

Τμήμα
Μηχανικών
Πληροφορικής τ.ε.
Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα
Δυτικής Ελλάδας

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΑΣΥΡΜΑΤΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΜΕΣΩ
ΥΠΟΑΤΟΜΙΚΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ (NEUTRINOS)»**

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΓΡΟΥΙΤΣΗΣ (Α.Μ. 0677)

ΕΠΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΑΣΑΡΙΔΗΣ ΗΛΙΑΣ

ΑΝΤΙΡΡΙΟ 2014

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

Ναύπακτος,

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1.

2.

3.

Περίληψη

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι αόρατη ακτινοβολία που δημιουργείται από τοπικά και χρονικά μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, κάθετα μεταξύ τους. Πρόκειται για εγκάρσια κύματα που πολώνονται γραμμικά, σφαιρικά και ελλειπτικά. Περιγράφονται από τους τύπους του Maxwell και μεταφέρουν ορμή και ενέργεια. Από αυτά, κυρίως τα ραδιοκύματα και δευτερευόντως τα μικροκύματα, χρησιμοποιούνται για την ασύρματη μετάδοση πληροφοριών. Οι συχνότητές τους κυμαίνονται από 3 kHz – 100 GHz. Ανάλογα με το μήκος κύματος χωρίζονται σε υποκατηγορίες, ενώ ανάλογα με τη διαμόρφωση χωρίζονται στα κύματα AM και FM.

Η ασύρματη μετάδοση πληροφοριών παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα, αλλά το μεγαλύτερο μειονέκτημα είναι οι απώλειες ισχύος, οι οποίες προκαλούνται κυρίως από τη μεγάλη απόσταση και τις συνθήκες της ατμόσφαιρας (καιρικές συνθήκες, ηλιακή ακτινοβολία) αλλά και την ανθρώπινη δραστηριότητα στην περιοχή. Σκοπός όλων των κατασκευαστών είναι να περιορίζονται οι απώλειες ισχύος. Για το λόγο αυτό, εκτός των άλλων πρέπει να επιλέγεται κάθε φορά η κατάλληλη κεραία για το δέκτη και να τοποθετείται στην κατάλληλη θέση.

Το νετρίνο, η ύπαρξη του οποίου προβλέφθηκε κατά τη διάσπαση β, ανακαλύφθηκε πειραματικά αργότερα. Πρόκειται για ένα σωματίδιο με σχεδόν μηδενική μάζα, που είναι ηλεκτρικά ουδέτερο. Η ιδέα να χρησιμοποιηθεί δέσμη νετρίνων για επικοινωνία έγκειται στην ιδιότητά του να μην αλληλεπιδρά με την ύλη. Αρα μια δέσμη με πληροφορίες δεν παρουσιάζει απώλειες ακόμα και αν διαπεράσει στερεούς όγκους βουνών ή ακόμα και πλανητών.

Το FermiLab οργάνωσε ένα πείραμα μεταφοράς πληροφοριών με δέσμη νετρίνων, με χρήση της δέσμης NUMI και του ανιχνευτή MINERvA. Η προσπάθεια στέφθηκε με επιτυχία και το 2012 ανακοινώθηκε η μεταφορά δέσμης νετρίνων σε 1000 m, από τα οποία τα 240 ήταν μέσα σε βράχο. Η κωδικοποίηση έγινε στο δυαδικό κώδικα και η λέξη που μεταφέρθηκε ήταν «νετρίνο».

Οι επιστήμονες είναι αισιόδοξοι ότι η πρώτη επιτυχημένη προσπάθεια θα έχει και συνέχεια.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	1
1.1 Εισαγωγή: Ασύρματη Μετάδοση Πληροφορίας.....	1
1.2 Ηλεκτρομαγνητικά Κύματα.....	1
1.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Ασύρματης Παροχής Πληροφοριών..	5
1.4 Σκοπός της πτυχιακής – Εισαγωγή στο πείραμα.....	9
Βιβλιογραφία – Αναφορές 1 ^{ου} Κεφαλαίου.....	11
Κεφάλαιο 2 – Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία.....	13
2.1 Εισαγωγή στα Ηλεκτρομαγνητικά πεδία: Ταυτόχρονη Διάδοση Ηλεκτρικού και Μαγνητικού Πεδίου.....	13
2.1.1 Ηλεκτρικό Πεδίο.....	13
2.1.2 Εισαγωγή στο Μαγνητικό Πεδίο.....	14
2.1.3 Εξισώσεις Maxwell.....	15
2.1.4 Επίπεδα Ηλεκτρομαγνητικά Κύματα.....	17
2.1.5 Ενέργεια, ορμή και πίεση στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα.....	19
2.2 Παραγωγή και Εκπομπή Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων από Κεραία.....	20
2.2.1 Διαμόρφωση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.....	24
2.3 Είδη Κυμάτων.....	27
2.4 Εξασθένηση ακτινοβολίας (απώλεια ενέργειας).....	28
2.4.1 Επίδραση της ατμόσφαιρας.....	31
2.4.2 Εξασθένηση.....	34
2.4.3 Απώλειες ισχύος (λόγω του είδους των κεραιών).....	36
2.4.4 Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές – Καιρικές Συνθήκες.....	37
2.5 Γενικά συμπεράσματα για τα ραδιοκύματα.....	37
2.6 Αποσφαλμάτωση.....	38
Βιβλιογραφία – Αναφορές 2 ^{ου} Κεφαλαίου.....	38
Κεφάλαιο 3 – Εισαγωγή στα στοιχειώδη σωμάτια.....	40
3.1 Εισαγωγή: Δομή του ατόμου – Ηλεκτρόνια.....	40
3.2 Δομή του πυρήνα – Πρωτόνια – Νετρόνια.....	43
3.3 Πυρηνικές διασπάσεις.....	46
3.3.1 Διάσπαση α.....	46
3.3.2 Διάσπαση β.....	47

3.3.2β Ανακάλυψη των νετρίνων και βασικές ιδιότητες.....	48
3.3.3 Διάσπαση γ	49
3.4 Θεμελιώδεις Δυνάμεις.....	50
3.5 Στοιχειώδη σωματίδια.....	52
3.6 Νετρίνα.....	55
3.7 Εφαρμογές και πειράματα με νετρίνα.....	56
Βιβλιογραφία – Αναφορές 3 ^{ου} Κεφαλαίου.....	59
Κεφάλαιο 4 – Πείραμα με χρήση νετρίνων για επικοινωνία με χρήση της	60
Δέσμης NuMI και του Ανιχνευτή MINERvA στο FermiLab.....	60
4.1 Εισαγωγή.....	60
4.2 Περιγραφή του πειράματος.....	62
4.3 Περισσότερες πληροφορίες για τις εγκαταστάσεις του πειράματος.....	74
4.4 Τελευταία νέα για το πείραμα, αποδοχή από τον επιστημονικό κόσμο.....	75
Βιβλιογραφία – Αναφορές 4 ^{ου} Κεφαλαίου.....	77
Κεφάλαιο 5 – Συμπεράσματα.....	78
Βιβλιογραφία – Αναφορές 5 ^{ου} Κεφαλαίου.....	80

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή: Ασύρματη Μετάδοση Πληροφορίας

Η ανάγκη για επικοινωνία με ασύρματα μέσα επιτυγχάνεται μέσω ενός πομπού και ενός δέκτη, μεταδίδοντας την πληροφορία κωδικοποιημένη σε ραδιοκύματα, τα οποία μεταδίδονται στον ελεύθερο χώρο ανάμεσα σε δυο σημεία.

Ξεκινώντας από τα ραδιόφωνα και τους ασύρματους, φτάσαμε σε μια εποχή που τα καλώδια αντικαθίστανται από ασύρματους διαύλους, με χαρακτηριστικότερο όλων τα κινητά τηλέφωνα και την ασύρματη πρόσβαση στο διαδίκτυο. Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless Local Area Networks, WLANs) βρίσκουν ευρεία εφαρμογή σχεδόν παντού. Επέκταση αυτών αποτελούν τα Ασύρματα Μητροπολιτικά Δίκτυα (Wireless Metropolitan Area Networks, WMANs) και προσφέρουν πρόσβαση σε πολύ μεγάλη ακτίνα κάλυψης και με ρυθμούς μετάδοσης που μπορούν να ικανοποιήσουν και τους πιο απαιτητικούς χρήστες.

Από την άλλη μεριά ένα κυψελωτό σύστημα τρίτης γενιάς, αντικαταστάτης του μέχρι τώρα πολύ πετυχημένου Παγκόσμιου Συστήματος Κινητών Επικοινωνιών (Global System for Mobile Communication, GSM) βρίσκεται ήδη σε ευρεία εφαρμογή. Το Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Τηλεπικοινωνιών (Universal Mobile Telecommunications System, UMTS), αποτελεί την τελευταία τεχνολογία στο χώρο των τηλεπικοινωνιών και μπορεί να υποστηρίξει τόσο χρήστες κινητής και σταθερής τηλεφωνίας όσο και χρήστες ίντερνετ σε ασύρματο περιβάλλον.

Στην απλούστερη μορφή του, ένα ασύρματο τηλεπικοινωνιακό σύστημα απαρτίζεται από τον πομπό, το δέκτη και το ασύρματο κανάλι. Η προς μετάδοση πληροφορία εκπέμπεται από την κεραία του πομπού με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που ανήκει στη συχνότητα των ραδιοκυμάτων (βλ. παρακάτω), διαδίδεται στο κανάλι (το μέσο μετάδοσης) και λαμβάνεται από την κεραία του δέκτη. (Serway, Τόμος 2 Ηλεκτρομαγνητισμός)

1.2 Ηλεκτρομαγνητικά Κύματα

Η διάδοση μιας διαταραχής στο χώρο ονομάζεται κύμα. Για να παραχθεί ένα κύμα απαιτείται μια πηγή η οποία εκτελεί ταλαντώσεις. Κατά την ταλάντωση της πηγής, μεταφέρεται ενέργεια και ορμή στο χώρο, ενώ η διαταραχή (παρόμοια ταλάντωση των γειτονικών

σημείων με αυτή της πηγής) διαδίδεται με καθορισμένη ταχύτητα που ονομάζεται ταχύτητα διάδοσης του κύματος. Χαρακτηριστικά μεγέθη που μας ενδιαφέρουν για ένα κύμα είναι η συχνότητα (αριθμός ταλαντώσεων στη μονάδα του χρόνου, με μονάδα μέτρησης το 1 Hz) ή η περίοδος (χρόνος που απαιτείται για μία ταλάντωση, με μονάδα μέτρησης το 1 sec), που συνδέονται με το μήκος κύματος (απόσταση που διανύει το κύμα σε χρόνο ίσο με μια περίοδο, με μονάδα μέτρησης το 1 m) και την ταχύτητα διάδοσης μέσω της σχέσης $\boxed{c = \lambda f}$ (1)

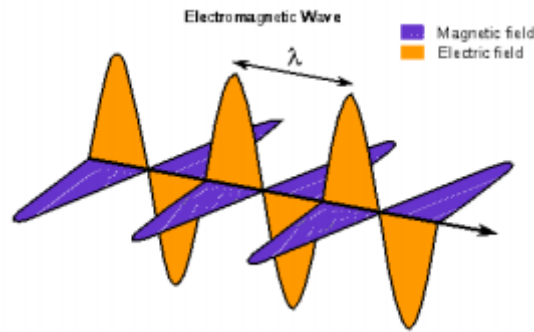
Η συχνότητα αποτελεί χαρακτηριστικό της πηγής και εξαρτάται μόνο από αυτήν, ενώ η ταχύτητα είναι χαρακτηριστική για κάθε μέσο. Το μήκος κύματος αλλάζει είτε με τη μεταβολή της συχνότητας (σχέση αντιστρόφως ανάλογη) είτε με τη μεταβολή της ταχύτητας (σχέση ανάλογη). Η συχνότητα και η περίοδος είναι μεγέθη αντιστρόφως ανάλογα μεταξύ τους και συνδέονται μέσω της σχέσης $f = \frac{1}{T}$. Κατά συνέπεια, η σχέση (1) μπορεί να γραφεί ως $c = \frac{\lambda}{T}$.

Τα κύματα γενικά διακρίνονται σε εγκάρσια (ταλάντωση κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης και δημιουργούν όρη και κοιλάδες) και διαμήκη (ταλάντωση παράλληλη στη διεύθυνση διάδοσης και δημιουργούν πυκνώματα και αραιώματα). Κατά συνέπεια, μπορούμε να ορίσουμε το μήκος κύματος για τα εγκάρσια κύματα ως την απόσταση ανάμεσα σε δυο διαδοχικές κορυφές.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα δημιουργούνται από την ταυτόχρονη μετάδοση ενός ηλεκτρικού και ενός μαγνητικού πεδίου. Τα πεδία πρέπει να είναι μεταβαλλόμενα, δηλαδή να μην παραμένουν σταθερά με την πάροδο του χρόνου. Μπορούμε δηλαδή να πούμε ότι πηγή παραγωγής ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι ένα επιταχυνόμενο φορτίο. Οι εξισώσεις του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου δίνονται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} E &= E_{\max} \sin\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) \\ B &= B_{\max} \sin\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

όπου E η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (που μετριέται σε N/C) και B η μαγνητική επαγωγή (με μονάδα μέτρησης το 1 T).

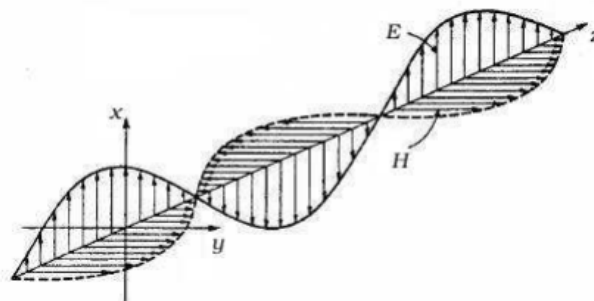


Εικόνα 1.1: Σχηματική απεικόνιση ηλεκτρομαγνητικού κύματος

Για κάθε χρονική στιγμή θα ισχύει ότι $c = \frac{E}{B}$ όπου c η ταχύτητα διάδοσης του κύματος στο μέσο. Για το κενό (και θεωρούμε και τον αέρα) ισχύει ότι $c = 3 \times 10^8$ m/s

Επίσης το ηλεκτρικό πεδίο ταλαντώνεται σε διεύθυνση κάθετη με τη διεύθυνση διάδοσής του, όπως το ίδιο ισχύει και για το μαγνητικό πεδίο. Να τονιστεί ότι η ένταση του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου είναι επίσης κάθετες μεταξύ τους. Δηλαδή συνολικά θα ισχύει: $E \perp B \perp c$ (3) (Ιωάννου, κα, 1999)

Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:

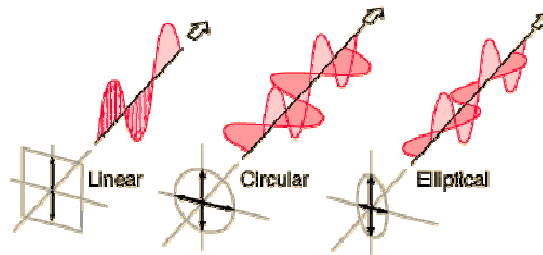


Εικόνα 1.2: Διάδοση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου

Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα που εκπέμπεται από μια σημειακή πηγή διαδίδεται στον ελεύθερο χώρο ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις (η διάδοση δηλαδή είναι ισοτροπική). Η διάδοση του κύματος είναι σφαιρική (σαν να φανταζόμαστε τους ομόκεντρους κύκλους που δημιουργεί μια πέτρα που πέφτει στο νερό). Σε απόσταση P από την πηγή το κύμα έχει μια συγκεκριμένη φάση και όλα τα σημεία που έχουν την ίδια φάση σχηματίζουν ένα επίπεδο το οποίο ονομάζεται μέτωπο κύματος. Αν ορίσουμε ως πυκνότητα ισχύος την ακτινοβολούμενη ισχύ ανά μονάδα επιφάνειας, τότε αποδεικνύεται ότι αυτή είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης από την πηγή. Να σημειώσουμε

επίσης ότι το ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι σφαιρικό, αλλά σε μεγάλες αποστάσεις θεωρείται επίπεδο (αντίστοιχα με το πώς η Γη θεωρείται επίπεδη στην καθημερινότητά μας)

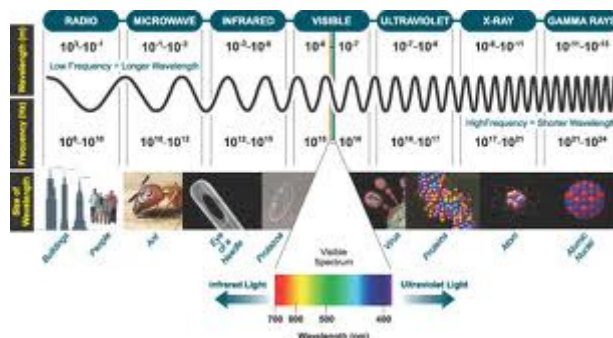
Σημαντική είναι επίσης η πόλωση του κύματος, δηλαδή η καμπύλη που διαγράφεται από το άκρο του διανύσματος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου E σε επίπεδα σταθερής φάσης, δηλαδή σε επίπεδα κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης. Η πόλωση χαρακτηρίζεται ως ελλειπτική, κυκλική ή γραμμική, όταν η αντίστοιχη γραμμή είναι έλλειψη, κύκλος ή γραμμή αντίστοιχα.



Εικόνα 1.3: Πόλωση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου

Οι περισσότερες κεραιές είναι γραμμικά πολωμένες. Για παράδειγμα, μια κάθετη κεραιά εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά κύματα των οποίων τα διανύσματα των ηλεκτρικών τους πεδίων είναι κάθετα και παραμένουν κάθετα κατά τη διάδοσή τους στον ελεύθερο χώρο. Γενικά ισχύει ότι η κατεύθυνση της πόλωσης είναι ίδια με την κατεύθυνση της κεραιάς. Έτσι, κατακόρυφες κεραιές ακτινοβολούν κατακόρυφα πολωμένα κύματα και οριζόντιες κεραιές ακτινοβολούν οριζόντια πολωμένα κύματα.

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα αποτελείται από πλήθος συχνοτήτων και μηκών κύματος, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που μας απασχολούν για την ασύρματη μετάδοση πληροφοριών ανήκουν στα ραδιοκύματα, τα οποία κυμαίνονται από 3 kHz έως 300 GHz.



Εικόνα 1.4: Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα

Τα ραδιοκύματα διαιρούνται σε περιοχές (μπάντες ή ζώνες), καθεμιά από τις οποίες είναι 10 φορές μεγαλύτερη σε συχνότητα από την προηγούμενή της. Αυτός ο διαχωρισμός εξυπηρετεί κυρίως πρακτικούς και μνημονικούς σκοπούς. Τα ονόματα των ζωνών και οι κυριότερες εφαρμογές τους φαίνονται στον πίνακα 1 (Ζώη, κα, 2008):

Ονομασία Ζώνης	Όρια Συχνοτήτων	Εφαρμογές
Extremely Low Frequencies (ELF)	1 Hz - 10 kHz	Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
Very Low Frequencies (VLF)	10 kHz - 30 kHz	Ραδιοπλοήγηση, Ραδιοφωνία AM
Low Frequencies (LF)	30 kHz - 300 kHz	Ραδιοπλοήγηση, Ραδιοφωνία AM
Median Frequencies (MF)	300 kHz - 3 MHz	Ραδιοφωνία AM
High Frequencies (HF)	3 MHz - 30 MHz	Ραδιοφωνία AM
Very High Frequencies (VHF)	30 MHz - 300 MHz	Ραδιοφωνία FM, Τηλεόραση, Κινητή τηλεφωνία (1ης γενιάς)
Ultra High Frequencies (UHF)	300 MHz - 3 GHz	Ραδιοζεύξεις, Τηλεόραση, Ραδιοπλοήγηση, Κινητή τηλεφωνία (2ης γενιάς), RADAR
Super High Frequencies (SHF)	3 GHz - 30 GHz	Επίγειες και Δορυφορικές Ζεύξεις, Ψηφιακή Δορυφορική Τηλεόραση, RADAR
Extremely High Frequencies (EHF)	30 GHz - 300 GHz	Μετεωρολογία, Αστρονομία

Πίνακας 1: Ζώνες των ραδιοκυμάτων

1.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Ασύρματης Παροχής Πληροφοριών

Στα προφανή πλεονεκτήματα της ασύρματης παροχής πληροφοριών είναι η δυνατότητα ζεύξης δυο σημείων χωρίς την ανάγκη ένωσης με κάποιο καλώδιο. Μάλιστα, σε κάποιες περιπτώσεις η επικοινωνία θα ήταν αδύνατη χωρίς τη χρήση ασύρματων μεθόδων, όπως για παράδειγμα σε ορεινά μέρη. Τα πλεονεκτήματα γενικά μπορούν να θεωρηθούν τα εξής:

1. Κινητικότητα χρήστη: Οι χρήστες μπορούν να μετακινούνται εντός της εμβέλειας του ασύρματου δικτύου, δηλαδή σε χώρο που θα έχουν επαρκές σήμα, διατηρώντας τη

συνδεσιμότητά τους με αυτό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη παραγωγικότητα – αποτελεσματικότητα στο εργασιακό και όχι μόνο περιβάλλον.

2. Ευκολία, ευελιξία και απλότητα εγκατάστασης: Δεν χρειάζεται να εγκαταστήσουμε καλωδιώσεις μέσα από τοίχους και ταβάνια. Μπορεί να γίνει η δικτύωση σε μέρη όπου η καλωδίωση θα ήταν αδύνατη ή μη επιθυμητή, όπως η δικτύωση γραφείων τα οποία βρίσκονται σε απόσταση μεταξύ τους. Η εγκατάσταση στις περισσότερες περιπτώσεις μπορεί να γίνει εύκολα αν ακολουθηθούν κάποιοι βασικοί κανόνες εγκατάστασης.
3. Κλιμάκωση, δυνατότητα επέκτασης: Τα ασύρματα δίκτυα μπορούν να διαρθρωθούν σε ένα πλήθος από τοπολογίες, ώστε να ταιριάζουν στις απαιτήσεις των εφαρμογών. Οι τοπολογίες αλλάζουν εύκολα και επεκτείνονται από απλά δίκτυα με μικρό αριθμό χρηστών, ως μεγάλες δομές δικτύων με εκατοντάδες χρήστες και δυνατότητα περιαγωγής (roaming)
4. Κόστος: Παρόλο που το αρχικό κόστος εγκατάστασης είναι υψηλότερο σε σχέση με λύσεις ενσύρματης δικτύωσης το κόστος για όλη τη διάρκεια ζωής της επένδυσης μπορεί να είναι μικρότερο, ιδιαίτερα σε δυναμικό περιβάλλον που απαιτεί συχνές αλλαγές, αναδιαρθρώσεις και μετακινήσεις. Επιπλέον, το κόστος υλοποίησης – εγκατάστασης και συντήρησης – διαχείρισης του δικτύου είναι πολύ μικρό. Το σημαντικότερο κομμάτι του κόστους είναι η αγορά του εξοπλισμού. Επίσης, με την εμφάνιση περισσότερων κατασκευαστών και τον έντονο ανταγωνισμό μεταξύ τους το κόστος έχει πέσει αισθητά, ενώ παράλληλα οι συσκευές έχουν αποκτήσει περισσότερα ποιοτικά χαρακτηριστικά.
5. Ταχύτητες μετάδοσης: Όσο αναπτύσσεται η τεχνολογία γίνεται δυνατή η μετάδοση μεγαλύτερων ρυθμών δεδομένων. Ήδη ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων από τα 2 Mbps που μπορούσαν να επιτευχθούν αρχικά, έφτασε σήμερα σε ταχύτητες πάνω από 100 Mbps ενώ ήδη έχουν εξαγγελθεί ακόμα μεγαλύτερες ταχύτητες
6. Αξιοπιστία – Ανεξαρτησία: Ένα ασύρματο δίκτυο κατάλληλα διαμορφωμένο μπορεί να έχει μεγάλη αξιοπιστία. Έτσι μπορεί να σχεδιαστεί με τρόπο ώστε να εργάζεται όταν συμβαίνουν διακοπές ρεύματος και να περιλαμβάνει πολλές εναλλακτικές διαδρομές.
7. Εμβέλεια: Η εμβέλεια ενός ασύρματου δικτύου σε περιβάλλον γραφείου μπορεί να είναι μερικές δεκάδες μέτρα. Τα ραδιοκύματα σε εσωτερικό χώρο έχουν να περάσουν τοίχους και οροφές, οπότε υφίστανται σημαντική απόσβεση. Όμως, σε ανοιχτό χώρο

που υπάρχει οπτική επαφή ανάμεσα στις ασύρματες επαφές, οι αποστάσεις που μπορεί να καλυφθούν είναι πολύ μεγαλύτερες.

