hilo, ένα από αυτά που κατεβαίνεις από το αεροπλάνο στην πίστα, και περπατάς προς την έξοδο. Όταν

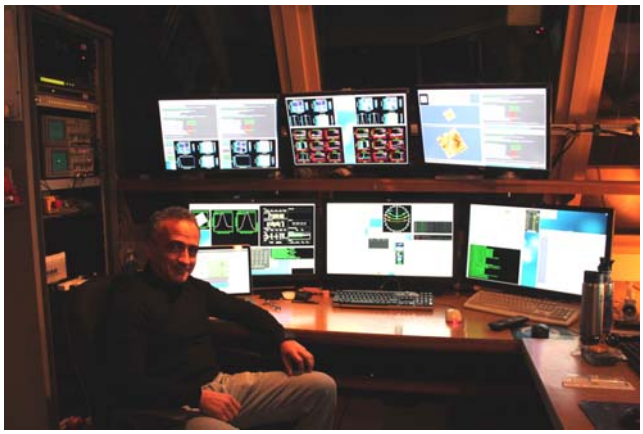
Το τηλεσκόπιο JCMT σε υψόμετρο 4100 μέτρων στο Mauna Kea της Χαβάης. Μπροστά του φαίνεται, για λόγους σύγκρισης, το 4x4 με το οποίο μετακινούμαστε μεταξύ της προκεχωρημένης βάσης στα 3100 μέτρα στο Hale Pohaku, και στα Αστεροσκοπεία στο πλατώ της κορυφής. Η υπερκατασκευή περιέχει ένα ραδιοτηλεσκόπιο υψηλών συχνοτήτων διαμέτρου 15 μέτρων.

άνοιξε η πόρτα του αεροπλάνου για να κατεβούμε, μας χτύπησε το πρόσωπο ο τροπικός απαλός θαλασσινός αέρας και το φώς της Βόρειας Πολυνησίας μας πλημμύρισε. Πάντα αυτό μου προξενούσε το ίδιο πρωτόγνωρο αίσθημα ακόμα και μετά από 20 χρόνια αποστολών σε αυτό το νησιωτικό σύμπλεγμα: "Ο κόσμος αυτός είναι καινούργιος, χτες μόλις ανακαλύφθηκε από τον Άνθρωπο". Δεν είναι μόνο η παντού ενεργή γεωλογία του, όπως την συνοψίζει το μεγάλο ηφαίστειο της Kilauea (ένα από τα πιο ενεργά του πλανήτη με την λάβα του να χύνεται διαρκώς στον απέραντο Ειρηνικό Ωκεανό), αλλά ένα άλλο περίεργο αίσθημα, που παρόμοιό του δεν ένιωσα σε άλλα απομακρυσμένα μέρη της Γής όπου βρίσκονται ερευνητικά τηλεσκόπια όπως τα Κανάρια Νησιά, ή τα υψίπεδα του St. Augustin στο Νέο Μεξικό (USA). Τα νησιά της Χαβάης είναι η γεωλογικά πιο πρόσφατη στεριά στον πλανήτη μας αφού πριν από περίπου 13 εκατομμύρια χρόνια (ένα "πετάρισμα" φλεβάρου για γεωλόγους), ήταν ακόμα κάτω από τον Ωκεανό, με τις ηφαιστειακές δυνάμεις που τα "γέννησαν" να τα σπρώχνουν προς τα επάνω. Ίσως όμως αυτή η αίσθηση της τελευταίας Νέας Γής να αναδίνεται γιατί τα νησιά αυτά ήταν και η τελευταία στεριά που εποίκησε ο Άνθρωπος στον πλανήτη, στο τελευταίο, πιο δύσκολο αλλά και θρυλικό Βήμα, το μοναδικό που έγινε αποκλειστικά πάνω από Θάλασσα (όλα τα άλλα μέρη του πλανήτη εποικίστηκαν με πορεία σε στεριά). Ο εποικισμός των νησιών αρχιπελάγους της Χαβάης, αυτού του πιο μακρινού μέρους της Ωκεανίας, και του πιο απομονωμένου νησιωτικού συμπλέγματος στον πλανήτη, έγινε μόλις το 900-1000 μΧ. Ίσως για αυτό, πολλές φορές πιάνω τον εαυτό μου σιωπηλά να περιμένει στον μακρινό ορίζοντα να φανούν, με τα πανιά τους φουσκωμένα, τα "Adventure" και "Resolution", τα δύο πλοία του Άγγλου καπετάνιου James Cook, που έκαναν την ύπαρξη αυτών των νησιών της Βόρειας Πολυνησίας γνωστή στην Ευρώπη μόλις το 1778!

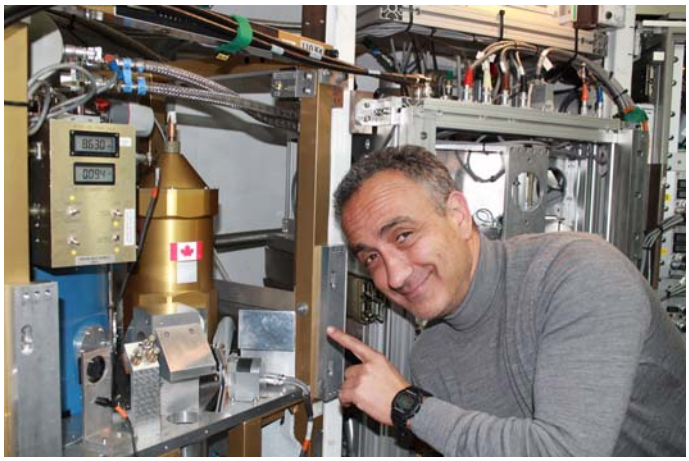
Προχωρήσαμε στο ξενοδοχείο μας όπου θα μέναμε 1-2 μέρες προτού ξεκινήσουμε την αποστολή μας

Το JCMT την νύχτα, με την χαρακτηριστική του μεμβράνη GorTex, διάφανη στα ραδιοκύματα, που το προστατεύει από τα στοιχεία της Φύσης (άνεμο, σκόνη, χιόνι).

