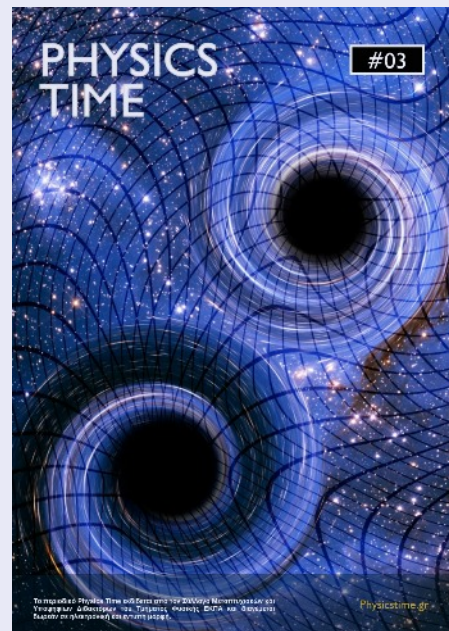


PHYSICS TIME

#03

ΤΕΥΧΟΣ ΜΑΗ - ΙΟΥΛΗ 2020.

Εξώφυλλο: Η καλλιτεχνική απεικόνιση δύο μελανών οπών που συγχωνεύονται από τον *Nicotr de Schwanberg*. Τα βαρυτικά κύματα τέτοιων γεγονότων, μπορούν πλέον να καταγραφούν από τους ανιχνευτές LIGO και VIRGO.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Χρήση ασύρματων οπτικών επικοινωνιών σε 5G δίκτυα.
2. Βαρυτικά κύματα: Μία σύντομη ιστορία.
3. Publish or Perish.
4. Η αρχή λειτουργίας των ανιχνευτών αερίου γεμίσματος και οι εφαρμογές τους.
5. Προς τη θεωρία του Καθιερωμένου Προτύπου - Μέρος Δεύτερο.

ΣΗΜΕΙΩΜΑ ΕΚΔΟΣΗΣ

Το τρίτο τεύχος του περιοδικού Physics Time περιλαμβάνει άρθρα για το ευρύ κοινό και τους εξειδικευμένους αναγνώστες, δίνοντας έμφαση στις αναφορές - πηγές στο τέλος κάθε άρθρου ώστε να μπορεί ο αναγνώστης να βρει περισσότερο υλικό πάνω στο θέμα. Το περιοδικό Physics Time απευθύνεται στους μαθητές που αναζητούν άρθρα φυσικής και τεχνολογίας για να διευρύνουν τους ορίζοντες τους πέρα από τη σχολική ύλη. Όποιος ενδιαφέρεται να συνεισφέρει σε επόμενα τεύχη του περιοδικού, θα ακολουθεί συγκεκριμένο πρότυπο κειμένου ώστε να επιμελείται ο ίδιος τη τελική εμφάνιση του άρθρου του. Μπορείτε να επικοινωνήσετε με τη συντακτική ομάδα (editing team) του Physics Time στέλνοντας email στο et@physicstime.gr.

Το περιοδικό Physics Time εκδίδεται από τον Σύλλογο Μεταπτυχιακών και Υποψηφίων Διδασκόντων του Τμήματος Φυσικής ΕΚΠΑ και διανέμεται δωρεάν σε ηλεκτρονική και έντυπη μορφή υπό τους όρους της άδειας Creative Commons, Αναφορά Δημιουργού - Μη Εμπορική Χρήση - Παρόμοια Διανομή [CC BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

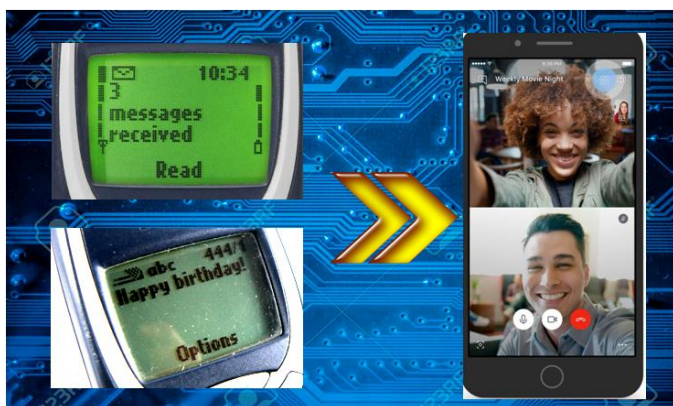


1 Χρήση ασύρματων οπτικών επικοινωνιών σε 5G δίκτυα

...where the light becomes data...

Γράφει ο Αργύρης Στασινάκης

Εξέλιξη δικτύων: Από το SMS στην live αναμετάδοση video μέσω social media



Το 1979 δημιουργήθηκε το πρώτο δίκτυο κινητών επικοινωνιών για εμπορική χρήση, στο Τόκυο της Ιαπωνίας, από την εταιρεία τηλεπικοινωνιών Nippon Telegraph and Telephone. Το δίκτυο ήταν πλήρως αναλογικό και μέσα σε λίγα χρόνια άρχισε να εξαπλώνεται σε όλο τον κόσμο και πλέον θεωρείται ως η πρώτη γενιά (1st Generation - 1G) των δικτύων κινητών επικοινωνιών. Από τα μέσα της δεκαετίας του 1980, η ταχεία ανάπτυξη της τεχνολογίας αλλά και οι ολοένα αυξανόμενες ανάγκες της κοινωνίας για χρήση ασύρματης επικοινωνίας οδήγησε στην εξέλιξη του 1G δικτύου ώστε το 1991 να οδηγηθούμε στα δίκτυα 2ης γενιάς (2G), το 2001 στα δίκτυα 3ης γενιάς 3G και το 2009 στην δημιουργία δικτύων 4ης γενιάς (4G). Έτσι λοιπόν, από τις απλές τηλεφωνικές κλήσεις χαμηλής ποιότητας το 1979, μέσα σε τρεις δεκαετίες οι χρήστες μπορούσαν να απολαμβάνουν υπηρεσίες gaming, video υψηλής ευκρίνειας (HD) και τηλεδιασκέψεις υψηλής ποιότητας (Video Conferencing).

Όμως, η ραγδαία αύξηση των χρηστών ασύρματων συσκευών, η αύξηση όγκου δεδομένων (HDTV, social media) καθώς και η ανάγκη για διασύνδεση πολλών ασύρματων συσκευών μεταξύ τους, οδήγησε γρήγορα στην ανάγκη βελτίωσης των 4G δικτύων ώστε να αυξηθεί ο αριθμός χρηστών σε μια περιοχή, ανταλλάσσοντας δεδομένα με μεγαλύτερο ρυθμό και μικρότερη καθυστέρηση (latency). Έτσι, το 2015 περίπου, ξεκίνησε ο σχεδιασμός της 5ης γενιάς (5G) δικτύων, όπου πλέον κρίθηκε αναγκαία η επέκταση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που χρησιμοποιείται για της ασύρματες ζεύξεις προκειμένου να καλυφθούν οι σύγχρονες ανάγκες.

	1G	2G	3G	4G	5G
Τεχνολογία	AMPS, NMT, TACS	GSM	WCDMA	LTE, WiMax	MIMO, mm Waves
Συχνότητες	30KHz	1.8GHz	1.6-2GHz	2-8GHz	3-60GHz
Bit Rate	2kbps	14.4-64kbps	2Mbps	<1Gbps	>1Gbps
Access	FDMA	CDMA	CDMA	CDMA	OFDM/BDMA
Core Network	PSTN	PSTN	Packet Network	Internet	Internet

Πίνακας 1-1: Χαρακτηριστικά δικτύων 1G-5G.

Τα δίκτυα 5ης γενιάς (5th Generation - 5G), αποτελούν την τελευταία γενιά δικτύων κινητών επικοινωνιών και στόχος τους είναι η διασύνδεση δεκάδων δισεκατομμυρίων συσκευών στο διαδίκτυο προσφέροντας μεγάλες ταχύτητες ανταλλαγής δεδομένων με ιδιαίτερα χαμηλό latency υλοποιώντας τον σχεδιασμό του Internet of Things - IoT όπου όλες οι συσκευές θα είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους. Το IoT, βασιζόμενο σε 5G δίκτυα, θα μπορεί να προσφέρει υπηρεσίες όπως τα αυτόνομα οδηγούμενα αυτοκίνητα, η τηλεϊατρική κ.ά. Προκειμένου να επιτευχθούν οι παραπάνω απαιτήσεις, το δίκτυο 5G λειτουργεί στη μπάντα συχνοτήτων μεταξύ 3-60 GHz (μέχρι 100 GHz υπό προϋποθέσεις), όπου, σε σχέση με την τεχνολογία 4G, γίνεται χρήση μικροκυματικών συχνοτήτων για την μετάδοση πληροφορίας. Πιο συγκεκριμένα, η ομοσπονδιακή επιτροπή επικοινωνιών (Federal Communications Commission - FCC) έχει εγκρίνει τις ακόλουθες μπάντες συχνοτήτων:

High - Band	47GHz, 39GHz, 37GHz, 24GHz - 28GHz
Mid - Band	3.7-4.2GHz, 3.5GHz, 2.5GHz
Low - Band	900MHz, 800MHz, 600MHz
Unlicensed	6GHz, above 95GHz

Πίνακας 1-2: Ζώνες συχνοτήτων 5G.

Μέσα στις ζώνες συχνοτήτων του Πίνακα 1-2 λειτουργούν και τα συστήματα 5G σε Ευρώπη και Κίνα.

Στις συχνοότητες αυτές είναι δυνατή η μεταφορά δεδομένων σε πολύ υψηλές ταχύτητες, όμως επηρεάζονται από την ύπαρξη εμποδίων καθώς δεν έχουν την ικανότητα να τα διαπερνούν. Για το λόγο αυτό, η δημιουργία ενός τέτοιου δικτύου απαιτεί μικρότερη απόσταση μεταξύ των κεραιών σε σχέση με τα 4G δίκτυα, ώστε να υπάρχει ικανοποιητική κάλυψη σε ένα χώρο.

Η διείσδυση της τεχνολογίας των 5G δικτύων αναμένεται σε 30% το 2025, δηλαδή 1 στις 3 συσκευές θα είναι συνδεδεμένη σε 5G δίκτυο, που μεταφράζεται σε 217 εκατομμύρια συνδέσεις. Οι χώρες που ηγούνται στην δημιουργία και χρήση 5G δικτύων για εμπορικούς σκοπούς είναι η Ν. Κορέα, η Κίνα και οι Η.Π.Α. Μετά τον Ιανουάριο του 2020 υπολογίζεται ότι 5G δίκτυα υπήρχαν σε περισσότερες από 378 πόλεις σε 34 χώρες.



Εικόνα 1-1: Top ten χωρών με διαθεσιμότητα δικτύων 5G.

Ακόμα όμως και μικρότερες χώρες όπως η Εσθονία διαθέτουν 5G δίκτυα. Στην Ελλάδα, το τελευταίο τρίμηνο του 2020 αναμένεται η ολοκλήρωση της διαδικασίας δημοπράτησης του φάσματος και στη συνέχεια οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι θα ξεκινήσουν τις εργασίες για την κατασκευή 5G δικτύων για εμπορική χρήση. Πιλοτικά δίκτυα ήδη αναπτύσσονται σε διάφορες πόλεις, όπως στο Δήμο Τρικκαίων.

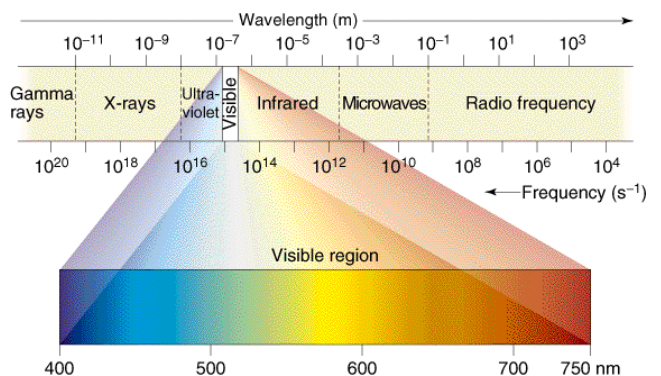
Επιπτώσεις ενός δικτύου 5G στην υγεία

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στο εύρος των ραδιοσυχνοτήτων (RF), που χρησιμοποιούνται ήδη από τα δίκτυα 1G-4G, έχουν την ικανότητα να διεισδύουν στο ανθρώπινο σώμα με κύριο αποτέλεσμα να αυξάνουν την θερμοκρασία των ιστών. Το ανθρώπινο σώμα έχει την ικανότητα να προσαρμόζεται σε μικρές αλλαγές της θερμοκρασίας όπως και στην περίπτωση της σωματικής άσκησης. Βέβαια, όταν η ακτινοβολία ξεπεράσει ένα όριο μπορεί να προκαλέσει βλάβες στους ιστούς και επιπτώσεις στην υγεία. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των RF κυμάτων είναι το βάθος διείσδυσης σε ένα σώμα, το οποίο μειώνεται καθώς αυξάνεται η συχνότητα. Άρα σε ένα δίκτυο 5G με συχνότητα μεγαλύτερη των 24GHz θα υπάρχει μικρότερη διείσδυση σε σχέση με ένα 4G δίκτυο που χρησιμοποιεί συχνότητα 4GHz, καθώς η ΗΜ ακτινοβολία αυτή θα απορροφάται κυρίως επιφανειακά. Για τους παραπάνω λόγους υπάρχουν εκτενείς και σαφείς διεθνείς οδηγίες για την έκθεση σε ραδιοκύματα. Στις οδηγίες αυτές συμπεριλαμβάνονται και οι συχνότητες που θα χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη και λειτουργία των

δικτύων 5ης γενιάς οι οποίες καθορίστηκαν από ανεξάρτητους επιστημονικούς οργανισμούς, όπως η Διεθνής Επιτροπή για την Προστασία από τις μη ιονίζουσες ακτινοβολίες (ICNIRP), και προσφέρουν προστασία σε όλον τον πληθυσμό, συμπεριλαμβανομένων των παιδιών, από όλους τους αποδεδειγμένους κινδύνους για την υγεία.

Ασύρματες οπτικές επικοινωνίες

Η ανάγκη για αυξημένο εύρος ζώνης ώστε να μπορούν να εξυπηρετούνται περισσότεροι χρήστες για αρκετά απαιτητικές εφαρμογές, οδήγησε στην ανάγκη εκμετάλλευσης νέων ζωνών του ΗΜ φάσματος που θα μπορούν να ικανοποιήσουν τις ανάγκες ενός σύγχρονου τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Την λύση έδωσε η χρήση του υπέρυθρου και οπτικού φάσματος, δημιουργώντας ένα νέο και πολλά υποσχόμενο κομμάτι, τις ασύρματες οπτικές επικοινωνίες.