8. Συμβατότητα με το υπάρχον δίκτυο: Τα περισσότερα ασύρματα δίκτυα έχουν προτυποποιημένο τρόπο σύνδεσης με τα υπάρχοντα ενσύρματα δίκτυα. Έτσι, η προσθήκη ασύρματης δικτύωσης σε υπάρχουσες δομές δικτύων μπορεί να γίνει με τον ευκολότερο τρόπο. Πολλές φορές αποτελούν επέκταση ενός ενσύρματου δικτύου.

Τα μειονεκτήματα είναι καταρχήν η μικρή εμβέλεια, κυρίως όσον αφορά κλειστούς χώρους, αλλά κι αυτό έχει αρχίσει να διορθώνεται με τους κατάλληλους ενισχυτές σήματος, ενώ τα σημαντικότερα προβλήματα είναι οι απώλειες ισχύος κατά τη διάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος, το οποίο είναι ένα σύνθετο αποτέλεσμα διαφόρων φαινομένων, όπως η ανάκλαση και η διάθλαση της ακτινοβολίας ή η απορρόφηση από την ατμοσφαιρική υγρασία. Γενικά οι απώλειες εξαρτώνται από το περιβάλλον στο οποίο γίνεται η διάδοση, τη συχνότητα του κύματος και την απόσταση της επικοινωνίας. Σε σύνθετα σήματα (συνιστώσες διαφορετικών συχνοτήτων) οι απώλειες προκαλούν παραμόρφωση, καθώς κάθε συνιστώσα υπόκειται σε διαφορετικές απώλειες. Μάλιστα, οι απώλειες είναι αυτές που καθορίζουν το εύρος και τη μέγιστη απόσταση της ασύρματης επικοινωνίας, καθώς ένας δέκτης χαρακτηρίζεται από ένα ελάχιστο επίπεδο λαμβανόμενης ισχύος.

Σκοπός όλων των κατασκευαστών ασύρματων δικτύων είναι ο υπολογισμός των απωλειών και η προσπάθεια μείωσής τους, πράγμα που όμως δεν είναι πάντα εφικτό. Για τον υπολογισμό των απωλειών υπάρχουν κάποια μοντέλα, διαφορετικά για τις διαφορετικές συνθήκες διάδοσης, τα οποία γενικά είναι θεωρητικά (σπάνια λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου της διάδοσης), στατιστικά (προκύπτουν από μακροχρόνια στατιστική μελέτη σε συγκεκριμένες συνθήκες διάδοσης και εξειδικευμένα σε συγκεκριμένα είδη επικοινωνίας).

Για παράδειγμα, ένας τύπος που δίνει τις απώλειες για ιδεατή ιστροπική κεραία είναι ο εξής:

$$\frac{P_t}{P_r} = \frac{(4\pi d)^2}{\lambda^2} = \frac{(4\pi f d)^2}{c^2} \quad \frac{P_t}{P_r} = \frac{(4\pi d)^2}{G_t G_r \lambda^2} = \frac{(\lambda d)^2}{A_t A_r c} = \frac{(cd)^2}{f^2 A_t A_r}$$

όπου

P_t : ισχύς σήματος στο σημείο εκπομπής

P_r : ισχύς σήματος στο σημείο λήψης

λ : μήκος κύματος

f : συχνότητα

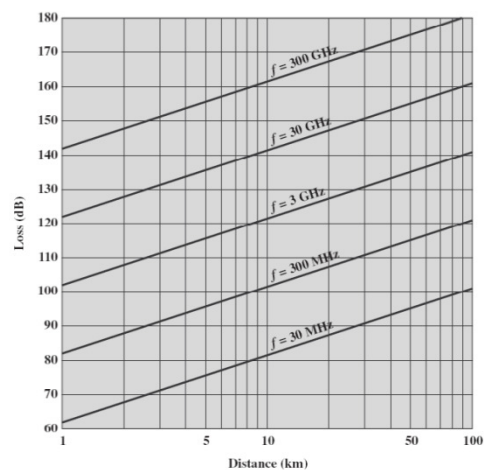
d : απόσταση επικοινωνίας

c : ταχύτητα του φωτός

G_t : κέρδος κεραίας πομπού

G_r : κέρδος κεραίας δέκτη

Οι απώλειες γενικά αυξάνονται με την αύξηση της απόστασης και τη συχνότητα επικοινωνίας. Ένα ενδεικτικό διάγραμμα φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 1.5: Απώλειες σε dB ανάλογα με την απόσταση και τη συχνότητα

Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ο θόρυβος. Ως θόρυβος ορίζεται οποιοδήποτε σήμα που δεν ανήκει στο σήμα που μεταφέρει την πληροφορία. Ο θόρυβος είναι συνήθως στοχαστικός, λευκός (δηλαδή έχει την ίδια ισχύ σε όλες τις συχνότητες) και προσθετικός (δηλαδή δρα προσθετικά στο μεταδιδόμενο σήμα). Το επίπεδο του θορύβου (ισχύς) εκφράζεται σε σχέση με το μεταδιδόμενο σήμα ως ο λόγος ισχύος σήματος προς το θόρυβο (S/N ή SNR) ή σηματοθορυβική σχέση. Ανάλογα με τα αίτια της δημιουργίας του, ο θόρυβος διακρίνεται σε: θερμικό θόρυβο, θόρυβο από παρεμβολές, θόρυβο ενδοδιαμόρφωσης, θόρυβο από εξωτερικές πηγές. Από αυτά σημαντικότερος είναι ο θερμικός θόρυβος, ο οποίος προκαλείται στον

πομπό και στο δέκτη και έχει ως αιτία τη θερμική κίνηση των ηλεκτρονίων. Εξαρτάται από τη θερμοκρασία και δεν μπορεί να εξαλειφθεί, ενώ ο τύπος του είναι $N_0 = kT$ όπου k η σταθερά Boltzmann και T η θερμοκρασία. Για τα ψηφιακά σήματα ο θερμικός θόρυβος εκφράζεται

$$\text{από το λόγο } \frac{E_b}{N_0} = \frac{S/R}{N_0} = \frac{S}{kTR}$$

Ο θόρυβος από παρεμβολές δημιουργείται από την επίδραση του σήματος ενός χρήστη στο σήμα κάποιου άλλου και εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείται από κοινού το κανάλι (μηχανισμός πρόσβασης). Ο θόρυβος ενδοδιαμόρφωσης δημιουργείται λόγω ατέλειας των τηλεπικοινωνιακών διατάξεων, ενώ τέλος ο θόρυβος από εξωτερικές πηγές οφείλεται σε κατασκευαστικές ατέλειες πολλών συσκευών που παράγουν εκπομπές σε διάφορες συχνότητες. Συχνή επίσης είναι η δημιουργία παλμών θορύβου (κρουστικός θόρυβος) που έχει μεγάλη ισχύ αλλά μικρή διάρκεια.

Στο περιβάλλον της κινητής τηλεφωνίας, ένα βασικό πρόβλημα είναι η χρονική μεταβολή του καναλιού ή της διαδρομής μετάδοσης, ενώ στο δέκτη φτάνουν διαφορετικές συνιστώσες του αρχικού σήματος που ακολουθούν διαφορετικές διαδρομές (πολλαπλές οδεύσεις), με συνέπεια την απότομη μεταβολή του πλάτους του λαμβανόμενου σήματος (διαλείψεις) και την παραμόρφωση του σήματος. Το φαινόμενο των πολλαπλών οδεύσεων οφείλεται στην ανάκλαση, διάθλαση και περίθλαση της ακτινοβολίας, ενώ οι διαλείψεις μπορεί να είναι γρήγορες ή αργές και σταθερές ή επιλεκτικές. Για την εξάλειψη του φαινομένου χρησιμοποιούνται τρεις τεχνικές διαχωρισμού: χώρου, συχνότητας και χρόνου.

Παράλληλα, λόγω της διάδοσης των ραδιοκυμάτων σε όλες τις κατευθύνσεις, είναι ευκολότερη η υποκλοπή των πληροφοριών σε σχέση με την ενσύρματη επικοινωνία και χρειάζεται περισσότερα πρωτόκολλα ασφαλείας. (<https://www.ceid.upatras.gr/>)

1.4 Σκοπός της διπλωματικής – Εισαγωγή στο πείραμα

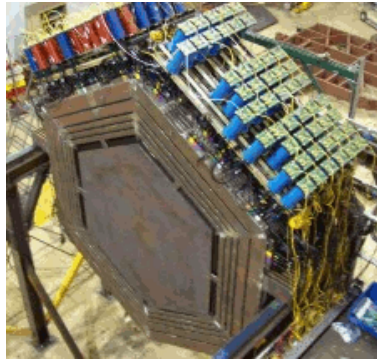
Δέσμες από νετρίνα έχουν προταθεί για τη χρησιμοποίησή τους ως μέσο επικοινωνίας κάτω από διάφορες «μη καθημερινές» καταστάσεις όπως η επικοινωνία με υποβρύχια, η ασφαλής επικοινωνία στρατιωτικών εγκαταστάσεων, η διαστρική επικοινωνία, αλλά και η διαπλανητική επικοινωνία (για διαστημικές αποστολές), όταν τα υπόλοιπα μέσα επικοινωνίας δεν λειτουργούν ή εμποδίζονται, όπως πχ από κάποιον πλανήτη (για παράδειγμα να στείλουμε μήνυμα στην αθέατη πλευρά του φεγγαριού). Άλλη σημαντική εφαρμογή τους

είναι η χρήση στη μετάδοση κωδικοποιημένων πληροφοριών. Τα νετρίνα (αλλά και άλλα στοιχειώδη σωματίδια, όπως θα αναφέρουμε στα επόμενα κεφάλαια), έχουν την ιδιότητα να διεισδύουν σε μεγάλο βαθμό μέσα στην ύλη, αλληλεπιδρώντας όμως σε μικρό βαθμό με αυτή, κάτι που σημαίνει ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο ισχυρές δέσμες νετρίνων και κατάλληλοι ανιχνευτές, κάτι που προς το παρόν δεν είναι επιτεύξιμο παρά μόνο σε μεγάλα εργαστήρια.

Πειραματικά έχουν χρησιμοποιηθεί στον ανιχνευτή MINERvA του Fermilab (κοντά στο Σικάγο), ο οποίος κατάφερε να ανιχνεύσει αποκωδικοποιημένες πληροφορίες με ταχύτητα 0,1 bits/sec με σφάλμα της τάξης του 1% σε απόσταση μεγαλύτερη από 1035 km και σε βάθος 240 m κάτω από τη Γη. Γενικά με το πείραμα αυτό φάνηκε η επιτευξιμότητα των δεσμών νετρίνο για ένα χαμηλό ποσοστό των επικοινωνιών, που μάλιστα δεν αλληλεπιδρά με τις υπάρχουσες δέσμες ακτινοβολιών στο χώρο (άρα δεν δημιουργεί παράσιτα). Όμως, δεδομένου του χαμηλού ποσού πληροφοριών που μπορεί να μεταφέρει, τη χαμηλή ταχύτητα και τις ακριβές και σύγχρονες τεχνολογίες που απαιτούνται για την ανίχνευση και αποκωδικοποίησή τους, χρειάζονται μεγάλες βελτιώσεις τόσο στις ακτίνες των νετρίνων όσο και τους ανιχνευτές.

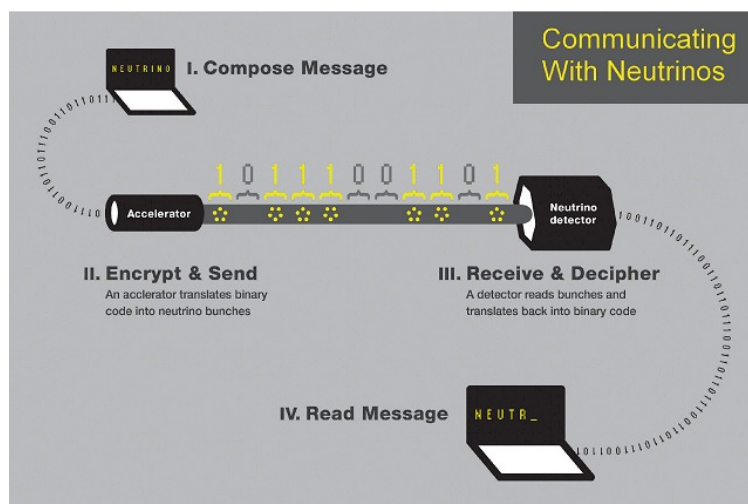
Ο σχεδιασμός του ανιχνευτή ξεκίνησε το 2006 και ολοκληρώθηκε τον Απρίλιο του 2009, ενώ η τοποθέτησή του έγινε το 2010. Το πείραμα ξεκίνησε το 2011, ενώ τα τελευταία αποτελέσματα τα έδωσε το 2012. Νέα αποτελέσματα αναμένονται την άνοιξη του 2013. Το MINERvA έλαβε το βραβείο Secretary of Energy's Award of Achievement το 2011 για την «αφοσίωση και ευφυΐα στη σχεδίαση και ανάπτυξη ενός εξαιρετικά πετυχημένου και πρωτότυπου project που επιτυχώς ενσωματώνει τη χρήση ενός πρωτογενούς ανιχνευτή, του οποίου τα μέρη συντέθηκαν σε διάφορα πανεπιστήμια, σε διαφορετικά γεωγραφικά μέρη. Στα επόμενα χρόνια θα αναφέρεται ως μια καλοσχεδιασμένη δουλειά...»

Σκοπός αυτής της διπλωματικής είναι να καταγράψει τα πειράματα που έχουν γίνει για την επικοινωνία μέσω δεσμών νετρίνων.



Εικόνα 1.6: Ανιχνευτής MINERVA: Τοποθετημένος στο Fermilab, ζυγίζει 5 τόνους και έχει κατασκευαστεί από πολλά στρώματα λωρίδων σπινθηριστών.

Συμπερασματικά, οι βασικοί στόχοι για την επικοινωνία με νετρίνα είναι η μετάδοση πληροφορίας σε πραγματικά μεγάλες αποστάσεις χωρίς τη χρήση καλωδίων (βλ 3^ο Κεφάλαιο για τις ιδιότητες των νετρίνων), με τρόπο που φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Εικόνα 1.7: Επικοινωνία με νετρίνα

Η MINERVA είναι μια διεθνής σύμπραξη πυρηνικών και μοριακών φυσικών από 21 ιδρύματα, που μελετούν τη συμπεριφορά των νετρίνων, χρησιμοποιώντας τον ανιχνευτή. Αυτό είναι το πρώτο πείραμα νετρίνων στον κόσμο, που χρησιμοποιεί υψηλής έντασης δέσμες, για να μελετήσει τις αλληλεπιδράσεις των νετρίνων με τους πυρήνες από πέντε διαφορετικά στοιχειώδη σωματίδια, πραγματοποιώντας έτσι την πρώτη σύγκριση των αλληλεπιδράσεων που προκύπτουν. Αυτό θα βοηθήσει να ολοκληρωθεί η εικόνα που έχουν οι επιστήμονες για τα νετρίνα και θα επιτρέψει στα δεδομένα που προκύπτουν να ερμηνεύονται με πιο ξεκάθαρο τρόπο σε τρέχοντα και μελλοντικά πειράματα. (<http://minerva.fnal.gov/>)

Βιβλιογραφία – Αναφορές 1^ο Κεφαλαίου

Ιωάννου Α., Ντάνος Γ., Πήττας Α., Ράπτης Σ., Φυσική Θετικής και Τεχνολογικής Κατεύθυνσης Γ' Λυκείου, Οργανισμός Εκδόσεων Διδακτικών Βιβλίων, 1999, Αθήνα

Ζώη Δ., Ρουμελιώτης Γ., Κεκάτος Β., Μπερμπερίδης Κ., Διδακτικές Σημειώσεις στο μάθημα «Συστήματα Μετάδοσης Πληροφορίας», Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής, Πολυτεχνείο Πάτρας, 2008, Πάτρα

Serway, Physics for Scientists and Engineers, Τόμος 2, Ηλεκτρομαγνητισμός, μετάφραση Λ.Κ Ρεσβάνη, 1990

<https://www.ceid.upatras.gr/webpages/faculty/alexiou/ahts/notes/kef08.pdf>

<http://minerva.fnal.gov/>

Κεφάλαιο 2 – Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία

2.1 Εισαγωγή στα ηλεκτρομαγνητικά πεδία: Ταυτόχρονη Διάδοση Ηλεκτρικού και Μαγνητικού Πεδίου

2.1.1 Εισαγωγή στο Ηλεκτρικό Πεδίο

Στη φύση έχουν παρατηρηθεί δυο είδη ηλεκτρικού φορτίου: το θετικό και το αρνητικό. Τα ομώνυμα φορτία απωθούνται, τα ετερόνυμα έλκονται. Η δύναμη ανάμεσα στα ηλεκτρικά φορτία είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασής τους, ενώ το ηλεκτρικό φορτίο διατηρείται (αρχή διατήρησης του φορτίου) και επίσης είναι κβαντισμένο μέγεθος (ακέραιο πολλαπλάσιο του φορτίου του ηλεκτρονίου). Το πόσο ισχυρό ή ασθενές είναι το ηλεκτρικό πεδίο περιγράφεται από την έντασή του E (μονάδα μέτρησης το 1 N/C) που ορίζεται ως το πηλίκο της δύναμης που ασκείται πάνω στο δοκιμαστικό φορτίο q_0 που βρίσκεται στο σημείο αυτό προς την τιμή του φορτίου: $E = \frac{F}{q_0}$. Το ηλεκτρικό πεδίο έχει δημιουργηθεί από φορτίο πηγή Q και το q_0 (το οποίο με τη σειρά του επίσης δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο) αποτελεί το φορτίο – υπόθεμα.

Γενικά, λέμε ότι σε κάποιο σημείο του χώρου υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο όταν πάνω σε δοκιμαστικό φορτίο που αρχικά ηρεμεί και το οποίο θα τοποθετήσουμε στο σημείο αυτό, δράσει μια ηλεκτρική δύναμη. Το ηλεκτρικό πεδίο σε κάποιο σημείο που οφείλεται σε συνεχή κατανομή φορτίου είναι $E = k \int \frac{dq}{r^2} \hat{r}$ όπου dq είναι το φορτίο ενός μικρού μέρους της κατανομής και r η απόστασή του από το σημείο στο οποίο μετράμε το πεδίο. Οι δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου αποτελούν την γραφική αναπαράσταση του ηλεκτρικού πεδίου, όπου κάθε φορά η ένταση είναι εφαπτόμενη αυτών. Τέλος, η πυκνότητα των γραμμών που διαπερνούν μια επιφάνεια κάθετη προς αυτές είναι ανάλογη προς το μέτρο του ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή αυτή. Συγκεκριμένα, η ποσοτική περιγραφή των δυναμικών γραμμών γίνεται μέσω της ηλεκτρικής ροής, η οποία ορίζεται ως ο αριθμός των γραμμών του ηλεκτρικού πεδίου που διαπερνούν μια επιφάνεια [$\Phi = E A$, όπου Φ η ηλεκτρική ροή, E η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και A η επιφάνεια].

Άλλη σημαντική έννοια για το ηλεκτρικό πεδίο είναι το ηλεκτρικό δυναμικό και κυρίως αυτό που μας απασχολεί είναι η διαφορά δυναμικού, που ισούται με το έργο ανά μονάδα φορτίου

που παράγει ή καταναλώνει μια εξωτερική δύναμη για να μετακινήσει ένα δοκιμαστικό φορτίο ανάμεσα σε δυο σημεία.

2.1.2 Εισαγωγή στο Μαγνητικό Πεδίο

Αρχικά τα ηλεκτρικά και τα μαγνητικά φαινόμενα συγγέονταν και δεν ήταν απόλυτα ξεκάθαρο ποια ήταν η διαφορά ανάμεσα στα δυο. Από την αρχαία Ελλάδα ήταν γνωστός ο μαγνητίτης και η έλξη ή η άπωση που δημιουργούνταν ανάμεσα σε διάφορα υλικά. Ο Γκίλμπερτ το 1600 έκανε πειράματα με μαγνήτες, ενώ ο Μίτσελ το 1750 χρησιμοποίησε το στροφικό ζυγό για να αποδείξει ότι οι μαγνητικοί πόλοι απωθούνται ή έλκονται σύμφωνα με το νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου (όπως οι ηλεκτρικές ή βαρυτικές δυνάμεις). Η άρρηκτη σχέση ανάμεσα στον ηλεκτρισμό και τον μαγνητισμό αποκαλύφθηκε κατά τη διάρκεια μιας διάλεξης του Έρστεντ το 1819, ο οποίος παρατήρησε ότι κάθε φορά που περνούσε ηλεκτρικό ρεύμα από ένα καλώδιο, εκτροπάζονταν μία μαγνητική βελόνα που βρισκόταν πάνω στην έδρα. Λίγο αργότερα ο Αμπέρ έκανε μια σειρά πειραμάτων βάσει των οποίων εξήγαγε και διατύπωσε τους νόμους της μαγνητικής δύναμης ανάμεσα σε δυο αγωγούς που διαρρέονται από ρεύμα. Διατύπωσε επίσης την άποψη ότι τα μαγνητικά φαινόμενα οφείλονται σε ηλεκτρικά ρεύματα στη μοριακή κλίμακα.

Κατά τη δεκαετία του 1820 ο Φαραντέι και ο Χένρι έκαναν μεγάλο αριθμό πειραμάτων, όπου απέδειξαν το στενό δεσμό ανάμεσα στον ηλεκτρισμό και το μαγνητισμό: απέδειξαν ότι μπορούσαν να παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα κύκλωμα κινώντας ένα μαγνήτη κοντά στο κύκλωμα ή μεταβάλλοντας το ρεύμα σε ένα άλλο γειτονικό κύκλωμα. Τα πειράματα επίσης έδειξαν ότι ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο παράγει ηλεκτρικό πεδίο. Ο Μάξγουελ κατέγραψε τις εξισώσεις που συνδέουν μαθηματικά το μαγνητικό με το ηλεκτρικό πεδίο.

Ονομάζουμε μαγνητική επαγωγή B (επίσης χαρακτηρίζεται και ως ένταση του μαγνητικού πεδίου) την περιοχή του χώρου όπου ασκούνται μαγνητικές δυνάμεις. Η μαγνητική δύναμη είναι ανάλογη προς το φορτίο q και την ταχύτητα u του σωματίου. Το μέτρο και η κατεύθυνση της μαγνητικής δύναμης εξαρτάται από το διάνυσμα της ταχύτητας του σωματίου καθώς και από το μέτρο και την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου: $F = qu \times B$

Ο νόμος των Biot – Savart ορίζει ότι αν ένα σύρμα διαρρέεται από σταθερό ρεύμα I , τότε ένα στοιχειώδες τμήμα ds του σύρματος αυτού δημιουργεί σε ένα σημείο P στοιχειώδες

μαγνητικό πεδίο που είναι κάθετο στο στοιχειώδες τμήμα ds , αντιστρόφως ανάλογο της απόστασης r , ανάλογο με το ρεύμα I και το μήκος του αγωγού:
$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I ds \times \hat{r}}{r^2}$$

Η ολοκληρωτική μορφή του παραπάνω νόμου είναι:
$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{ds \times \hat{r}}{r^2}$$
 (Παπαδημητράκη, Τσουκαλάς, 1995)

2.1.3 Εξισώσεις Maxwell

Οι τέσσερις εξισώσεις του Ηλεκτρομαγνητισμού του Maxwell είναι οι εξής:

$$\oint E \cdot dA = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

$$\oint B \cdot dA = 0$$

$$\oint E \cdot ds = -\frac{d\Phi_m}{dt}$$

$$\oint B \cdot ds = \mu_0 I + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\Phi_e}{dt}$$

Ο πρώτος αποτελεί το Νόμο του Γκάους και συνδέει το ηλεκτρικό πεδίο με το ηλεκτρικό φορτίο που το δημιουργεί. Θεωρούμε ότι οι δυναμικές γραμμές ξεκινούν από τα θετικά ηλεκτρικά φορτία και καταλήγουν στα αρνητικά.