Αλλο ένα από τα τηλεσκόπια του Mauna Kea, το περίφημο Keck, το πιο μεγάλο οπτικό τηλεσκόπιο του πλανήτη με 10 μέτρα αντικειμενικό κάτοπτρο.



Τμήμα του Telescope Operations Room, James Clerk Maxwell Telescope (JCMT), Hawaii.



Τμήμα του κρυογενικά ψυχόμενου ραδιο-δέκτη HARP-B, εγκαταστημένου στο JCMT από το Herzberg Institute for Astrophysics (HIA) του Καναδά. Μοντέρνα τηλεσκόπια έρευνας έχουν πάντα μια μεγάλη συλλογή οργάνων τοποθετημένα εκεί τα οποία εξυπηρετούν διαφορετικά επιστημονικά προγράμματα και στόχους, και κάποια αυτά μπορούν ακόμα και να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα. Την κατασκευή και τοποθέτησή τους συνήθως αναλαμβάνουν οι χώρες που έχουν συνεργαστεί για να κατασκευάσουν το συγκεκριμένο τηλεσκόπιο. Πολλές φορές όμως φιλοξενούνται και όργανα/δέκτες από ερευνητικές ομάδες που δεν ανήκουν στο αρχικό σύνολο των χωρών που κατασκεύασαν τα τηλεσκόπια, είναι τα λεγόμενα guest instruments, πολύτιμα για τα τηλεσκόπια πρώτης γραμμής που πρέπει συχνά να ανανεώνουν τις δυνατότητές τους.

Μερικά από τα ραδιοτηλεσκόπια του συμβολομέτρου υψηλών συχνοτήτων SMA (Smithsonian Millimeter Array). Σε αντίθεση με τα οπτικά, τα ραδιοτηλεσκόπια μπορούν να παρατηρούν και κατά την διάρκεια της ημέρας, επεκτείνοντας τις τυπικές βάρδιες σε αυτά από 15-16 ώρες (για τις υψηλές συχνότητες) μέχρι και για όλη την διάρκεια του 24ώρου για τις χαμηλές.

Το βουνό Mauna Kea με όλη την αίγλη των 4100 μέτρων χιονισμένων κορυφών του υψώνεται πάνω από την μικρή πόλη του Hilo (όπου βρίσκονται οι βάσεις σε επίπεδο θαλάσσης των περισσότερων Αστεροσκοπείων εκεί πάνω). Η δραματική αλληλουχία κλιματικών ζωνών φαίνεται με μία ματιά, από το τροπικό κλίμα ενός νησιού του Ειρηνικού στους πρόποδές του, μέχρι και τα χιόνια στα συχνά παγωμένα υψίπεδα των κορυφών του όπου αχνοφαίνονται και κάποιοι θόλοι τηλεσκοπίων (με το μεγαλύτερο που φαίνεται να είναι το CFHT Canada France Hawaii Telescope).

στα αστεροσκοπεία πάνω στο Mauna Kea. Στον δρόμο για το Hilo και το ξενοδοχείο, ο Ειρηνικός Ωκεανός έδινε πολλές φορές το βροντερό του "παρών!", με την μεγάλη του ρεστία να αναλώνεται βροντερά και αφρισμένα στα μαύρα βράχια της ηφαιστειακής ακτής. Αυτό συμβαίνει ακόμα και με παντελή απουσία ανέμου, αποτέλεσμα κάποιας μακρινής καταιγίδας, ίσως τόσο μακρινής όσο τα Aleutians (νησιά κοντά στην μακρινή Αλάσκα). Με καμία στεριά να παρεμβάλλεται ώστε να "σπάσει" ή έστω να αδυνατίσει τα κύματα πρώτου φτάσουν στην Χαβάη, αυτά μπορούν να φτάσουν στις ακτές της σχεδόν το ίδιο γιγάντια, αλλά χωρίς τον άνεμο της μακρινής καταιγίδας που τα γέννησε. Αυτό είναι άλλο ένα χαρακτηριστικό του Ειρηνικού Ωκεανού που δεν το συναντά κανείς σε περίκλειστες θάλασσες αν αυτή της Μεσογείου, όπως και εκείνο το αμυδρά πιο θαμπό διάχυτο φώς του Ήλιου, φώς σαν να το βλέπει κανείς μέσω εκείνων των ειδικών φακών που βάζουμε στις φωτογραφικές μηχανές για να βγουν μυστηριακά και ελαφρά θαμπά τοπία. Τέτοιο είναι το φώς που διαχέει τα τοπία, ειδικά από την μεριά της πιο υγρής ακτής της Hamakua, αποτέλεσμα της διάχυσης που προξενεί στο φώς η σημαντική τροπική υγρασία σε αυτά τα μέρη του νησιού.

Τις άλλες δύο μέρες ακολούθησε μία ενημέρωση για την κατάσταση των διαφόρων λειτουργικών συστημάτων του JCMT από τους μηχανικούς και τους υπόλοιπους τεχνικούς του προσωπικού της βάσης υποστήριξης στο επίπεδο Θαλάσσης στο Hilo. Την τρίτη ήμερα, με ένα από τα αυτοκίνητα του JAC, ανεβήκαμε για το υποχρεωτικό 24-ωρο εγκλιματισμού την προκεχωρημένη βάση στα 3100 μέτρα στο Hale Pohakou (Πέτρινο Σπίτι στα Χαβανέζικα), μετά από αυτό θα ήμασταν πια έτοιμοι για την αρχή του 10-

Πανοραμική εικόνα των Αστεροσκοπείων του Mauna Kea, μετά από μία τυπική χιονοθύελλα στα 4000 μέτρα υψόμετρο, ενώ ο καιρός στο επίπεδο Θαλάσσης παραμένει σταθερά τροπικός (30-35 °C), όπως σε ένα τυπικό νησί του Ειρηνικού κοντά στον Ισημερινό.