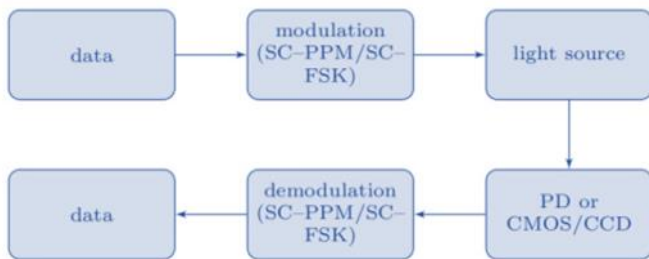
Εικόνα 1-2: Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα (Πηγή)

Στις ασύρματες οπτικές επικοινωνίες (Optical Wireless Communications - OWC), γίνεται χρήση του οπτικού ΗΜ φάσματος (400nm-700nm) καθώς και ενός μέρους του υπεριώδους και του υπέρυθρου ΗΜ φάσματος. Ανάλογα με το μήκος κύματος, οι ασύρματες οπτικές επικοινωνίες χωρίζονται σε 2 βασικές κατηγορίες, οι οποίες αναλύονται παρακάτω:

α) Επικοινωνίες ορατού φωτός (Visible Light Communications - VLC)

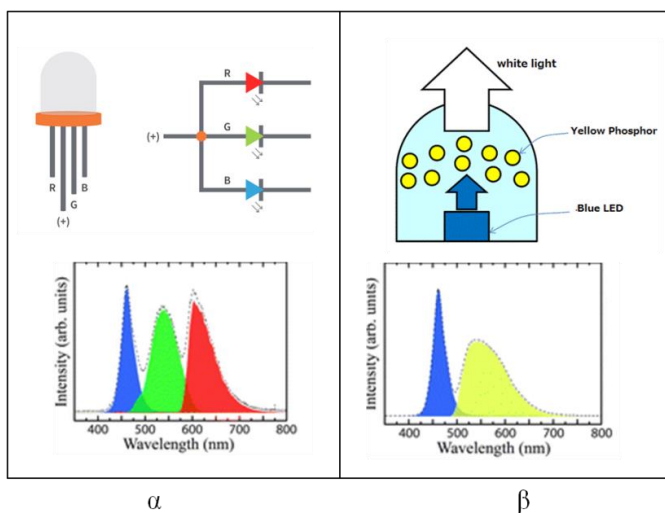
Στα συστήματα αυτά, η επικοινωνία πραγματοποιείται με χρήση διόδων LED που εκπέμπουν σε μήκη κύματος μεταξύ 390nm-750nm. Ο τρόπος με τον οποίο ένα LED μπορεί να μεταδώσει πληροφορία έγκειται στην ικανότητα της πολύ γρήγορης διαμόρφωσης του ρεύματος που διαρρέει το LED, η οποία προκαλεί γρήγορες εναλλαγές της φωτεινότητας, οι οποίες μπορούν να φτάσουν τις μερικές εκατοντάδες εκατομμύρια το δευτερόλεπτο. Στην απλή μορφή επικοινωνίας, το bit "1" θα μεταδίδεται όταν το LED φωτοβολεί, ενώ το bit "0" όταν το LED δεν φωτοβολεί ή

φωτοβολεί ασθενέστερα. Οι μεταβολές αυτές μπορούν να εντοπιστούν από μία φωτοδίοδο, η οποία με την σειρά της θα μετατρέψει το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό. Με τον τρόπο αυτό πραγματοποιείται η επικοινωνία μεταξύ πομπού (LED) και δέκτη (φωτοδίοδου).



Εικόνα 1-3: Block διάγραμμα VLC επικοινωνίας (Visible Light Communications, Christian Pohlmann).

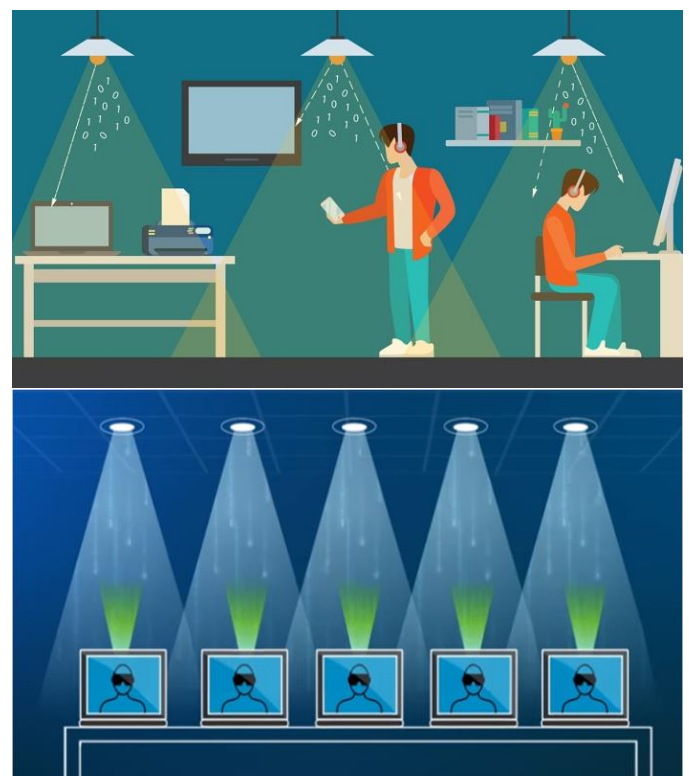
Η ιδέα που έφερε επανάσταση στο χώρο των ασύρματων οπτικών επικοινωνιών ήταν ο συνδυασμός της χρήσης των LED ταυτόχρονα για φωτισμό του χώρου αλλά και για μετάδοση πληροφορίας, καθώς οι τόσο γρήγορες μεταβολές της φωτεινότητας δεν γίνονται αντιληπτές από το ανθρώπινο σύστημα όρασης ώστε να δημιουργήσουν παρενέργειες όπως κούραση ή ζάλη. Για τις εφαρμογές αυτές, τα LED που εκπέμπουν λευκό φως είναι καταλληλότερα, τα οποία βασίζονται είτε στην τεχνική RGB, όπου ο συνδυασμός κόκκινου, πράσινου και μπλε LEDs παράγει το λευκό φως, είτε στην τεχνική επικάλυψης ενός μονοχρωματικού LED, συνήθως μπλε, με φώσφορο διαφορετικού χρώματος, συνήθως κίτρινου.



Εικόνα 1-4: α) RGB τεχνική β) Τεχνική επικάλυψης με φώσφορο (Chih Lin et al, Inorganic Phosphor Materials for Lighting, Cercrys.com).

Βάσει αυτής της ιδέας δημιουργήθηκαν τα πρώτα Li-Fi (Light Fidelity) συστήματα, τα οποία αναμένεται να

αντικαταστήσουν μεγάλο μέρος των WiFi συστημάτων, καθώς οι ιδιότητες και τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν μπορούν να καλύψουν τις απαιτήσεις ενός σύγχρονου 5G δικτύου. Σε ένα LiFi σύστημα, μπορεί να επιτευχθεί μεγάλος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (~Gbps) με πολύ μικρό κόστος αλλά και πολύ μικρή ισχύ (~W) λειτουργίας. Επίσης η χρήση του οπτικού φάσματος είναι απολύτως ασφαλής ως προς το περιβάλλον και τους οργανισμούς και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μέρη όπου απαγορεύεται η χρήση WiFi συστημάτων, όπως τα νοσοκομεία και αεροπλάνα. Ένα μεγάλο ακόμα πλεονέκτημα είναι η εύκολη επιλογή του field of view (FOV) ενός LED, ώστε η πληροφορία να μην διαχέεται σε ολόκληρο το χώρο, αλλά σε συγκεκριμένη περιοχή. Με αυτό τον τρόπο, κάθε χρήστης θα εξυπηρετείται από συγκεκριμένο LED που βρίσκεται στο χώρο.



Εικόνα 1-5: LiFi συστήματα (Πηγή).

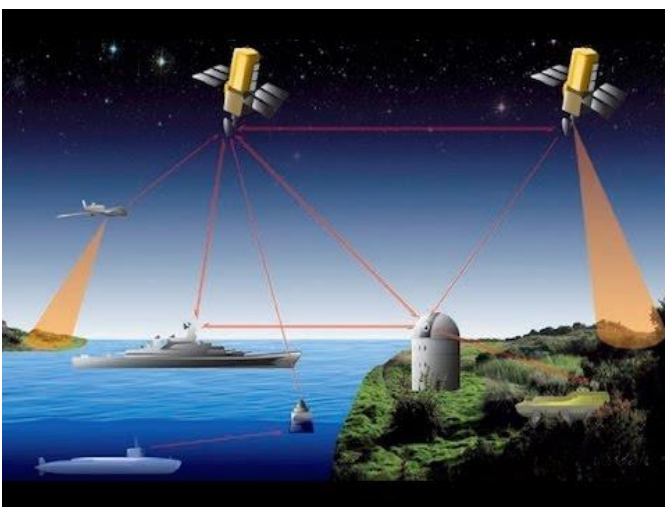
Μάλιστα, η αδυναμία της συγκεκριμένης ΗΜ ακτινοβολίας να διαπεράσει ένα τοίχο, προσφέρει υψηλά επίπεδα ασφάλειας καθώς η πληροφορία δεν μπορεί να υποκλαπεί από κάποιον που βρίσκεται εκτός δωματίου.

Λόγω των παραπάνω ιδιοτήτων, η VLC τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση του Smart Home Project, όπου όλες οι συσκευές σε ένα σπίτι θα επικοινωνούν μεταξύ τους και θα ελέγχονται μέσω ειδικών εφαρμογών από τον χρήστη.



Εικόνα 1-6: Smart Home Project (Πηγή).

Όμως, τα VLC συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε ανοιχτούς χώρους πραγματοποιώντας ζεύξεις αρκετών μέτρων. Τα ελεύθερα WiFi που υπάρχουν σε αρκετούς δημόσιους χώρους, όπως πλατείες, μπορούν εν μέρει να αντικατασταθούν από LiFi συστήματα μέσω του δημόσιου φωτισμού στους χώρους αυτούς. Η κύρια συμβολή των VLC συστημάτων σε ανοιχτούς χώρους είναι η υλοποίηση Smart City εφαρμογών, όπως η επικοινωνία μεταξύ οχημάτων με χρήση των LED που διαθέτουν (φώτα πορείας, φρένων κ.ά.) ή τα "έξυπνα" φανάρια τα οποία θα μπορούν να μεταδίδουν προειδοποιητικά μηνύματα στους οδηγούς. Το μεγαλύτερο πρόβλημα για την εφαρμογή VLC συστημάτων σε εξωτερικούς χώρους είναι η παρουσία της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία προσθέτει θόρυβο στο δέκτη. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται σε ικανοποιητικό βαθμό με χρήση ειδικών φίλτρων στο δέκτη τα οποία επιτρέπουν την διέλευση μόνο των επιθυμητών συχνοτήτων.



Εικόνα 1-7: FSO ζεύξεις (Free Space optical Communications, Sandeep Rajput).

β) Επικοινωνίες ελεύθερου χώρου (Free Space Optics - FSO)

Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν δίοδους LASER με μήκη κύματος μεταξύ 750nm-1600nm πραγματοποιώντας ζεύξεις σημείου προς σημείο σε μεγάλες αποστάσεις. Οι αποστάσεις αυτές μπορούν να φτάσουν έως τα 10km για επίγειες ζεύξεις, αρκετές εκατοντάδες χιλιόμετρα για δορυφορικά FSO συστήματα, και μερικές δεκάδες μέτρα για υποθαλάσσιες ζεύξεις.

Τα συστήματα FSO ξεκίνησαν να αναπτύσσονται για στρατιωτικές εφαρμογές το 1960, καθώς η χρήση δέσμης LASER προσφέρει υψηλά επίπεδα ασφάλειας, όμως η ραγδαία ανάπτυξη των ημιαγωγικών στοιχείων LASER, κέντρισε γρήγορα και το εμπορικό ενδιαφέρον με αποτέλεσμα τις τελευταίες δεκαετίες να παρουσιάζεται αξιοσημείωτη αύξηση στην χρήση αυτής της τεχνολογίας.

Πολλοί φορείς χρησιμοποίησαν FSO συστήματα προκειμένου να δημιουργήσουν ζεύξεις μεταξύ διαφορετικών κτιρίων. Η λύση αυτή προσέφερε μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, χαμηλό κόστος, ενώ η ζεύξη μπορούσε να πραγματοποιηθεί μέσα σε λίγες ώρες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της χρηστικής ευελιξίας των FSO συστημάτων είναι η δημιουργία ασύρματων οπτικών ζεύξεων στην περιοχή όπου πραγματοποιήθηκε η επίθεση στους δίδυμους πύργους το 2001 όπου οι ενσύρματες γραμμές των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων καταστράφηκαν. Τα FSO αποτελούσαν τη μόνη αξιόπιστη και γρήγορη λύση προκειμένου να επαναλειτουργήσουν άμεσα οι επικοινωνίες στην περιοχή.

Εκτός όμως από το εμπορικό ενδιαφέρον, υπάρχει και μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον, καθώς ερευνητικές ομάδες από όλο τον κόσμο εργάζονται προκειμένου να βελτιώσουν την ποιότητα των FSO ζεύξεων, καθώς η διάδοση της δέσμης LASER μέσα από την ατμόσφαιρα επηρεάζεται από διάφορους ατμοσφαιρικούς και μετεωρολογικούς παράγοντες. Οι κύριοι μηχανισμοί που εξασθενούν την ισχύ της δέσμης είναι η σκέδαση, η απορρόφηση και η τυρβώδης ροή (turbulence). Έχουν αναπτυχθεί αρκετά μαθηματικά μοντέλα που περιγράφουν τους μηχανισμούς αυτούς, σύμφωνα με τα οποία είναι δυνατή η ασφαλής εκτίμηση της ποιότητας της ζεύξης γνωρίζοντας διάφορες βασικές μετεωρολογικές παραμέτρους όπως η θερμοκρασία, η ταχύτητα του ανέμου και η υγρασία. Τα μαθηματικά αυτά μοντέλα επιβεβαιώνονται με αποτελέσματα που προκύπτουν από διάφορες πειραματικές FSO ζεύξεις.

Χάρη στις ερευνητικές μελέτες και προσπάθειες, τα τελευταία χρόνια οι FSO ζεύξεις προσφέρουν πλέον υψηλή απόδοση, με ταχύτητες που μπορούν να φτάσουν τα 5Gbps σε αποστάσεις έως 3km για εμπορική χρήση, χαμηλό κόστος αγοράς αλλά και λειτουργίας, καθώς η ισχύς εκπομπής ενός πομπού,

χρησιμοποιώντας από μία ως τρεις δέσμες LASER, δεν ξεπερνά συνολικά τα 100mW. Ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα των FSO συστημάτων είναι χρήση τους χωρίς την ανάγκη αδειοδότησης όπως συμβαίνει σε άλλες ΗΜ ζώνες (Ραδιοσυχνότητες κ.ά.) Επιπροσθέτως, προσφέρουν υψηλά επίπεδα ασφάλειας καθώς είναι εξαιρετικά δύσκολο να υπάρξει υποκλοπή χωρίς να γίνει αντιληπτή. Όλοι αυτοί οι λόγοι, έχουν θέσει τις FSO ζεύξεις ως μια αξιόπιστη λύση για τα σύγχρονα και μελλοντικά δίκτυα υψηλών απαιτήσεων. Οι επιδόσεις ενός τυπικού εμπορικού FSO συστήματος συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Bit Rate	~2.5Gbps
Latency	<40μs
Απόσταση	~3km
Ισχύς δέσμης	<100mW

Πίνακας 1-3: Χαρακτηριστικά λειτουργίας τυπικού συστήματος FSO.

Όμως, ο συνδυασμός της ανάγκης για οπτική επαφή μεταξύ των πομποδεκτών και το στενού εύρους της δέσμης, απαιτεί ακριβή στόχευση και τοποθέτηση του συστήματος σε σημεία όπου δεν υπάρχουν εμπόδια (κορυφές κτιρίων, τaráτσες κ.ά.). Οι λόγοι αυτοί περιόριζαν τα πρώτα FSO συστήματα για ζεύξεις μεταξύ σταθερών σημείων, αποτελώντας όμως μια πολύ καλή λύση για τα backhaul κομμάτια ενός 5G δικτύου. Το 2017, η ομάδα Εφαρμοσμένης Φυσικής του Πανεπιστημίου John Hopkins (APL) ανέπτυξε επιτυχημένα σε συνεργασία με το Αμερικανικό Πολεμικό Ναυτικό, FSO ζεύξεις μεταξύ κινούμενων πλοίων, χρησιμοποιώντας κατάλληλες τεχνικές παρακολούθησης στόχου (tracking). Παράλληλα έχουν γίνει αρκετές μελέτες για χρήση FSO συστημάτων στην επικοινωνία τρένων ή αεροπλάνων με τα κέντρα επιχειρήσεων, οι οποίες ακόμα βρίσκονται σε πειραματικό επίπεδο με πολύ ενθαρρυντικά όμως αποτελέσματα.