Ο δεύτερος νόμος αποτελεί το Νόμο του Γκάους για το μαγνητισμό και ορίζει ότι ο αριθμός των μαγνητικών δυναμικών γραμμών που εισέρχονται σε μια κλειστή επιφάνεια ισούται με τον αριθμό των γραμμών που εξέρχονται από αυτή (μαγνητικά μονόπολα δεν έχουν ανιχνευθεί ακόμα).

Η τρίτη εξίσωση αποτελεί το νόμο του Φαραντέι και περιγράφει τη σχέση ανάμεσα σε ένα μεταβαλλόμενο ως προς το χρόνο μαγνητικό πεδίο και το ηλεκτρικό πεδίο το οποίο επάγει. Αποτέλεσμα του νόμου του Φαραντέι είναι το επαγόμενο ρεύμα που δημιουργείται σε έναν κλειστό αγωγό όταν αυτός τοποθετηθεί μέσα σε μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.

Ο τελευταίος νόμος (γενικευμένη περίπτωση του νόμου του Αμπέρ) περιγράφει τη σχέση ανάμεσα στα ηλεκτρικά ρεύματα και τα μαγνητικά και ηλεκτρικά πεδία.

Αφού υπολογίσουμε το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο σε ένα σημείο του χώρου, μπορούμε να προσδιορίσουμε τη δύναμη στην οποία υπόκειται ένα φορτίο q που βρίσκεται στο σημείο αυτό: $F = qE + q\mathbf{u} \times \mathbf{B}$. Η δύναμη αυτή ονομάζεται δύναμη Lorentz. Όλα τα κλασικά ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα περιγράφονται πλήρως από τις εξισώσεις του Maxwell και τη δύναμη Lorentz.

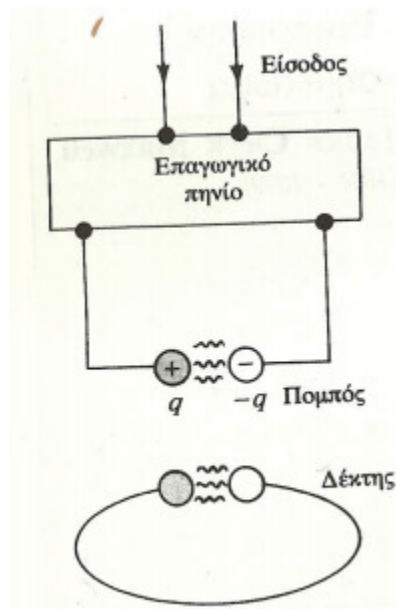
Η θεωρία του Maxwell προέβλεψε την ύπαρξη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που διαδίδονται στο κενό με την ταχύτητα του φωτός. Η πρόβλεψη αυτή επαληθεύτηκε πειραματικά από τον Hertz, που πρώτος παρήγαγε και ανίχνευσε ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Η ανακάλυψη αυτή οδήγησε στο σημερινό τηλεπικοινωνιακό πληθωρικό τρόπο ζωής με τη ραδιοφωνία, την τηλεόραση, το ραντάρ και τις δορυφορικές ζεύξεις.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα δημιουργούνται από επιταχυνόμενα ηλεκτρικά φορτία. Τα εκπεμπόμενα κύματα δεν είναι τίποτα άλλο παρά ταλαντούμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, τα οποία είναι κάθετα μεταξύ τους και ταυτόχρονα κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης της κυματικής διαταραχής. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι εγκάρσια, ενώ η θεωρία του Maxwell αποδεικνύει ότι τα πλάτη του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου E και B αντίστοιχα συνδέονται μεταξύ τους με τη σχέση $c = \frac{E}{B}$.

Σε μεγάλες αποστάσεις από την πηγή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων τα πλάτη των ταλαντούμενων πεδίων ελαττώνονται αντιστρόφως ανάλογα προς την απόσταση r από την πηγή. Τα εκπεμπόμενα κύματα μπορούμε να τα ανιχνεύσουμε σε μεγάλες αποστάσεις από την πηγή. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταφέρουν ενέργεια, ορμή και στροφορμή, άρα ασκούν πίεση πάνω στις επιφάνειες στις οποίες προσπίπτουν. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα καλύπτουν ένα τεράστιο φάσμα συχνοτήτων, ενώ τα ραδιοκύματα που απασχολούν τη συγκεκριμένη πτυχιακή παράγονται από ταλαντούμενα ρεύματα στις κεραίες των πομπών και έχουν συχνότητα 10^7 Hz περίπου (μικρή συχνότητα, μεγάλο μήκος κύματος).

Στην εικόνα που ακολουθεί βλέπουμε τη διάταξη που χρησιμοποίησε ο Hertz το 1887 για να ανιχνεύσει ηλεκτρομαγνητικά κύματα από ηλεκτρικές πηγές. Ο πομπός αποτελείται από ένα πηνίο συνδεδεμένο με δυο σφαιρικά ηλεκτρόδια τα οποία χωρίζονται από ένα μικρό διάκενο. Το πηνίο παρέχει στις σφαίρες τάση σε παλμούς, δίνοντας τότε στη μία και τότε στην άλλη θετικό και αρνητικό φορτίο αντίστοιχα. Όταν η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα δυο ηλεκτρόδια υπερβεί την τιμή εκκένωσης στον αέρα, τότε εμφανίζεται σπινθήρας ανάμεσά

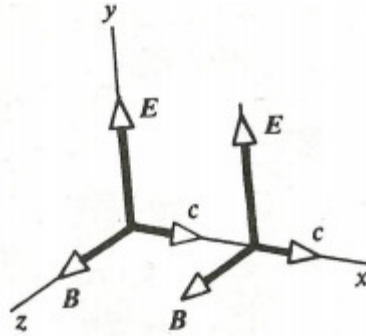
τους. ο αέρας ανάμεσα στα δυο σφαιρικά ηλεκτρόδια ιοντίζεται, η αγωγιμότητά του αυξάνεται και η εκκένωση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια αρχίζει να ταλαντώνεται καθώς μεταβάλλεται η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα δυο ηλεκτρόδια. Ο δέκτης είναι ένας βρόχος με διάταξη ηλεκτροδίων παρόμοια με αυτή του πομπού. Το βρόχο αυτό τον τοποθέτησε σε απόσταση μερικών μέτρων από τον πομπό και όταν η συχνότητα του δέκτη συνέπιπτε με τη συχνότητα του πομπού (μεταβάλλοντας την αυτεπαγωγή του πηνίου και τη χωρητικότητα του πυκνωτή), δημιουργούνταν εξ επαγωγής σπινθήρες ανάμεσα στα δυο ηλεκτρόδια του δέκτη. Έτσι, ο Hertz απέδειξε ότι το επαγόμενο στο δέκτη ρεύμα οφειλόταν στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που εξέπεμπε ο πομπός. Με μια σειρά από πειράματα ο Hertz απέδειξε τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα σε ραδιοσυχνότητες είναι παρόμοια με το φως και έχουν τις ίδιες ιδιότητες (συμβολή, περίθλαση, ανάκλαση, διάθλαση, πόλωση). (Παπαδημητράκη, Τσουκαλάς, 1994)



Εικόνα 2.1: Διάγραμμα της πειραματικής διάταξης με την οποία ο Hertz παρήγαγε και ανίχνευσε ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Ο πομπός αποτελείται από δυο σφαιρικά ηλεκτρόδια συνδεδεμένα με ένα πηνίο το οποίο δίνει στα σφαιρικά ηλεκτρόδια βραχείς (ως προς το χρόνο) παλμούς τάσης. Ο δέκτης είναι ένας βρόχος με διάταξη ηλεκτροδίων παρόμοια με τη διάταξη του πομπού

2.1.4 Επίπεδα ηλεκτρομαγνητικά κύματα

Κατά τη μελέτη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, αρχικά θα υποθέσουμε ότι το ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι ένα επίπεδο κύμα, δηλαδή οδεύει μόνο σε μια κατεύθυνση. Το κύμα αυτό θα έχει τις ακόλουθες ιδιότητες:



Εικόνα 2.2: Πολωμένο επίπεδο κύμα οδεύει προς τη θετική κατεύθυνση x . Το ηλεκτρικό πεδίο κατευθύνεται προς τη διεύθυνση y και το μαγνητικό πεδίο προς τη διεύθυνση z . Τα πεδία εξαρτώνται μόνο από τα x και t .

Το κύμα θα κατευθύνεται προς τον άξονα x , ενώ το διάνυσμα του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου θα είναι παράλληλα προς τον άξονα y και z αντίστοιχα. Τα κύματα στα οποία τα διανύσματα του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου είναι παράλληλα προς ορισμένες διευθύνσεις στο επίπεδο yz τα ονομάζουμε γραμμικά πολωμένα κύματα. Επίσης υποθέτουμε ότι σε οποιοδήποτε σημείο P οι τελικές τιμές των E και B εξαρτώνται μόνο από τη συντεταγμένη x του σημείου P και από το χρόνο t , αλλά όχι από τις συντεταγμένες y και z του σημείου.

Γενικά, η απλούστερη λύση των εξισώσεων του Maxwell είναι ένα επίπεδο αρμονικό κύμα του οποίου τα πλάτη του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου μεταβάλλονται ως προς x και t σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$E = E_0 \cos(kx - \omega t)$$

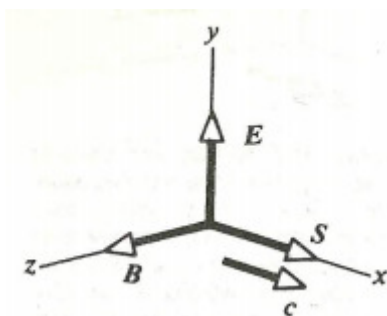
$$B = B_0 \cos(kx - \omega t)$$

όπου E_0 και B_0 είναι αντίστοιχα οι μέγιστες τιμές του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ όπου λ το μήκος κύματος και $\omega = 2\pi f$ όπου f η συχνότητα. Ο λόγος ω/k ισούται με το c .

Κάθε στιγμή θα ισχύει ότι $\frac{E_0}{B_0} = \frac{E}{B} = c$, δηλαδή κάθε στιγμή ο λόγος του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου είναι ίσος με την ταχύτητα του φωτός. Επίσης θα ισχύει ότι $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$ όπου μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού και ϵ_0 η ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού. (Ιωάννου, κα)

2.1.5 Ενέργεια, ορμή και πίεση στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταφέρουν ορμή και ενέργεια. Καθώς διαδίδονται μέσα στο χώρο μεταφέρουν ορμή και ενέργεια στα αντικείμενα που συναντούν στο δρόμο τους. Ο ρυθμός ενέργειας περιγράφεται με το διάνυσμα Poynting, που συμβολίζεται με το S : $S = \frac{1}{\mu_0} E \times B$. Το μέτρο του διανύσματος Poynting περιγράφει το ρυθμό με τον οποίο η ενέργεια διαρρέει μια επιφάνεια που είναι κάθετη προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.



Εικόνα 2.3: Η κατεύθυνση του διανύσματος Poynting S ενός επίπεδου ηλεκτρομαγνητικού κύματος που κατευθύνεται κατά τη θετική κατεύθυνση x συμπίπτει με την κατεύθυνση διάδοσης του κύματος (δηλαδή με τη θετική κατεύθυνση x)

Η κατεύθυνση του S είναι ίδια με την κατεύθυνση διάδοσης του κύματος. Μονάδες μέτρησης είναι το 1 J/s m^2 .

Όπως αναφέραμε παραπάνω, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα δεν μεταφέρουν μόνο ενέργεια, αλλά και ορμή. Επομένως, όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσκρούει σε μια επιφάνεια ασκεί πάνω της πίεση, που ονομάζεται πίεση ακτινοβολίας. Υποθέτουμε ότι το ηλεκτρομαγνητικό κύμα μεταφέρει πάνω σε μια επιφάνεια συνολική ενέργεια U μέσα σε χρόνο t . Με την προϋπόθεση ότι η επιφάνεια απορροφά όλη την προσπίπτουσα ενέργεια, ο Maxwell απέδειξε ότι η ολική ορμή p με την οποία το ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσκρούει στην επιφάνεια ισούται με: $p = \frac{U}{c}$ (ολική απορρόφηση).

Επίσης, η πίεση ακτινοβολίας P (δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας) που ασκεί το κύμα πάνω στην επιφάνεια (η οποία απορροφά πλήρως την ορμή και την ενέργεια του κύματος) ισούται με $P = \frac{S}{c}$.

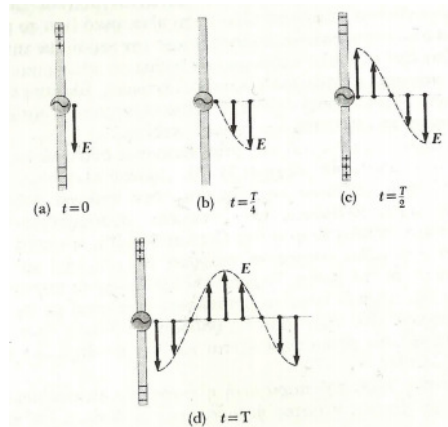
Εάν η επιφάνεια είναι τέλειος ανακλαστής τότε η μεταφορά ορμής μέσα σε χρονικό διάστημα t για κάθετη πρόσπτωση του κύματος ισούται με $2U/c$, δηλαδή με το διπλάσιο της τιμής που υπολογίσαμε πριν. Με άλλα λόγια, το κύμα που προσπίπτει δίνει στην επιφάνεια ορμή U/c αλλά άλλη τόση δίνει στην επιφάνεια και το κύμα που ανακλάται. Γενικά η ορμή που μεταφέρεται σε μια τυχαία επιφάνεια κυμαίνεται ανάμεσα στο U/c και στο $2U/c$ ανάλογα με τις ιδιότητες της επιφάνειας. Τέλος, η πίεση της ακτινοβολίας που ασκεί ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα που προσπίπτει κάθετα σε μια επιφάνεια η οποία είναι τέλειος ανακλαστής, ισούται με $P = \frac{2S}{c}$. Οι τιμές των πιέσεων της ακτινοβολίας γενικά είναι μικρές (Serway, Τόμος 2^{ος})

2.2 Παραγωγή και Εκπομπή Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων από Κεραία

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα παράγονται από μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία τα οποία δημιουργούν ηλεκτρικά πεδία και μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία τα οποία δημιουργούν μαγνητικά πεδία. Βλέπουμε λοιπόν ότι ούτε τα στατικά ηλεκτρικά φορτία ούτε τα σταθερά ηλεκτρικά ρεύματα μπορούν να παράγουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Όταν όμως το ρεύμα που διαρρέει ένα σύρμα μεταβάλλεται ως προς το χρόνο, τότε το σύρμα εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Δηλαδή, η λέξη κλειδί για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι η επιτάχυνση (ή επιβράδυνση).

Εάν σε μια κεραία εφαρμόσουμε εναλλασσόμενη τάση αυτή εξαναγκάζει τα ηλεκτρικά φορτία της κεραίας να ταλαντωθούν. Αυτή είναι μια πολύ κοινή μέθοδος επιτάχυνσης ηλεκτρικά φορτισμένων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στους ραδιοφωνικούς σταθμούς.

Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται σχηματικά η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από τα επιταχυνόμενα φορτία μιας κεραίας. Δυο μεταλλικές ράβδοι είναι συνδεδεμένες με μια γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος η οποία εξαναγκάζει τα φορτία των δυο ράβδων να ταλαντωθούν. Η τάση εξόδου της γεννήτριας είναι ημιτονοειδής. Κατά τη στιγμή $t = 0$ η πάνω ράβδος έχει μέγιστη περίσσεια θετικού φορτίου, ενώ η κάτω έχει περίσσεια ισόποσου αρνητικού φορτίου.

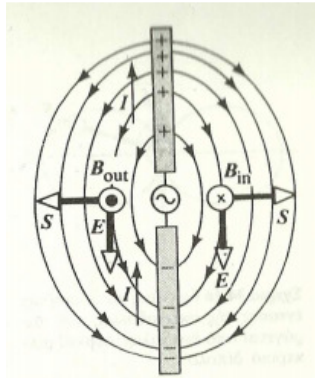


Εικόνα 2.4: Το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργούν τα ταλαντούμενα ηλεκτρικά φορτία μιας κεραίας. Το ηλεκτρικό καθώς και το μαγνητικό πεδίο απομακρύνονται από την κεραία με ταχύτητα c .

Στο ίδιο σχήμα βλέπουμε επίσης το ηλεκτρικό πεδίο κατά τη στιγμή $t = 0$. Καθώς τα φορτία ταλαντώνονται, οι ράβδοι έχουν λιγότερο φορτίο και το ηλεκτρικό πεδίο που παράγουν (που επομένως βρίσκεται κοντά στη ράβδο) είναι μικρότερο, ενώ το πεδίο που είχε παραχθεί κατά τη στιγμή $t = 0$ (όταν το παραχθέν πεδίο είχε τη μέγιστη τιμή του και κατευθυνόταν προς τα κάτω) έχει οδεύσει και επομένως έχει απομακρυνθεί από τη ράβδο. Όταν η περίσσεια φορτίου στην κάθε ράβδο είναι μηδέν (b) το ηλεκτρικό φορτίο μηδενίζεται. Αυτό συμβαίνει στο τέταρτο της περιόδου μετά από τη στιγμή $t = 0$. Γρήγορα η πάνω ράβδος αποκτά μέγιστη περίσσεια αρνητικού φορτίου και η κάτω περίσσεια θετικού φορτίου (c), οπότε το παραγόμενο μέγιστο ηλεκτρικό πεδίο κατευθύνεται προς τα πάνω. Αυτό συμβαίνει μισή περίοδο μετά τη στιγμή $t = 0$. Οι ταλαντώσεις συνεχίζονται (d), ενώ ταυτόχρονα παράγεται και μαγνητικό πεδίο ου είναι κάθετο στο επίπεδο του σχήματος. Το ηλεκτρικό πεδίο δίπλα στην κεραία ταλαντώνεται σε φάση με την ταλάντωση της κατανομής φορτίου. Δηλαδή το ηλεκτρικό πεδίο κατευθύνεται προς τα κάτω όταν η πάνω ράβδος είναι θετική και προς τα πάνω όταν η πάνω ράβδος είναι αρνητική. Τέλος, το μέτρο του πεδίου κάθε στιγμή εξαρτάται από την περίσσεια φορτίου που έχουν οι ράβδοι τη στιγμή αυτή.

Καθώς τα φορτία εξακολουθούν να ταλαντώνονται (και επομένως να επιταχύνονται), ανάμεσα στις δυο ράβδους, το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο το οποίο δημιουργούν απομακρύνεται από την κεραία με την ταχύτητα του φωτός. Στο σχήμα 2.5 βλέπουμε το ηλεκτρικό πεδίο που παράγεται σε διάφορες στιγμές του κύκλου ταλάντωσης. Βλέπουμε, λοιπόν, ότι ένας πλήρης κύκλος (μία περίοδος) ταλάντωσης του ηλεκτρικού φορτίου παράγει ένα πλήρες μήκος κύματος του ηλεκτρικού πεδίου.

Ας μελετήσουμε τώρα την παραγωγή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από μια κεραία μισού μήκους κύματος ή ημικύματος ή διπολική κεραία του Hertz. Στη διάταξη αυτή χρησιμοποιούμε δυο αγώγιμες ράβδους τις οποίες συνδέουμε με μια πηγή εναλλασσόμενης ΗΕΔ, όπως στο παρακάτω σχήμα 2.5:



Εικόνα 2.5: Μια κεραία «ημικύματος» (διπολική) αποτελείται από δυο μεταλλικές ράβδους που είναι συνδεδεμένες με πηγή εναλλασσόμενης τάσης. Στο διάγραμμα βλέπουμε τα διανύσματα E και B κατά τη στιγμή που το ρεύμα κατευθύνεται προς τα πάνω. Να σημειωθεί ότι οι γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου θυμίζουν τις γραμμές του ηλεκτρικού διπόλου (από όπου και η ονομασία της κεραίας αυτής)

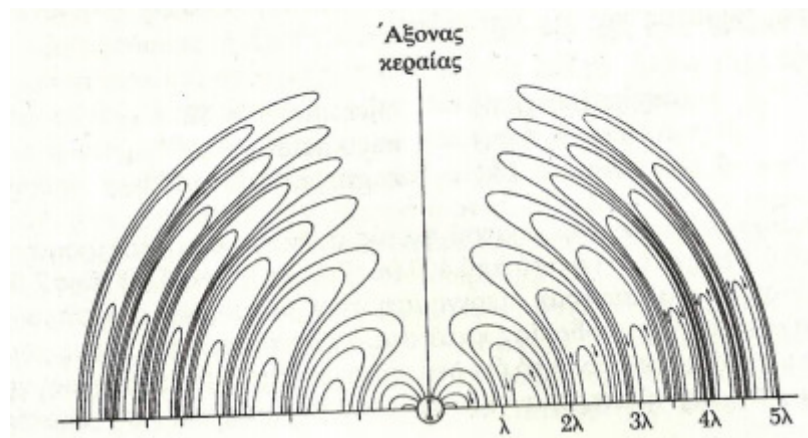
Το μήκος καθεμιάς ράβδου ισούται με ένα τέταρτο του μήκους κύματος. Ο ταλαντωτής εξαναγκάζει τα φορτία να ταλαντώνονται παλινδρομικά ανάμεσα στις δυο ράβδους. Στο σχήμα βλέπουμε το πεδίο σε μια στιγμή που το ρεύμα μεταβαίνει προς την επάνω ράβδο. Όπως παρατηρούμε, οι γραμμές ηλεκτρικού πεδίου μοιάζουν με τις γραμμές ενός ηλεκτρικού διπόλου, δηλαδή του πεδίου δυο ίσων και αντίθετων ηλεκτρικών φορτίων. Αφού λοιπόν τα φορτία αυτά ταλαντώνονται συνεχώς ανάμεσα στις δυο ράβδους, μπορούμε να περιγράψουμε προσεγγιστικά μια κεραία ως ένα παλλόμενο ηλεκτρικό δίπολο. Οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου σχηματίζουν ομόκεντρους κύκλους (γύρω από την κεραία) και είναι παντού κάθετοι προς τις γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου. Το μαγνητικό πεδίο είναι μηδενικό παντού πάνω στον άξονα της κεραίας. Τέλος, το ηλεκτρικό πεδίο E και το μαγνητικό πεδίο B έχουν μεταξύ τους διαφορά φάσης 90° , δηλαδή όταν το E έχει τη μέγιστη τιμή του, το B είναι μηδενικό και αντίστροφα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όταν οι περιπτώσεις ηλεκτρικού φορτίου στις δυο ράβδους έχουν τη μέγιστη τιμή τους (οπότε το ηλεκτρικό πεδίο που παράγουν έχει κι αυτό τη μέγιστη τιμή του) το ηλεκτρικό ρεύμα μηδενίζεται και επομένως μηδενίζεται το μαγνητικό πεδίο.

Στα σημεία που βλέπουμε στο σχήμα 2.5 το διάνυσμα Poynting S κατευθύνεται ακτινικά προς τα έξω. Αυτό δείχνει ότι η ενέργεια ρέει, απομακρυνόμενη τη στιγμή αυτή από την

κεραία. Αργότερα όμως, καθώς το ρεύμα μεταβάλλει την κατεύθυνσή του, μεταβάλλουν την κατεύθυνσή τους και τα εκπεμπόμενα πεδία και, επομένως, και το διάνυσμα Poynting. Αφού όμως τα E και B έχουν διαφορά φάσης 90° κοντά στο δίπολο, η καθαρή ροή ενέργειας πρέπει να είναι μηδενική.