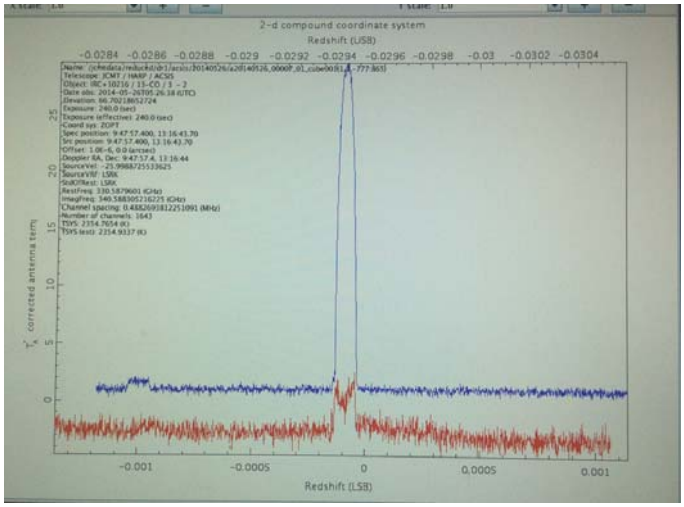
ήμερου προγράμματος μας. Όσο κρατά το πρόγραμμα δεν πρέπει να κατέβουμε σε επίπεδο Θαλάσσης για να μην χαθεί ο απαραίτητος εγκλιματισμός μας και έτσι ύπνος και διατροφή είναι πάντα στην βάση του Hale Pohaku.

Το "εξωτερικό" πλήρωμα του JCMT στην συγκεκριμένη αποστολή αποτελούνταν από εμένα από το Astrophysics Division της ESA (European Space Agency) και μία ερευνήτρια από το UCL (University College London), ενώ ο Δρ. Per Friberg, Σουηδός και ο Jim Hoge ως TSS (=Telescope System Specialist) παρείχαν την τεχνική και επιστημονική υποστήριξη από το JAC. Οι νυχτερινοί ουρανοί στο Mauna Kea είναι απίστευτοι και κάποιος μπορεί να αποκτήσει την αίσθηση ότι μπορεί να "πέσει" προς τον Ουρανό αν κοιτά για αρκετή ώρα προς τα επάνω. Δεν υπάρχει βέβαια πάντα ο χρόνος για τέτοιες ρομάντσες ειδικά όταν κάποιος κάνει 14-16-ωρες βάρδιες σε αυτά τα υψόμετρα, περιστοιχισμένος από 5+ οθόνες ανά άτομο, οι οποίες παρακολουθούν διαρκώς τις ζωτικές λειτουργίες των διαφόρων συστημάτων και υποσυστημάτων ενός μοντέρνου τηλεσκοπίου έρευνας πρώτης γραμμής. Στην ένταση της στιγμής πρέπει να προσθέτει το γεγονός ότι το επιστημονικό πρόγραμμα που μπορεί να εκτελείται να είναι κάποιου άλλου ερευνητή ή και διδακτορικού φοιτητή σε κάποιο μακρινό Πανεπιστήμιο ή ερευνητικό κέντρο του πλανήτη, για τους οποίους οι μετρήσεις είναι ιδιαίτερα πολύτιμες ή ακόμα και η βάση ενός διδακτορικού. Με αυτούς συνήθως να μην είναι παρόντες ή "παρόντες" μόνο σε remote-mode (αλλά σε τόσο διαφορετική ζώνη ώρας που να μπορούν να παρακολουθήσουν τις μετρήσεις μόνο για κάποια περιορισμένα διαστήματα), η ευθύνη για την επιτυχία του προγράμματός τους είναι όλη δική μας. Αυτό είναι η αιτία τέτοιας έντασης δουλειάς εκεί ψηλά που έρχεται σε ασυνέχεια με την βαθιά αστερόφωτη βραδιά έξω από τα control rooms των τηλεσκοπίων έρευνας.

Εκείνη την βραδιά όμως όλα πήγαιναν καλά, και μετά από έναν σύντομο περίπατο κάτω από τα άστρα του Mauna Kea δίπλα από τον "θόλο" του JCMT γύρισα στο control room, στην οθόνη όπου εμφανίζονταν το φάσμα ενός άστρου με το εκτεταμένο του "φλοιό" πλούσιο σε άνθρακα και το μόριο CO. Όλα τα συστήματα/υποσυστήματα φαίνονταν εντάξει και σε μία σπάνια στιγμή χαλάρωσης μπόρεσα να συγκεντρωθώ σε μία εκπομπή που είχε βάλει ο Jim (TSS) να παίζει χαμηλόφωνα στον δικό του computer. Ήταν ο τοπικός σταθμός του Hilo:

"The ocean-going canoe Hokulea, after a few trial sails, has entered the port of Hilo with her crew from around Polynesia...."

(συνεχίζεται...)
(Hokulea = Αρκτούρος στα Χαβανέζικα)

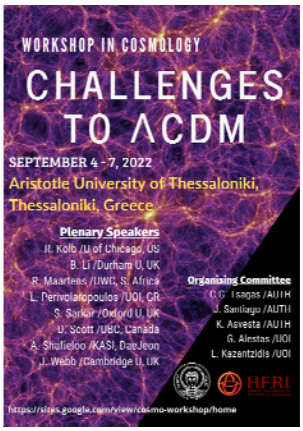


Φάσμα του μορίου CO από το πλούσιο σε C άστρο IRC 10216, ~300 έτη φωτός μακριά.