Οι ιδιότητες και η απόδοση των VLC και FSO συστημάτων, αναμένεται να εντάξει τις τεχνολογίες αυτές στα δίκτυα 5G και να αποτελέσουν αναπόσπαστο μέρος κάθε σύγχρονου και μελλοντικού δικτύου υψηλών απαιτήσεων. Ακόμα υπάρχουν πολλά περιθώρια βελτίωσης στις ασύρματες οπτικές επικοινωνίες στο φυσικό επίπεδο, στο οποίο εργάζονται πολλές ομάδες εφαρμοσμένης Φυσικής, αλλά και στο επίπεδο του δικτύου.

Αναφορές

- Net-informations: <http://net-informations.com>
- L. Witney: 5G expands to 378 cities across 34 countries, <https://www.techrepublic.com/article/5g-expands-to-378-cities-across-34-countries/>, ανακτήθηκε στις 23/7/2020.
- T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights," in *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 50, no. 1, pp. 100-107, Feb. 2004, doi: 10.1109/TCE.2004.1277847.
- P. H. Pathak, X. Feng, P. Hu and P. Mohapatra, "Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2047-2077, Fourthquarter 2015, doi: 10.1109/COMST.2015.2476474.
- Suman Malik, Prasant Kumar Sahu, Free space optics/millimeter-wave based vertical and horizontal terrestrial backhaul network for 5G, *Optics Communications*, Volume 459, 2020, 125010, ISSN 0030-4018, doi: 10.1016/j.optcom.2019.125010.
- A.K. Majumdar, *Advanced free space optics (FSO): A systems approach*. 2014
- Rappaport, Theodore S. (2002). *Wireless communications : principles and practice* (2 ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR. ISBN 0-13-042232-0.

2 Βαρυτικά κύματα: Μία σύντομη ιστορία

Γράφει ο Γιώργος Μουζλάνοβ

11 Φεβρουαρίου 2016. Η επιστημονική ομάδα του LIGO και του VIRGO ανακοινώνει πως πέντε μήνες νωρίτερα, στις 14 Σεπτεμβρίου 2015, παρατηρήθηκαν άμεσα, για πρώτη φορά, βαρυτικά κύματα από τη συγχώνευση δύο μαύρων σπών. Έκτοτε, συνεχίζει να ανιχνεύει όλο και περισσότερα γεγονότα. Μάλιστα, την επόμενη χρονιά, το 2017, δόθηκε το βραβείο Nobel στους Rainer Weiss, Kip Thorne και Barry Barish για τη συνεισφορά τους πάνω στην ανίχνευση των βαρυτικών κυμάτων. Ακούγοντας κάποιος αυτή την είδηση και σκεπτόμενος πως το Nobel έχει δοθεί σε μερικούς μεγάλους επιστήμονες στο παρελθόν (αποφεύγουμε την αναφορά σε ονόματα για να μην αδικήσουμε κάποιον που μπορεί να ξεχάσουμε, άλλωστε η πλήρης λίστα υπάρχει στην ιστοσελίδα των βραβείων Νόμπελ), προκύπτει ότι μάλλον είναι κάτι σημαντικό αυτό που ονομάζουμε βαρυτικά κύματα. Τι είναι όμως τα βαρυτικά κύματα, και γιατί έχουν αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο βλέπουμε το σύμπαν;

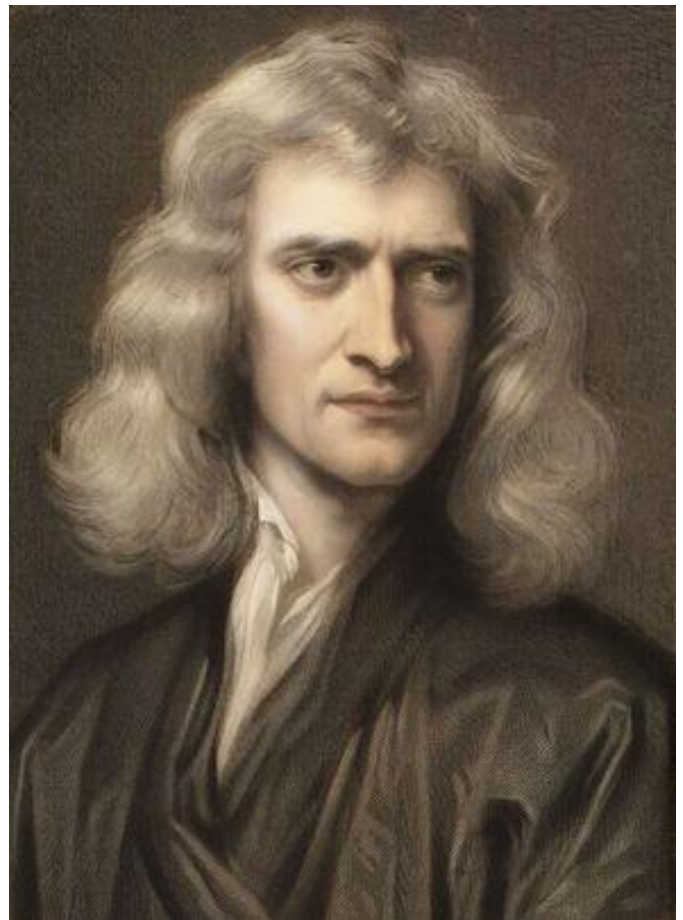
Πριν αρχίσουμε να μιλάμε για βαρυτικά κύματα, θα εξετάσουμε πως και γιατί οδηγηθήκαμε σε αυτά. Για το σκοπό αυτό θα κάνουμε ένα μικρό (και νοητό) ταξίδι στο χρόνο. Προορισμός μας είναι η Μεγάλη Βρετανία του 1687, χρονιά που ο Isaac Newton εκδίδει το Principia, μέσα από το οποίο αναπτύσσει την θεώρησή του για την βαρύτητα. Παρουσιάζει τον γνωστό νόμο της παγκόσμιας έλξης που περιγράφει τη δύναμη που ασκείται μεταξύ δύο σωμάτων με μάζα. Μαθηματικά αυτός γράφεται ως εξής:

$$\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r}$$

Τον έχουμε γράψει σε διανυσματική μορφή, για να τονίσουμε τον ελκτικό χαρακτήρα της δύναμης με το αρνητικό πρόσημο: G είναι η βαρυτική σταθερά, την οποία μέτρησε πειραματικά ο Cavendish το 1798 και -πλέον- κάθε πρωτοετής φοιτητής στο Φυσικό Αθήνας και r είναι η απόσταση μεταξύ των δύο σωμάτων.

Η εξίσωση αυτή ήταν επιτυχής στο να περιγράψει τις κινήσεις των ουράνιων σωμάτων στο ηλιακό μας σύστημα και να αποδείξει τους, γνωστούς για την εποχή, νόμους του Kepler. Ωστόσο, παρουσίαζε ορισμένα προβλήματα. Πρώτο και κυριότερο, περιγράφει μία δύναμη που είναι στιγμιαία, και με άπειρη ταχύτητα διάδοσης. Τι σημαίνει αυτό; Σημαίνει πως αν ξαφνικά εμφανιστεί μία μάζα σε κάποιο σημείο του χώρου, όλα τα υπόλοιπα σώματα που βρίσκονται στην εμβέλεια του θα "νιώσουν" αμέσως τη δύναμη που τους ασκείται από αυτό. Κάτι τέτοιο, εκ πρώτης όψεως, φαντάζει

ως παράδοξο, καθώς γνωρίζουμε πως τίποτα δεν μπορεί να μεταδοθεί πιο γρήγορα από την ταχύτητα του φωτός. Ένα άλλο πρόβλημα ήταν ότι εμφανίζονταν αποκλίσεις στις προβλέψεις της θεωρίας του Newton όταν αρχίσαμε να μελετάμε πιο ακραία περιβάλλοντα βαρύτητας, όπως πολύ κοντά σε ένα άστρο, ή σε πιο μαζικά άστρα από τον Ήλιο. Για την ώρα θα αφήσουμε αυτά τα ερωτήματα αναπάντητα.



Εικόνα 2-1: Sir Isaac Newton (1642 - 1727).

Συνεχίζουμε το ταξίδι μας στο χρόνο, μερικούς αιώνες μπροστά και πάμε στο 1915, όπου ο καταξιωμένος πλέον Albert Einstein παρουσιάζει την δική του θεώρηση πάνω στη βαρύτητα, που ονομάζεται Γενική Θεωρία της Σχετικότητας (η γενίκευση, δηλαδή, της Ειδικής Θεωρίας της Σχετικότητας που εκδόθηκε το 1905). Μέσα από αυτή, ο Einstein μας λέει πως ο χώρος και ο χρόνος (που έχουν ήδη ενωθεί σε μία οντότητα, τον χωρόχρονο) δεν είναι κάτι στατικό και άκαμπτο, αλλά "καμπυλώνονται" από την μάζα (και την ενέργεια).

Μαθηματικά, η θεωρία αυτή περιγράφεται από τις λεγόμενες Εξισώσεις Πεδίου του Einstein:

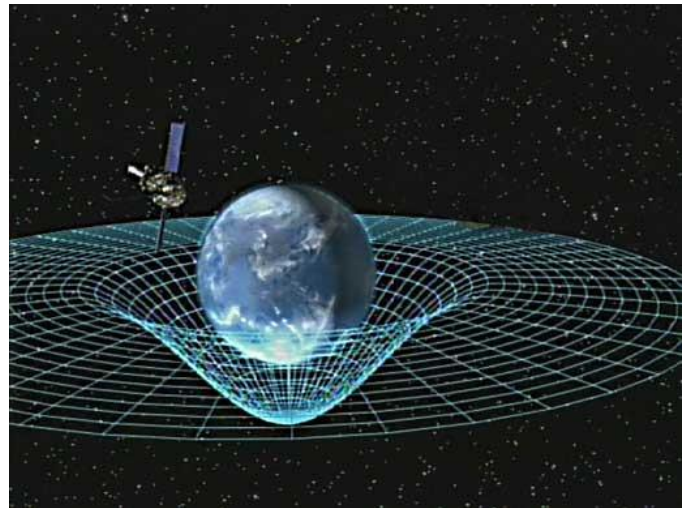
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

όπου $c=300.000$ km/sec είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό.

Ίσως με μία πρώτη ματιά η γραφή αυτή τρομάζει τον αναγνώστη, ωστόσο ας προσπαθήσουμε να καταλάβουμε διαισθητικά τι περίπου περιγράφει η παραπάνω σχέση. Θα ξεκινήσουμε με το δεξί μέλος. Το σύμβολο $T_{\mu\nu}$ ονομάζεται τανυστής ενέργειας-ορμής, και όπως λέει το όνομά του, μας περιγράφει το πώς κατανέμεται η ενέργεια-μάζα (κάθε μορφής) στο χώρο. Προχωρώντας στα αριστερά, ο όρος $R_{\mu\nu}$ ονομάζεται τανυστής καμπυλότητας του Ricci, και μας περιγράφει τη γεωμετρία ή την καμπυλότητα του χωρόχρονου (μην ξεχνάμε πως η ΓΘΣ είναι μία γεωμετρική θεωρία). Συνεχίζοντας, το σύμβολο $g_{\mu\nu}$ ονομάζεται μετρικός τανυστής (ή σκέτο μετρική), και στην ουσία είναι ο χαρακάς μας για να μετράμε αποστάσεις στο σύμπαν. Το Λ ονομάζεται κοσμολογική σταθερά, αλλά σε πρώτη προσέγγιση δεν μας απασχολεί αυτός ο όρος. Η λύση της αρχικής εξίσωσης μας δίνει τη μετρική. Έχοντας δηλαδή γνώση για την ύλη (τανυστής ενέργειας-ορμής) και για την καμπυλότητα (τανυστής Ricci), βρίσκουμε το πώς αλλάζει η μεζούρα μας. Υπό αυτή την έννοια προκύπτει και η φράση που πιθανόν έχετε ακούσει, ότι η ύλη λέει στο χώρο πως να καμπυλωθεί (πηγαίνοντας από τα δεξιά προς τα αριστερά στην εξίσωση) και πως η καμπύλωση μαρτυρά την παρουσία μάζας ή ενέργειας εν γένει (κοιτώντας την εξίσωση από αριστερά προς τα δεξιά). Μία επιβεβαίωση πως η ΓΘΣ είναι η σωστή θεωρία για την βαρύτητα είναι πως παίρνοντας το όριο "ασθενούς" βαρύτητας καταλήγουμε στη θεωρία του Newton για τη βαρύτητα που είδαμε νωρίτερα.

Το νέο αυτό πρίσμα υπό το οποίο βλέπουμε την βαρύτητα, κατάφερε να εξηγήσει όλα εκείνα τα σημεία στα οποία η θεωρία του Newton απέτυχε. Επαληθεύτηκε πειραματικά στα επόμενα χρόνια, και συνεχίζει ακόμα και σήμερα να επαληθεύει κάθε θεωρητικό της αποτέλεσμα. Επομένως, είμαστε πεπεισμένοι πως η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας είναι η σωστή θεωρία για να περιγράψουμε τη βαρύτητα. Ο τρόπος με τον οποίο ο Einstein έλυσε το πρόβλημα της στιγμιαίας δύναμης από απόσταση, ήταν με την εισαγωγή των βαρυτικών κυμάτων που μεταδίδονται με την ταχύτητα του φωτός. Τα βαρυτικά κύματα προκύπτουν λύνοντας την παραπάνω εξίσωση με τον πιο τεχνικό τρόπο της Γραμμικοποιημένης Βαρύτητας. Για να καταλάβουμε τί επιπλοκές έχει η πεπερασμένη ταχύτητα της βαρύτητας, ας σκεφτούμε το εξής παράδειγμα:

Αν ξαφνικά, για κάποιο λόγο, ο Ήλιος εξαφανιζόταν, η πληροφορία αυτή θα έπαιρνε γύρω στα 8 λεπτά για να φτάσει σε εμάς στη Γη (όσο χρόνο κάνει δηλαδή και το φως για να ταξιδέψει από τον Ήλιο στη Γη). Μέχρι εκείνη τη στιγμή, θα βλέπαμε και θα αισθανόμασταν βαρυτικά, την επίδραση του και θα γυρίζαμε γύρω από αυτόν, σαν να ήταν ακόμα εκεί.



Εικόνα 2-2: Η καμπύλωση του χωρόχρονου παρουσία μάζας. Πηγή: LIGO.

Τί είναι όμως τα βαρυτικά κύματα;

Θα ξεκινήσουμε κοιτάζοντας τις δύο λέξεις που τα απαρτίζουν, ξεχωριστά. Όταν ακούμε την λέξη κύματα, το πρώτο πράγμα που μας έρχεται διαισθητικά στο νου, είναι τα κύματα στην επιφάνεια της θάλασσας, σκέψη που δεν είναι λάθος. Στην ουσία, τα κύματα είναι μια διαταραχή σε ένα μέσο. Εάν δεν υπάρχει κάτι να διαταράξει το μέσο μας, τότε θα βλέπουμε μία ήρεμη επιφάνεια (στην περίπτωση μιας λίμνης). Αν όμως, για παράδειγμα, ρίξουμε μία πέτρα, θα δούμε ξαφνικά να εμφανίζονται διαταραχές ή αλλιώς κύματα από το σημείο στο οποίο ρίξαμε την πέτρα και οι οποίες ταξιδεύουν προς όλες τις διευθύνσεις πάνω στην επιφάνεια. Η ίδια αρχή ισχύει σε κάθε είδους κύμα. Ο επιθετικός προσδιορισμός μπροστά από τη λέξη κύματα, μας υποδηλώνει την φύση του φαινομένου που εξετάζουμε. Προφανώς τα υδάτινα κύματα δεν είναι τα μόνα που συναντώνται στη φύση, έτσι υπάρχουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα κύματα πυκνότητας (ηχητικά), τα βαρυτικά (στα οποία εστιάζουμε στο παρόν άρθρο) κ.ά.

Στην περίπτωση των υδάτινων κυμάτων, ξέρουμε ήδη πώς να τα παράξουμε, καθώς από μικρή ηλικία, όλοι μας έχουμε παίξει πετώντας πέτρες στη θάλασσα. Αν όμως αντί για μία υδάτινη επιφάνεια έχουμε τον χωρόχρονο, πώς τον διαταράσσουμε κατ' αναλογία με όσα ήδη ξέρουμε;



Εικόνα 2-3: Κυματισμοί στην επιφάνεια μιας λίμνης. Πηγή: LIGO.