Αφού τα πεδία των διπόλων μεταβάλλονται ως $1/r^2$, δεν πρέπει να απαντώνται σε σημαντικά μεγάλες αποστάσεις από την κεραία. Ωστόσο, στις μεγάλες αποστάσεις υπεισέρχεται ένα άλλο φαινόμενο το οποίο παράγει ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Αυτό οφείλεται στη συνεχή παραγωγή, λόγω επαγωγής, ηλεκτρικού πεδίου από μεταβαλλόμενο ως προς το χρόνο ηλεκτρικό πεδίο. Και τούτο είναι αποτέλεσμα των εξισώσεων του Maxwell. Τα ηλεκτρικά και τα μαγνητικά πεδία όμως που παράγονται κατά τον τρόπο αυτό βρίσκονται σε φάση το ένα με το άλλο και εξαρτώνται από την απόσταση από την κεραία ως $1/r$. Το αποτέλεσμα είναι μια συνεχής εκροή ενέργειας από την πηγή.

Οι γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου που παράγονται σε κάποια στιγμή από ένα ταλαντούμενο δίπολο φαίνονται στο σχήμα 2.6:



Εικόνα 2.6: Στιγμαία αναπαράσταση των γραμμών του ηλεκτρικού πεδίου που εκπέμπεται από ταλαντούμενο ηλεκτρικό δίπολο. Τα εκπεμπόμενα πεδία απομακρύνονται από ταλαντούμενο ηλεκτρικό δίπολο. Τα εκπεμπόμενα πεδία απομακρύνονται από το δίπολο με ταχύτητα c .

Να σημειωθεί ότι η ένταση (και επομένως η εκπεμπόμενη ισχύς) του εκπεμπόμενου πεδίου είναι μέγιστη στο επίπεδο που είναι κάθετο στην κεραία και διέρχεται από το μέσο της. Να σημειωθεί επίσης ότι δεν εκπέμπεται ισχύς κατά μήκος του άξονα της κεραίας. Εάν λύσουμε τις εξισώσεις του Maxwell για ένα ταλαντούμενο δίπολο, θα δούμε ότι η ένταση του

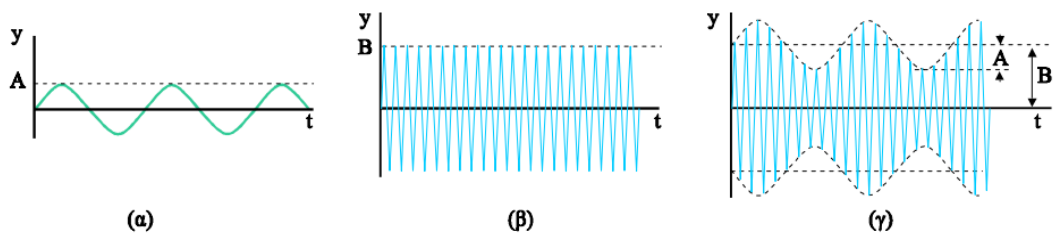
εκπεμπόμενου πεδίου μεταβάλλεται ως $\frac{\sin^2\theta}{r^2}$ όπου μετράμε τη γωνιακή εξάρτηση της εκπεμπόμενης έντασης (ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας).

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα επάγουν ρεύματα στις κεραίες λήψης. Η απόκριση μιας κεραίας λήψης διπόλου σε μια δεδομένη θέση είναι μέγιστη όταν ο άξονάς της είναι παράλληλος προς το ηλεκτρικό πεδίο του ανιχνευόμενου κύματος στο σημείο αυτό και είναι μηδενική όταν η κεραία λήψης είναι κάθετη στο ηλεκτρικό πεδίο (<https://www.ceid.upatras.gr>, Γεωργακόπουλος)

2.2.1 Διαμόρφωση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

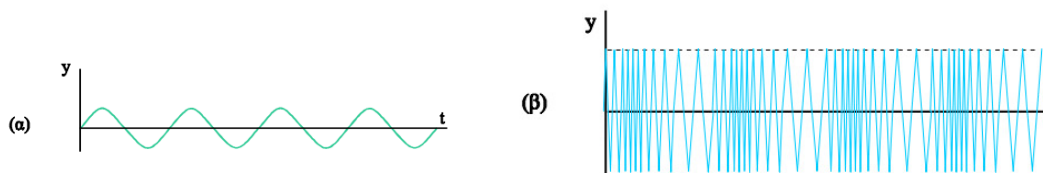
Ο παραπάνω τρόπος αποτελεί την αρχή λειτουργίας μιας κεραίας. Ένα σημαντικό μέγεθος που μας απασχολεί είναι η διαμόρφωση των κυμάτων. Η διαμόρφωση του σήματος επιβάλλεται για δυο λόγους: α) το μήκος μιας κεραίας πρέπει να είναι συγκρίσιμο με το μήκος κύματος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που εκπέμπει. Για να εκπνευθεί κατ' ευθείαν το ηλεκτρικό σήμα που παίρνουμε από έναν ήχο απαιτείται κεραία μήκους πολλών χιλιομέτρων και β) Κάθε πομπός πρέπει να έχει κάποια ταυτότητα ώστε κατά τη λήψη να είναι δυνατή η αναγνώριση και η επιλογή του.

Για να μεταδώσουμε την πληροφορία το ηλεκτρικό σήμα που παίρνουμε από το μικρόφωνο διαβιβάζεται στην κεραία του πομπού, αφού προηγουμένα το διαμορφώσουμε. Αυτό σημαίνει ότι το σήμα προστίθεται σε ένα αρμονικό υψίσυχο κύμα που παράγεται στον πομπό και έχει ορισμένη συχνότητα (φέρουσα συχνότητα) (σχήμα β). Έτσι το κύμα που εκπέμπεται από την κεραία έχει τη μορφή του σχήματος γ. Η διαμόρφωση αυτή ονομάζεται διαμόρφωση κατά πλάτος ή AM (amplitude modulation).



Εικόνα 2.7: (α) μικροφωνικό κύμα, (β) φέρον κύμα, (γ) διαμορφωμένο κύμα

Το σήμα μπορεί να διαμορφωθεί και στη συχνότητά του. Η διαμόρφωση αυτή λέγεται διαμόρφωση κατά συχνότητα ή FM (frequency modulation).



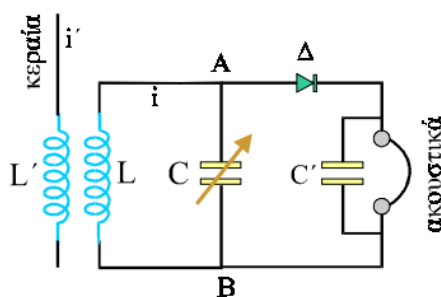
Εικόνα 2.8: (α) μικροφωνικό κύμα, (β) διαμόρφωση του φέροντος κύματος κατά συχνότητα

Στη διαμόρφωση κατά συχνότητα στο φέρον κύμα δημιουργούνται πυκνώματα και αραιώματα. Όσο πιο ισχυρό είναι το ηχητικό σήμα τόσο πιο έντονα είναι τα πυκνώματα και τα αραιώματα που δημιουργούνται στο φέρον κύμα. Το πλεονέκτημα αυτής της διαμόρφωσης είναι ότι το διαμορφωμένο κύμα δεν επηρεάζεται σημαντικά από παράσιτα. Τα παράσιτα κατά τη συμβολή τους με το διαμορφωμένο κύμα, επηρεάζουν κυρίως τα πλάτη και λιγότερο τις συχνότητες.

Το διαμορφωμένο κύμα διεγείρει την κεραία. Τα φορτία της ταλαντώνονται και εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικό κύμα αντίστοιχης μορφής.

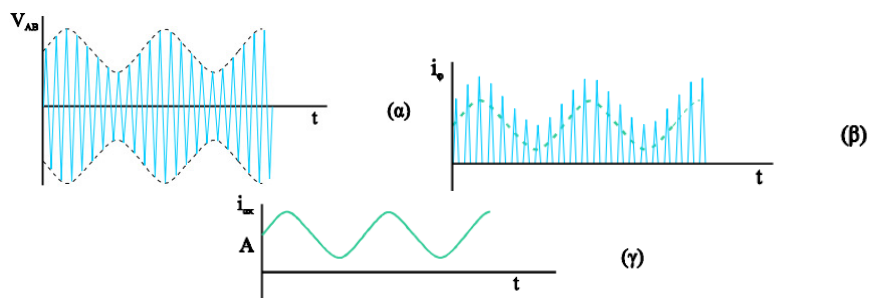
Η λήψη ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος από το δέκτη, γίνεται με έναν αγωγό (κεραία) ο οποίος βρίσκεται σε επαγωγική σύζευξη με ένα κύκλωμα LC. Ο δέκτης, αφού συντονιστεί με κάποιο πομπό διαχωρίζει το φέρον κύμα από την ταλάντωση που το διαμόρφωσε και το μετατρέπει σε ρεύμα όμοιας μορφής (φώραση). Το ρεύμα αυτό αφού ενισχυθεί οδηγείται στο μεγάφωνο το οποίο αναπαράγει τον αρχικό ήχο.

Σε κάθε σημείο του χώρου στον οποίο διαδίδεται το ηλεκτρομαγνητικό κύμα, το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλονται με το χρόνο. Αν τοποθετήσουμε έναν ευθύγραμμο αγωγό μέσα σε ένα τέτοιο μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο (με τη διεύθυνσή του παράλληλη στην ένταση του πεδίου), τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του αγωγού εξαναγκάζονται σε ταλάντωση.



Εικόνα 2.9: Ραδιοφωνικός δέκτης

Κάθε στιγμή, στην κεραία του δέκτη φτάνουν πολλά ηλεκτρομαγνητικά κύματα, διαφόρων συχνοτήτων. Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια της κεραίας εξαναγκάζονται σε μια περίπλοκη ταλάντωση. Η κίνηση αυτή του φορτίου στην κεραία προκαλεί, λόγω επαγωγής, εξαναγκασμένη ηλεκτρική ταλάντωση στο κύκλωμα LC. Το πλάτος της ηλεκτρικής ταλάντωσης στο κύκλωμα LC είναι πολύ μικρό, εκτός αν το κύκλωμα συντονιστεί με κάποια από τις συχνότητες με τις οποίες ταλαντώνονται τα ηλεκτρόνια στην κεραία. Ο πυκνωτής C στο κύκλωμα είναι μεταβλητός. Έτσι μπορούμε να συντονίσουμε το δέκτη με ορισμένο ραδιοφωνικό σταθμό, αποκλείοντας όλους τους άλλους. Τότε στα άκρα A και B εμφανίζεται εναλλασσόμενη τάση.



Εικόνα 2.10: (α) Η τάση στα άκρα του πυκνωτή στο κύκλωμα LC, (β) το ρεύμα μετά τη φώραση, (γ) το ρεύμα που διαρρέει τα ακουστικά

Αν τα σημεία A και B συνδεθούν απ' ευθείας με ακουστικά δε θα παραχθεί ήχος γιατί η αδράνεια των ακουστικών δεν επιτρέπει ταλάντωση τόσο μεγάλης συχνότητας. Για να λειτουργήσουν τα ακουστικά πρέπει από το διαμορφωμένο κύμα (α) να απομονώσουμε το κύμα που αντιστοιχεί στο ηχητικό σήμα. Η φώραση επιτυγχάνεται αν μεταξύ του κυκλώματος LC και των ακουστικών παρεμβάλουμε μια ανορθωτική διάταξη πχ δίοδο (Δ). Η δίοδος επιτρέπει να περνάει ρεύμα μόνο κατά τη μία φορά. Έτσι το ρεύμα που οδηγείται στα ακουστικά είναι ημιανορθωμένο (β). Το ημιανορθωμένο αυτό ρεύμα μπορεί να θεωρηθεί ως το αποτέλεσμα της επαλληλίας ενός ρεύματος χαμηλής συχνότητας η πράσινη διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα β) και ενός άλλου υψηλής συχνότητας. Το πηνίο που υπάρχει στα ακουστικά, εξαιτίας του φαινομένου της αυτεπαγωγής, κόβει το ρεύμα υψηλής συχνότητας. Επομένως από τα ακουστικά περνάει μόνο το ρεύμα χαμηλής συχνότητας (γ) που έχει τη μορφή του μικροφωνικού ρεύματος. Το ρεύμα αυτό αναπαράγει στα ακουστικά τον αρχικό ήχο.

Στο δέκτη του παραπάνω σχήματος τα ακουστικά λειτουργούν με την ενέργεια που παρέχει το κύμα που φτάνει στην κεραία. Στην πράξη όμως οι δέκτες χρησιμοποιούν διατάξεις οι οποίες ενισχύουν το σήμα που φτάνει στα μεγάφωνα (Ιωάννου, κα).

2.3 Είδη κυμάτων

Μακρά κύματα: Έχουν μήκος κύματος 1000 m – 2000 m. Τα κύματα αυτά ταξιδεύουν πάνω από το έδαφος και μπορούν να διανύσουν μεγάλες αποστάσεις πάνω στη Γη χωρίς σημαντική εξασθένηση. Απορροφώνται όμως πιο εύκολα από τη θάλασσα και έτσι δεν μπορούν να διανύσουν μεγάλες αποστάσεις πάνω από αυτή.

Μεσαία κύματα: Έχουν μήκος κύματος από 100 m – 1000 m. Παρουσιάζουν μεγαλύτερη απορρόφηση από την επιφάνεια της Γης, αλλά ανακλώνται πάνω στην ιονόσφαιρα και φτάνουν σε μεγάλες αποστάσεις.

Βραχέα κύματα: Χαρακτηρίζονται από μήκη κύματος από 10 m έως 100 m. Διαπερνούν εύκολα τα χαμηλότερα στρώματα της ιονόσφαιρας, αλλά ανακλώνται από τα υψηλότερα, που βρίσκονται σε ύψος πάνω από 180 km. Με διαδοχικές ανακλάσεις μεταξύ ιονόσφαιρας και της επιφάνειας της Γης μπορούν να φτάσουν σε μεγάλες αποστάσεις, να κάνουν ακόμα και το γύρο της Γης χωρίς να εμποδίζονται από την καμπυλότητά της. Πολλοί από τους ραδιοσταθμούς που πιάνουμε στα «βραχέα» εμφανίζουν αστάθεια κατά τη λήψη τους. Αυτό οφείλεται στην αστάθεια που παρουσιάζει η ιονόσφαιρα. Οι διάφορες περιοχές της ιονόσφαιρας μετακινούνται με το χρόνο, αλλάζουν σύσταση, έκταση και μορφή, ανάλογα με τη θέση του Ήλιου, τις εποχές του χρόνου κ.ο.κ.

Περιοχές VHF και UHF: Τα VHF αντιστοιχούν σε μήκη κύματος από 1 m έως 10 (συχνότητες 20 MHz – 300 MHz) και τα UHF από 10 cm – 1 m (συχνότητες από 300 MHz έως 30.000 MHz). Τα κύματα αυτά διαπερνούν την ιονόσφαιρα και απορροφώνται πολύ γρήγορα από το έδαφος. Γι' αυτό στην τηλεόραση όπου χρησιμοποιούνται αυτές οι συχνότητες πρέπει οι κεραίες των σπιτιών μας να έχουν οπτική επαφή με την κεραία του σταθμού εκπομπής ή του αναμεταδότη που συνήθως βρίσκεται σε ένα κοντινό βουνό.

Μικροκύματα: Αντιστοιχούν σε μήκη κύματος από 0,1 mm – 1 cm. Τα μικροκύματα διαπερνούν την ιονόσφαιρα και προσφέρονται για επικοινωνίες μέσω δορυφόρων.

Πιο συγκεκριμένα και ανάλογα με τις χρήσεις τους περιγράφονται στον παρακάτω πίνακα:

Ραδιοφωνία στα μακρά (AM)	540 – 1600 kHz (MF, HF)
Ραδιοφωνία στα βραχέα (FM)	88 – 108 MHz (VHF)
Τηλεόραση	(PAL) VHF1: 50 MHz, VHF2: 100 MHz, UHF: 500 MHz
Συστήματα Κυβελωτής Ψηφιακής Επικοινωνίας	GSM: 900 MHz, 1800 MHz (UHF)
WiFi	2,4 GHz και 5,1 GHz (SHF)

Πίνακας 2.1: Ραδιοκύματα και χρήσεις τους

Τα επόμενα κομμάτια αφορούν τις απώλειες ενέργειας κατά τη διάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η ατμόσφαιρα της Γης δεν είναι ισοτροπικό μέγεθος (όπου δεν θα είχαμε απώλειες ενέργειας ή παρεμβολές), ενώ ο ιονισμός της ατμόσφαιρας και η διαφορετική της πυκνότητα είναι παράγοντες που οδηγούν σε απώλειες ενέργειας. Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τις απώλειες είναι το ύψος, η γεωγραφική θέση, οι καιρικές συνθήκες και η ώρα του εικοσιτετραώρου.

Οι βασικότεροι παράγοντες υποβάθμισης (που θα εξηγηθούν αναλυτικά παρακάτω) είναι οι απώλειες μετάδοσης, η πολύδρομη μετάδοση, οι διαλείψεις, η απορρόφηση στην ιονόσφαιρα, οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και η επίδραση των καιρικών συνθηκών (Ζώνη, κα)

2.4 Εξασθένηση ακτινοβολίας (απώλεια ενέργειας) (Ζώνη, κα, <http://www.cs.uoi.gr>)

Ο νόμος του αντιστρόφου τετραγώνου δείχνει ότι η πυκνότητα ισχύος ελαττώνεται σημαντικά με την αύξηση της απόστασης από την πηγή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Με άλλα λόγια τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα εξασθενούν καθώς απομακρύνονται από την πηγή και η εξασθένηση είναι ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης που διένυσαν. Η εξασθένηση μετριέται σε dB και συμβαίνει να είναι αριθμητικά ίση τόσο με την ένταση του πεδίου όσο και για την πυκνότητα ισχύος.

Στο κενό η έννοια της απορρόφησης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων δεν υφίσταται, μιας και δεν υπάρχει τίποτα που να παρεμποδίζει τη διάδοσή τους. Ωστόσο, τα πράγματα είναι διαφορετικά στην ατμόσφαιρα της Γης. Η ατμόσφαιρα απορροφά μέρος της ενέργειας των ραδιοκυμάτων καθώς και μέρος της ενέργειας των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων απορροφάται από τα άτομα και μόρια της ατμόσφαιρας. Η ανταλλαγή αυτή της ενέργειας έχει ως αποτέλεσμα τα άτομα και τα μόρια της ατμόσφαιρας που απορρόφησαν την ενέργεια να ταλαντώνονται και η ατμόσφαιρα στο σημείο εκείνο να θερμαίνεται.

Στην πραγματικότητα, η απορρόφηση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από την ατμόσφαιρα για συχνότητες κάτω των 10 GHz είναι ασήμαντη: Η απορρόφηση από το οξυγόνο και τους υδρατμούς σε αυτή τη συχνότητα γίνεται σημαντική και αυξάνεται σταδιακά για μεγαλύτερες συχνότητες. Γενικά, οι συχνότητες των 60 και 120 GHz δεν συνιστανται για διάδοση σε μεγάλες αποστάσεις στην ατμόσφαιρα, ενώ το ίδιο ισχύει και για συχνότητες των 23 GHz εκτός από περιόδους που η ατμόσφαιρα είναι ξηρή. Από την άλλη πλευρά, το παράθυρο στο οποίο η εξασθένηση είναι μικρή είναι για συχνότητες όπως τα 33 GHz.

Η απορρόφηση χωρίζεται σε δυο βασικές συνιστώσες με την απορρόφηση εξαιτίας των υδρατμών να λαμβάνεται για μια συγκεκριμένη τιμή της υγρασίας. Αν η υγρασία αυξηθεί ή αν υπάρχει ομίχλη, βροχή ή χιόνι η απορρόφηση αυξάνεται σημαντικά και ταυτόχρονα υπάρχει το ενδεχόμενο της ανάκλασης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος από το νερό της βροχής. Επαναλαμβάνεται ότι η εξασθένηση αυτή είναι ασήμαντη για χαμηλές συχνότητες εκτός αν η απόσταση διάδοσης είναι πολύ μεγάλη.

Η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στην ατμόσφαιρα δεν εξαρτάται λοιπόν μόνο από τα χαρακτηριστικά των κυμάτων, αλλά και από τις ιδιότητες της ατμόσφαιρας. Τα κύματα διαδίδονται σε ευθείες τροχιές εκτός αν η ατμόσφαιρα με τα χαρακτηριστικά της αλλάξουν την πορεία τους. Τα κύματα αυτά ονομάζονται μερικές φορές τροποσφαιρικά κύματα γιατί διαδίδονται στην τροπόσφαιρα, το στρώμα της ατμόσφαιρας πιο κοντά στο έδαφος. Για συχνότητες κάτω από τη ζώνη HF τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται γύρω από τη Γη, ορισμένες φορές κάνοντας πλήρη περιστροφή. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι δημιουργείται ένα είδος κυματοδηγού μεταξύ του χαμηλότερου επιπέδου της ιονόσφαιρας και της επιφάνειας της Γης. Τα κύματα αυτά ονομάζονται κύματα επιφάνειας και χρησιμοποιούνται για διαδόσεις χωρίς οπτική επαφή. Τα επίγεια κύματα κινούνται κατά μήκος της επιφάνειας της Γης και πρέπει να πολωθούν κατακόρυφα προς αποφυγή short

circuiting της ηλεκτρικής συνιστώσας. Κατά τη διάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος κοντά στην επιφάνεια της Γης επάγεται ρεύμα στο έδαφος κι αυτό έχει ως αποτέλεσμα μέρος της ενέργειάς του να απορροφάται από αυτό.

Ηλεκτρομαγνητικά κύματα στις συχνότητες της ζώνης HF ανακλώνται από την ιονόσφαιρα και ονομάζονται ουράνια ή ιονοσφαιρικά κύματα. Τέτοιου είδους κύματα εκπέμπονται προς τον ουρανό και ανακλώνται από την ιονόσφαιρα και επιστρέφουν στο έδαφος πολύ πέρα από τον ορίζοντα. Για να φτάσουν τα κύματα αυτά σε δέκτες που βρίσκονται στο άλλο ημισφαίριο της Γης πρέπει να ανακλαστούν μεταξύ της ιονόσφαιρας αρκετές φορές. Κάτι που πρέπει να τονίσουμε είναι ότι όσο το κύμα μεταδίδεται πάνω από τη Γη αποκτά όλο και μεγαλύτερη κλίση, έτσι ώστε να προκαλείται μεγαλύτερο short circuiting της ηλεκτρικής συνιστώσας. Τελικά και σε απόσταση ορισμένων μηκών κύματος μακριά από την κεραία το κύμα «οριζοντιώνεται και πεθαίνει». Αυτό αποκτά ιδιαίτερη σημασία αφού δείχνει ότι η μέγιστη εμβέλεια ενός τέτοιου πομπού εξαρτάται τόσο από τη συχνότητα όσο και από την ισχύ της μετάδοσης. Έτσι, στην VLF μάλιστα η ανεπαρκής εμβέλεια μετάδοσης μπορεί να αντιμετωπιστεί με αύξηση της ισχύος μετάδοσης. Από την άλλη αυτή η μέθοδος δεν δουλεύει κοντά στην κορυφή της MF κλίμακας, αφού η μετάδοση εξαρτάται άμεσα από την κλίση.