Το τέλος μιας μεγάλης βάρδιας στο JCMT (αρκετά αργότερα από όλα τα υπόλοιπα οπτικά και υπέρυθρα τηλεσκόπια του Mauna Kea) είναι πάντα μια ωραία στιγμή ειδικά αν έχεις συλλέξει μοναδικά δεδομένα την προηγούμενη βραδιά. Μας χωρίζουν μόνο 40 λεπτά οδήγησης πίσω στην βάση μας στα 3100 μετρά στο Hale Pohaku, και τις θρυλικές ομελέτες του αρχι-μάγειρου Steve Garcia (τις οποίες παραγγέλνουμε με τα υλικά που θέλουμε ήδη πριν κατέβουμε στην βάση μέσω του συστήματος ενδοεπικοινωνίας τηλεσκοπίων και Hale Pohaku) και ύπνο στα δωμάτια μας. Την επόμενη νύχτα θα είμαστε πάλι εκεί πάνω...

Τέλος αποστολής

Workshop in Cosmology: Challenges to ΛCDM (4-7/9/2022)

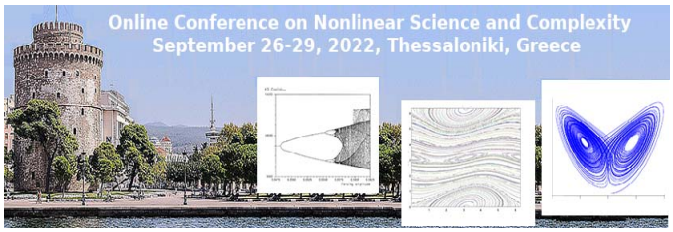


Οι πρόσφατες παρατηρήσεις έχουν πυροδοτήσει νέες συζητήσεις στην κοσμολογικής κοινότητα με δυνητικά κομβικές και εκτεταμένες επιπτώσεις. Ο καταλύτης για τη συνεχιζόμενη συζήτηση φαίνεται να είναι οι μέχρι στιγμής ανεξήγητες διαφορές μεταξύ των πρώιμων και των όψιμων μετρήσεων της σταθεράς Hubble. Επίμονες αναφορές για μαζικές ιδιόμορφες κινήσεις μεγαλύτερες και ταχύτερες από ό,τι αναμενόταν, καθώς και για ανώμαλες διπολικές ανισοτροπίες των απομακρυσμένων ραδιοπηγών, έχουν προστεθεί στη συζήτηση. Ως αποτέλεσμα, ένας αυξανόμενος αριθμός κοσμολόγων επανεξετάζει την κατάσταση του τρέχοντος κοσμολογικού μοντέλου, του Καθιερωμένου Πρότυπο ή ΛCDM. Συνοψίζοντας, φαίνεται ότι ίσως ήρθε η ώρα να αναθεωρήσουμε ορισμένες από τις μακροχρόνιες απόψεις και αντιλήψεις μας σχετικά με το σύμπαν στο οποίο ζούμε.

Στόχος του συμποσίου υπήρξε η ανασκόπηση της κατάστασης για το ΛCDM, ο προσανατολισμός της προσοχής σε ανοιχτά ζητήματα που ενδέχεται να αμφισβητήσουν τα θεμέλια και την ευρωστία του, καθώς και η συζήτηση για εναλλακτικές λύσεις που θα μπορούσαν να αμβλύνουν τις εντάσεις και να εξετάσει τις πιθανές μελλοντικές προοπτικές. Τα κύρια θέματα της συζήτησης περιλάμβαναν: Τελευταίες Μετρήσεις Κοσμολογικών Παραμέτρων ▪ Θεωρητικές και Παρατηρησιακές Προκλήσεις στο ΛCDM ▪ Εναλλακτικές λύσεις για το ΛCDM ▪ Προκλήσεις στην Κοσμολογική Αρχή.

Η εκδήλωση διοργανώθηκε από την Ομάδα Κοσμολογίας του Εργαστηρίου Αστρονομίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης και η εντάσσεται στο τριετές ερευνητικό πρόγραμμα «Tilted Cosmology», που χρηματοδοτείται από το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας & Καινοτομίας.

2022 Conference on Nonlinear Science and Complexity (26-29/9/2022)



Στόχος του Διεθνούς Συνεδρίου "2022 Conference on Nonlinear Science and Complexity" ήταν να δοθεί η δυνατότητα ανταλλαγής απόψεων γύρω από τις πρόσφατες εξελίξεις, ανακαλύψεις και επιστημονική πρόοδο, όσον αφορά τα αντικείμενα της Μη-Γραμμικής Επιστήμης και της Πολυπλοκότητας. Παρουσιάστηκαν θεωρίες και τεχνικές αιχμής που συμβάλουν στην εφαρμογή της Μη-Γραμμικής Επιστήμης και της Πολυπλοκότητας στην σύγχρονη επιστήμη και τεχνολογία.

Τελετή Υποδοχής Πρωτοετών Φοιτητών Ακαδημαϊκού Έτους 2022 – 2023

Την Τετάρτη 2 Νοεμβρίου 2022, ώρα 12:15 στην αίθουσα Α31 του κτιρίου της Σχολής Θετικών Επιστημών πραγματοποιήθηκε η Τελετή Υποδοχής Πρωτοετών Φοιτητών του Τμήματος Φυσικής για το πανεπιστημιακό έτος 2022 -2023. Η κεντρική ομιλία της εκδήλωσης εκφωνήθηκε από τον Καθηγητή του Τμ. Φυσικής Κλεομένη Τσιγάνη, με τίτλο "*DART: αποτελέσματα από την πρώτη διαστημική αποστολή πλανητικής άμυνας*" κατά την οποία αναφέρθηκε στον σχεδιασμό, τα αποτελέσματα, την σημασία και την συμμετοχή του Τμήματος Φυσικής του ΑΠΘ στην αποστολής του διαστημικού σκάφους DART, το οποίο στις 27 Σεπτεμβρίου 2022 μετά από πορεία ενός περίπου έτους, προσέκρουσε στον αστεροειδή Δίμορφο, δορυφόρο του Διδύμου, ολοκληρώνοντας με επιτυχία το πρώτο πείραμα εκτροπής αστεροειδούς και πλανητικής άμυνας στην ιστορία της ανθρωπότητας.