Για να χτίσουμε τη διαίσθηση μας περισσότερο, θα χρησιμοποιήσουμε το απλουστευμένο μοντέλο του "ελαστικού σεντονιού", όπου μπορούμε να φανταστούμε τον χώρο σαν μία δισδιάστατη ελαστική επιφάνεια (όπως αυτή ενός τραμπολίνου).

Τι θα συμβεί αν τοποθετήσουμε μία μπάλα σε κάποιο σημείο αυτού του σεντονιού; Όπως πολύ σωστά μαντέψατε, θα δημιουργηθεί ένα βαθούλωμα ή αλλιώς, μία καμπύλωση. Είναι όμως αυτό αρκετό για να δημιουργηθούν βαρυτικά κύματα; Δηλαδή, είναι ικανή και μόνο η παρουσία μάζας στον χώρο να παράξει διαταραχές; Η απάντηση είναι όχι. Σκεφτείτε όμως την περίπτωση που εμείς πάρουμε αυτή τη μπάλα και αρχίζουμε να την κουνάμε, είτε επιταχύνοντας την, είτε αλλάζοντας της διεύθυνση, πάνω στο σεντόνι. Ξαφνικά θα δούμε πως καθώς μετακινείται εμφανίζονται ρυτιδώσεις, ή αλλιώς τα πολυπόθητα βαρυτικά κύματα που ψάχνουμε. Άρα έχουμε καταφέρει να βρούμε, επί της αρχής, το αίτιο που προκαλεί την δημιουργία τους. Και αυτό δεν είναι άλλο από την επιτάχυνση των σωμάτων.

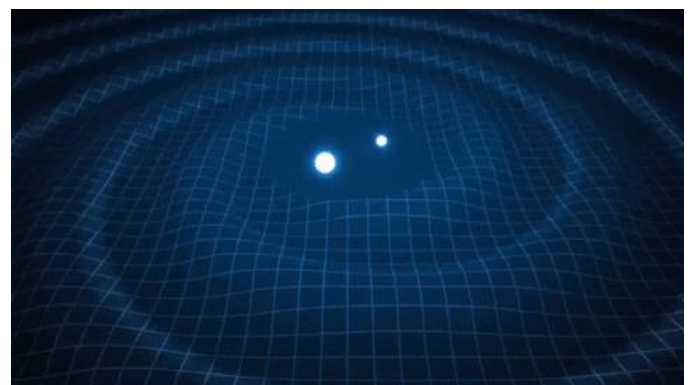
Ας μελετήσουμε όμως τους μηχανισμούς που κρύβονται πίσω από την παραγωγή τους λίγο καλύτερα. Συνεχίζουμε με το παράδειγμα της μπάλας στο ελαστικό μας σεντόνι. Αν αρχίσουμε να περιστρέφουμε αυτή τη σφαίρα γύρω από τον εαυτό της, το "βαθούλωμα" δεν θα αλλάξει. Επομένως δεν θα παραχθούν διαταραχές. Αν όμως η μπάλα μας, αντί για το τέλειο σφαιρικό σχήμα που είχε μέχρι τώρα, έμοιαζε περισσότερο με μία μπάλα του ράγκμπι, κι αυτή περιστρεφόταν όχι γύρω από τον άξονα συμμετρίας της, τότε αυτή η διαφορά στο σχήμα της θα ήταν ικανή να δημιουργήσει ρυτιδώσεις πάνω στο σεντόνι.

Άρα καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως αποκλίσεις από το σφαιρικό σχήμα ενός αντικειμένου (εφόσον αυτό επιταχύνεται) οδηγούν στην παραγωγή βαρυτικών κυμάτων. Στο ίδιο αποτέλεσμα θα φτάναμε και αν είχαμε "φούσκωμα-ξεφούσκωμα" της μπάλας μας, με σφαιρικό ή όχι σχήμα. Σε πιο τεχνικό επίπεδο, τα παραπάνω είναι μία συνέπεια του θεωρήματος του Birkhoff, ωστόσο δεν θα επεκταθούμε παραπάνω σε αυτό. Από την σκοπιά της αστροφυσικής, η

προηγούμενη ανάλυση μεταφράζεται ως εξής: ένα στατικό σφαιρικό άστρο δε δημιουργεί βαρυτικά κύματα, όπως δε δημιουργεί και στην περίπτωση που το εν λόγω άστρο απλά περιστρέφεται γύρω από τον εαυτό του. Αν, όμως, εμφανίζεται κάποιο εξόγκωμα στην επιφάνεια του και επιπλέον υπάρχει περιστροφή, όπως συμβαίνει στην περίπτωση ορισμένων άστρων νετρονίων, τότε θα έχουμε παραγωγή βαρυτικών κυμάτων. Το ίδιο συμβαίνει και αν έχουμε κάποιο κατακλυσμιαίο γεγονός, όπως μία έκρηξη σουπερνόβα, όπου είναι εξαιρετικά σπάνιο αυτό να είναι πλήρως συμμετρικό σε όλες τις διευθύνσεις.

Προχωράμε τώρα σε ένα άλλο σενάριο. Ας σκεφτούμε πως αντί για μία μπάλα, έχουμε δύο πλέον μπάλες και είναι ενωμένες με μία αρκετά λεπτή και αμελητέας μάζας ράβδο, σαν ένα βαράκι. Αν αυτή η διάταξη περιστρέφεται γύρω από τον άξονα συμμετρίας της και πάλι δεν θα έχουμε κάποια διαταραχή. Όμως αν η περιστροφή είναι κάθετη στη ράβδο που τα ενώνει, τότε θα παρατηρήσουμε πως δημιουργούνται βαρυτικά κύματα και μάλιστα όσο πιο κοντά πλησιάζουν οι δυο σφαίρες, τόσο πιο έντονο θα είναι το φαινόμενο, μέχρις ότου φτάσουν αρκετά κοντά ώστε να συγχωνευτούν. Το αστροφυσικό ανάλογο είναι ένα διπλό σύστημα, που συνήθως αποτελείται από αστέρες νετρονίων και μαύρες τρύπες σε οποιονδήποτε συνδυασμό αυτών.

Σημαίνει αυτό, όμως, πως δεν παράγονται βαρυτικά κύματα και από άλλα αντικείμενα στο σύμπαν; Όπως για παράδειγμα ένα άστρο και τον πλανήτη που περιστρέφεται γύρω από αυτόν; Η απάντηση είναι πως ναι, παράγονται, ωστόσο αυτά είναι τόσο ασθενή που η ύπαρξή τους, όσο και η ανίχνευσή τους, ουσιαστικά δεν έχουν καμία σημασία στην ευρύτερη μελέτη του συστήματος. Με το ίδιο σκεπτικό, αν αρχίσετε να γυρίζετε γύρω από τον εαυτό σας με ανοιχτά τα χέρια, θα παράξετε βαρυτικά κύματα, μη περιμένετε όμως κάποια εμφανή διαφορά στον περιβάλλοντα χώρο σας. Το πιο πιθανό είναι πως ίσως ιδρώσετε λίγο.



Εικόνα 2-4: Παραγωγή βαρυτικών κυμάτων από διπλό σύστημα μαζών. Πηγή: Rochester Institute of Technology.

Ας πάμε τώρα να κάνουμε λίγη φυσική (γιατί μέχρι τώρα κουνούσαμε απλά τα χέρια μας και παρήγαμε βαρυτικά κύματα).

Μέσα από τη μελέτη του φορμαλισμού των βαρυτικών κυμάτων, μπορεί κανείς να καταλήξει στις δυο παρακάτω σχέσεις:

$$L_{\text{GW}} = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{5} \frac{G}{c^5} \langle \ddot{Q}_{jk} \ddot{Q}_{jk} \rangle$$

$$h_{jk} = \frac{2}{r} \frac{G}{c^4} \ddot{Q}_{jk} \left(t - \frac{r}{c} \right)$$

Η πρώτη μας περιγράφει την ενέργεια που ακτινοβολεί (και κατά συνέπεια χάνει) η πηγή μέσω αυτού και η δεύτερη το πλάτος του κύματος. Το σύμβολο Q_{jk} ονομάζεται τετραπολική ροπή, και για την ώρα δείτε το σαν μία ιδιότητα (όπως είναι η μάζα ή το φορτίο) που περιγράφει ένα σώμα. Οι τελείες στο πάνω μέρος του συμβολίζουν χρονικές παραγωγούς, ενώ οι αγκύλες σημαίνουν μέση τιμή. Για να τις μελετήσουμε θα κάνουμε την λεγόμενη εκτίμηση τάξης μεγέθους, δηλαδή πόσο μεγάλη (ή μικρή) περιμένουμε να είναι αυτή η ποσότητα. Για το μεν πλάτος βρίσκουμε πως:

$$h \sim \frac{r_s}{r} \frac{v^2}{c^2}$$

όπου r_s είναι η ακτίνα του Schwarzschild και δίνεται από τον τύπο:

$$r_s = 2 \frac{GM}{c^2}$$

Κάποιοι ίσως την έχουν ακούσει να περιγράφει τον ορίζοντα γεγονότων στην περίπτωση των μαύρων τρυπών, ωστόσο μη μπερδευτείτε, δεν θα ασχοληθούμε με αυτή την έννοια, απλώς μας βολεύει να γράφουμε πιο συμπυκνμένα τις εξισώσεις μας και γιατί μπορούμε να συγκρίνουμε πιο εύκολα την ακτίνα των αντικειμένων που μελετάμε. Τέλος, r είναι η απόστασή μας από την πηγή του κύματος, ενώ για την λαμπρότητα:

$$L_{\text{GW}} \sim \frac{c^5}{G} \left(\frac{r_s}{R} \right)^2 \left(\frac{v}{c} \right)^6$$

Ο "περίεργος" αναγνώστης μπορεί να αντικαταστήσει τις αριθμητικές τιμές και να υπολογίσει το πλάτος και πόση ενέργεια θα χάνει με την εκπομπή βαρυτικών κυμάτων η πηγή αν αρχίσει να περιστρέφεται γύρω από τον εαυτό της. Μία πρώτη και άμεση παρατήρηση είναι πως και οι δύο αυτές ποσότητες παίρνουν αρκετά μεγάλες τιμές (και άρα ανιχνεύσιμες) όταν εξετάζουμε συστήματα όπου οι διαστάσεις τους είναι: $R \sim r_s$, και οι ταχύτητες: $v \sim c$, όπου οι

συνθήκες αυτές ικανοποιούνται στα συμπαγή αντικείμενα (αστέρες νετρονίων και μαύρες τρύπες). Κάποιος θα μπορούσε να σκεφτεί, γιατί μας ενδιαφέρει όμως το πλάτος του κύματος;

Ας επιστρέψουμε πίσω στην αναλογία των υδάτινων κυμάτων για να το καταλάβουμε διαισθητικά. Όταν έχουμε ένα κύμα στην επιφάνεια της θάλασσας, αυτό που παρατηρούμε είναι μία αυξομείωση στη στάθμη του νερού. Αν τοποθετήσουμε μία σημαδούρα, θα δούμε πως αυτή θα αρχίσει να ανεβοκατεβαίνει. Όσο μεγαλύτερο το κύμα (σε πλάτος) τόσο πιο μεγάλη η μετατόπισή της.

Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και στη περίπτωση των βαρυτικών κυμάτων, μόνο που τώρα αντί για τη αυξομείωση στο ύψος της θάλασσας, έχουμε την αυξομείωση στο μήκος του χώρου. Δηλαδή αν σκεφτούμε πως έχουμε έναν χάρακα, και μέσα από αυτόν περνάει ένα βαρυτικό κύμα, αυτό που θα συμβεί είναι πως ο χάρακας θα μεγαλώσει και θα μικρύνει κατά τη διάρκεια του γεγονότος. Ωστόσο μην τρομάξετε, τα βαρυτικά κύματα είναι εξαιρετικά ασθενή και η αλλαγή που επιφέρουν είναι σχεδόν (αλλά όχι εντελώς) ανεπαίσθητη.

Για να καταλάβουμε πόσο "αδύναμα" είναι, ας σκεφτούμε πως έχουμε μία έκρηξη supernova στο γαλαξιακό σμήνος της Παρθένου (100 εκατομμύρια έτη φωτός μακριά) και η ενέργεια που εκλύεται είναι της τάξης των $10^4 M_\odot$ (θυμηθείτε πως η ενέργεια είναι ισοδύναμη με τη μάζα από τη διάσημη σχέση $E=mc^2$), με συχνότητα $f=1\text{kHz}$ και το σήμα μας έχει διάρκεια 1 ms. Σε αυτή τη περίπτωση, το πλάτος του κύματος που θα ανιχνεύσουμε εμείς στη Γη θα δίνεται από τη σχέση:

$$h \approx 10^{-22} \left(\frac{E_{\text{GW}}}{10^4 M_\odot} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{1\text{kHz}} \right)^{-1} \left(\frac{\tau}{1\text{msec}} \right)^{-1/2} \left(\frac{r}{15\text{Mpc}} \right)^{-1}$$

Επομένως, αν σκεφτούμε πως ο "χάρακάς" μας (που ονομάζεται συμβολόμετρο) έχει μήκος 4 km η αλλαγή που θα παρατηρήσουμε θα είναι:

$$\Delta l = h \cdot l = 10^{-22} \cdot 4\text{km} = 4 \cdot 10^{-17} \text{ cm.}$$

Για να καταλάβουμε πόσο μικρό είναι αυτό το νούμερο, ας θυμηθούμε πως ένα τυπικό μέγεθος για τα άτομα είναι της τάξης των 10^{-8} cm . Οπότε, βλέπουμε πόσο ασθενή είναι τα βαρυτικά κύματα, ακόμα και από τις πιο έντονες πηγές στο σύμπαν και γιατί ακόμα και ο ίδιος ο Einstein θεωρούσε πως δεν θα ήταν δυνατή η ανίχνευσή τους. Παρόλα αυτά, αν και χρειάστηκε να περάσουν 100 χρόνια από τότε που θεμελιώθηκε η θεωρία, και χάρις στην πρόοδο της τεχνολογίας και την επιμονή του ανθρωπίνου πνεύματος, καταφέραμε το φαινομενικά αδύνατο.



Εικόνα 2-5: Ο ανιχνευτής VIRGO στην Πίζα της Ιταλίας. Πηγή: VIRGO.

Μέχρι τώρα, μελετήσαμε τί είναι τα βαρυτικά κύματα, και πώς παράγονται. Ωστόσο ακόμα δεν απαντήσαμε ένα πολύ σημαντικό ερώτημα. Γιατί είναι τόσο σημαντικά ώστε να αξίζουν την απονομή 2 βραβείων Nobel (το πρώτο δόθηκε το 1993 στους Hulse και Taylor για την έμμεση ανίχνευσή τους); Μέχρι τώρα, όση πληροφορία λαμβάναμε από το σύμπαν, ήταν μέσω ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, δηλαδή μέσω φωτός που έρχεται στα τηλεσκόπια μας (σε κάθε μήκος κύματος). Τα βαρυτικά κύματα, όμως, είναι μία εντελώς διαφορετικής φύσεως ακτινοβολία, οπότε η πληροφορία που παίρνουμε είναι εντελώς διαφορετική. Οι συχνότητες στις οποίες εκπέμπεται είναι αρκετά κοντά στις ηχητικές.

Επομένως, για μερικές χιλιάδες χρόνια, από τότε που ο άνθρωπος έστρεψε τα μάτια του στον έναστρο ουρανό, είχαμε μόνο την αίσθηση της όρασης να μας βοηθάει στην κατανόηση του σύμπαντος. Πλέον όμως, θα μπορούσε να πει κάποιος, ότι έχουμε "εξελιχθεί" και έχουμε αναπτύξει ένα ακουστικό όργανο που μας επιτρέπει να ακούμε. Ή, αν θέλουμε μία διαφορετική παρομοίωση, εμπνευσμένη από τις τέχνες, μέχρι τώρα πηγαίναμε στον κινηματογράφο

και βλέπαμε βουβές ταινίες του Charlin και ξαφνικά για πρώτη φορά προβάλλεται ο Μέγας Δικτάτορας (για όσους δεν γνωρίζουν, ήταν η πρώτη ταινία στην οποία μίλησε ο Charlin) και είμαστε σε θέση πλέον να βλέπουμε αλλά και να ακούμε τους ηθοποιούς να μιλούν.