Κατά την εκπομπή ενός κύματος επιφάνειας από μια κεραία εκπομπής αυξάνεται η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε μια απόσταση από την πηγή, η οποία υπολογίζεται με χρήση των εξισώσεων Maxwell. Αν μια κεραία τοποθετηθεί σε κάποιο σημείο, το σήμα που θα λάβει θα

$$\text{είναι ίσο με: } V = \frac{120\pi h_t h_r I}{\lambda d} \text{ όπου}$$

120π: χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση του ελεύθερου χώρου

ht: ενεργό μήκος κεραίας μετάδοσης

hr: ενεργό μήκος κεραίας λήψης

I: ρεύμα που διαρρέει την κεραία εκπομπής

d: απόσταση από την κεραία εκπομπής

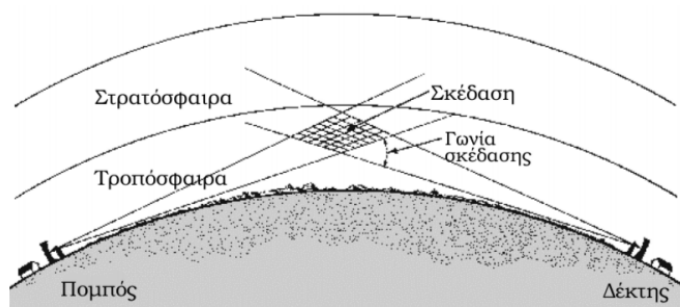
λ: μήκος κύματος

Κατά συνέπεια, θα πρέπει να τοποθετείται στην κατάλληλη θέση ώστε το σήμα να είναι όσο το δυνατόν ισχυρότερο.

2.4.1 Επίδραση της ατμόσφαιρας

Η τροπόσφαιρα είναι το κατώτερο τμήμα της ατμόσφαιρας, στο οποίο η τιμή της θερμοκρασίας μειώνεται με το ύψος. Εκτείνεται από την επιφάνεια του εδάφους έως ένα ορισμένο ύψος (6 km στους πόλους, 18 km στον ισημερινό). Οι μεταβολές του δείκτη διάθλασης, της πίεσης και της υγρασίας καθώς επίσης τα νέφη και οι υδρομετεωρίτες επηρεάζουν σημαντικά τη διάδοση των ραδιοσυχνοτήτων. Οι διάφοροι μηχανισμοί μπορούν να μεταφέρουν ενέργεια αρκετά μακριά από τον κανονικό ορίζοντα.

Η τροποσφαιρική μετάδοση (tropospheric scatter propagation) είναι ουσιαστικά μετάδοση UHF κυμάτων πέρα από τον ορίζοντα και οφείλεται σε ανακλάσεις σε σταγονίδια στην ατμόσφαιρα και σε ατμοσφαιρικά στρώματα μεγέθους συγκρίσιμου με το μήκος κύματος λ. Τα χαρακτηριστικά της είναι η ισχυρή εξασθένηση που εμφανίζουν και για το λόγο αυτό απαιτούνται κεραιές υψηλής κατευθυντικότητας σε μεγάλο ύψος ενώ το φαινόμενο είναι μόνιμο και όχι παροδικό.



Εικόνα 2.11: Διάδοση ραδιοκυμάτων στην ιονόσφαιρα

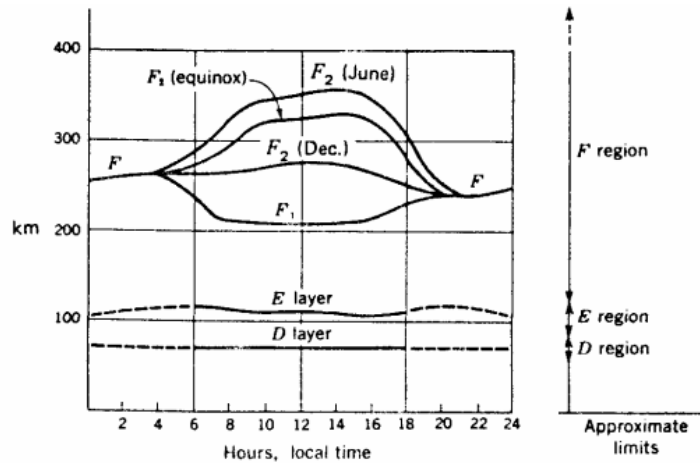
Η ιονόσφαιρα είναι το ανώτερο στρώμα της ατμόσφαιρας. Απορροφά μεγάλες ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας κι έτσι θερμαίνεται και ιοντίζεται. Υπάρχει πληθώρα φυσικών ιδιοτήτων της ιονόσφαιρας όπως θερμοκρασία, πυκνότητα και σύνθεση. Εξαιτίας αυτών αλλά και των διαφορετικών τύπων ακτινοβολίας που απορροφά, η ιονόσφαιρα τείνει να διαστρωματώνεται δημιουργώντας έτσι περιοχές με διαφορετικά επίπεδα ιονισμού. Οι πιο σημαντικοί παράγοντες ιονισμού είναι η υπεριώδης ηλιακή ακτινοβολία α, β και γ, όπως

επίσης η κοσμική ακτινοβολία και οι μετεωρίτες. Όλα αυτά έχουν ως αποτέλεσμα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα στην ιονόσφαιρα σχηματίζονται τέσσερα βασικά επίπεδα D, E, F₁ και F₂ με αύξουσα σειρά. Τα δυο τελευταία συνδυάζονται τη νύχτα για να σχηματίσουν ένα μόνο επίπεδο. Το στρώμα D (το χαμηλότερο) υπάρχει σε ύψος 70 km με μέσο πάχος τα 10 km. Είναι το λιγότερο σημαντικό επίπεδο για την HF διάδοση, καθώς αντανάκλαστις συχνότητες VLF και LF και απορροφά κάποια στις MF και HF συχνότητες.

Το στρώμα E ακολουθεί το D και βρίσκεται στα 100 km περίπου με πάχος 25 km. Όπως και το D εξαφανίζεται τη νύχτα, ενώ τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι η μικρή βοήθεια στην MF (surface wave) διάδοση και η αντανάκλαση των HF κυμάτων κατά τη διάρκεια της ημέρας. Επίσης υπάρχει ένα σποραδικό υπόστρωμα E_s το οποίο εμφανίζεται κάποιες φορές με το E, είναι ιδιαίτερα λεπτό με υψηλό βαθμό ιονισμού, ενώ σε αντίθεση με το E, διατηρείται και τη νύχτα. Το ιδιαίτερο με αυτό το υπόστρωμα είναι ότι δημιουργεί πολύ καλές συνθήκες μετάδοσης.

Το στρώμα F₁ βρίσκεται σε ύψος 180 km την ημέρα, ενώ τη νύχτα ενώνεται με το F₂. Αν και μερικά HF κύματα ανακλώνται σε αυτό, τα περισσότερα το διαπερνούν για να ανακλαστούν στο F₂ στρώμα. Η κύρια ιδιότητά του είναι ότι εξασθενεί σε μεγάλο βαθμό τα HF κύματα μέχρι που χάνονται.

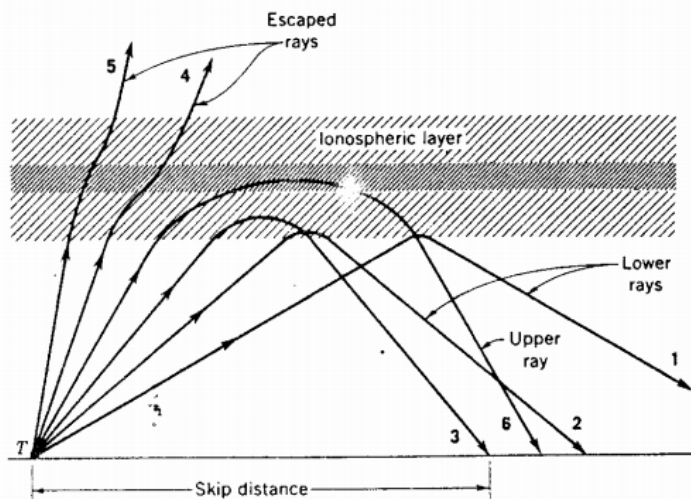
Το στρώμα F₂ είναι το πιο σημαντικό ανακλαστικό μέσο για τα ραδιοκύματα υψηλών συχνοτήτων. Το πάχος του μπορεί να ανέλθει στα 2000 km την ημέρα αλλά πέφτει στα 300 km τη νύχτα. Επίσης, σημαντικά ποικίλει και ο βαθμός ιονισμού του. Ο βαθμός ιονισμού και το πάχος εξαρτώνται από την ώρα της ημέρας, τη μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος και τον ηλιακό κύκλο. Το στρώμα F διατηρείται και τη νύχτα σε αντίθεση με τα άλλα στρώματα της ιονόσφαιρας. Πέρα από τον ιονισμό των μορίων λόγω της ηλιακής δραστηριότητας, η χαμηλή πυκνότητα του αέρα δίνει στα μόρια ένα μεγάλο μέσο ελεύθερο μονοπάτι, κάτι που σημαίνει ότι η χαμηλή συχνότητα των συγκρούσεων των μορίων δεν εξαφανίζει τον ιονισμό των μορίων όταν ο ήλιος ανατέλλει. Τελικά, ο λόγος για την καλύτερη λήψη HF κατά τη διάρκεια της νύχτας είναι ο συνδυασμός των F₁ και F₂ στρωμάτων σε ένα στρώμα F καθώς επίσης και η εικονική εξαφάνιση των άλλων δυο επιπέδων, που προκαλούσε σημαντική απορρόφηση κατά τη διάρκεια της ημέρας.



Εικόνα 2.12: Τα στρώματα της ιονόσφαιρας της Γης

Γενικά οι μεταβολές στην ιονόσφαιρα σχετίζονται με τις ακτινοβολίες που εκπέμπονται από τον Ήλιο, τις αλλαγές στη δραστηριότητά του και τη μετακίνηση της Γης γύρω από αυτόν.

Μπορούμε να διακρίνουμε τις μεταβολές σε κανονικές, οι οποίες είναι περιοδικές και προβλέψιμες (ημερήσιες, λόγω της περιστροφής της Γης γύρω από τον εαυτό της, εποχιακές, ως αποτέλεσμα της περιστροφής της Γης γύρω από τον Ήλιο και ηλιακού κύκλου, οι οποίες σχετίζονται με τον 11ετή ηλιακό κύκλο) αλλά και τυχαίες, οι οποίες είναι απρόβλεπτες, όπως τα τυχαία νεφελώματα (σποραδικό E) ή οι ιονοσφαιρικές θύελλες που σχετίζονται με τις ηλιακές εκρήξεις.



Εικόνα 2.13: Επίδραση της ιονόσφαιρας σε κύματα τα οποία εκπέμπονται με διαφορετικές γωνίες

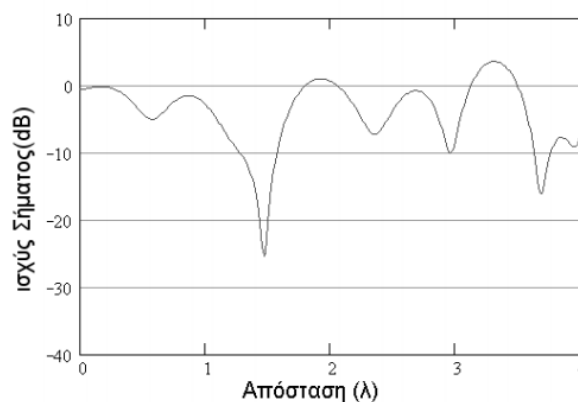
Η ιονόσφαιρα όχι μόνο επιτρέπει μετάδοση HF μακράς απόστασης, αλλά επηρεάζει επίσης και τη μετάδοση κυμάτων μέσα της. Τα κύματα που δεν ανακλώνται από την ιονόσφαιρα

υφίστανται και αυτά κύρτωση από την αυθεντική τους τροχιά. Αυτό υποδηλώνει άμεσα ότι οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται εδώ χρειάζεται να είναι πάνω από την κρίσιμη συχνότητα για ελαχιστοποίηση της διάθλασής τους. Αν αυτό δε συμβεί, σοβαρά σφάλματα εντοπισμού και επικοινωνιακές δυσκολίες θα προκληθούν λόγω της κύρτωσης των ραδιοκυμάτων.

2.4.2 Εξασθένηση

Με τον όρο εξασθένηση (fading) εννοούμε τη διακύμανση στην ισχύ ενός σήματος στο δέκτη. Η εξασθένηση μπορεί να είναι γρήγορη (fast fading) ή αργή (slow fading), γενική ή επιλεκτική συχνοτήτων (frequency selective fading). Σε κάθε περίπτωση οφείλεται στην παρεμβολή μεταξύ δυο κυμάτων που φεύγουν από την ίδια πηγή αλλά φτάνουν στον προορισμό τους από διαφορετικά μονοπάτια. Επειδή το σήμα που λαμβάνεται κάθε χρονική στιγμή είναι το διανυσματικό άθροισμα όλων των κυμάτων (κάθε χρονική στιγμή) των οποίων η διαφορά των διαδρομών από τον πομπό στο δέκτη θα είναι μεγαλύτερη από μισό μήκος κύματος. Αυτό σημαίνει ότι η εξασθένηση είναι πιο πιθανή σε μικρότερα μήκη κύματος, δηλαδή σε υψηλότερες συχνότητες. Γενικά η εξασθένηση μπορεί να οφείλεται στην αλλαγή της πόλωσης του κύματος, στην απορρόφηση ενέργειας από την ιονόσφαιρα, στην εξασθένηση λόγω καιρικών συνθηκών, αλλά και στην πολύδρομη μετάδοση. Λιγότερο σημαντικοί παράγοντες μπορεί να είναι οι ανακλάσεις – διαθλάσεις – περιθλάσεις σε αντικείμενα ή ατμοσφαιρικά στρώματα ή στη μορφολογία του εδάφους.

Όπως παρατηρούμε στο παρακάτω σχήμα η ισχύς της λήψης μπορεί να μεταβάλλεται σημαντικά ακόμα και για μικρές μετατοπίσεις του δέκτη

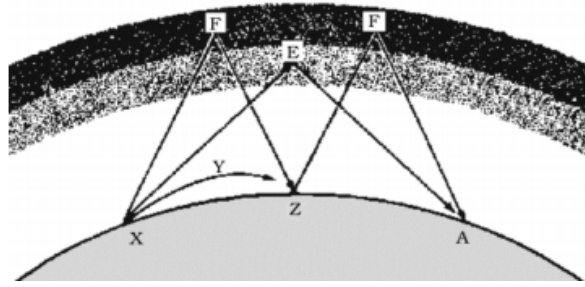


Εικόνα 2.14: Διάγραμμα της ισχύος του σήματος σε συνάρτηση με την απόσταση

Η εξασθένηση μπορεί να παρουσιαστεί λόγω παρεμβολής μεταξύ των χαμηλότερων και υψηλότερων ακτίνων ενός ουράνιου κύματος, μεταξύ κυμάτων που φτάνουν από διαφορετικά μονοπάτια και μετά από διαφορετικό αριθμό αναπηδήσεων ή ακόμα μεταξύ ενός επίγειου και ενός εναέριου κύματος ειδικά στο χαμηλότερο άκρο της HF μπάντας. Μπορεί επίσης να παρουσιαστεί αν ένα απλό εναέριο λαμβάνεται λόγω των διακυμάνσεων του ύψους ή της πυκνότητας του επιπέδου που αντανακλά το κύμα. Ένας από τους πιο πετυχημένους τρόπους αντιμετώπισης της εξασθένησης είναι η τεχνική space ή frequency diversity (2 ή περισσότερες κεραιές λήψεις και 2 πομποί και 2 δέκτες για μετάδοση της πληροφορίας σε 2 διαφορετικές συχνότητες αντίστοιχα).

Επειδή η εξασθένηση είναι συχνοτικά επιλεκτική, διαφορετικά στιγμιότυπα του ίδιου κύματος εξασθενούν με διαφορετικό τρόπο. Αυτό είναι πιο πιθανό να συμβεί στις υψηλότερες συχνότητες. Τα AM κύματα υποφέρουν περισσότερο από το φαινόμενο της συχνοτικά επιλεκτικής εξασθένησης. Αντίθετα, τα SSB σήματα έχουν καλύτερη συμπεριφορά. Σε κάθε περίπτωση το φαινόμενο της συχνοτικά επιλεκτικής εξασθένησης αντιμετωπίζεται με τεχνικές diversity.

Γενικά παρατηρούμε από όσα αναφέραμε ότι κάθε ψηλό και ογκώδες αντικείμενο εμποδίζει τα κύματα που διαδίδονται κοντά στο έδαφος. Προκύπτουν έτσι ζώνες σκίασης και διάθλασης. Για το λόγο αυτό χρειάζονται σε ορισμένες περιοχές ψηλότερες κεραιές από αυτές που η θεωρία υποδεικνύει. Από την άλλη κάποιες περιοχές λαμβάνουν τέτοια σήματα από ανακλάσεις των κυμάτων από ογκώδη εμπόδια. Έτσι, σε περιοχές μπροστά από το εμπόδιο μια μορφή παρεμβολής γνωστή ως “ghosting” μπορεί να παρατηρηθεί πχ στην οθόνη ενός δέκτη τηλεόρασης. Προκαλείται έτσι διαφορά διαδρομών (άρα και στη φάση) μεταξύ του απευθείας και του ανακλώμενου εκ του εμποδίου κύματος. Η κατάσταση γίνεται χειρότερη κοντά σε έναν πομπό παρά σε απόσταση από αυτόν, λόγω του ότι οι ανακλώμενες ακτίνες είναι ισχυρότερες εκεί κοντά. Τελικά ισχυρή παρεμβολή υπάρχει σε μια αρκετά μεγάλη απόσταση από τον πομπό μιας και είναι σχεδόν αδύνατο να ληφθούν από δέκτη ταυτόχρονα τόσο το απευθείας κύμα όσο και το ανακλώμενο. Το φαινόμενο ονομάζεται πολύδρομη μετάδοση.



Εικόνα 2.15: Πολύδρομη μετάδοση

2.4.3 Απώλειες ισχύος (λόγω του είδους των κεραιών)

Πέρα από την ενέργεια που εκπέμπεται από την κεραιά, ένα σημαντικό μέγεθος, ο προσδιορισμός και περιορισμός του οποίου αποτελεί εξέχουσα σημασίας έργο, είναι οι απώλειες ισχύος. Παράγοντες που συμβάλλουν στην απώλεια ισχύος κατά την εκπομπή της κεραιάς είναι μεταξύ των άλλων, η ground resistance, corona effects, imperfect dielectric στον περιβάλλοντα χώρο της κεραιάς, ρεύματα eddy και τέλος σε θερμικές απώλειες κατά μήκος της κεραιάς. Συνδυάζοντας λοιπόν όλα τα παραπάνω, προκύπτει η σχέση:

$$P_{in} = P_d + P_{rad}$$

όπου P_{in} η συνολική ισχύς τροφοδοσίας της κεραιάς

P_d η απολεσθείσα ενέργεια

P_{rad} η συνολικά ακτινοβολούμενη ενέργεια

Οι LF (low frequency) και MF (medium frequency) κεραιές είναι οι λιγότερο αποδοτικές δεδομένων των δυσκολιών που απαντώνται στην επίτευξη του κατάλληλου μήκους τους. Συγκεκριμένα, ο βαθμός απόδοσης των εν λόγω κεραιών δεν ξεπερνά την τιμή 0,95 ενώ είναι δυνατό στη χειρότερη περίπτωση ο βαθμός απόδοσής τους να μην ξεπερνά την τιμή 0,75. Φυσικά, αυξανόμενης της συχνότητας εκπομπής της κεραιάς, αυξάνεται ο βαθμός απόδοσής τους έτσι που σε ορισμένες περιπτώσεις επιτυγχάνεται άριστη απόδοση πλησίον της μέγιστης τιμής 1.

Ένα ακόμα θέμα που πρέπει να λάβουμε υπόψη μας είναι η αύξηση της αντίστασης ακτινοβολίας της κεραιάς. Μια πολύ καλή μέθοδος είναι γνωστή ως μέθοδος top landing. Στην ουσία με την υλοποίηση της εν λόγω διαμόρφωσης επιτυγχάνεται η αύξηση του

ρεύματος στη βάση και κεραίας και επιπρόσθετα η ομοιομορφία της κατανομής του ρεύματος κατά μήκος της διάταξης. Ο σχεδιασμός μιας τέτοιας κεραίας πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως το κόστος κατασκευής.

2.4.4 Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές – Καιρικές Συνθήκες

Οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές είναι είτε ανθρώπινες είτε φυσικές. Οι ανθρώπινες παρεμβολές προκαλούνται από τον άνθρωπο και έχουν διάφορες πηγές, όπως οι πομποί σημάτων παρόμοιας συχνότητας ή οι ηλεκτρικές συσκευές, ενώ μειώνονται αισθητά τη νύχτα λόγω παύσης της μεγάλης ανθρώπινης δραστηριότητας. Οι φυσικές παρεμβολές από την άλλη οφείλονται σε φυσικά φαινόμενα όπως καταιγίδες, χιονοθύελλες, κοσμικές πηγές ή τον Ήλιο. Μεταδίδονται κατά προσέγγιση όπως τα ραδιοκύματα και είναι ακανόνιστες, αλλά γενικά μειώνονται καθώς αυξάνεται η συχνότητα λειτουργίας.

Οι καιρικές συνθήκες από την άλλη διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη διάδοση των ραδιοκυμάτων, ενώ ανάλογα με τις εκάστοτε καιρικές συνθήκες τα ραδιοκύματα μπορεί είτε να διαδοθούν πέρα από την πραγματική τους εμβέλεια, είτε να εξασθενήσουν σημαντικά. Γενικά δεν υπάρχουν αυστηροί κανόνες για την επίδρασή τους, ενώ καθώς το μήκος κύματος γίνεται πιο μικρό οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις επηρεάζουν περισσότερο τα ραδιοκύματα.

2.5 Γενικά συμπεράσματα για τα ραδιοκύματα

Οι ζώνες χαμηλών συχνοτήτων (VLF, ELF) έχουν μήκος κύματος πάνω από 10 km και μεταδίδονται με ιονοσφαιρική μετάδοση (στο υπόστρωμα D) ή με κύματα επιφάνειας και φτάνουν σε όλο τον πλανήτη. Κυρίως βρίσκουν εφαρμογή στην επικοινωνία πλοίων, ενώ τα βασικότερα προβλήματά τους είναι οι καιρικές συνθήκες και ιδιαίτερα οι κεραυνοί ή η παρεμβολή άλλων χρηστών.

Οι ζώνες μεσαίων συχνοτήτων αποτελούνται από τη ζώνη MF, ενώ μεταδίδονται με κύματα επιφάνειας σε περιορισμένη απόσταση ή απορροφώνται από υποστρώματα D και E. Η ιονοσφαιρική μετάδοση γίνεται κυρίως τη νύχτα μέσω ανάκλασης στο F. Βρίσκουν εφαρμογή στη ραδιοφωνία AM και τη ναυτιλία, ενώ ο θόρυβος οφείλεται στον ατμοσφαιρικό θόρυβο, τις ανθρώπινες παρεμβολές και το θερμικό θόρυβο στο δέκτη.

Στη ζώνη υψηλών συχνοτήτων (ζώνη HF) οι υψηλότερες συχνότητες μπορούν να ανακλαστούν στην ιονόσφαιρα (στρώμα F), ενώ γίνεται επίσης πολύδρομη μετάδοση. Εφαρμόζονται στη ραδιοφωνία AM και ο θόρυβος οφείλεται στην ατμόσφαιρα και το θερμικό θόρυβο στο δέκτη.

Οι ζώνες VHF και UHF μεταδίδονται με κύματα χώρου (με υψηλές κεραιές και αυξημένο ηλεκτρικό ορίζοντα), τροποσφαιρική μετάδοση και υπερδιάθλαση με υψηλή εξασθένηση, ενώ διαπερνούν την ατμόσφαιρα. Βρίσκουν εφαρμογή στη ραδιοφωνία FM, την τηλεόραση, την κινητή τηλεφωνία, την αεροναυσιπλοΐα, τα ραντάρ και τους δορυφόρους. Ο θόρυβος οφείλεται σε κοσμικό θόρυβο ή θερμικό θόρυβο στο δέκτη.

Οι υψηλότερες ζώνες (SHF) έχουν συχνότητες πάνω από 10 GHz και μήκος κύματος λίγα mm. Μεταδίδονται με κύματα χώρου με μεγάλη εξασθένηση και βρίσκουν εφαρμογή σε επιστημονικά πειράματα και δορυφόρους. Παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία στα καιρικά φαινόμενα.