1st Greek Summer School on Synchrotron Radiation: Properties & Applications

Το 1ο διεθνές Θερινό Σχολείο (Θ.Σ.) στην Ελλάδα, με θέμα «Ακτινοβολία Σύγχροτρον: Ιδιότητες και εφαρμογές», διοργανώθηκε επιτυχώς από το Τμήμα Φυσικής του ΑΠΘ στις 5-8/9/2022, φιλοξενήθηκε στο Κέντρο Διεπιστημονικής Έρευνας και Καινοτομίας (ΚΕΔΕΚ) του ΑΠΘ και υλοποιήθηκε μέσω του Κέντρου Επιμόρφωσης και Δια Βίου Μάθησης του ΑΠΘ (ΚΕΒΙΔΙΜ). Στο Θ.Σ. δίδαξαν θεωρητικά και εργαστηριακά μαθήματα 25 διακεκριμένοι επιστήμονες από την Ευρώπη και τις ΗΠΑ. Στους συμμετέχοντες απονεμήθηκαν 2 ECTS έπειτα από επιτυχή συμμετοχή τους σε online εξέταση μέσω της πλατφόρμας eLearning του ΑΠΘ.

Στόχος του Θ.Σ. ήταν η εκπαίδευση νέων και πεπειραμένων ερευνητών, καθώς και στελεχών της βιομηχανίας από την Ελλάδα και το εξωτερικό, στις καινοτόμες τεχνολογίες χαρακτηρισμού υλικών στη νανοκλίμακα που επιτυγχάνονται μόνο με τη χρήση ακτινοβολίας synchrotron (υπέρλαμπρη δέσμη σκληρών ακτίνων Χ που παράγονται σε επιταχυντές ηλεκτρονίων). Τα υλικά που μελετώνται περιλαμβάνουν νανοϋλικά για εφαρμογές στην μικρο - και οπτοηλεκτρονική, βιολογικά υλικά, μεταλλεύματα, υλικά για την αεροπλοΐα, αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς κ.ά.

Κατά την έναρξη του Θ.Σ. απηύθυναν χαιρετισμό ο Πρύτανης του ΑΠΘ, Καθ. Νικόλαος Γ. Παπαϊωάννου, η Κοσμητόρισσα της Σχολής Θετικών Επιστημών του ΑΠΘ, Καθ. Χαρά Χαραλάμπους και ο κ. Νικόλαος Τζόλλας, Εντεταλμένος Περιφερειακός Σύμβουλος σε θέματα Καινοτομίας. Η εναρκτήρια ομιλία δόθηκε από τον Γενικό Διευθυντή της Ευρωπαϊκής Εγκατάστασης Ακτινοβολίας Σύγχροτρον - ESRF, Prof. Francesco Sette.

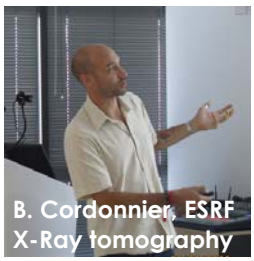
Κατά γενική ομολογία διδασκόντων και διδασκομένων, το Θ.Σ. ήταν εξαιρετικά επιτυχές και προσβλέπουμε στη συνέχιση του. Η διοργάνωσή του Θ.Σ. έγινε στο πλαίσιο μια πανελλαδικής προσπάθειας του δικτύου Ελλήνων χρηστών της ακτινοβολίας Σύγχροτρον (GrSUN) για την ένταξη της Ελλάδας στο ESRF (www.esrf.fr). Η έμπρακτη στήριξη του Θ.Σ. από κορυφαίους στον τομέα τους, επιστημόνων από το εξωτερικό αποτελεί και στήριξη της προσπάθειας που κάνει το GrSUN για την ένταξη της Ελλάδας στο ESRF. Ευελπιστούμε στη συνέχιση του θεσμού των Θ.Σ. στοχεύοντας στην επιμόρφωση του επιστημονικού δυναμικού και στελεχών Τμημάτων R&D της Βιομηχανίας με ορίζοντα την ευρύτερη Βαλκανική.

Ευχαριστούμε θερμά το ΑΠΘ, τη Σχολή Θετικών Επιστημών και το Τμήμα Φυσικής για την έμπρακτη στήριξη του Θ.Σ. και της προσπάθειας για την ένταξη της Ελλάδας στο ESRF, τους διδάσκοντες, τους συμμετέχοντες, τους χορηγούς και το ΚΕΔΕΚ για την παραχώρηση του χώρου και την τεχνική υποστήριξη.

Η πρόεδρος,
Καθ. Μ. Κατσικίνη

E. Margiolaki, Un. Patras Macromolecular crystallography

S.M. Souliou, KIT Inelastic X-Ray scattering


B. Cordonnier, ESRF X-Ray tomography

D. Sokaras, SLAC HR X-Ray spectroscopy

Ν. Τζόλλας, Καθ. Ν. Παπαϊωάννου, Καθ. Χ. Χαραλάμπους.