Αναφορές

- Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy, Kip Thorne. Έχει μεταφραστεί στα Ελληνικά με τίτλο Μαύρες Τρύπες και Στρεβλώσεις του Χρόνου, Εκδόσεις Κάτοπτρο, από τον Καθηγητή Θεοχάρη Αποστολάτο. Βιβλίο εκλαϊκευτικής φυσικής, ιδανικό για κάποιον που θέλει να μάθει περισσότερα, αλλά ακόμα δεν έχει το απαραίτητο μαθηματικό υπόβαθρο.
- Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars, Shapiro and Teukolsky. Ένα αρκετά καλό βιβλίο πάνω στη φυσική των συμπαγών αντικειμένων, όχι ιδιαίτερα απαιτητικό από μαθηματικής απόψεως, ωστόσο αρκετά προχωρημένο για τον απλό αναγνώστη.
- [Gravitational Waves Physics, Kostas D. Kokkotas](#)
- [Η ιστοσελίδα του LIGO](#)

3 Publish or Perish, ή επί το ελληνικότερο: «Δημοσίευση ή Θάνατος»

Γράφει ο Φώτιος Πυρρής

Μια ακριβέστερη απόδοση αυτής της φράσης στα ελληνικά θα ήταν "Δημοσίευσε ή παράτησε τα", ωστόσο η παράφραση του συνθήματος της επανάστασης του '21 φαίνεται να αποδίδει πιο ουσιαστικά το νόημα της φράσης. Η πρώτη χρήση της ανάγεται στο μακρινό 1932, από τον HJ Coolidge⁽¹⁾. Χρησιμοποιείται για να περιγράψει την -ολοένα και μεγαλύτερη- τάση του "ακαδημαϊκού πραγματισμού", στο πλαίσιο του οποίου η συγγραφή και η δημοσίευση άρθρων σε κάποιο περιοδικό αποτελεί αυτοσκοπό. Στο σήμερα, το ακαδημαϊκό περιβάλλον διεθνώς είναι πολύ διαφορετικό από το 1932, ωστόσο φαίνεται ότι η φράση αυτή δεν είναι απλώς επίκαιρη, αλλά σκιαγραφεί εξαιρετικά την κατάσταση στην ακαδημαϊκή κοινότητα. Μάλιστα, κριτική στην κατάσταση αυτή έκανε και ο Peter Higgs, ένας από τους εμπνευστές του ομώνυμου σωματιδίου, η ανακάλυψη του οποίου επέτρεψε την ολοκλήρωση του καθιερωμένου προτύπου των στοιχειωδών σωματιδίων. Συγκεκριμένα, σε μια συνέντευξη στον Guardian το 2013⁽²⁾, καθ' οδόν προς την παραλαβή του βραβείου Νόμπελ, εξέφρασε την αμφιβολία του ως προς το αν μια ιδίου βεληνεκούς ανακάλυψη θα ήταν επιτεύξιμη στο σημερινό ακαδημαϊκό περιβάλλον, λόγω της πίεσης για ροή δημοσιεύσεων που δέχονται οι ερευνητές. Το παρόν άρθρο αποσκοπεί στο να καταδείξει τις συνέπειες του "Publish or Perish" στην επιστήμη και στους εργαζόμενους στην έρευνα.

Δημοσιεύσεις και επιστημονικά περιοδικά

Οι δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά αποτελούν, επί της ουσίας, το "προϊόν" της ερευνητικής εργασίας, παρουσιάζουν, δηλαδή, στην επιστημονική κοινότητα, τη νέα γνώση που παρήχθη. Οι συγγραφείς υποβάλλουν το προσχέδιο του άρθρου στο περιοδικό, το οποίο είναι συνήθως ιδιοκτησία κάποιου μεγάλου εκδοτικού οίκου. Αν το θέμα του άρθρου εμπίπτει στο σκοπό του περιοδικού, το γραφείο έκδοσης (editorial board) αποστέλλει το άρθρο προς αξιολόγηση σε ορισμένους ερευνητές οι οποίοι ασχολούνται με παρεμφερή αντικείμενα. Όποιος προθυμοποιηθεί από τους τελευταίους, αναλαμβάνει να κρίνει το προσχέδιο. Στο πλαίσιο αυτό, το άρθρο είτε απορρίπτεται, είτε δημοσιεύεται μετά από μικρές ή μεγαλύτερες αλλαγές, τις οποίες προτείνει ο αξιολογητής. Η διαδικασία αυτή αναφέρεται ως ομότιμος κρίση (peer-review) και παρουσιάζεται ως αντικειμενική και αδιάβλητη. Το εύρος ισχύος αυτών των παραδοχών θα συζητηθεί σε επόμενο άρθρο, ενδεικτικά μπορεί κανείς να ανατρέξει στους Horbach & Halffman⁽³⁾.



"Surely you were aware when you accepted the position, Professor, that it was publish or perish."

Εικόνα 3-1: Μια κατά λέξη ανάγνωση του "Publish or Perish" εν είδει αστεισμού από τους Rawat & Meena⁽⁴⁾. Θα μπορούσε ίσως κάποιος να ισχυριστεί ότι η βεβαιότητα της σφαίρας συνιστά "μικρότερο κακό" από το συνεχές άγχος της εργασιακής επισφάλειας.

Υπάρχει πληθώρα περιοδικών, καθώς η ιδιοκτησία ενός επιστημονικού περιοδικού αποτελεί μια εξαιρετικά επικερδή επιχειρηματική ενασχόληση με πολύ χαμηλά λειτουργικά έξοδα, καθώς η όλη διαδικασία της ομότιμου κρίσης που αναφέρθηκε παραπάνω γίνεται δωρεάν από μέλη της επιστημονικής κοινότητας, και η διάθεση των τευχών του περιοδικού, ακόμα και σε ηλεκτρονική μορφή, γίνεται σε αρκετά υψηλές τιμές, συγκρίσιμες με αυτές έντυπων βιβλίων (!). Ένα κριτήριο ποιότητας για ένα περιοδικό είναι ο παράγοντας απήχησης (impact factor), ο οποίος ορίζεται ως:

$$\text{Impact Factor} = \frac{\text{Total Citations}}{\text{Total Publications}}$$

όπου τα σύνολα των αναφορών (citations) και των δημοσιεύσεων (publications) αναφέρονται στην προηγούμενη διετία.

Ένας Υποψήφιος Διδάκτορας ή ένας Μεταδιδακτορικός Ερευνητής, προσπαθεί για όσο το δυνατόν περισσότερες δημοσιεύσεις σε περιοδικά με όσο το δυνατόν υψηλότερο παράγοντα απήχησης. Ο λόγος για αυτό έχει να κάνει με την εργασιακή επισφάλεια μέσα στην ακαδημαϊκή κοινότητα παγκοσμίως. Συγκεκριμένα, κάποιος Υποψήφιος Διδάκτορας, προκειμένου να εξασφαλίσει ότι θα μπορέσει να βρει μία διετή ή τριετή σύμβαση εργασίας στον χώρο της έρευνας ως Μεταδιδακτορικός Ερευνητής, θα πρέπει να έχει ικανό αριθμό δημοσιεύσεων, ήτοι περισσότερες από τους υπόλοιπους αιτούντες για την ίδια θέση. Ακριβέστερα, χρησιμοποιούνται μετρικές όπως ο δείκτης h (h -index). Ο δείκτης αυτός ορίζεται ως ο αριθμός N των δημοσιεύσεων που έχει κάνει κάποιος και έχουν τουλάχιστον N αναφορές. Ομοίως, ένας Μεταδιδακτορικός Ερευνητής, προκειμένου να εξασφαλίσει το επόμενο συμβόλαιο, αναγκάζεται να συνεχίσει το "κυνήγι" δημοσιεύσεων. Θα περίμενε κανείς ότι τουλάχιστον ένας Καθηγητής, έχοντας μόνιμη θέση, θα βρισκόταν εκτός αυτής της δυναμικής. Ωστόσο, για μια σειρά από λόγους, όπως για παράδειγμα την εξασφάλιση χρηματοδοτήσεων προκειμένου να προσληφθούν Μεταδιδακτορικοί Ερευνητές ή/και να γίνουν πειράματα, ή ακόμα και λόγω συγκεκριμένων χρηματικών ανταμοιβών, η πλειοψηφία των Καθηγητών συμμετέχει στην προαναφερθείσα δυναμική. Η συμμετοχή τους μάλιστα γίνεται σε προνομακό επίπεδο, καθώς καθορίζουν το εργασιακό πλαίσιο για όλους τους υπόλοιπους εργαζόμενους, λόγω της ισχυρής ακαδημαϊκής ιεραρχίας.

Επιπτώσεις

Θα μπορούσε κανείς να ισχυριστεί ότι το συγκεκριμένο μοντέλο προσφέρει στην επιστήμη, καθώς η δυναμική αυτή του ανταγωνισμού μεταξύ ερευνητικών ομάδων, ερευνητών εντός της ίδιας ομάδας καθώς και μεμονωμένων ερευνητών, ωθεί κάθε μέλος της κοινότητας στα όρια του, με κέρδος τόσο για την επιστήμη όσο και για τον καθένα ατομικά. Δυστυχώς, το παραπάνω -λογικοφανές- συμπέρασμα φαίνεται να είναι εξ' ολοκλήρου ανακριβές.

Στο πλαίσιο της επιστημονικής μεθόδου, τα "θετικά αποτελέσματα", η απόδειξη δηλαδή ότι μια μέθοδος δουλεύει αποτελεσματικά ή μια υπόθεση ισχύει, είναι το ίδιο πολύτιμα με τα "αρνητικά αποτελέσματα". Ανάμεσα στις επιπτώσεις της προαναφερθείσας δυναμικής στην λειτουργία της ακαδημαϊκής κοινότητας, αλλά και στην παραγόμενη γνώση, φαίνεται ότι είναι η έμφαση σε "θετικά αποτελέσματα". Σχετική έρευνα⁽⁴⁾ έδειξε ότι ο αυξανόμενος ανταγωνισμός και η πίεση για δημοσιεύσεις μπορούν να οδηγήσουν σε βλάβη της ακεραιότητας της επιστημονικής έρευνας, καθώς οι ερευνητές, στην προσπάθειά τους για δημοσίευση, ωθούνται στο να επιβεβαιώνουν παρά να διαψεύδουν υποθέσεις. Για παράδειγμα, το να δείξει κανείς

ότι μια συγκεκριμένη φαινομενολογική παραμετροποίηση μιας μετρήσιμης ποσότητας δεν αποτελεί καλή προσέγγιση είναι ένα χρήσιμο ερευνητικό αποτέλεσμα, καθώς δεν θα χρειαστεί να δαπανήσει κάποιος άλλος ερευνητής χρόνο στο ίδιο ερώτημα. Φαίνεται όμως ότι υπάρχουν πολύ λίγες συγκριτικά αντίστοιχες εργασίες στη βιβλιογραφία. Αυτό συμβαίνει γιατί "αρνητικά" αποτελέσματα είναι λιγότερο πιθανό να δημοσιευτούν και εν συνεχεία να αναφερθούν σε άλλες εργασίες, συνεπώς δεν απασχολούν τους ερευνητές σε αυτά τα πλαίσια.

Μια άλλη επίπτωση της σύνδεσης του αριθμού των δημοσιεύσεων με την επαγγελματική εξέλιξη των ερευνητών αφορά τον ακαδημαϊκό πλουραλισμό. Η επιστημονική κοινότητα, επί της αρχής, όχι μόνο επιτρέπει αλλά και επιθυμεί την ύπαρξη πολλών διαφορετικών κατευθύνσεων προς επίλυση ενός προβλήματος. Ωστόσο, αν για δοθέν πρόβλημα μια συγκεκριμένη ερευνητική κατεύθυνση παρέχει "ευκολότερη" επίτευξη δημοσιεύσιμων αποτελεσμάτων, είναι προς το συμφέρον κάθε ερευνητή να ασχοληθεί με αυτή. Επίσης, οι κριτές τείνουν να προτείνουν προς δημοσίευση άρθρα "κοντά" στις δικές τους αντιλήψεις για το τι συνιστά "καλή"/"χρήσιμη" έρευνα⁽⁵⁾. Συνεπώς, ενισχύεται η τάση της περιχαράκωσης στο κυρίαρχο επιστημονικό παράδειγμα, προς εξασφάλιση του άμεσα δημοσιεύσιμου των αποτελεσμάτων⁽⁵⁾. Έτσι, από τη μία πλευρά έχουμε ανισοκατανομή των νέων ερευνητών στα ερευνητικά πεδία, και από την άλλη μείωση του ακαδημαϊκού πλουραλισμού.

Φαίνεται επίσης ότι μια σειρά κακών επιστημονικών πρακτικών συνδέονται με την "publish or perish" αντίληψη⁽¹⁾. Ένα σχετικό παράδειγμα αποτελεί το λεγόμενο "salami slicing". Η πρακτική αυτή αφορά την κατάτμηση μιας έρευνας σε πολλές επιμέρους δημοσιεύσεις, με σκοπό, φυσικά, τη μεγαλύτερη άνοδο του h -index του συγγραφέα. Ταυτόχρονα, παρότι η συνεισφορά κάθε συν-συγγραφέα είναι, υποτίθεται, ίση στο τελικό αποτέλεσμα, στην πράξη δεν ισχύει κάτι τέτοιο, και μάλιστα είναι αρκετά κοινή η πρακτική σε κάθε δημοσίευση να μπαίνουν ως συν-συγγραφείς όλα τα μέλη του συγκεκριμένου εργαστηρίου ή της ομάδας. Έτσι, μια πολυμελής ομάδα είναι σε θέση να εμφανίζει περισσότερες αναφορές ανά ερευνητή, συγκριτικά με μια ολιγομελή, και έτσι να νέμεται το μερίδιο του λέοντος σε χρηματοδοτήσεις. Είναι επίσης πλέον κοινός τόπος ότι, αν ένας ερευνητής έχει μεγάλο αριθμό ερευνητικών άρθρων ανά έτος (π.χ. 10 - 12), αυτό που μάλλον συμβαίνει είναι ότι ο συγκεκριμένος ερευνητής έχει μεγάλο αριθμό συνεργασιών, όπου η ακριβής συνεισφορά του είναι μάλλον δύσκολο να υπολογιστεί. Το τελευταίο είναι προφανές, καθώς, όσο αποδοτικός και αν είναι κάποιος, είναι απλά ανθρωπίνως αδύνατο να ολοκληρώνει μια έρευνα, να συγγράφει το άρθρο, να το υποβάλλει προς δημοσίευση και να ολοκληρωθεί η

διαδικασία εντός ενός μήνα. Ένα υψηλό h-index, λοιπόν, δεν αντιστοιχεί απαραίτητα σε έναν ικανό ερευνητή.

Ως προς τα αποτελέσματα στην καθημερινότητα ενός εργαζόμενου στην έρευνα, η κατάσταση φαίνεται να είναι ακόμα δυσχερέστερη. Συγκεκριμένα, σε σχετική έρευνα⁽⁶⁾ βρέθηκε ότι η πίεση για δημοσιεύσεις προκαλεί υψηλό άγχος στα μέλη της ακαδημαϊκής κοινότητας, με το φαινόμενο να είναι εντονότερο στους μη-μόνιμους ερευνητές (Υπ. Διδ, κ.ά.). Έχει βρεθεί επίσης⁽⁷⁾ ότι 32% των Υποψηφίων Διδασκάντων έχουν ή διατρέχουν άμεσο κίνδυνο να αναπτύξουν κατάθλιψη ή κάποια άλλη κοινή ψυχική νόσο, ενώ το 50% βιώνουν ψυχολογικές διαταραχές. Μάλιστα, στη μεγάλη πλειοψηφία τους εμφανίζουν αϋπνίες, ενώ αισθάνονται καθημερινά απογοήτευση. Καθώς το άγχος αποτελεί σημαντικό αίτιο ψυχικών διαταραχών, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η έμφαση στη δημοσίευση έχει ισχυρά αρνητικό αντίκτυπο στην ψυχική υγεία του εργαζόμενου στην έρευνα.