2.6 Αποσφαλμάτωση

Η αποσφαλμάτωση (debugging) εμφανίζεται στην επιστήμη υπολογιστών και στην ηλεκτρονική, και είναι η διαδικασία εύρεσης και εξάλειψης ελαττωμάτων ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος ώστε να συμπεριφέρονται όπως σχεδιάστηκαν. Η αποσφαλμάτωση γίνεται συνήθως με τη βοήθεια εξειδικευμένου λογισμικού, των αποσφαλματωτών (debuggers) οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα να εκτελέσουν ένα εξωτερικό πρόγραμμα βήμα προς βήμα, να καταγράψουν σε κάθε στάδιο την κατάστασή του, να διακόπτουν τη ροή εκτέλεσης, κ.λ.π.

Βιβλιογραφία – Αναφορές 2^ο Κεφαλαίου

Γεωργακόπουλος Κ., «Τεχνολογίες Σύγχρονων Ασύρματων Δικτύων Δεδομένων», Διδακτικές σημειώσεις στην Τηλεματική, ΑΤΕΙ Καβάλας, Τμήμα Βιομηχανικής Πληροφορικής, 2007, Καβάλα

Ιωάννου Α., Ντάνος Γ., Πήττας Α., Ράπτης Σ., Φυσική Θετικής και Τεχνολογικής Κατεύθυνσης Γ' Λυκείου, Οργανισμός Εκδόσεων Διδακτικών Βιβλίων, 1999, Αθήνα

Ζώη Δ., Ρουμेलιώτης Γ., Κεκάτος Β., Μπερμπερίδης Κ., Διδακτικές Σημειώσεις στο μάθημα «Συστήματα Μετάδοσης Πληροφορίας», Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής, Πολυτεχνείο Πάτρας, 2008, Πάτρα

Παπαδημητράκη – Χλίγλια Ε., Τσουκαλάς Ι.Α., Ηλεκτρισμός, Εκδόσεις Ζήτη, 1995, Θεσσαλονίκη

Παπαδημητράκη – Χλίγλια Ε., Τσουκαλάς Ι.Α., Ηλεκτρομαγνητισμός, Εκδόσεις Ζήτη, 1994, Θεσσαλονίκη

Serway, Physics for Scientists and Engineers, Τόμος 2, Ηλεκτρομαγνητισμός, μετάφραση Λ.Κ Ρεσβάνη, 1990

<https://www.ceid.upatras.gr/webpages/faculty/alexiou/ahts/notes/kef09.pdf>

<http://www.cs.uoi.gr/~epap/asurmata/downloads/lect3.pdf>

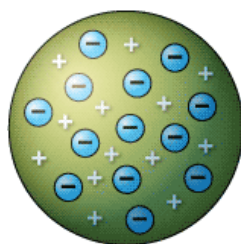
Κεφάλαιο 3 – Εισαγωγή στα στοιχειώδη σωματίδια

3.1 Εισαγωγή: Δομή του ατόμου - Ηλεκτρόνια

Η έννοια του ατόμου πρωτοακούστηκε από το Δημόκριτο τον 5^ο πΧ αιώνα, αρχαίο Έλληνα φιλόσοφο από τη Θράκη που θεώρησε ότι τα άτομα είναι «τα έσχατα μόρια της ύλης που δεν επιδέχονται τομές (άτμητα) ή αυξομειώσεις, είναι αγέννητα, άφθαρτα, αναλλοίωτα και αδιαίρετα, πλήρη και τέλεια συμπαγή, ενιαία και απλά, ενώ είναι αριθμητικά άπειρα, απέραντα, ποικιλόμορφα σε σχήμα και κινούνται αδιάκοπα στο κενό», τα μικρότερα δηλαδή δομικά συστατικά της φύσης, από την οποία αποτελούνται όλα τα σώματα.

Παρόλο που ο Δημόκριτος είχε στο μυαλό του μια πιο φιλοσοφική έννοια του ατόμου και της ύλης γενικότερα, θεωρείται πατέρας της ατομικής θεωρίας και έπρεπε να περάσουν πολλοί αιώνες μέχρι να γίνει κάποια πιο ενδελεχής επιστημονική αναφορά στη δομή του ατόμου και της ύλης γενικότερα. Έτσι, ο J.J. Thomson στα τέλη του 19^{ου} αιώνα ανακάλυψε το ηλεκτρόνιο, για το οποίο του απονεμήθηκε το βραβείο Nobel Φυσικής το 1906 (κατά έναν χιουμοριστικό τρόπο της μοίρας ο γιος του George Paget Thomson ήταν μέλος της ομάδας όπου το 1937 βραβεύτηκε με Nobel φυσικής για την ανακάλυψη της κυματικής φύσης του ηλεκτρονίου).

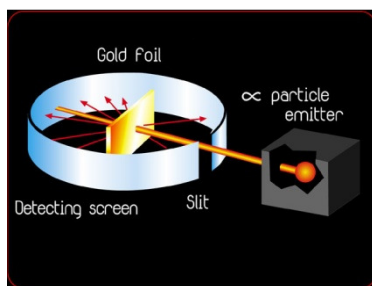
Συνέπεια αυτού, ήταν ότι το άτομο είχε κάποια εσωτερική δομή. Επίσης, ήταν γνωστό ότι το κομμάτι του ατόμου που περιείχε το θετικό φορτίο ήταν μεγαλύτερο από το κομμάτι που περιείχε το αρνητικό. Ο ίδιος ο sir Thomson πρότεινε ένα μοντέλο στο οποίο το άτομο ήταν ένας θετικά φορτισμένος όγκος μέσα στον οποίο ήταν διασπαρμένα τα αρνητικά ηλεκτρόνια, όπως οι σταφίδες μέσα στο σταφιδόψωμο. Για το λόγο αυτό, επικράτησε στην ιστορία της επιστήμης αυτή η πρώτη προσπάθεια απεικόνισης του ατόμου να ονομάζεται ως «μοντέλο του σταφιδόψωμου».



Εικόνα 3.1: Ατομικό μοντέλο του Thomson (μοντέλο του σταφιδόψωμου)

Το 1911, όμως, ο Ernest Rutherford απέδειξε ότι το μοντέλο του Thomson ήταν λανθασμένο. Στο πείραμα που σχεδίασε σωμάτια α (πυρήνες ηλίου) συγκρούονται σε φύλλο χρυσού. Σύμφωνα με το πρότυπο του Τόμσον θα πρέπει να μην αποκλίνει σημαντικά η δέσμη γιατί:

- Το ηλεκτρικό φορτίο του ατόμου είναι μηδέν, άρα στα σωμάτια α δεν ασκούνται ηλεκτρικές δυνάμεις.
- Το θετικό φορτίο είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο, οπότε δεν θα ασκεί ισχυρή απωστική δύναμη στα σωμάτια α .
- Η σύγκρουση των σωματίων α με τα ηλεκτρόνια δεν θα επηρεάσει σημαντικά την κίνηση των α , γιατί τα ηλεκτρόνια έχουν μικρή μάζα.



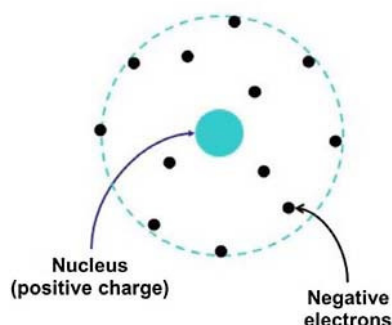
Εικόνα 3.2: Πείραμα του Rutherford

Όμως, ο Rutherford παρατήρησε ότι :

- Τα περισσότερα σωμάτια α διέρχονται μέσα από το στόχο σαν να κινούνται μέσα σε κενό χώρο.
- Λίγα σκεδάζονται κατά 180° (αυτό μπορεί να συμβεί αν το θετικό φορτίο είναι συγκεντρωμένο σε μικρό χώρο και ασκεί μεγάλες απωστικές δυνάμεις) και κατά άλλες τυχαίες γωνίες.

Αυτό είχε ως συνέπεια ο Rutherford να αναγκαστεί να προτείνει ένα νέο μοντέλο για το άτομο, γνωστό και ως πλανητικό μοντέλο. Το άτομο αποτελείται από μια πολύ μικρή περιοχή στην οποία είναι συγκεντρωμένο όλο το θετικό φορτίο και σχεδόν όλη η μάζα του ατόμου. Η περιοχή αυτή ονομάζεται πυρήνας. Ο πυρήνας περιβάλλεται από ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια κινούνται γύρω από τον πυρήνα σε κυκλικές τροχιές, όπως οι πλανήτες γύρω από τον Ήλιο, γιατί αν παρέμεναν ακίνητα θα έπεφταν πάνω στον πυρήνα, εξαιτίας της έλξης που δέχονται από αυτόν.

RUTHERFORD'S ATOMIC MODEL



Εικόνα 3.3: Ατομικό μοντέλο του Rutherford, πλανητικό μοντέλο

Υπήρχαν όμως δυο βασικές δυσκολίες στο μοντέλο του Rutherford: Κάθε ηλεκτρόνιο εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με ορισμένες μόνο συχνότητες και ποτέ άλλες. Αυτό το γεγονός δεν μπορεί να ερμηνευτεί με το μοντέλο του Rutherford, σύμφωνα με το οποίο τα ηλεκτρόνια θα έπρεπε να εκπέμπουν διαρκώς ακτινοβολία. Η δεύτερη δυσκολία είναι ότι από τον κλασικό ηλεκτρομαγνητισμό γνωρίζουμε ότι τα επιταχυνόμενα ηλεκτρικά φορτία εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, δηλαδή χάνουν ενέργεια. Στο μοντέλο του Rutherford κινούνται σε κυκλικές τροχιές, άρα έχουν κεντρομόλο επιτάχυνση, το οποίο σημαίνει ότι θα εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία f , κάτι που αποδεικνύεται και από τη θεωρία του Hertz. Άρα, τα ηλεκτρόνια θα έπρεπε να έχαναν ενέργεια, άρα η ακτίνα τους ολοένα να μειωνόταν ώσπου να έπεφταν στον πυρήνα, κάτι που φυσικά δεν είχε παρατηρηθεί πειραματικά.

Έτσι λοιπόν, ο Bohr πρότεινε το ατομικό μοντέλο που κυριαρχεί μέχρι σήμερα, ότι δηλαδή τα ηλεκτρόνια κινούνται σε επιτρεπόμενες ενεργειακές στάθμες (στάσιμες καταστάσεις) χωρίς να εκπέμπουν ακτινοβολία (δέσμια ηλεκτρόνια), παρά μόνο κατά τη μετάβαση από τη μία ενεργειακή στάθμη σε άλλη. Η σχέση στην οποία κατέληξε για τη συχνότητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται όταν ένα ηλεκτρόνιο μεταπηδά από τη μια στάσιμη κατάσταση σε άλλη είναι η εξής: $E_{αρχ} - E_{τελ} = h f$ όπου E_a και $E_{τελ}$ η αρχική και η τελική ενέργεια της στάθμης στην οποία βρισκόταν και αυτής που κατέληξε αντίστοιχα το ηλεκτρόνιο. Η ενέργεια κάθε στάθμης δίνεται από τη σχέση: $E_n = \frac{E_1}{n^2}$ όπου n ο κύριος κβαντικός αριθμός και E_1 η ενέργεια της πρώτης στάθμης: $E_1 = - 13,6 \text{ eV}$

Οι προσπάθειες ερμηνείας των περιγραφέντων πειραματικών αποτελεσμάτων οδήγησαν σε σημαντικές βελτιώσεις της θεωρίας του Bohr. Μια από αυτές ήταν η παραδοχή ότι τα ηλεκτρόνια έχουν εσωτερική στροφορμή, το λεγόμενο σπιν που δίνεται από τη σχέση $mvr =$

nħ. Ο Sommerfield επέκτεινε τη θεωρία του Bohr λαμβάνοντας υπόψη την ειδική θεωρία της σχετικότητας και εισήγαγε την ιδέα ότι οι τροχιές των ηλεκτρονίων δεν είναι κυκλικές, αλλά ελλειπτικές. Αυτό συνεπάγεται ότι η ταχύτητα των ηλεκτρονίων μεταβάλλεται συνεχώς, πράγμα που επιφέρει μεταβολές της ενέργειάς τους. (<http://www.metal.ntua.gr>, Γεωργακάκος κα)

3.2 Δομή του πυρήνα – Πρωτόνια – Νετρόνια

Όλοι οι πυρήνες αποτελούνται από πρωτόνια και νετρόνια, τα οποία γενικά με μια λέξη ονομάζονται νουκλεόνια (με εξαίρεση τον πυρήνα του υδρογόνου που περιέχει μόνο ένα πρωτόνιο) και συγκρατούνται στερεωμένα με τη βοήθεια της ισχυρής πυρηνικής δύναμης. Κάθε πυρήνας έχει τον ατομικό του αριθμό Z , ο οποίος ισούται με το άθροισμα όλων των πρωτονίων του πυρήνα, τον αριθμό των νετρονίων N , ο οποίος ισούται με το άθροισμα όλων των νετρονίων του πυρήνα και το μαζικό αριθμό A ο οποίος ισούται με το άθροισμα όλων των νουκλεονίων του πυρήνα.

Τα πειράματα του Rutherford δεν οδηγούν μόνο στη δημιουργία ενός μοντέλου για τη δομή του ατόμου, αλλά οδήγησαν και προς την ανακάλυψη του πρωτονίου μέσω της μελέτης του ατόμου του υδρογόνου.

Η ανακάλυψη του νετρονίου από την άλλη δεν ήταν ιδιαίτερα εύκολη, καθώς η έλλειψη φορτίου δεν το καθιστούσε εύκολα ανιχνεύσιμο. Η παρατήρηση βομβαρδισμού βηρυλλίου με ακτινοβολία α είχε ξεκινήσει από διάφορους ερευνητές και μια διεισδυτική ακτινοβολία παρατηρούνταν, η οποία αρχικά θεωρούνταν ως ακτινοβολία γ , αλλά ο Chadwick διαφώνησε. Τότε, επειδή οι τυπικές ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι ανίχνευσης ήταν άχρηστες, σκέφτηκε να βομβαρδίσει με αυτή την ακτινοβολία πυρήνες με γνωστή μάζα. Χρησιμοποιώντας τις αρχές διατήρησης της ορμής και της ενέργειας και μετρώντας ύστερα από τη σύγκρουση τις ταχύτητες της γνωστής μάζας πυρήνων, έφτασε τελικά στο συμπέρασμα ότι η ακτινοβολία αυτή αποτελείται από σωματίδια ίδιας μάζας με το πρωτόνιο, αλλά χωρίς ηλεκτρικό φορτίο. Με την ανακάλυψη του νετρονίου ως θεμελιώδους σωματιδίου εξηγήθηκαν πολλά από τα ως τότε παράδοξα στη Φυσική και τη Χημεία, ενώ άνοιξαν νέοι δρόμοι έρευνας. Πριν την ανακάλυψή του γενικά είχε την αντίληψη ότι ο πυρήνας αποτελείται από πρωτόνια και «πυρηνικά ηλεκτρόνια». Αυτή η αντίληψη όμως δεν εξηγούσε τη στροφορμή του πυρήνα. Με τη νέα αντίληψη, οι ιδιότητες του πυρήνα ήταν πολύ πιο εύκολα εξηγήσιμες.

Οι βασικότερες ιδιότητες των πυρήνων είναι οι εξής:

- Οι πυρήνες των ατόμων του ίδιου στοιχείου αποτελούνται από τον ίδιο αριθμό πρωτονίων (το Z είναι το «αποτύπωμα» του στοιχείου), αλλά μπορεί να έχουν διαφορετικό αριθμό νετρονίων. Τα στοιχεία αυτά ονομάζονται ισότοπα. Όλα τα ισότοπα δηλαδή έχουν την ίδια τιμή του Z , αλλά διαφορετικές τιμές για το N και το A . Για παράδειγμα τα ισότοπα του άνθρακα ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{13}_6\text{C}$, ${}^{14}_6\text{C}$ με το πρώτο να απαντά περίπου στο 98,9% στη φύση, ενώ ακόμα και για το υδρογόνο υπάρχει πέρα από το υδρογόνο, το δευτέριο και το τρίτιο αντίστοιχα: ${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$, ${}^3_1\text{H}$
- Όσον αφορά στη μάζα, τα πρωτόνια και τα νετρόνια έχουν περίπου την ίδια μάζα (ίδια τάξη μεγέθους), με $m_p = 9 \times 10^{-27}$ και $m_n = 1,6 \times 10^{-27}$ kg, ενώ η μάζα του ηλεκτρονίου ($m_e = 1,6 \times 10^{-31}$ kg) είναι 1831 φορές μικρότερη της μάζας του πρωτονίου.
- Τα πειράματα του Rutherford απέδειξαν ότι ο πυρήνας καταλαμβάνει μόνο μια μικρή περιοχή του ατόμου (δηλαδή ο μεγαλύτερος όγκος του ατόμου είναι «κούφιος»), ενώ οι περισσότεροι πυρήνες έχουν κατά προσέγγιση ακτίνα ίση με $r = r_0 A^{1/3}$ όπου r_0 μια σταθερά ίση με $1,2 \times 10^{-15}$ m και A ο μαζικός αριθμός. Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι ο όγκος του πυρήνα είναι ανάλογος του αριθμού των νουκλεονίων, κάτι που σημαίνει ότι όλοι οι πυρήνες έχουν την ίδια σχεδόν πυκνότητα. Η τάξη μεγέθους για το εσωτερικό του πυρήνα είναι το $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$
- Η σταθερότητα των πυρήνων οφείλεται στην ισχυρή πυρηνική δύναμη, η οποία έχει εμβέλεια ή ακτίνα δράσης περίπου 2 fm ($2 \times 10^{-15} \text{ m}$), είναι ελκτική και δρα ανάμεσα στα πρωτόνια και τα νετρόνια (γενικά όπως θα δούμε παρακάτω δρα ανάμεσα σε αδρόνια). Προφανώς η ισχυρή πυρηνική δύναμη οφείλει να είναι πιο ισχυρή από την ηλεκτρομαγνητική, καθώς τα θετικά φορτισμένα πρωτόνια απωθούνται μεταξύ τους.
- Όλοι οι πυρήνες δεν παρουσιάζουν την ίδια σταθερότητα. Για παράδειγμα, οι ελαφροί πυρήνες είναι πιο σταθεροί όταν περιέχουν τον ίδιο αριθμό πρωτονίων και νετρονίων. Στους πιο βαρείς πυρήνες, χρειάζεται μεγαλύτερος αριθμός νετρονίων από τον αριθμό των πρωτονίων για μεγαλύτερη σταθερότητα (γιατί όταν αυξάνεται ο αριθμός των πρωτονίων αυξάνεται η απωστική δύναμη Coulomb, ενώ όταν αυξάνεται ο αριθμός των νετρονίων αυξάνεται η ισχυρή πυρηνική δύναμη που είναι ελκτική).
- Οι πιο σταθεροί πυρήνες είναι οι λεγόμενοι μαγικοί πυρήνες, οι οποίοι έχουν τον ίδιο αριθμό πρωτονίων και νετρονίων ($Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$)

- Κατά την πυρηνική σχάση (ο πυρήνας σπάει σε μικρότερους) ή την πυρηνική σύντηξη (δύο μικρότεροι πυρήνες ενώνονται και σχηματίζουν έναν βαρύτερο), η ολική μάζα ηρεμίας των προϊόντων της αντίδρασης είναι μικρότερη από την ολική μάζα ηρεμίας των αρχικών πυρήνων. Η διαφορά αυτή ονομάζεται έλλειμμα μάζας. Αυτή η μείωση της μάζας ηρεμίας συνοδεύεται με τέτοια έκλυση ενέργειας από το σύστημα ώστε να ικανοποιείται ο νόμος διατήρησης της ολικής σχετικιστικής ενέργειας (μην ξεχνάμε τον τύπο $E = m c^2$ όπου μας δείχνει πώς η ενέργεια μετατρέπεται σε μάζα και το αντίστροφο). Η τελική ενέργεια του πυρήνα μας είναι η ενέργεια σύνδεσης των νουκλεονίων του πυρήνα.
- Τα κυριότερα μοντέλα του πυρήνα είναι τα εξής:
 - Μοντέλο του πυρήνα σταγόνας νερού (Bohr): Τα νουκλεόνια αλληλεπιδρούν ισχυρά το ένα με το άλλο και αλληλοσυγκρατούνται καθώς πηγαινοέρχονται μέσα στον πυρήνα κατά τρόπο ανάλογο με την κίνηση των θερμικά διεγερμένων μορίων των υγρών.
 - Μοντέλο των ανεξάρτητων φλοιών ή μοντέλο του πυρήνα κατά φλοιούς: Βασίζεται στην υπόθεση ότι κάθε νουκλεόνιο κινείται πάνω σε μια καλά ορισμένη τροχιά μέσα στον πυρήνα, υπό την επίδραση του πεδίου που δημιουργούν τα υπόλοιπα νουκλεόνια. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, τα νουκλεόνια βρίσκονται σε κβαντισμένες καταστάσεις και οι συγκρούσεις ανάμεσά τους είναι λίγες. (Οι υποθέσεις αυτού του μοντέλου διαφέρουν πολύ από τις ανάλογες υποθέσεις του μοντέλου της σταγόνας).
 - Μοντέλο των συλλογικών κινήσεων: Το μοντέλο αυτό συνδυάζει μέρος του μοντέλου της σταγόνας υγρού με ένα μέρος του μοντέλου των ανεξάρτητων σωματιδίων. Σύμφωνα με αυτό, ο πυρήνας αποτελείται από ένα συμπληρωμένο «κουκούτσι» το οποίο, με τη σειρά του, αποτελείται από τους συμπληρωμένους φλοιούς. Γύρω από το κουκούτσι κινούνται, σε κβαντισμένες τροχιές, τα υπόλοιπα νουκλεόνια (αυτά δηλαδή που δεν ανήκουν σε συμπληρωμένους φλοιούς). Αυτά τα υπόλοιπα νουκλεόνια κινούνται υπό την επίδραση του πεδίου των νουκλεονίων του κουκουτσιού, με τρόπο αντίστοιχο με εκείνον που περιγράφει τον μοντέλο των ανεξάρτητων σωματιδίων. Η ισχυρή πυρηνική δύναμη ανάμεσα στο κουκούτσι και στα υπόλοιπα νουκλεόνια παραμορφώνει τον πυρήνα (από το σφαιρικό του σχήμα)

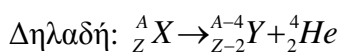
και έτσι ο πυρήνας αρχίζει να ταλαντώνεται και να περιστρέφεται. Το μοντέλο αυτό έχει μεγάλη επιτυχία στην ερμηνεία πολλών πυρηνικών φαινομένων.