Καθ. F. Sette, Γενικός Δ/ντης ESRF

xafslab.physics.auth.gr/srss22.html

ορκωμοσίες

συνέβησαν στο τμήμα

Οι νέοι πτυχιούχοι του Τμήματος

Ορκωμοσία 26/7/2022

ΑΒΡΑΜΙΔΗΣ ΟΝΟΥΦΡΙΟΣ • ΑΛΕΞΙΑΔΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ • ΑΛΕΞΙΟΥ ΕΥΜΟΡΦΙΑ • ΑΡΒΑΝΙΤΙΔΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ • ΒΡΑΝΑ ΜΑΡΙΑ • ΓΙΑΝΝΑΚΟΥΔΗ ΙΦΙΓΕΝΕΙΑ • ΓΚΙΛΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ • ΓΡΑΝΟΥΖΗΣ ΣΟΛΟΥΝΙΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ • ΔΑΝΙΗΛ ΙΦΙΓΕΝΕΙΑ • ΔΗΜΟΠΟΥΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ • ΙΩΣΗΦ ΑΝΔΡΕΑΣ • ΚΑΡΑΜΠΑΤΖΑΚΗ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ • ΚΕΡΑΜΑΡΗΣ ΠΑΥΛΟΣ • ΚΟΥΡΡΗ ΔΕΣΠΟΙΝΑ • ΛΑΜΠΡΟΠΟΥΛΟΣ ΓΙΩΡΓΟΣ • ΜΑΝΕΝΗ ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ • ΓΙΑΝΝΕΛΟΣ ΙΑΣΩΝ • ΜΙΧΑΗΛ ΕΛΕΝΗ • ΜΟΧΛΑΣ ΚΑΤΣΙΦΑΣ ΦΙΛΙΠΠΟΣ • ΜΠΕΝΕΤΟΥ ΕΡΑΤΩ ΑΓΓΕΛΙΚΗ • ΜΥΛΙΟΡΔΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ • ΜΩΡΑΪΤΗ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ • ΝΤΑΜΠΟΥ ΑΣΠΑΣΙΑ • ΝΤΙΝΑΣ ΧΡΗΣΤΟΣ • ΟΙΚΟΝΟΜΙΔΗΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ • ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ ΦΩΤΙΟΣ • ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ • ΠΑΥΛΟΠΟΥΛΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ • ΣΑΪΤΗ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ • ΣΔΡΑΝΗΣ ΙΑΣΩΝ ΣΤΕΦΑΝΟΣ • ΣΤΑΜΑΤΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ • ΤΕΓΓΕΛΙΔΟΥ ΜΑΡΙΑ ΙΩΑΝΝΑ • ΤΣΑΚΙΡΙΔΟΥ ΑΓΛΑΙΑ • ΦΙΛΙΠΠΙΔΟΥ ΜΑΡΙΝΑ ΘΑΛΑΣΣΙΝΗ • ΦΙΛΙΠΠΟΥ ΦΙΛΙΠΠΑ • ΦΛΩΡΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ • ΦΥΝΤΑΝΙΔΟΥ ΣΤΥΛΙΑΝΗ • ΧΑΒΙΑΝΙΔΟΥ ΕΛΕΝΗ • ΧΑΤΖΗΙΩΑΝΝΟΥ ΕΛΕΝΗ • ΧΑΤΖΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ • ΧΟΥΣΤΟΥΛΑΚΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ • ΧΡΗΣΤΙΔΗΣ ΣΤΑΥΡΟΣ

Ορκωμοσία 23/11/2022

ΑΓΡΟΓΙΑΝΝΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ • ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ • ΑΡΑΠΧΑΤΖΗΣ ΜΑΡΚΟΣ • ΓΕΩΡΓΑΚΑΚΟΣ ΜΙΛΤΙΑΔΗΣ • ΓΙΑΜΟΥΡΙΔΗΣ ΕΥΘΥΜΙΟΣ • ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ ΗΛΙΑΣ • ΓΚΙΩΝΗ ΑΡΝΤΙΤ • ΔΑΜΑΚΟΥΔΗ ΛΑΜΠΡΙΝΗ • ΔΑΜΙΑΝΙΔΗΣ ΣΥΜΕΩΝ • ΔΑΣΚΑΛΑΚΗ ΒΙΚΤΩΡΙΑ • ΔΟΚΟΠΟΥΛΟΥ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ • ΕΥΦΡΑΙΜΙΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ • ΖΑΧΟΥ ΕΥΦΡΟΣΥΝΗ • ΖΙΓΝΕΛΗΣ ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΣ • ΗΛΙΟΠΟΥΛΟΥ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ • ΘΩΜΟΣ ΜΑΡΚΟΣ • ΚΑΛΟΓΙΑΝΝΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ • ΚΑΜΠΟΥΡΗΣ ΘΩΜΑΣ ΑΝΔΡΕΑΣ • ΚΑΝΑΤΣΙΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ • ΚΑΝΕΛΛΑΚΗ ΕΛΕΝΗ • ΚΑΡΑΛΗΣ ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ • ΚΙΖΑΚΗΣ ΘΕΟΛΟΓΟΣ • ΚΙΗΓΜΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ • ΚΟΙΟΥ ΟΛΥΜΠΙΑ • ΚΟΤΑΡΕΛΑΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ • ΚΟΥΤΡΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ • ΚΟΥΦΕΤΙΔΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ • ΚΡΗΤΙΚΟΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ • ΚΥΡΙΑΚΙΔΟΥ ΆΛΚΗΣΤΙΣ • ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΙΔΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ • ΚΩΣΤΟΠΟΥΛΟΥ ΑΦΡΟΔΙΤΗ • ΛΑΓΙΟΚΑΠΑ ΝΙΚΗ • ΛΕΛΟΒΑ ΔΑΦΝΗ • ΜΑΝΑΣΙΔΗΣ ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ • ΜΕΝΕΞΕΣ ΣΤΑΥΡΟΣ • ΜΟΥΣΟΛΛΑΡΙ ΣΤΥΛΙΑΝΗ • ΜΠΛΗΓΙΑΝΝΟΥ ΜΑΡΙΑΝΘΗ • ΜΠΡΙΣΙΜΗ ΑΝΝΑ • ΝΙΚΟΛΑΪΔΟΥ ΒΑΣΙΛΙΚΗ ΜΑΡΙΑ • ΠΑΠΑΔΑΚΗΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ • ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ • ΠΕΤΡΙΔΗΣ ΣΑΒΒΑΣ • ΠΟΣΟΝΙΔΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ • ΠΥΡΚΑΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ • ΣΑΛΤΖΗΣ ΘΩΜΑΣ ΝΕΚΤΑΡΙΟΣ • ΣΑΜΑΡΑ ΔΗΜΗΤΡΑ • ΣΑΜΟΥΗΛΙΔΗΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ • ΣΕΡΡΑ ΑΡΙΑΔΝΗ • ΣΤΟΓΙΟΥΔΗΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ • ΣΥΡΠΑ ΕΛΕΝΗ • ΤΕΑΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ • ΤΡΑΓΙΑ ΕΥΤΥΧΙΑ • ΤΣΕΡΜΙΔΗΣ ΚΥΡΙΛΛ • ΤΣΟΜΠΑΝΙΔΗΣ ΤΙΜΟΘΕΟΣ ΆΓΓΕΛΟΣ • ΧΑΒΙΑΡΑ ΕΥΔΟΚΙΑ ΜΑΡΙΑ • ΧΑΙΡΕΤΑΣ ΣΤΑΥΡΟΣ • ΧΑΤΖΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ • ΧΥΤΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