Ακόμα, καθώς τα πανεπιστημιακά ιδρύματα διεθνώς είναι ως επί το πλείστον εμπορευματοποιημένα, προκειμένου να προσελκύσουν περισσότερους φοιτητές χρειάζεται να χτίσουν φήμη. Ένας από τους τρόπους για να επιτευχθεί αυτό είναι η παρουσίαση υψηλού ερευνητικού έργου. Μια πρακτική επιλογή ως προς αυτό είναι η τοποθέτηση επιπλέον χρηματικών αμοιβών (πριμ) ανάλογα με τις δημοσιεύσεις που κάνει κάποιος. Σύμφωνα με τους Backes-Gellner & Schlinghoff⁽⁸⁾, οι Καθηγητές ωθούνται στο να αφιερώνουν όλο και λιγότερο χρόνο σε άλλα, εξίσου ή και περισσότερο σημαντικά καθήκοντα, όπως αυτό της διδασκαλίας και της συμβουλευτικής νέων ερευνητών, με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της παρεχόμενης διδασκαλίας. Ανεξάρτητα της ύπαρξης άμεσου οικονομικού κέρδους, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η έμφαση στην έρευνα και η επακόλουθη παραμέληση της εκπαιδευτικής διαδικασίας γίνεται προκειμένου να αποκτηθεί επιπλέον φήμη έναντι συναδέλφων στο ίδιο τμήμα, στο πλαίσιο του ανταγωνισμού, κάτι που αποτελεί τρόπο ζωής εντός της ακαδημαϊκής κοινότητας.

Συμπεράσματα

Η έμφαση στο πλήθος και την απήχηση των δημοσιεύσεων ως το βασικότερο κριτήριο για την χρηματοδότηση και τη γενικότερη επαγγελματική εξέλιξη ενός ερευνητή δημιουργεί θεμελιώδη προβλήματα, τόσο στην ακαδημαϊκή κοινότητα,

όσο και στην ίδια την ποιότητα της επιστημονικής εργασίας. Οι συνέπειες στην καθημερινότητα των εργαζομένων στην έρευνα είναι επίσης σοβαρές, και φυσικά εξαρτώνται από τη θέση τους στην ακαδημαϊκή ιεραρχία. Ως προς τα μέτρα που μπορούν να ληφθούν σε διεθνές αλλά και τοπικό επίπεδο, υπάρχουν διάφορες αντιλήψεις. Μια εξ' αυτών αφορά την περαιτέρω αυστηροποίηση των κριτηρίων δημοσίευσης, στην προσπάθεια να εξασφαλιστεί η ποιότητα του ερευνητικού έργου, ενώ άλλες αφορούν την δημιουργία κινήτρων ώστε να δοθεί έμφαση στην εκπαιδευτική διαδικασία και λιγότερο στην παραγωγή δημοσιεύσεων. Υπάρχει, ακόμα, η αντίληψη που αναφέρεται στη χρήση περισσότερο προηγμένων μετρικών της ποιότητας του ερευνητικού έργου. Ωστόσο, η ουσιαστικότερη προβληματική αφορά την ίδια τη δομή της ακαδημαϊκής κοινότητας διεθνώς, και του νεοφιλελεύθερου Πανεπιστημίου, του πλαισίου δηλαδή μέσα στο οποίο δημιουργήθηκε και κυριαρχεί η αντίληψη *publish or perish*.

Αναφορές

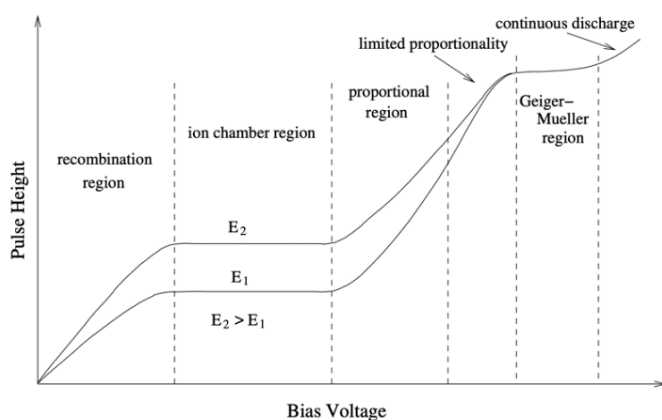
- (1) Rawat, S., & Meena, S. (2014). Publish or perish: Where are we heading?. *Journal of research in medical sciences: the official journal of Isfahan University of Medical Sciences*, 19(2), 87.
- (2) Peter Higgs: I wouldn't be productive enough for today's academic system, <https://www.theguardian.com/science/2013/dec/06/peter-higgs-boson-academic-system>, ανακτήθηκε στις 26/6/2020.
- (3) Horbach, S. S., & Halffman, W. W. (2018). The changing forms and expectations of peer review. *Research integrity and peer review*, 3(1), 1-15.
- (4) Fanelli, D. (2010). Do pressures to publish increase scientists' bias? An empirical support from US States Data. *PLoS one*, 5(4), e10271.
- (5) De Rond, M., & Miller, A. N. (2005). Publish or perish: bane or boon of academic life?. *Journal of management inquiry*, 14(4), 321-329.
- (6) Miller, A. N., Taylor, S. G., & Bedeian, A. G. (2011). Publish or perish: academic life as management faculty live it. *Career development international*.
- (7) Levecque, K., Anseel, F., De Beuckelaer, A., Van der Heyden, J., & Gisle, L. (2017). Work organization and mental health problems in PhD students. *Research Policy*, 46(4), 868-879.
- (8) Backes-Gellner, U., & Schlinghoff, A. (2010). Career incentives and "publish or perish" in German and US universities. *European Education*, 42(3), 26-52.

4 Η αρχή λειτουργίας των ανιχνευτών αερίου γεμίσματος και οι εφαρμογές τους

Γράφει ο Γιώργος Σαββίδης

Κάθε ιστορική περίοδος χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο κοινωνικοοικονομικών αναγκών, στο πλαίσιο των οποίων ο άνθρωπος καλείται να επιβιώσει και να αναπτυχθεί. Η επίλυση προβλημάτων τόσο της καθημερινής ζωής όσο και η απάντηση σε φιλοσοφικά ερωτήματα, οδήγησε βαθμιαία στην ανάπτυξη της επιστημονικής έρευνας. Θεμέλια συστατικά της τελευταίας αποτελούν δύο διαλεκτικά συνδεδεμένες έννοιες: η θεωρία και το πείραμα. Η συγκέντρωση ενός συνόλου παρατηρήσεων οδηγούν στην ανάπτυξη ενός γενικότερου κανόνα περιγραφής της πραγματικότητας, την θεωρία. Από την άλλη, η ανάπτυξη της θεωρίας ωθεί στην εξέλιξη νέων πειραματικών μεθόδων και διατάξεων για την επαλήθευση θεωρητικών προβλέψεων. Μία κατηγορία τέτοιων διατάξεων αποτελούν οι ανιχνευτές αερίου γεμίσματος (ή ανιχνευτές με αέριο γέμισμα - Gas Filled Detectors).

Οι ανιχνευτές αερίου γεμίσματος είναι διατάξεις ανίχνευσης ιονίζουσας ακτινοβολίας με σημαντικές εφαρμογές στην σωματιδιακή φυσική και την ραδιοπροστασία. Οι συγκεκριμένοι ανιχνευτές αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια στα άκρα των οποίων εφαρμόζεται τάση, ενώ ανάμεσα τους παρεμβάλλεται κάποιο αέριο. Η αλληλεπίδραση της ιονίζουσας ακτινοβολίας με το αέριο, δημιουργεί ζεύγη ηλεκτρονίων/ιόντων, η κίνηση των οποίων κάτω από την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου, οδηγεί στην δημιουργία ενός μετρήσιμου ρεύματος στην έξοδο. Η επιλογή της έντασης του πεδίου, της πίεσης και του είδους του αερίου, εξαρτάται από τις ανάγκες του δοσμένου προβλήματος. Η κατηγοριοποίηση τους, ωστόσο, γίνεται με βάση την ένταση του πεδίου.

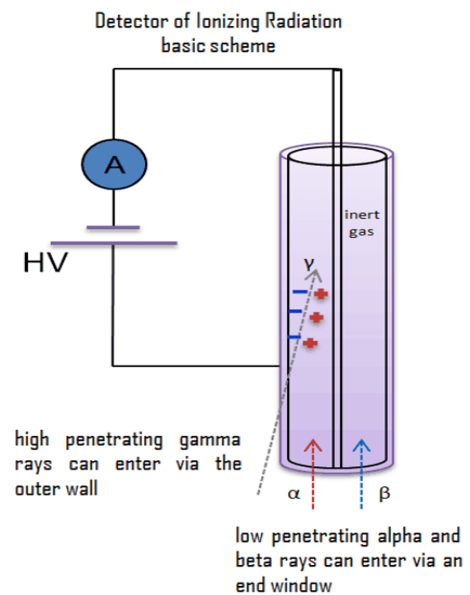


Εικόνα 4-1: Μεταβολές του ύψους του παλμού που παράγεται από τους διάφορους τύπους ανιχνευτών σαν συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης. Οι δύο καμπύλες αντιστοιχούν σε διαφορετικές ενέργειες της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. (Πηγή (1))

Ως εκ τούτου, οι ανιχνευτές αερίου γεμίσματος χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες: *θάλαμοι ιονισμού, αναλογικοί απαριθμητές, και ανιχνευτές Geiger-Müller*. Πιο συγκεκριμένα, η Εικόνα 4-1, απεικονίζει το μετρούμενο ύψος του παλμού στην έξοδο σαν συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης (έντασης του πεδίου). Η σχέση μεταξύ του ύψους του παλμού και της εφαρμοζόμενης τάσης, καθορίζει τον τύπο του ανιχνευτή αερίου.

Θάλαμοι ιονισμού

Ας υποθέσουμε ότι διαθέτουμε ένα τροφοδοτικό υψηλής τάσης, έναν μετρητή ρεύματος και μία κλειστή κυλινδρική διάταξη αποτελούμενη από δύο ηλεκτρόδια με κατάλληλους πληρωτές αερίου για το γέμισμα και άδειασμα του κυλίνδρου με κάποιο αέριο.



Εικόνα 4-2: Στοιχειώδες σχεδιάγραμμα διάταξης θαλάμου ιονισμού. (Πηγή (2))

Αν κάποιος συνδέσει τα δύο ηλεκτρόδια της διάταξης στο τροφοδοτικό υψηλής τάσης, θα έχει θέσει σε λειτουργία έναν ανιχνευτή αερίου γεμίσματος. Το πρώτο πράγμα που θα παρατηρήσει ξεκινώντας από χαμηλή τάση θα είναι ότι το ύψος του παλμού στην έξοδο αυξάνεται με την αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης. Η δημιουργία παλμού στην έξοδο δηλώνει ότι το αέριο στο εσωτερικό του κυλίνδρου ιονίζεται από την παρουσία ιονίζουσας ακτινοβολίας. Ωστόσο όπως φαίνεται από την Εικόνα 4-1, λόγω της χαμηλής τάσης που εφαρμόζεται, ο συγκεκριμένος ανιχνευτής θα λειτουργεί στην περιοχή *επανασύνδεσης* (recombination). Επανασύνδεση

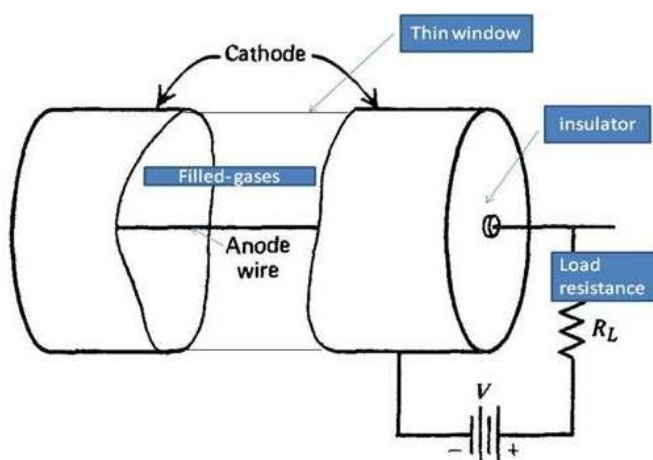
ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο ζεύγη ηλεκτρονίων/ιόντων επανενώνονται για να σχηματίσουν ένα ουδέτερο άτομο. Εν προκειμένω, λόγω χαμηλής τάσης, το ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό του κυλίνδρου είναι αρκετά ασθενές, με αποτέλεσμα η δύναμη που ασκείται από το πεδίο στα φορτία (ηλεκτρόνια/ιόντα) να μην είναι αρκετή για να εμποδίσει την επανασύνδεση. Επομένως, ένας ανιχνευτής που λειτουργεί στην περιοχή επανασύνδεσης δεν χρησιμοποιείται για μετρήσεις.

Η αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης, οδηγεί σε αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου με συνέπεια την αποτελεσματικότερη συλλογή των φορτίων (ηλεκτρονίων/ιόντων) η οποία αντανακλάται από την αύξηση του ύψους του παλμού στην έξοδο. Η επιτυχής συλλογή όλων των παραγόμενων φορτίων είναι το χαρακτηριστικό των θαλάμων ιονισμού. Σε αυτή την περιοχή, περαιτέρω αύξηση της τάσης δεν θα επηρεάσει το μετρούμενο ρεύμα καθώς όλα τα φορτία συλλέγονται επιτυχώς από τα δύο ηλεκτρόδια. Εν γένει, στους θαλάμους ιονισμού είναι σχεδόν αδύνατο να εμποδιστεί εξ ολοκλήρου η επανασύνδεση, ωστόσο ειδικά σχεδιασμένοι ανιχνευτές μπορούν να κάνουν το συγκεκριμένο φαινόμενο αμελητέο.

Οι θάλαμοι ιονισμού χρησιμοποιούνται ευρέως στην ιατρική φυσική στον τομέα της ραδιοθεραπείας ως δοσίμετρα⁽³⁾ για τους ασθενείς. Επίσης χρησιμοποιούνται στην πυρηνική βιομηχανία για την ραδιοπροστασία των εργαζομένων από την ραδιενέργεια.

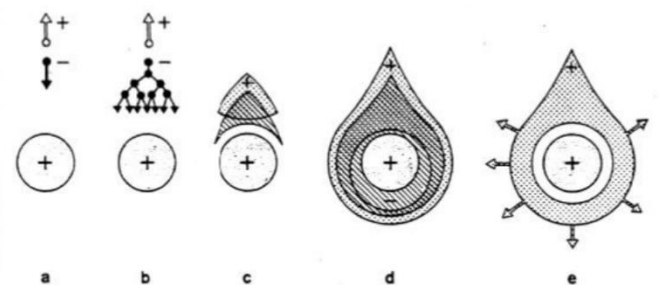
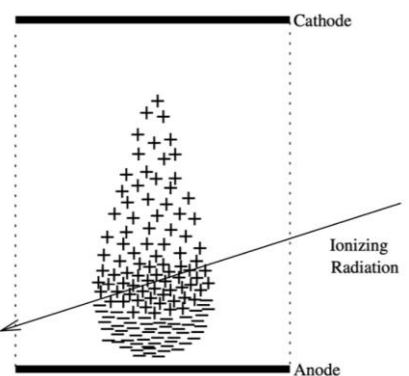
Αναλογικοί απαριθμητές

Ως τώρα έχει γίνει αναφορά στον ιονισμό που προκαλείται από την πρόσπτωση ακτινοβολίας στο αέριο του ανιχνευτή. Ο ιονισμός αυτού του τύπου ονομάζεται *πρωτογενής ιονισμός*.