- Η τυχαία εκπομπή ακτινοβολίας από κάποιους πυρήνες ονομάζεται ραδιενέργεια. Υπάρχουν τρία είδη ραδιενέργειας: οι ακτίνες α, η οποία αποτελείται από πυρήνες He (σωμάτια α), η ακτινοβολία β (η οποία αποτελείται από ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια) και η ακτινοβολία γ, η οποία αποτελείται από φωτόνια μεγάλης ενέργειας. Τα τρία αυτά είδη ραδιενέργειας έχουν εντελώς διαφορετικές διεισδυτικές ικανότητες, με τα σωμάτια α να περιορίζονται από ένα φύλλο χαρτί και τις ακτίνες γ να διαπερνούν αρκετά εκατοστά μολύβδου. Ο νόμος της διάσπασης για έναν πυρήνα είναι της μορφής $N = N_0 e^{-\Lambda t}$, όπου N_0 ο αριθμός των πυρήνων τη στιγμή $t = 0$ και N ο αριθμός των πυρήνων μετά από χρόνο t . Η σταθερά Λ ονομάζεται σταθερά διάσπασης.
- Άλλο σημαντικό μέγεθος είναι ο χρόνος ημίσειας ζωής, δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται ώστε να διασπαστούν οι μισοί αρχικοί πυρήνες: $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\Lambda}$ (Serway, Τόμος IV)

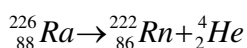
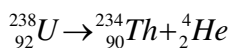
3.3 Πυρηνικές διασπάσεις (Serway, Χαραλάμπους)

3.3.1 Διάσπαση α

Όταν ένας πυρήνας εκπέμπει ένα σωμάτιο α χάνει δυο πρωτόνια και δυο νετρόνια, επομένως ο ατομικός του αριθμός Z μειώνεται κατά 2 μονάδες και ο μαζικός του αριθμός A μειώνεται κατά 4 μονάδες:



Ο πυρήνας X ονομάζεται μητρικός πυρήνας και ο πυρήνας Y ονομάζεται θυγατρικός πυρήνας. Για παράδειγμα:



Όταν ένα στοιχείο μετατρέπεται σε άλλο, το φαινόμενο ονομάζεται μεταστοιχείωση. Η διάσπαση α είναι αυθόρμητη διάσπαση, δηλαδή συντελείται εντελώς τυχαία, χωρίς να

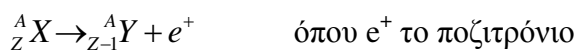
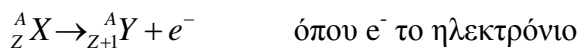
υπάρξει αίτιο που να την προκαλεί. Το άθροισμα των μαζικών και των ατομικών αριθμών στα δυο μέλη πρέπει να είναι ίσο (αρχή διατήρησης των νουκλεονίων), ενώ πρέπει να ισχύουν οι νόμοι της διατήρησης της ενέργειας, της ορμής, της στροφορμής και του ηλεκτρικού φορτίου. Για την ενέργεια διάσπασης θα ισχύει:

$$Q = (M_x - M_y - M_a)c^2$$

Τέλος, να σημειώσουμε ότι με βάση την κλασική φυσική δεν είναι δυνατή η διάσπαση α , δηλαδή το σωματίο α δεν μπορεί να εξέλθει από τον πυρήνα. Σύμφωνα όμως με την κβαντική φυσική και το φαινόμενο της σήραγγας, το σωματίο α μπορεί να διαπεράσει το φράγμα δυναμικού και να βρεθεί έξω από τον πυρήνα, δηλαδή, όσο αυξάνεται η ολική ενέργεια του σωματίου α , τόσο αυξάνεται και η πιθανότητα να δραπετεύσει το σωματίο α από τον πυρήνα. Τέλος, όσο μεγαλύτερο πλάτος έχει το φράγμα τόσο μικρότερη είναι και η πιθανότητα να το διαπεράσει.

3.3.2 Διάσπαση β

Όταν ένας ραδιενεργός πυρήνας υπόκειται σε διάσπαση β , ο θυγατρικός πυρήνας έχει τον ίδιο μαζικό αριθμό με το μητρικό, αλλά ο ατομικός αριθμός του μητρικού αλλάζει κατά μία μονάδα. Η διάσπαση β περιγράφεται συμβολικά ως:

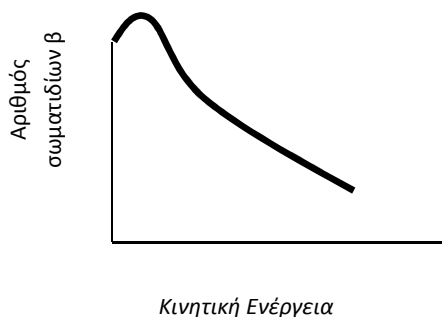


Να σημειωθεί ότι ο μαζικός και ο ατομικός αριθμός διατηρούνται. Όμως, στην πραγματικότητα οι δυο παραπάνω εξισώσεις είναι εσφαλμένες και πρέπει να συμπληρωθούν.

Πρέπει να τονιστεί ότι το πρώτο βήμα για τη διάσπαση β είναι η δημιουργία ενός ηλεκτρονίου (ή ποζιτρονίου) μέσα στον πυρήνα ή, ισοδύναμα, η μετατροπή ενός νετρονίου του πυρήνα σε πρωτόνιο.

Αν μελετήσουμε ενεργειακά τη β διάσπαση, θεωρώντας ότι ο διασπώμενος πυρήνας αποτελεί απομονωμένο σύστημα, θα πρέπει να διατηρείται η ολική ενέργεια του συστήματος. Έχει μετρηθεί όμως ότι η ενέργεια του εκπεμπόμενου σωματιδίου β (ηλεκτρόνιο ή ποζιτρόνιο)

παίρνει διαφορετική τιμή σε κάθε διάσπαση του ίδιου πυρήνα, έτσι ώστε να σχηματίζεται ένα συνεχές φάσμα. Με άλλα λόγια, κάθε φορά που διασπώνται πυρήνες του ίδιου στοιχείου, η ενέργεια των σωματιδίων β έχει διαφορετική τιμή, όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Εικόνα 3.4: Καμπύλη κινητικής ενέργειας διάσπασης β . Η μέγιστη κινητική ενέργεια που μπορεί να έχει το σωματίδιο β αντιστοιχεί στην τιμή Q της διάσπασης

Η κινητική ενέργεια όμως των σωματιδίων β πρέπει να εξισορροπείται κάθε φορά με αντίστοιχη μείωση της τιμής της ενέργειας. Όμως, αφού όλοι οι διασπώμενοι πυρήνες έχουν την ίδια μάζα, τότε η τιμή Q θα πρέπει να είναι η ίδια για κάθε διάσπαση του ίδιου πυρήνα. Αφού οι νόμοι της φυσικής ορίζουν τα παραπάνω, πώς είναι δυνατόν κάθε φορά το ηλεκτρόνιο ή το ποζιτρόνιο να έχει διαφορετική κινητική ενέργεια; Μήπως δεν ισχύει στη διάσπαση β ο νόμος διατήρησης της ενέργειας; Πληρέστερη μελέτη δείχνει ότι τότε δεν θα ισχύει ούτε ο νόμος διατήρησης της γραμμικής ορμής, ούτε της στροφορμής. Προφανώς από τα παραπάνω φαίνεται ότι υπάρχει κάποιο κενό.

3.3.2β Ανακάλυψη των νετρίνων και βασικές ιδιότητες

Μετά από έντονη πειραματική και θεωρητική έρευνα, ο Pauli (1930) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι στη διάσπαση β πρέπει να υπάρχει και ένα τρίτο σωματίδιο το οποίο μοιράζεται με τα άλλα δύο την ενέργεια, την ορμή και τη στροφορμή, έτσι ώστε να ισχύουν οι γνωστοί νόμοι διατήρησης. Αργότερα ο Fermi ονόμασε το σωματίδιο αυτό νετρίνο (neutrino, δηλαδή μικρό ουδέτερο σωματίδιο) επειδή το σωματίδιο αυτό έπρεπε να μην έχει ηλεκτρικό φορτίο (διαφορετικά δε θα ίσχυε ο νόμος διατήρησης του φορτίου στη διάσπαση) και έπρεπε να έχει μηδενική ή σχεδόν μηδενική μάζα ηρεμίας.

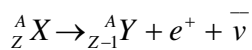
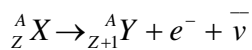
Υπάρχουν τρία είδη νετρίνων, το νετρίνο του ηλεκτρονίου (ανακαλύφθηκε το 1956 σε ένα πείραμα που έκαναν οι Cowan και Reines), το νετρίνο του μιονίου (ανακαλύφθηκε το 1962

στον επιταχυντή AGS του εργαστηρίου Brookhaven των ΗΠΑ από τους L. Lederman, M. Schwartz, J. Steinberg, K. Γουλανό κα), ενώ τα πειράματα του M. Perl κα με τον επιταχυντή SPEAR στο εργαστήριο SLAC του πανεπιστημίου Stanford των ΗΠΑ, το 1975 έδειξαν ότι πρέπει να υπάρχει και τρίτο είδος νετρίνο, το ταυ νετρίνο, το οποίο τελικά ανακαλύφθηκε το 2000. Πειράματα το 1991 στο CERN (με ελληνική συμμετοχή από το Δημόκριτο) απέδειξαν ότι δεν μπορεί να υπάρχει άλλη κατηγορία νετρίνων πέρα από αυτές τις τρεις.

Γενικά το νετρίνο έχει τις ακόλουθες ιδιότητες:

- 1) Είναι ηλεκτρικά ουδέτερο.
- 2) Η μάζα ηρεμίας του είναι μικρότερη από τη μάζα του ηλεκτρονίου, ίσως μάλιστα να είναι και μηδενική.
- 3) Έχει σπιν $\frac{1}{2}$, πράγμα που είναι απαραίτητο για να ισχύει ο νόμος διατήρησης της στροφορμής.
- 4) Συμμετέχει μόνο στις ασθενείς αλληλεπιδράσεις και επομένως είναι πολύ δύσκολο να ανιχνευθεί.

Επομένως, οι εξισώσεις της διάσπασης β ορθά θα γράφονται ως εξής:



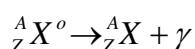
Δηλαδή γενικά μέσα στον πυρήνα το νετρόνιο μετασχηματίζεται σε πρωτόνιο, ηλεκτρόνιο και νετρίνο: $n \rightarrow p + \beta^- + \bar{\nu}$

Τέλος, να αναφέρουμε ότι όταν στην τελική κατάσταση της διάσπασης β υπάρχει ηλεκτρόνιο, τότε υπάρχει ένα αντινετρίνο, όταν όμως υπάρχει ποζιτρόνιο τότε υπάρχει νετρίνο.

3.3.3. Διάσπαση γ

Πολύ συχνά ένας ραδιενεργός πυρήνας που έχει διασπαστεί παραμένει σε διεγερμένη κατάσταση. Συνήθως τότε ο πυρήνας αποδιεγείρεται και με μια νέα διάσπαση, εκπέμποντας ένα φωτόνιο, μεταβαίνει στη θεμελιώδη κατάσταση. Τα φωτόνια τα οποία εκπέμπονται κατά

τη διεργασία αυτή της αποδιέγερσης του πυρήνα ονομάζονται ακτίνες γ . Γενικά η ακτινοβολία γ αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια μεγαλύτερη του 1 MeV.



3.4 Θεμελιώδεις Δυνάμεις

Στη φύση υπάρχουν τέσσερις δυνάμεις: η βαρυτική, η ηλεκτρομαγνητική, η ασθενής πυρηνική και η ισχυρή πυρηνική.

Η βαρυτική αλληλεπίδραση έχει μεγάλη εμβέλεια και ελαττώνεται αντιστρόφως ανάλογα προς το τετράγωνο της απόστασης που χωρίζει τα αλληλεπιδρώντα σώματα. Η δύναμη της βαρύτητας είναι 10^{-38} φορές πιο αδύναμη από την πυρηνική. Είναι δηλαδή η πιο αδύναμη από την πυρηνική. Είναι δηλαδή η πιο αδύναμη από τις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις. Είναι η δύναμη που κρατά συνδεδεμένους τους πλανήτες, τους γαλαξίες και τους αστέρες μεταξύ τους, είναι δηλαδή η δύναμη που κυριαρχεί στο μικρόκοσμο. Επειδή είναι τόσο αδύναμη (σε σύγκριση με τις άλλες), μπορούμε συνήθως με πολύ καλή προσέγγιση να αγνοήσουμε τη βαρυτική δύναμη ανάμεσα στα στοιχειώδη σωματίδια.

Η ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση είναι περίπου 10^{-2} φορές πιο αδύναμη από την ισχυρή αλληλεπίδραση και είναι η δύναμη που προσδένει τα ηλεκτρόνια γύρω από τους πυρήνες για να σχηματίσουν τα άτομα, καθώς και τα άτομα μεταξύ τους για να σχηματίσουν τα μόρια ή τα στερεά. Στη δύναμη αυτή οφείλονται όλα σχεδόν τα φαινόμενα που παρατηρούμε στην καθημερινή μας ζωή. Η δύναμη αυτή έχει μεγάλη εμβέλεια. Όπως γνωρίζουμε από το νόμο του Coulomb, η δύναμη της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης ελαττώνεται αντιστρόφως ανάλογα προς το τετράγωνο της απόστασης που χωρίζει τα αλληλεπιδρώντα σώματα.

Η ασθενής πυρηνική αλληλεπίδραση έχει μικρότερη εμβέλεια από την ισχυρή δύναμη και είναι υπεύθυνη για τη διάσπαση πολλών πυρήνων. Σε αυτήν οφείλεται η διάσπαση β που αναφέραμε παραπάνω. Είναι 10^{-9} φορές πιο αδύναμη από την ισχυρή πυρηνική δύναμη. Από τα μέσα της δεκαετίας του 1970 αποδείχθηκε ότι η ηλεκτρομαγνητική και η ασθενής αλληλεπίδραση είναι εκφάνσεις της ίδιας αλληλεπίδρασης, της ηλεκτρασθενούς. Όνειρο των φυσικών είναι να βρεθεί η απόδειξη ότι και οι τέσσερις δυνάμεις μπορούν να συγκροτηθούν σε μια εξίσωση και αποτελούν εκφάνσεις μιας ενιαίας δύναμης που διέπει τη φύση (Θεωρία

των Πάντων, στην κατεύθυνση της οποίας κινείται το πείραμα με τον επιταχυντή LHC του CERN).

Τέλος, η ισχυρή πυρηνική αλληλεπίδραση έχει πολύ μικρή εμβέλεια και σε αυτήν οφείλεται η σύνδεση των πρωτονίων και των νετρονίων για τη συγκρότηση των πυρήνων. Η δύναμη αυτή αποτελεί την «κόλλα» που κρατάει κολλημένα μεταξύ τους τα νουκλεόνια. Η εμβέλεια, δηλαδή η ακτίνα δράσης της ισχυρής αλληλεπίδρασης, είναι πάρα πολύ μικρή και εντελώς αμελητέα σε αποστάσεις μεγαλύτερες από τη διάμετρο των πυρήνων, δηλαδή 10^{-14} m περίπου. Η ισχυρή πυρηνική δύναμη είναι ελκτική και δρα ανάμεσα στα πρωτόνια και στα νετρόνια. Παρόλο λοιπόν που τα πρωτόνια απωθούν το ένα το άλλο λόγω της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης, η ισχυρή πυρηνική δύναμη τα υποχρεώνει να έλκονται μεταξύ τους.

Η μικρή ακτίνα δράσης της είναι ο λόγος που η ισχυρή πυρηνική δύναμη άργησε πολύ να ανακαλυφθεί (1965), ενώ αντίθετα η βαρυτική και η ηλεκτρομαγνητική ήταν γνωστές από τους παλαιολιθικούς χρόνους ακόμα (από τη στιγμή που ο πρώτος άνθρωπος μπόρεσε να παρατηρήσει το περιβάλλον του). Με βάση την ισχυρή πυρηνική δύναμη μπορούμε να κατανοήσουμε τη σταθερότητα των πυρήνων την οποία αναφέραμε παραπάνω. Γενικά, ισχύει ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των πρωτονίων, τόσο αυξάνεται η απωστική δύναμη Coulomb ανάμεσα στα πρωτόνια, ώστε μετά από ένα σημείο η ελκτική πυρηνική δύναμη να μην μπορεί να συγκρατήσει τον πυρήνα, ο οποίος στην κυριολεξία θραύεται. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να υπάρχουν περισσότερο νετρόνια σε έναν πυρήνα που δεν υπόκειται στην απωστική δύναμη Coulomb, αλλά αυξάνουν τη συνολική ελκτική ισχυρή πυρηνική δύναμη. Τελικά όμως είναι αδύνατο να εξισορροπηθεί πλήρως η απωστική δύναμη Coulomb με την πρόσθεση νετρονίων, οπότε για $Z = 83$ και πάνω γενικά οι πυρήνες δεν είναι σταθεροί.

Γενικά κάθε αλληλεπίδραση θεωρείται ότι έχει ένα φορέα (διαδότη) αλληλεπίδρασης. Το σωματίδιο – φορέας αναλαμβάνει να μεταφέρει την πληροφορία, με ταχύτητα που δεν πρέπει να ξεπερνάει την ταχύτητα του φωτός. Για κάθε αλληλεπίδραση υπάρχει ένας ή περισσότεροι φορείς, των οποίων η ανταλλαγή κάνει τα σωματίδια να «αισθάνονται» την αλληλεπίδραση. Για την ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση ο φορέας είναι το φωτόνιο, η αλληλεπίδραση του οποίου περιγράφεται αναλυτικά στην Κβαντική Ηλεκτροδυναμική. Για την ασθενή αλληλεπίδραση απαιτεί την ύπαρξη τριών φορέων Z^0 , W^- και W^+ . Η ανάγκη ενός μόνο φορέα για την περιγραφή της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης και των τριών για την ασθενή

αντανακλά το μαθηματικό υπόβαθρο της θεωρίας που στηρίζεται στη Θεωρία των Ομάδων. Η ισχυρή αλληλεπίδραση, στο επίπεδο των κουάρκ απαιτεί οκτώ φορείς που ονομάζονται γκλουόνια, τα οποία ανταλλάσσονται μεταξύ των κουάρκ, όπως περιγράφει η Κβαντική Χρωμοδυναμική. Τέλος, η βαρυτική αλληλεπίδραση, παρόλο που δεν έχουμε μια συνεπή θεωρία περιγραφής της ανάλογη με τις άλλες αλληλεπιδράσεις, πιστεύουμε ότι έχει το δικό της φορέα, το βαρυτόνιο, το οποίο ακόμα δεν έχει ανακαλυφθεί.

3.5 Στοιχειώδη σωματίδια

Κατά τη δεκαετία του 1920 ο Dirac διατύπωσε τη σχετικιστική κβαντική μηχανική (δηλαδή την κβαντική μηχανική που περιλάμβανε και την ειδική θεωρία της σχετικότητας). Η θεωρία του εξηγούσε επιτυχώς την ύπαρξη του σπιν του ηλεκτρονίου και τη μαγνητική του ροπή. Παρ' όλα αυτά, είχε ένα σημαντικό μειονέκτημα, διότι κάποιες λύσεις της σχετικιστικής εξίσωσης απαιτούσαν την ύπαρξη καταστάσεων αρνητικής ενέργειας. Αλλά, αν υπήρχαν καταστάσεις ηλεκτρονίων με αρνητική ενέργεια, θα έπρεπε τα ηλεκτρόνια που έχουν θετική ενέργεια να μεταβαίνουν αμέσως σχεδόν στην κατάσταση αρνητικής ενέργειας, εκπέμποντας από ένα φωτόνιο το καθένα.

Αργότερα έγινε σαφές ότι η πρόβλεψη της θεωρίας του Dirac ήταν ότι κάθε σωματίδιο έχει το αντισωματίδιό του. Το αντισωματίδιο έχει την ίδια μάζα με το αντίστοιχο αντισωματίδιό του και φορτία ίσο σε απόλυτη τιμή, αλλά με αντίθετο πρόσημο. Έτσι, το αντισωματίδιο του ηλεκτρονίου είναι το ποζιτρόνιο, το οποίο συμβολίζεται ως e^+ . Άλλα αντισωματίδια είναι το αντιπρωτόνιο (p^-) ή το αντινετρόνιο. Επίσης υπάρχουν τα αντινετρίνα. Μερικά σωματίδια όπως το π^0 (πιόνιο) είναι ταυτόχρονα σωματίδια και αντισωματίδια.

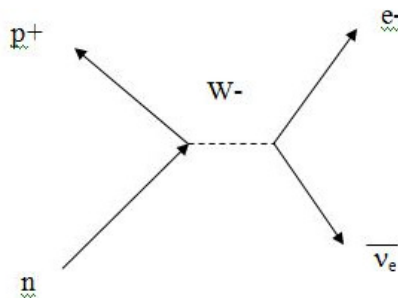
Ενώ αρχικά θεωρούνταν ότι τα στοιχειώδη σωματίδια που συγκροτούν την ύλη είναι τα ηλεκτρόνια, τα πρωτόνια και τα νετρόνια, σύντομα ανακαλύφθηκαν περισσότερα. Ο Yukawa το 1935 (βραβείο Nobel 1949) υπέθεσε ότι η ισχυρή πυρηνική δύναμη οφείλεται στο ότι τα νουκλεόνια ανταλλάσσουν ένα νέο σωματίδιο με μάζα μεταξύ της μάζας του ηλεκτρονίου και του πρωτονίου, το οποίο και ονόμασε μεσόνιο. Τα επόμενα χρόνια ανακαλύφθηκαν στις κοσμικές ακτίνες το μεσόνιο π ή αλλιώς πιόνιο (π) από τον Powell το 1950. Αποδεικνύεται ότι τα πιόνια μετατρέπονται σε μυόνια (μ), τα οποία δεν αλληλεπιδρούν καθόλου με την ισχυρή αλληλεπίδραση. Το πιόνιο υπάρχει σε τρεις καταστάσεις ηλεκτρικού φορτίου: π^+ , π^- και π^0 . Τα σωματίδια π^+ και π^- έχουν ίση μάζα ($139,6 \text{ MeV}/c^2$), ενώ το π^0 έχει μάζα $135,0 \text{ MeV}/c^2$. Τα πιόνια και τα μυόνια είναι ασταθή σωματίδια. Για παράδειγμα, το π^- διασπάται

σε ένα μυόνιο και ένα αντινετρίνο με χρόνο υποδιπλασιασμού $2,6 \times 10^{-8}$ sec. Το μυόνιο με τη σειρά του διασπάται σε ένα ηλεκτρόνιο, σε ένα νετρίνο της οικογένειας του μιονίου και σε ένα αντινετρίνο της οικογένειας του ηλεκτρονίου:

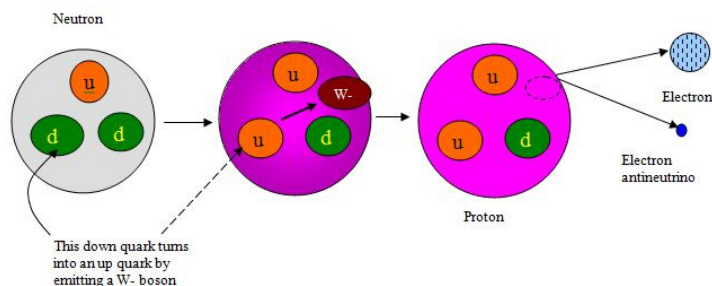
$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}$$

$$\mu^- \rightarrow e + \nu + \bar{\nu}$$

Ο R. Feynman επινόησε τα λεγόμενα διαγράμματα Feynman ως τρόπο απεικόνισης της αλληλεπίδρασης ανάμεσα σε δυο στοιχειώδη σωματίδια με την ανταλλαγή άλλων στοιχειωδών σωματιδίων. Παρακάτω παρατηρούμε το διάγραμμα Feynman για τη διάσπαση β:



Εικόνα 3.5: Διάγραμμα Feynman για την διάσπαση β



Εικόνα 3.6: Διάσπαση β και μετατροπή του νετρονίου σε πρωτόνιο με ανταλλαγή μποζονίου W

Γενικά, από το παραπάνω παράδειγμα βλέπουμε ότι ένα πρωτόνιο μπορεί να μετατραπεί σε ένα πρωτόνιο συν ένα πιόνιο, εφόσον επιστρέψει στην αρχική του κατάσταση σε πάρα πολύ μικρό χρόνο. Τα νουκλεόνια, γενικά, υφίστανται διακυμάνσεις καθώς εκπέμπουν ή απορροφούν πιόνια. Οι διακυμάνσεις αυτές είναι σύμφωνες με την Αρχή της Απροσδιοριστίας και την Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας.