** παρατίθενται μόνο τα ονόματα αυτών που συναίνεσαν*

Οι νέοι διδάκτορες του Τμήματος που ορκίστηκαν την Δευτέρα 19/12/2022

◊ **Ισαάκ Βασιλειάδης** (επιβλ. Γ. Δημητρακόπουλος): «Δομικός και χημικός χαρακτηρισμός χαμηλοδιάστατων νανο-ετεροδομών και ατελειών δομής με προηγμένες μεθόδους HR(S)TEM».

◊ **Στέφανος Γιαρέμης** (επιβλ. Ι. Κιοσέογλου): «Υπολογιστικές μέθοδοι ανάλυσης ιδιοτήτων υλικών στη νανοκλίμακα».

◊ **Κωνσταντίνος Κοζαλάκης** (επιβλ. Σ. Σίσκος): «Σχεδιασμός ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και συστημάτων συλλογής ενέργειας και μετρήσεων».

◊ **Γεώργιος Παναγιώτης Κουσιόπουλος** (επιβλ. Σ. Νικολαΐδης): «Ανάπτυξη εφαρμογών σε ενσωματωμένα συστήματα: Εκτίμηση θέσης-μεγέθους διαρροής σε μεταλλικούς σωλήνες».

◊ **Γεώργιος Νικούλης** (επιβλ. Ι. Κιοσέογλου): «Υπολογιστική ανάλυση φυσικών ιδιοτήτων υλικών».