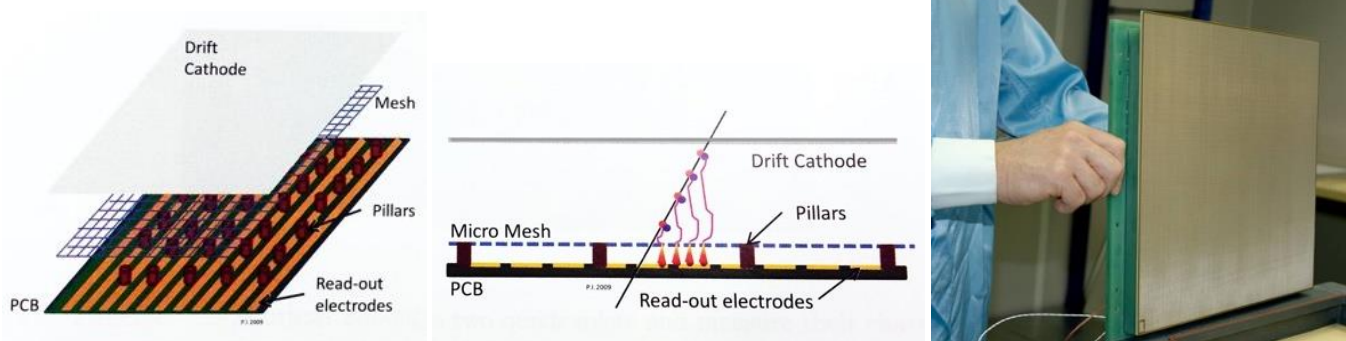


Εικόνα 4-3: Κυλινδρικός αναλογικός απαριθμητής. Αποτελείται από έναν κύλινδρο (κάθοδος), το εσωτερικό του οποίου γεμίζεται με κάποιο αέριο, ενώ από το κέντρο του διέρχεται ένα σύρμα (άνοδος). (Πηγή (4))

Εάν τα φορτία του πρωτογενούς ιονισμού έχουν αρκετή ενέργεια, μπορούν να προκαλέσουν επιπλέον ιονισμούς, μια διαδικασία που ονομάζεται *δευτερογενής ιονισμός*. Επιπλέον ιονισμοί είναι εφικτό να προκληθούν εάν τα φορτία έχουν αρκετή ενέργεια για να ιονίσουν το αέριο. Για να συμβούν όλα τα παραπάνω απαιτείται μεγάλη διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων του ανιχνευτή, έτσι ώστε τα φορτία να αποκτούν αρκετά υψηλές ταχύτητες. Δεδομένου ότι τα ηλεκτρόνια είναι κατά πολύ ελαφρύτερα από τα ιόντα, αποκτούν μεγαλύτερη ταχύτητα από τα ιόντα και αποτελούν το κύριο αίτιο των ιονισμών. Ο επακόλουθος *πολλαπλασιασμός* των φορτίων που συμβαίνει υπό την επίδραση ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου αποτελεί εκείνο το χαρακτηριστικό που εκμεταλλεύονται οι *αναλογικοί απαριθμητές*. Σε αυτούς τους ανιχνευτές, η αύξηση του ύψους του παλμού στην έξοδο είναι ανάλογη της αύξησης της εφαρμοζόμενης διαφοράς δυναμικού στα άκρα του ανιχνευτή, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στην Εικόνα 4-1. Ο *πολλαπλασιασμός* των φορτίων συμβαίνει με τέτοιο τρόπο, ώστε το ύψος του μετρούμενου παλμού είναι ανάλογο της εναποτιθέμενης ενέργειας στον ανιχνευτή. Πιο συγκεκριμένα, το ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο (τάξης kV/cm) προκαλεί μια διαδικασία ραγδαίου *πολλαπλασιασμού* των πρωτογενών φορτίων που ονομάζεται *χιονοστιβάδα* (avalanche). Η αύξηση των φορτίων μέσω του μηχανισμού της χιονοστιβάδας έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του ύψους του μετρούμενου παλμού.



Εικόνα 4-4:Τυπική απεικόνιση της «χιονοστιβάδας» σχήματος υγρής σταγόνας. Η προσπίπτουσα ακτινοβολία (βέλος) ιονίζει το αέριο και παράγει ζεύγη ηλεκτρονίων/ιόντων κατά μήκος της διαδρομής. Αυτά τα φορτία αρχίζουν να κινούνται προς αντίθετες κατευθύνσεις εξαιτίας του ηλεκτρικού πεδίου. Τα ηλεκτρόνια όντας πολύ ελαφρύτερα από τα θετικά ιόντα κινούνται ταχύτερα και αφήνουν πίσω τους μία «ουρά» βραδύτερων θετικών φορτίων που κινούνται προς την κάθοδο. Να σημειωθεί ότι υπάρχει μια καθυστέρηση από τον πρωτογενή ιονισμό μέχρι την δημιουργία της χιονοστιβάδας. Κάτω, a-e: Χρονική εξέλιξη χιονοστιβάδας. (Πηγές (1), (5))



Εικόνα 4-5: Αναπαράσταση της λειτουργίας του ανιχνευτή micromega (αριστερά) και μια πραγματική φωτογραφία (δεξιά). Ο συγκεκριμένος ανιχνευτής χρησιμοποιήθηκε το 2017 από ομάδα ερευνητών στην πυραμίδα του Χέοπα στην Αίγυπτο που μέσω της μιονικής ραδιογραφίας οδήγησε στην ανακάλυψη κρυφής μέχρι τότε κοιλότητας στο εσωτερικό της πυραμίδας. (Πηγές (9), (10))

Οι αναλογικοί απαριθμητές έχουν ευρεία εφαρμογή τόσο στην βασική έρευνα όσο και σε περισσότερο πρακτικά προβλήματα. Η ανάπτυξη αναλογικών απαριθμητών για την ανίχνευση νετρίνων αλλά και σκοτεινής ύλης αποτελεί μία από τις τρέχουσες ερευνητικές δραστηριότητες. Σε πιο πρακτικό επίπεδο, αναλογικοί απαριθμητές χρησιμοποιούνται ως δοσίμετρα στα πυρηνικά εργοστάσια για την προστασία του προσωπικού από την ραδιενέργεια, στη φασματοσκοπία α , γ και β ⁽⁶⁾ καθώς και στην ανίχνευση νετρονίων αλλά και κοσμικής ακτινοβολίας (μιονίων). Σχετικά πρόσφατα, το 2017, δημοσιεύτηκαν αποτελέσματα από την ανακάλυψη πιθανής άγνωστης έως τότε κοιλότητας στο εσωτερικό της πυραμίδας του Χέοπα⁽⁷⁾ με τη χρήση αναλογικού απαριθμητή με την μέθοδο της μιονικής ραδιογραφίας. Στην ουσία η τεχνική αυτή επιτρέπει την δημιουργία τρισδιάστατης εικόνας του χώρου βασιζόμενη σε πληροφορίες που παρέχει η σκέδαση Coulomb των μιονίων⁽⁸⁾.

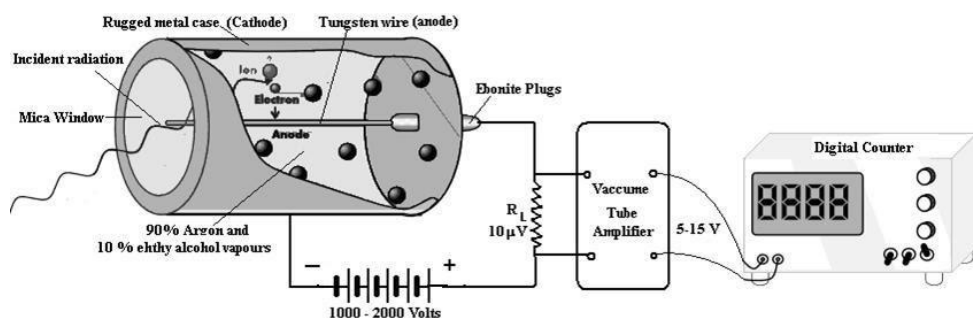
Geiger-Müller

Επιπλέον αύξηση της τάσης δημιουργεί ένα πολύ ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο με την σειρά του προκαλεί έντονες

χιονοστιβάδες, με αποτέλεσμα την παραγωγή μεγάλου αριθμού ζευγών ηλεκτρονίων/ιόντων και την επακόλουθη δημιουργία ενός μεγάλου παλμού στην έξοδο. Αυτή είναι η περιοχή λειτουργίας των ανιχνευτών Geiger-Müller.

Οι συγκεκριμένοι ανιχνευτές χρησιμοποιούνται για την απαρίθμηση των σωματιδίων της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, καθώς κάθε μεμονωμένο σωματίδιο προκαλεί *κατάρρευση* και δημιουργία ισχυρού σήματος στην έξοδο. Ο μετρούμενος παλμός δεν εξαρτάται από το είδος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, ούτε είναι ανάλογος της εναποτιθέμενης ενέργειας, με αποτέλεσμα οι ανιχνευτές Geiger-Müller να μη χρησιμοποιούνται στην φασματοσκοπία.

Οι Geiger-Müller χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση ακτινοβολίας τόσο φορτισμένων σωματιδίων, όπως σωματία α και β , όσο και μη φορτισμένων, όπως νετρονίων και φωτονίων X και γ ^(11,12). Η χρήση τους περιορίζεται ωστόσο στην μέτρηση του αριθμού των σωματιδίων της ιονίζουσας ακτινοβολίας καθώς δεν παρέχει πληροφορίες για την ενέργεια της.



Εικόνα 4-6: Αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας του ανιχνευτή Geiger-Müller (αριστερά) και μια πραγματική φωτογραφία του ανιχνευτή (δεξιά). Ιονίζουσα ακτινοβολία προσπίπτει στον ανιχνευτή, ιονίζει το αέριο και παράγει ένα ισχυρό σήμα στην έξοδο. Χρησιμοποιείται για την μέτρηση του αριθμού των σωματιδίων της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. (Πηγές (13), (14))

Αναφορές

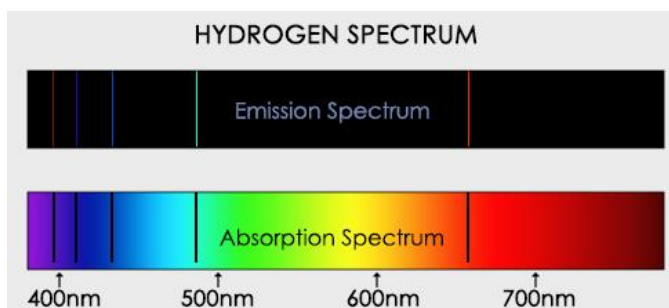
- (1) Physics and Engineering of Radiation Detection, Syed Naeem Ahmed, Queen's University, Kingston, Ontario.
- (2) N. Connor: What is Ionization Chamber – Ion Chamber – Definition, <https://www.radiation-dosimetry.org/what-is-ionization-chamber-ion-chamber-definition/>, ανακτήθηκε στις 23/7/2020.
- (3) E. Okuno: Instrumentation for Dosimetry, https://humanhealth.iaea.org/HHW/MedicalPhysics/TheMedicalPhysicist/Studentscorner/HandbookforTeacherandStudents/Chapter_21.pdf, ανακτήθηκε στις 23/7/2020.
- (4) A.M. Hamad & H. Salh (2014), Kr gas filled proportional counters and characteristic X-rays detection and 36 Kr Gas Filled Proportional Counters and Characteristic X-Rays Detection, AJPA, doi: 10.11648/j.ajpa.20140204.12. https://www.researchgate.net/figure/Figure-1-3-Basic-composition-of-a-gas-filled-proportional-counter-taken-from-Knoll_fig1_265094172
- (5) T. Yi: Gas Detectors and Neutron Detection, <https://slideplayer.com/slide/10490201/>, ανακτήθηκε στις 23/7/2020.
- (6) E. C. Romero (2012), Optimization of gas flow proportional counter for alpha decay measurements, Master Thesis, https://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/physik_kp/agkhoukaz/bamadipdok/ma_eqr.pdf, ανακτήθηκε στις 23/7/2020.
- (7) K. Morishima et al. (2017), Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons, Nature 552, 386-390, <https://arxiv.org/pdf/1711.01576.pdf> (pre-print), ανακτήθηκε στις 23/7/2020.
- (8) H. Gomez (2019), Muon tomography using micromegas detectors: From Archaeology to nuclear safety applications, doi: 10.1016/j.nima.2018.10.011, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900218313251>, ανακτήθηκε στις 23/7/2020.
- (9) Micromega Jig Alignment, High Energy Physics, ATLAS, CERN, <http://hep.sci.brandeis.edu/MM.html>, ανακτήθηκε στις 23/7/2020.
- (10) New applications for the new Micromegas detectors, http://irfu.cea.fr/en/Phocea/Vie_des_labos/Ast/ast.php?t=fait_marquant&id_ast=2561, ανακτήθηκε στις 23/7/2020.
- (11) Applications of Geiger Counters, GeigerCounters.com, <https://www.geigercounters.com/Applications/>, ανακτήθηκε στις 23/7/2020.
- (12) C. Mori et al. (1984), Application of a background-compensated Geiger-Muller counter to a survey meter, doi: 10.1016/0168-9002(84)90029-9, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168900284900299>, ανακτήθηκε στις 23/7/2020.
- (13) A. Mourya, Geiger-Muller counter, Engineering Physics, Peoples University, Bhopal, <https://sites.google.com/site/puenggphysics/home/unit-iii/gm-counter>, ανακτήθηκε στις 23/7/2020.
- (14) Geiger counter, BYJU'S Learning app, <https://byjus.com/physics/geiger-counter/>, ανακτήθηκε στις 23/7/2020.

5 Προς τη θεωρία του Καθιερωμένου Προτύπου - Μέρος Δεύτερο: Η γένεση της Κβαντικής Μηχανικής και η λύση των πρώτων προβλημάτων

Γράφει ο Γιώργος Μελαχρινός

Στο πρώτο μέρος του άρθρου με τίτλο “[Προς τη θεωρία του Καθιερωμένου Προτύπου](#)” παρουσιάστηκαν οι σταδιακές προσπάθειες και έρευνες που έγιναν για την μελέτη και τη κατανόηση της φυσικής του ατόμου. Μέχρι στιγμής μπορούσαμε να περιγράψουμε τα πάντα με απλές κλασικές εξισώσεις ή ακόμα και με απλή γεωμετρία, όπως μπορεί να κάνει κανείς στην σκέδαση Rutherford προκειμένου να υπολογίσει τις γωνίες σκέδασης των σωματιδίων α από τους πυρήνες χρυσού.

Ωστόσο η θεωρία μας, έτσι όπως την έχουμε φτιάξει μέχρι στιγμής, αποτυγχάνει να εξηγήσει την ευστάθεια του ατόμου και προβλέπει ακριβώς αντίθετα αποτελέσματα. Επίσης, ένα ακόμη σημείο που η θεωρία μας αποτυγχάνει να εξηγήσει είναι και τα φάσματα εκπομπής των ατόμων, στα οποία ενώ θα αναμέναμε ολόκληρες περιοχές με φως παρατηρούμε μεμονωμένες διακριτές φωτεινές γραμμές. Αντίστοιχα και στα φάσματα απορρόφησης, ενώ θα περιμέναμε τα άτομα να απορροφούν ολόκληρες μπάντες-περιοχές από μήκη κύματος, στην πραγματικότητα απορροφούν συγκεκριμένα μόνο μήκη κύματος.



Εικόνα 5-1: Επάνω: το φάσμα εκπομπής του Υδρογόνου. Εάν εγκλωβίσουμε αέριο υδρογόνο μέσα σε ένα δοχείο στα άκρα του οποίου έχουμε τοποθετήσει δύο μεταλλικούς ακροδέκτες έτσι ώστε να μπορούμε να εφαρμόσουμε μια διαφορά δυναμικού και να δημιουργήσουμε ένα ηλεκτρικό πεδίο, τότε, αν χρησιμοποιήσουμε μια κατάλληλη διάταξη που λέγεται φασματογράφος, θα δούμε ότι το αέριο εκπέμπει φως συγκεκριμένου χρώματος σε συγκεκριμένες μόνο γωνίες (Περισσότερες λεπτομέρειες για την φασματοσκοπία μπορεί να βρει κανένας στην άσκηση 7 του παρακάτω [εργαστηριακού οδηγού](#)). Αυτή η εκπομπή του φωτός που αποτυπώνεται στην παραπάνω εικόνα είναι χαρακτηριστική υπογραφή του συγκεκριμένου αερίου. Αντίστοιχα μπορούμε να καταγράψουμε και τα φάσματα απορρόφησης, που είναι τα μήκη κύματος που θα απορροφηθούν όταν φως «πέσει» επάνω στο συγκεκριμένο αέριο. Κάτω: το φάσμα απορρόφησης του Υδρογόνου. (Πηγή)

Ο λόγος για τον οποίο οι κλασικές θεωρίες αποτυγχάνουν να εξηγήσουν το φάσμα εκπομπής του υδρογόνου όπως και την σταθερότητά του είναι ότι δεν εμπεριέχουν ανταλλαγές ενέργειας με διακριτό (κβαντισμένο) τρόπο.

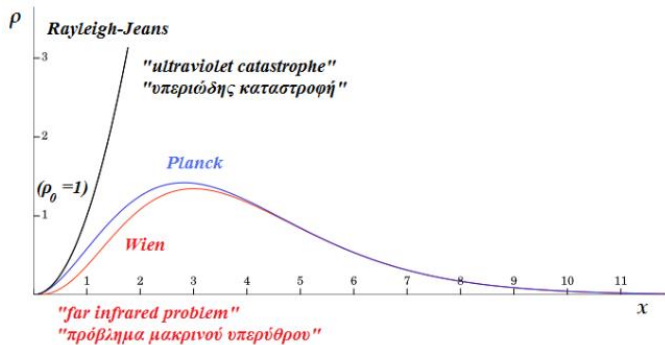
Η κβαντική μηχανική είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την περιγραφή του μικρόκοσμου. Η ανάγκη για την γένεσή της μας πηγαινεί πίσω στο 1860 όπου διατυπώθηκε το πρόβλημα της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος ή αλλιώς το Black Body Radiation Problem. Το πρόβλημα αυτό της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος διατυπώνεται λίγο μετά την βιομηχανική επανάσταση, μία περίοδο στην οποία όλοι οι μεγάλοι επιστήμονες προσπαθούν να κατανοήσουν και να μελετήσουν τη θερμοδυναμική και τις μηχανές. Την περίοδο αυτή, οι φυσικοί μπορούν και περιγράφουν τα πάντα χρησιμοποιώντας κλασική φυσική όπως έχει διατυπωθεί τους δύο προηγούμενες αιώνες.

Το μέλαν σώμα (black body) είναι ένα εξιδανικευμένο φυσικό σώμα το οποίο απορροφά όλη την προσπίπτουσα σε αυτό ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ανεξαρτήτως συχνότητας και ανεξαρτήτως γωνίας πρόσπτωσης. Το μέλαν σώμα αφήνει όλη την προσπίπτουσα ακτινοβολία να μπει μέσα του, δηλαδή ανακλά μηδενικό ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, και απορροφά όλη αυτή την προσπίπτουσα ακτινοβολία χωρίς να αφήνει ακτινοβολία να το διαπεράσει. Άρα ένα μέλαν σώμα είναι ένας τέλειος απορροφητής της προσπίπτουσας ΗΜ ακτινοβολίας. Βεβαίως, αν συνέβαιναν μόνο τα παραπάνω, τότε, λόγω της συνεχούς απορρόφησης ενέργειας, η θερμοκρασία του σώματος θα αυξανόταν συνεχώς. Έτσι, ένα μέλαν σώμα που βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία, άρα και σε σταθερή θερμοκρασία, θα πρέπει να επανεκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, την οποία καλούμε ακτινοβολία μέλανος σώματος (black-body radiation), έτσι ώστε να διατηρείται το ενεργειακό ισοζύγιο. Στην πράξη το μέλαν σώμα είναι ένα ιδανικό σώμα το οποίο δεν υπάρχει στην φύση καθώς κανένα υλικό δεν φτάνει σε 100% απορρόφηση. Στην καλύτερη περίπτωση η απορρόφηση φτάνει στο 95%, όπως συμβαίνει για παράδειγμα στο γραφίτη.

Εκείνη την εποχή, ως μέλανα σώματα χρησιμοποιούσαν κοιλότητες τα τοιχώματα των οποίων ήταν καλυμμένα από γραφίτη. Οι κοιλότητες διατηρούνταν σε μια σταθερή θερμοκρασία, και σε κάποιο σημείο του τοιχώματος άνοιγαν μια μικρή οπή ώστε να μπορεί να μπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στο εσωτερικό της κοιλότητας, να απορροφηθεί

μετά από πολλαπλές ανακλάσεις και να μπορέσει στη συνέχεια να επανεκπεμφθεί και να καταγραφεί.

Σύμφωνα με την κλασική θεωρία, ένα σώμα το οποίο θα βρίσκεται σε κάποια θερμοκρασία θα πρέπει να εκπέμπει ΗΜ ακτινοβολία με τρόπο που θα συμφωνεί με τη διακεκομμένη καμπύλη της παρακάτω εικόνας.



Εικόνα 5-2: Οι νόμοι των Rayleigh-Jeans, Wien και Planck ως συνάρτηση του $x = h\nu/k_B T$. (Πηγή: Κβαντική Οπτική και Lasers, Κ. Σιμσερίδης (2015))

Πρέπει να προσέξουμε ότι στην περιοχή του υπεριώδους, που βρίσκεται σε μικρότερα μήκη κύματος από αυτά του ορατού του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, η καμπύλη αυτή αποκλίνει οδηγώντας σε αυτό που ονομάζεται υπεριώδης καταστροφή και περιγράφεται από τον νόμο Rayleigh-Jeans. Σύμφωνα με αυτό το νόμο, η πυκνότητα της ενέργειας ανά συχνότητα ν δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_{RJ} = \frac{8\pi\nu^2 k_B T}{c^3}$$

Με μονάδες $J m^{-3} Hz^{-1}$ και όπου $k_B = 1.38064852 \times 10^{-23} J K^{-1}$ η σταθερά του Boltzmann. Στην πράξη όμως οι μετρήσεις έδειξαν ότι οι κατανομές δεν συμφωνούσαν με τις κλασικές καμπύλες. Στην προσπάθεια να ερμηνευτούν οι παρατηρούμενες καμπύλες διατυπώθηκαν δύο νόμοι, ο νόμος του Wien και ο νόμος των Stefan-Boltzmann. Και οι δύο νόμοι εμφανίστηκαν στην προσπάθεια να περιγραφούν οι πειραματικές καμπύλες με σχέσεις. Ο νόμος του Wien, εμφανίστηκε ως μια προσπάθεια να περιγραφούν τα πειραματικά δεδομένα στα χαμηλά μήκη κύματος - υψηλές συχνότητες. Σύμφωνα με το νόμο του Wien, η πυκνότητα της ενέργειας (ανά μονάδα όγκου) ανά συχνότητα περιγράφεται από τη σχέση:

$$\rho_W = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}}}$$

όπου $h = 6.62607004 \times 10^{-34} J \cdot s$ η σταθερά του Planck. Ίσως η πιο σημαντική απόρροια του νόμου του Wien είναι ότι καταφέρνει να συνδέσει τη θέση του μεγίστου της κατανομής με την θερμοκρασία του μέλανος σώματος. Απλή

παραγωγή της παραπάνω σχέσης ως προς τη συχνότητα και μηδενισμός αυτής (ώστε να βρούμε το ακρότατο και αντικατάσταση της συχνότητας με τη σχέση $c = \lambda \cdot \nu$ ώστε να υπολογίσουμε το μήκος κύματος) οδηγεί στη σχέση:

$$\lambda_{max} = \frac{2.89 \times 10^{-3} mK}{T}$$

όπου το μήκος κύματος είναι εκφρασμένο σε μέτρα (m) και η θερμοκρασία σε Kelvin (K). Ο νόμος των Stefan-Boltzmann εκφράζεται με δύο τρόπους. Η πρώτη έκφραση δίνει την πυκνότητα της ΗΜ ακτινοβολίας (προκύπτει με ολοκλήρωση του νόμου Planck πάνω στις συχνότητες. Ωστόσο η δεύτερη έκφραση είναι αυτή που έχει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον και συνδέει την συνολική εκπεμπόμενη ισχύ του μέλανος σώματος με την θερμοκρασία του ως εξής:

$$I = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4 \Rightarrow I = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} T^4$$

με μια σχέση που συνδέει την συνολική εκπεμπόμενη ισχύ με την θερμοκρασία^(1, 2).

Λίγα χρόνια αργότερα, το 1877, διατυπώθηκε από τον Boltzmann η ιδέα ότι οι ενεργειακές καταστάσεις των φυσικών συστημάτων μπορεί να είναι διακριτές. Οι προσπάθειες να εξηγηθεί και να κατανοηθεί το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο που ανακαλύφθηκε το 1887 από τον Hertz, οδήγησαν στην κατεύθυνση της υπόθεσης για την ύπαρξη κβάντων φωτός. Η πραγματική επανάσταση όμως ήρθε το 1905 όταν ο Einstein υπέθεσε ότι η ενέργεια του φωτονίου δίνεται από τη σχέση:

$$E = h \nu$$

όπου h η σταθερά που πήρε το όνομα του Planck και ν η συχνότητα της ακτινοβολίας και έτσι κατάφερε να εξηγήσει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (βλ. και "[Προς τη θεωρία του Καθιερωμένου Προτύπου](#)") και να πάρει το βραβείο Nobel το 1921.

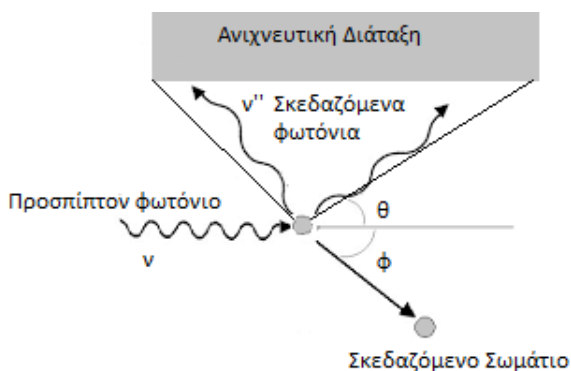
Ο νόμος του Planck⁽³⁾ (1900) ο οποίος περιγράφει την εκπομπή μέλανος σώματος και συμφωνεί με τα πειραματικά δεδομένα είναι:

$$\rho_W = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1}$$

Τα θεμέλια της κβαντικής μηχανικής έχουν μόλις τεθεί. Μία πολύ χρήσιμη και δυνατή σχέση που εμφανίστηκε (την μαθηματική απόδειξη της οποίας μπορεί να διαβάσει κανείς στον ακόλουθο [υπερσύνδεσμο](#)) είναι η σχέση αβεβαιότητας του Heisenberg για την θέση και την ορμή ενός σωματιδίου:

$$(\Delta \hat{x})(\Delta \hat{p}) \geq \frac{\hbar}{2}$$

όπου $\hbar = h/2\pi$, η ανηγμένη σταθερά του Planck. Μια πολύ απλοϊκή απόδειξη για την παραπάνω σχέση αποτελεί το παρακάτω: Για να μπορέσουμε να βρούμε ένα σωματίο στο χώρο πρέπει να μετρήσουμε τη θέση του. Για να μπορέσουμε να μετρήσουμε τη θέση του όμως, πρέπει το συγκεκριμένο σωματίο να αλληλεπιδράσει με φωτόνια, τα οποία θα σκεδαστούν και θα φτάσουν σε κάποια ανιχνευτή διάταξη. Το πρόβλημα είναι ότι στην ανιχνευτική διάταξη δεν φτάνει ένα φωτόνιο το οποίο έχει καθορισμένη ορμή, αλλά φτάνουν φωτόνια ανάμεσα σε ένα εύρος συχνοτήτων οπότε δεν μπορούμε μέσω φαινομένου Compton να προσδιορίσουμε την ορμή του σωματιδίου.



Εικόνα 5-3: Σύμφωνα με το φαινόμενο Compton τα σκεδαζόμενα φωτόνια ανάλογα με την γωνία εκπομπής έχουν και διαφορετική συχνότητα. Σημειώνεται δε πως μόνο τα φωτόνια που βρίσκονται εντός του κώνου που θλέπει την ανιχνευτική διάταξη ανιχνεύονται και χρησιμοποιούνται για την καταγραφή της θέσης του σωματιδίου. Λόγω λοιπόν του ότι φτάνει ένα πλήθος από φωτόνια στην ανιχνευτική διάταξη με διαφορετικές συχνότητες τα οποία έχουν αλληλεπιδράσει με το σωματίο επηρεάζοντας την ορμή του δεν μπορούμε να προσδιορίσουμε με ακρίβεια την ορμή του.

Σύμφωνα με αυτή τη σχέση¹, όταν καταφέρουμε να περιορίσουμε ένα σωματίδιο στο χώρο τείνοντας την αβεβαιότητα της θέσης του στο μηδέν ($\Delta x \rightarrow 0$) τότε, προκειμένου να ικανοποιείται η συγκεκριμένη ανισότητα, πρέπει η αβεβαιότητα της ορμής (Δp) να τείνει στο άπειρο ώστε το γινόμενο των δύο αβεβαιοτήτων να τείνει σε κάτι πεπερασμένο και μεγαλύτερο του $\hbar/2$. Η εξήγηση της ευστάθειας του ατόμου του υδρογόνου έγκειται σε αυτήν ακριβώς την ανισότητα, καθώς όταν το ηλεκτρόνιο πλησιάσει τόσο πολύ τον πυρήνα του ατόμου ώστε η αβεβαιότητα στη θέση του να τείνει στο μηδέν, η αβεβαιότητα της ορμής που αποκτά είναι τεράστια και έτσι μπορεί πλέον να αποκτήσει οποιαδήποτε ορμή και να βρεθεί παντού στο χώρο.

¹ Πρέπει να προσέξουμε ότι οι ποσότητες x , p συνοδεύονται από το σύμβολο $\hat{\cdot}$. Πρόκειται για το σύμβολο του τελεστή. Στο επόμενο άρθρο θα συζητηθεί αναλυτικότερα η έννοια του τελεστή. Μέχρι τότε ο αναγνώστης μπορεί να ρίξει μια ματιά στον παρακάτω [υπερσύνδεσμο](#).

Έτσι κάναμε ένα πρώτο βήμα για να εξηγήσουμε την ευστάθεια του ατόμου. Στο επόμενο άρθρο θα δούμε πώς μπορεί κανείς να μελετήσει το συγκεκριμένο σύστημα με αυστηρά μαθηματικά χρησιμοποιώντας την εξίσωση του Schrödinger και την σχέση μετάθεσης των τελεστών της θέσης και της ορμής. Θα δούμε ότι θα καταφέρουμε να εξηγήσουμε, τουλάχιστον μέχρι κάποια σε τάξη ακριβείας, τα φάσματα εκπομπής στο άτομο του υδρογόνου. Θα προκύψουν όμως δυο προβλήματα. Το πρώτο είναι το αποτέλεσμα του πειράματος των Stern-Gerlach, το οποίο αποκάλυψε μια περίεργη συμπεριφορά των ατόμων μέσα σε μαγνητικά πεδία. Το δεύτερο είναι ότι προκειμένου να είμαστε συμβατοί με την ειδική θεωρία σχετικότητας του Einstein θα πρέπει η δυναμική, δηλαδή το σύνολο των εξισώσεων που περιγράφουν ένα σύστημα να είναι συμβατό να υπακούουν τους μετασχηματισμούς Lorentz. Έτσι θα οδηγηθούμε σε μία εξίσωση, την Klein-Gordon που θα καταφέρει να λύσει το δεύτερο πρόβλημα, ωστόσο το πρώτο πρόβλημα θα παραμείνει άλυτο.

Αναφορές

- (1) Black-body radiation, Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Black-body_radiation, ανακτήθηκε στις 23/7/2020.
- (2) Κβαντική Οπτική και Lasers, Κ. Σιμσερίδης (2015)
- (3) Planck's law of black-body radiation, Black-body radiation, Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Black-body_radiation#Planck%27s_law_of_black-body_radiation, ανακτήθηκε στις 23/7/2020.