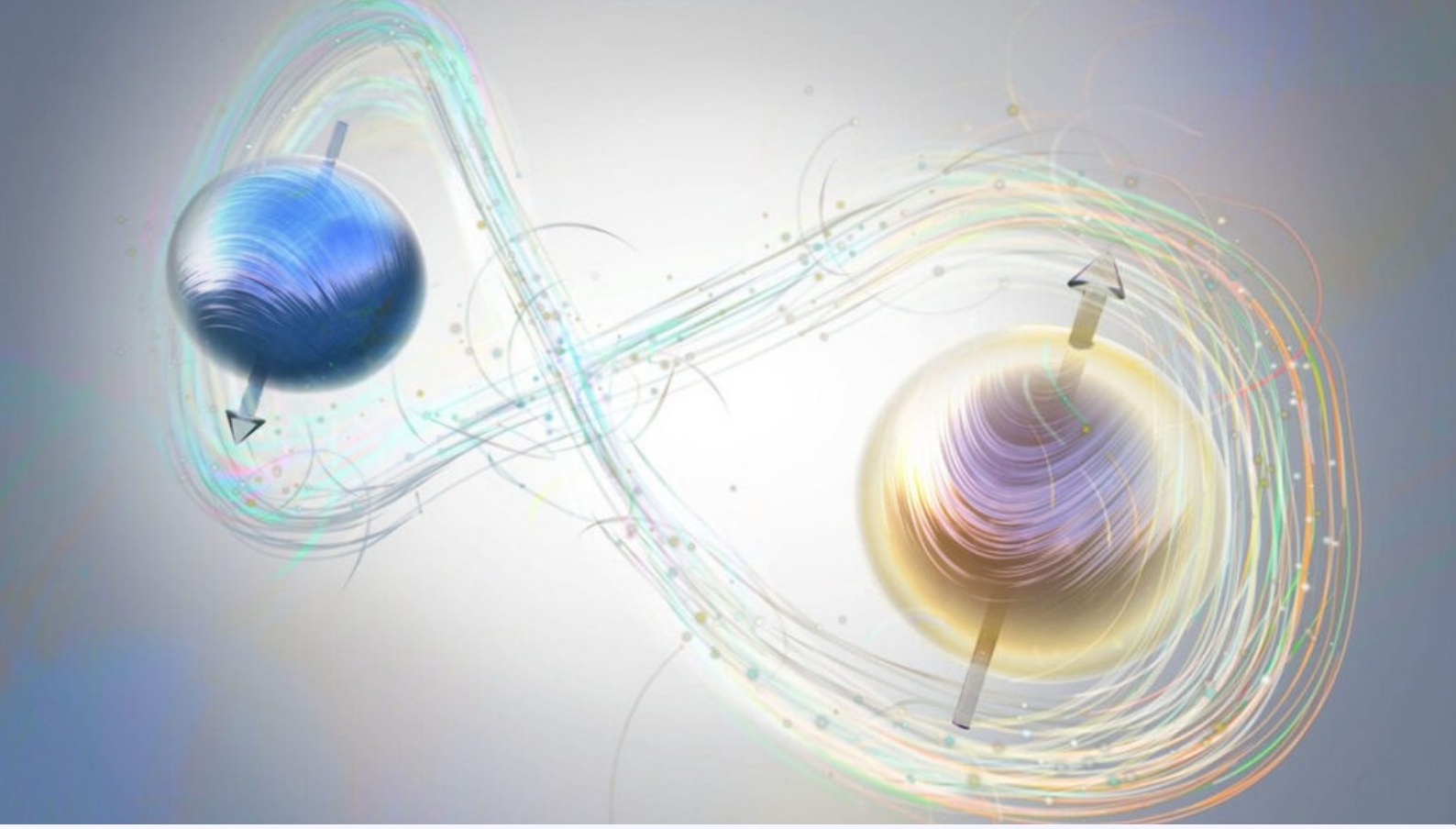
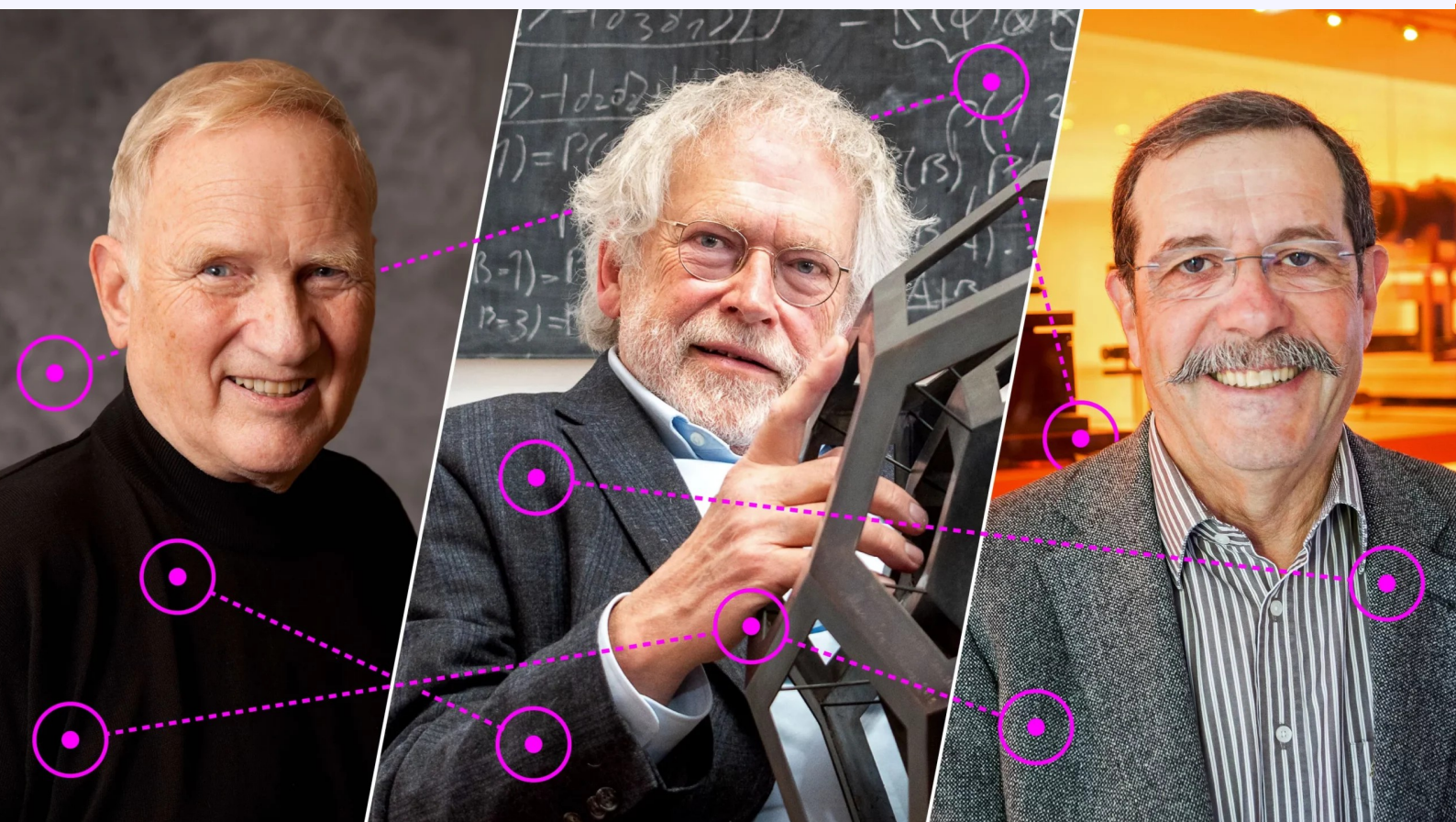
◊ **Αλέξανδρος Παπαγεωργίου** (επιβλ. Ε. Πλειώνης): «Υπολογισμός κοσμολογικών παραμέτρων χρησιμοποιώντας δεδομένα μεγάλης κλίμακας στο καθιερωμένο κοσμολογικό πρότυπο (ΛCDM)».

◊ **Κωνσταντίνος Προύσκας** (επιβλ. Π. Πατσαλάς): «Εναλλακτικές Γεωμετρίες για Συστοιχίες Φωτοβολταϊκών Λεπτών Υμενίων Υψηλής Απόδοσης».

◊ **Αικατερίνη Τεκνετζή** (επιβλ. Γ. Βουρλιάς): «Ανάπτυξη πυριτιδίων για θερμοηλεκτρικές εφαρμογές με καινοτόμες μεθόδους».

◊ **Μαρία Ευανθία Τσοπούλου** (επιβλ. Χ. Πετρίδου): «Μελέτη πολύ-λεπτονικών καταστάσεων για την αναζήτηση Νέας Φυσικής στο LHC στο πείραμα ATLAS».

◊ **Μαρία Χήρα** (επιβλ. Ε. Πλειώνης): «Φυσικές Ιδιότητες των Άλω Σκοτεινής Ύλης σε Κοσμολογικές Προσομοιώσεις N-σωμάτων Κώνου Φωτός και Αλγόριθμος Ταυτοποίησης Δομών».



Nobel Prize in Physics 2022