Στην πορεία του χρόνου ανακαλύφθηκαν και άλλα στοιχειώδη σωματίδια, όπως τα W^\pm ή τα Z^0 . Γενικά τα στοιχειώδη σωματίδια μπορούν να καταταχθούν σε δύο κατηγορίες, τα αδρόνια και τα λεπτόνια. Όλα τα σωματίδια που υπόκεινται στην ισχυρή αλληλεπίδραση είναι τα αδρόνια, τα οποία με τη σειρά τους χωρίζονται στα μεσόνια (που είναι φερμιόνια) και τα βαρυόνια (που είναι μποζόνια). Όλα τα μεσόνια έχουν σπιν μηδενικό ή ακέραιο (0 ή 1) και διασπώνται τελικά σε διάφορους συνδυασμούς ηλεκτρονίων, ποζιτρονίων, νετρίνων και φωτονίων. Το ελαφρύτερο από αυτά είναι το πiónιο με μηδενικό σπιν, ενώ το αμέσως βαρύτερο είναι το καόνιο (μεσόνιο K), με περίπου μηδενικό σπιν. Τα βαρυόνια έχουν μάζα μεγαλύτερη ή ίση με τη μάζα του πρωτονίου (το οποίο είναι το ελαφρύτερο γνωστό βαρυόνιο), έχουν ημιακέραιο σπιν ($1/2$ ή $3/2$) και διασπώνται έτσι ώστε πάντα στην τελική διάσπαση της σειράς να υπάρχει πρωτόνιο ή αντιπρωτόνιο. Το πρωτόνιο και το νετρόνιο είναι βαρυόνια.

Ένα παράδειγμα διάσπασης βαρυονίου είναι η διάσπαση του λεγόμενου υπερονίου Ξ , το οποίο διασπάται σε ένα βαρυόνιο Λ^0 και ένα μεσόνιο π^0 . Το βαρυόνιο Λ^0 με τη σειρά του διασπάται σε ένα πρωτόνιο και ένα μεσόνιο π^- ή σε ένα νετρόνιο και ένα μεσόνιο π^0 . Το νετρόνιο, με τη σειρά του, διασπάται με διάσπαση β σε ένα πρωτόνιο, ένα ηλεκτρόνιο και ένα αντινεutrino της οικογένειας του ηλεκτρονίου. Το πρωτόνιο είναι σταθερό (βασικά αποδεικνύεται ότι ο χρόνος υποδιπλασιασμού του είναι περίπου 10^{32} έτη, άρα θεωρείται σταθερό). Πλέον θεωρούμε ότι τα αδρόνια δεν είναι στοιχειώδη, αλλά σύνθετα σωματίδια που αποτελούνται από πιο στοιχειώδη σωματίδια, τα κουάρκ.

Τα λεπτόνια είναι τα στοιχειώδη σωματίδια που δεν υπόκεινται στην ισχυρή αλληλεπίδραση. Τα λεπτόνια έχουν σπιν $1/2$. Λεπτόνια είναι το ηλεκτρόνιο, το μύονιο, το βαρύ λεπτόνιο τ και τα αντίστοιχα νετρίνα τους (και τα αντισωματίδιά τους).

Γενικά σε κάθε πυρηνική αντίδραση ισχύουν οι αρχές διατήρησης του βαρυονικού αριθμού (το άθροισμα των βαρυονικών αριθμών πριν από τη διάσπαση ή αντίδραση ισούται με το άθροισμα των βαρυονικών αριθμών μετά από αυτήν), του λεπτονικού αριθμού (σε κάθε αντίδραση ή διάσπαση το άθροισμα των λεπτονικών αριθμών της οικογένειας του ηλεκτρονίου, πριν από την αντίδραση ή διάσπαση ισούται με το άθροισμα των λεπτονικών αριθμών της οικογένειας του ηλεκτρονίου μετά από την αντίδραση ή διάσπαση. Το ίδιο ισχύει και για τις οικογένειες του μιονίου και του βαρέος λεπτονίου τ) και της παραδοξότητας. (Πετρίδου, 2005)

Τέλος, πλέον θεωρείται ότι οι δομικοί λίθοι της ύλης, δηλαδή τα πραγματικά στοιχειώδη σωματίδια είναι τα κουάρκ, από τα οποία αποτελούνται τα βαρυόνια και τα μεσόνια. Γενικά υπάρχουν τρία είδη κουάρκ, το up, το down και το strange. Το φορτίο τους δεν είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του φορτίου του ηλεκτρονίου αλλά κλάσμα αυτού: το u έχει φορτίο $+2e/3$, το d έχει $-e/3$ και το s έχει φορτίο $-e/3$, ενώ το s έχει παραξενιά -1 (τα άλλα έχουν μηδέν). Τα αντίστοιχα αντικουάρκ τους έχουν αντίθετο ηλεκτρικό φορτίο, αντίθετος βαρυονικούς αριθμούς και αντίθετη παραξενιά. Γενικά τα μεσόνια αποτελούνται από ένα συνδυασμό κουάρκ και αντικουάρκ, τα βαρυόνια αποτελούνται από τρία κουάρκ και τα αντιβαρυόνια αποτελούνται από τρία αντικουάρκ. Επιπλέον ιδιότητες των κουάρκ είναι η χάρη και το χρώμα, η μελέτη των οποίων ξεφεύγει από τα πλαίσια αυτής της εργασίας.

3.6 Νετρίνα

Στο σημείο αυτό θα παρουσιάσουμε πιο αναλυτικά τις ιδιότητες των νετρίνων και τις εφαρμογές τους, καθώς και τη σημαντικότητά τους στην επιστήμη.

Το νετρίνο είναι ίσως η πιο παράξενη οντότητα στον κόσμο της φυσικής. Έχει μηδενικό ηλεκτρικό φορτίο και δεν αλληλεπιδρά με την ηλεκτρομαγνητική και την ισχυρή αλληλεπίδραση, με αποτέλεσμα να είναι το στοιχειώδες σωματίο για το οποίο έχουμε τις λιγότερες πληροφορίες. Η πιθανότητα ύπαρξής του προτάθηκε για πρώτη φορά το 1932 από τον Pauli, για την εξήγηση της β διάσπασης (όπως αναφέραμε παραπάνω), αλλά πειραματικά διαπιστώθηκε το 1958. Αποτελεί ένα από τα κυριότερα συστατικά του σύμπαντος, ενώ επίσης παράγεται σε επιταχυντές.

Έχει καθιερωθεί το σωματίο που συνοδεύει την εκπομπή των ηλεκτρονίων στη β διάσπαση να ονομάζεται αντινετρίνο. Η ανακάλυψη του αντισωματιδίου του ηλεκτρονίου, του ποζιτρονίου από τον Anderson το 1934 αποτέλεσε την αφετηρία για την επιβεβαίωση και της ύπαρξης της β+ διάσπασης, όπου συμμετέχει το νετρίνο αντί για το αντινετρίνο.

Το 1967, ο φυσικός Weinberg προσπαθώντας να μελετήσει την πιθανή ενοποίηση των ηλεκτρικών δυνάμεων με τις ασθενείς που προκαλούν τη β-διάσπαση, θεώρησε την ύπαρξη μιας συμμετρίας (η οποία ισχύει πάνω από ένα σχετικά ψηλό ενεργειακό επίπεδο) όπου το ηλεκτρόνιο δεν ξεχωρίζει από το αντίστοιχο του νετρίνο. Το ίδιο υπέθεσε και για τα άλλα δύο ζεύγη (βραχύβιων) λεπτονίων που συναντώνται στη φύση: το μιονίο, μ, που έχει ίδιο φορτίο με το ηλεκτρόνιο συνοδεύεται από το αντίστοιχο νετρίνο του και το σωματίο ταυ επίσης με

το αντίστοιχο νεutrino. Με άλλα λόγια, όταν μελετάμε τη φυσική πάνω από ενέργειες της τάξης των 100 GeV, τα ηλεκτρόνια και τα νεutrina είναι ένα και το αυτό σωματίο ως προς τις ασθενείς δυνάμεις. Πριν τη ρήξη της αρχικής συμμετρίας, όλα τα λεπτόνια παραμένουν χωρίς μάζα. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή όροι μάζας “γεννιούνται” στη συνέχεια για το ηλεκτρόνιο και τα άλλα δύο φορτισμένα σωματίδια, δηλ. το μιονίο και το σωματίο ταυ.

Εμφανίζονται τέτοιες μάζες για τα νεutrina; Τουλάχιστον στα πλαίσια του καθιερωμένου προτύπου, η απάντηση είναι όχι. Βέβαια, ο τελικός κριτής για την ύπαρξη μάζας στα νεutrina είναι μόνο το πείραμα. Τα πειραματικά δεδομένα, δεν αποκλείουν τα νεutrina να έχουν μάζα, η οποία όμως αν τελικά υπάρχει, θα πρέπει να είναι αμελητέα. Από πειράματα που μετρούν απ’ ευθείας τη μάζα του νεutrino, τα ανώτατα όρια είναι

$m_{\nu_e} < 10 \text{ eV}$, $m_{\nu_\mu} \gg \text{λίγα KeV}$, $m_{\nu_\tau} \gg \text{λίγα MeV}$ (Serway, Πετρίδου, Χαραλάμπους)

3.7 Εφαρμογές και πειράματα με νεutrina

Πέρα από το ιδιαίτερο ενδιαφέρον μας για τα νεutrina από την πλευρά της Φυσικής στοιχειωδών σωματιδίων, τα σωματία αυτά έχουν επίσης μεγάλη σημασία για την αστροφυσική και την κοσμολογία μιας και μπορούν να δώσουν σημαντικές πληροφορίες για την εξέλιξη του σύμπαντος, από την αρχική μεγάλη έκρηξη (Big Bang) έως και σήμερα. Συγκεκριμένα:

Νεutrina που εξεπέμφθησαν από εκρήξεις των υπερκαινοφανών αστερών (supernova) πολλές χιλιάδες χρόνια πριν, φτάνουν στη γη τώρα. Τα νεutrina αυτά μεταφέρουν το 99% της ενέργειας του αστερά προς τα έξω και δίνουν πληροφορίες για το σύμπαν πολύ πριν την γέννηση του ανθρώπου στη Γη. Από τις αρχές της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας, επικρατούσαν δύο απόψεις για το σύμπαν.

Σύμφωνα με την πρώτη το σύμπαν είναι στατικό, ενώ αντίθετα η δεύτερη υποστηρίζει ότι επεκτείνεται συνεχώς, μετά από την αρχική στιγμή της δημιουργίας του από μια μεγάλη έκρηξη. Η δεύτερη άποψη ενισχύθηκε από τις παρατηρήσεις του Edwin Hubble, στις πρώτες δεκαετίες του αιώνα μας οι οποίες απέδειξαν ότι οι σχετικές αποστάσεις ανάμεσα στους γαλαξίες μεγαλώνουν. Η οριστική της επικράτηση όμως σημειώθηκε το 1964, όταν οι Penzias και Wilson ανακάλυψαν το εναπομείναν αέριο φωτονίων με θερμοκρασία περίπου 3 K, το οποίο προβλεπόταν από τη Θεωρία. Η τελευταία επίσης προβλέπει μικρές διαταραχές στην

ομοιογένεια του φωτονικού αερίου, που παρατηρήθηκαν το 1992 από το διαστημικό παρατηρητήριο COBE (COsmic Background Explorer). Οι διακυμάνσεις αυτές σχετίζονται με την παρουσία νετρίνων σε ποσοστό 25% στην λεγόμενη “αθέατη ύλη” (dark matter), η οποία πιστεύεται ότι αποτελεί το 90% περίπου της συνολικής ύλης του σύμπαντος. Αν είναι σωστή η υπόθεση αυτή, τότε πράγματι το νετρίνο είναι ένα σωματίο αβάσταχτα ελαφρύ. Τα ταχέως κινούμενα νετρίνα, απαρτίζουν την λεγόμενη “σχετικιστική ή θερμή αθέατη ύλη” (hot dark matter), ενώ βαρυόνια και πιθανώς άγνωστα σωματίια με μεγάλη μάζα και συνεπώς μικρή ταχύτητα συνθέτουν την μη σχετικιστική ή ψυχρή αόρατη ύλη (cold dark matter).

Ένα κάπως πιο κοντινό σε μας θέμα, είναι το λεγόμενο “πρόβλημα των ηλιακών νετρίνων,” (solar neutrino problem). Οι υπολογισμοί των διαφόρων διεργασιών στον ήλιο εκτελούνται από τους αστροφυσικούς με βάση το λεγόμενο Θεμελιώδες Ηλιακό Πρότυπο. Δεδομένα στους υπολογισμούς αυτούς είναι η μάζα του ήλιου, η συνάρτηση πυκνότητας και η χημική σύσταση της επιφάνειάς του, ενώ για το εσωτερικό του γίνονται λογικές υποθέσεις οι οποίες οδηγούν σε σωστές προβλέψεις. Η ηλιακή ακτινοβολία διατηρείται από μια σειρά θερμοπυρηνικών αντιδράσεων, στις οποίες συμμετέχουν κυρίως πρωτόνια. Η κύρια ακολουθία των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα, είναι η σύντηξη του υδρογόνου σε δευτέριο (^2D) και αυτό με τη σειρά του σε ήλιο (^3He) και στη συνέχεια σε βαρύτερα στοιχεία.

Στις παραπάνω αντιδράσεις, τόσο κατά την σύντηξή του ^1H όσο και σε επόμενα στάδια, παράγονται νετρίνα. Τα νετρίνα αυτά, διασχίζουν το εσωτερικό του ήλιου και φτάνουν στη Γη όπου καταγράφονται από πειράματα που γίνονται στην Ευρώπη, ΗΠΑ και Ιαπωνία. Επειδή ο ρυθμός αντίδρασης των νετρίνων με την ύλη είναι εξαιρετικά αργός, έχει οριστεί διαφορετική μονάδα μέτρησής του. Αυτή είναι η μονάδα ηλιακών νετρίνων SNU (solar neutrino unit) που αντιπροσωπεύει 1 γεγονός ανά δευτερόλεπτο σε 10^{36} άτομα-στόχους. Σύμφωνα με τους υπολογισμούς του ηλιακού προτύπου, ο ρυθμός αντίδρασης των νετρίνων υπολογίζεται σε 8 SNU. Όμως τα πειράματα μετρούν μόνο 2 SNU. Η ασυμφωνία αυτή ανάμεσα στη θεωρία και το πείραμα, είναι γνωστή ως πρόβλημα των ηλιακών νετρίνων.

Μια πιθανή ερμηνεία, είναι ότι το ηλιακό πρότυπο δεν είναι σωστό και προβλέπει λανθασμένη ροή ν_e . Όμως, υπολογισμοί με βάση τις θερμοπυρηνικές αντιδράσεις που περιγράφηκαν, δίνουν την ακριβή ισορροπία μεταξύ της θερμικής πίεσης και της ισχυρής

βαρύτητας στον ήλιο, ενισχύοντας το θεμελιώδες ηλιακό πρότυπο. Σε αντίθετη περίπτωση, ο ήλιος θα είχε καταρρεύσει ή εκραγεί.

Υπάρχουν και άλλες εκδοχές ερμηνείας του παράδοξου. Θα σταθούμε όμως σε μια άποψη που συνδέει αρμονικά τη σωματιδιακή φυσική σε μικροσκοπικές αποστάσεις, με τη φυσική σε αποστάσεις μεγάλες όσο το σύμπαν. Σύμφωνα με την εκδοχή αυτή, το ηλεκτρονικό νεutrino αποτελείται στην πραγματικότητα από μια μίξη ιδιοκαταστάσεων, δηλαδή ένα γραμμικό συνδυασμό δύο αρχικών καταστάσεων ν_1, ν_2 : $\nu_e = \alpha_1 \nu_1 + \alpha_2 \nu_2$ όπου οι παράμετροι α_1, α_2 εκφράζουν το ποσοστό συμμετοχής των καταστάσεων ν_1, ν_2 στην “κατασκευή” του ν_e . Η χρονική εξέλιξη των παραμέτρων κατά το ταξίδι των νεutrinov από τον ήλιο περιγράφεται από διαφορικές εξισώσεις βάσει των οποίων υπολογίζεται η πιθανότητα να βρεθεί ένα ηλεκτρονικό νεutrino στη Γη. Η πιθανότητα να βρεθεί στη γη δεν είναι μονάδα, αλλά εξαρτάται από παράγοντες όπως η μάζα, ενέργεια και το ποσοστό μίξης των νεutrinov, η απόσταση γης-ήλιου κ.λ.π. Συνεπώς, η επιβεβαίωση των “ταλαντώσεων” (όπως ονομάζονται) των νεutrinov, συνεπάγονται αναπόφευκτα και την ύπαρξη μάζας, έστω και πολύ μικρής.

Ανάλογο με το προηγούμενο πρόβλημα, είναι κι εκείνο των ατμοσφαιρικών νεutrinov. Ας εξηγήσουμε τι ακριβώς συμβαίνει. Κοσμικές ακτίνες οι οποίες φθάνουν στα εξωτερικά στρώματα της ατμόσφαιρας παράγουν σωματίδια τα οποία είναι γνωστά στους φυσικούς ως πόνια. Τα πόνια στη συνέχεια δημιουργούν μια αλυσίδα αντιδράσεων όπου αρχικά διασπώνται σε μόνια και νεutrina ν_μ , ενώ στη συνέχεια τα μόνια διασπώνται σε ηλεκτρόνια και νεutrina δύο ειδών ν_μ και ν_e .

Πολλά πειράματα εγκατεστημένα εδώ και χρόνια σε διάφορες γωνίες της Γης μετρούν τη ροή των νεutrinov και κάνουν συγκρίσεις με τις θεωρητικές προβλέψεις. Μία τελευταία ανακοίνωση σχετικά με την ύπαρξη μάζας που τάραξε τα νερά της φυσικής προσφάτως, προήλθε από την Ιαπωνία. Στην περιοχή Gifu και στα ορυχεία της Kamioka Mine Company, βρίσκεται εγκατεστημένος ένας τεράστιος ανιχνευτής που περιέχει 50 κιλোটόνους νερό και είναι γνωστός με το όνομα Super-Kamiokande. Τα προϊόντα των αντιδράσεων που αναφέραμε ανιχνεύονται από τον επιταχυντή για μεγάλα χρονικά διαστήματα και κάτω από εξαιρετικά πολύπλοκες διαδικασίες. Οι αντιδράσεις αυτές σύμφωνα με τη θεωρία οδηγούν στην αναλογία 2:1 ανάμεσα στα μιονικά και ηλεκτρονικά νεutrina. Στα πειράματα όμως, ο λόγος αυτός μετρήθηκε να είναι 1:2.

Η ασυμφωνία αυτή μπορεί να εξηγηθεί με ακριβώς ανάλογο τρόπο με εκείνον για τα ηλιακά νετρίνα, στην περίπτωση που το μιονικό νεutrίνο είναι μίξη ιδιοκαταστάσεων μη μηδενικής μάζας. Οι μετρήσεις είναι συμβιβαστές με μάζα της τάξης $1/1000$ eV, (η μικρότερη μάζα που έχει μετρηθεί ποτέ στο σύμπαν) ενώ η ανάμιξη των δύο διαφορετικών ειδών νετρίνων που συμμετέχουν στο φαινόμενο βρίσκεται να είναι σχεδόν η μέγιστη δυνατή. Η επιβεβαίωση των παρατηρήσεων αυτών και από άλλα πειράματα στο μέλλον θα σημάνει μια νέα αναζωογόνηση στη σύγχρονη φυσική καθώς θα μας φέρει ένα ουσιαστικό βήμα εμπρός στην κατανόηση του σύμπαντος.

Συμπερασματικά, από τα παραπάνω, βλέπουμε ότι το νεutrίνο, είναι μία οντότητα με ιδιαίτερη σημασία τόσο για την φυσική στοιχειωδών σωματιδίων, όσο και για την κοσμολογία και την αστροφυσική. Η επιβεβαίωση της μη-μηδενικής μάζας και μίξης των νετρίνων, που όπως είδαμε σχετίζεται με θεμελιώδη ερωτήματα, είναι ο στόχος μιας μεγάλης σειράς πειραμάτων για τα επόμενα χρόνια. Στα πλαίσια αυτά έχει δημιουργηθεί και στην χώρα μας, στον υποθαλάσσιο χώρο κοντά στην Πύλο, ο ερευνητικός σταθμός NESTOR. Στο πρόγραμμα αυτό, στο οποίο συμμετέχουν επιστήμονες από διάφορες χώρες, στόχος είναι όπως και στα υπόλοιπα πειράματα που έχουν προγραμματιστεί, η απόκτηση όσο το δυνατόν περισσότερων πληροφοριών για τις ιδιότητες του παράξενου αυτού σωματιδίου. Περισσότερες πληροφορίες και ανάλυση του πειράματος MINERvA ακολουθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

Βιβλιογραφία – Αναφορές 3^ο Κεφαλαίου

Γεωργακάκος Π., Σκαλωμένος Α., Σφαρνάς Ν., Χριστακόπουλος Ι., Φυσική Γενικής Παιδείας Ενιαίου Λυκείου, Οργανισμός Εκδόσεων Διδακτικών Βιβλίων Αθήνα, 1999

Πετρίδου Χ., «Πυρηνική Φυσική και Φυσική στοιχειωδών σωματιδίων», Σημειώσεις μαθήματος, πανεπιστημιακό τυπογραφείο, Θεσσαλονίκη, 2005

Χαραλάμπους Σ., Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική, Θεσσαλονίκη 1973

Serway, Physics for Scientists and Engineers, Τόμος 4, Σύγχρονη Φυσική, μετάφραση Λ.Κ. Ρεσβάνη, 1990

http://www.metal.ntua.gr/uploads/729/kef_1.pdf

http://skiathos.physics.auth.gr/atlas/Nuclear_Physics/2010/particlePhysicsPetridou_14_1_11.pdf

Κεφάλαιο 4 – Πείραμα με χρήση νετρίνων για επικοινωνία με χρήση της Δέσμης NuMI και του Ανιχνευτή MINERvA στο FermiLab

4.1 Εισαγωγή

Η ανθρωπότητα εφευρίσκει διαρκώς νέους τρόπους για επαφή και επικοινωνία. Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι δύσκολο αυτές οι γραμμές να παραμείνουν ανοιχτές, όπως για παράδειγμα όταν το διαστημικό λεωφορείο βρίσκεται πίσω από τη Σελήνη ή το υποβρύχιο βρίσκεται βαθιά στο νερό. Όπως λέμε στην καθομιλουμένη «το σήμα μπλοκάρεται».

Πρόσφατα (ξεκίνησε να σχεδιάζεται από το 2009 αλλά οι πρώτες ανακοινώσεις επιτυχίας έγιναν το 2012), οι επιστήμονες έκαναν δυνατό ένα νέο τρόπο επικοινωνίας όταν δεν θα μπορούν τα ραδιοκύματα. Για πρώτοι φορά οι επιστήμονες διαβίβασαν ένα μήνυμα χρησιμοποιώντας νετρίνα σε απόσταση όπου τα 240 m ήταν συμπαγής βράχος.

Για χρόνια οι επιστήμονες προσπαθούσαν να επικοινωνήσουν σε μεγάλες αποστάσεις με ένα είδος κώδικα Μορς μέσω των νετρίνων, των σωματιδίων – φαντασμάτων που αλληλεπιδρούν τόσο ασθενώς με την ύλη ώστε να μπορούν να περνάνε από ολόκληρους πλανήτες ανέπαφα. «Τώρα αρχίζει να φαίνεται πιο εφικτό αυτό το όνειρο. Τα συστήματα επικοινωνιών που θα βασίζονται σε νετρίνα θα είναι μεν πολύ πιο περίπλοκα από τα σημερινά συστήματα, πιθανότατα όμως θα έχουν σημαντικές στρατηγικές εφαρμογές», εκτίμησε ο Dan Stancil του πανεπιστημίου της Βόρειας Καρολίνας, ο οποίος συμμετείχε στην ερευνητική ομάδα που σχεδίασε και υλοποίησε το πείραμα που θα περιγράψουμε στη συνέχεια.

Η ιδέα πρωτοξεκίνησε το 1980, όταν ο Stancil (τότε στο πανεπιστήμιο Carnegie Mellon) σκεφτόταν συνεχώς την ιδέα να χρησιμοποιήσει τα νετρίνα, τα σωματίδια για τα οποία τότε μόλις αρχίζαμε να μαθαίνουμε περισσότερα πράγματα, για την επικοινωνία. Τότε επικεντρώθηκε στα αξιόνια, ένα ακόμα άγνωστο σωματίδιο που προβλέπεται από κάποιες θεωρίες που σχετίζονται με τη σκοτεινή ύλη (και ακόμα δεν το έχουμε ανακαλύψει).

Με λίγα λόγια, το 2009 ξεκίνησε να σχεδιάζεται ο ανιχνευτής MINERvA, ικανός να μελετήσει τα νετρίνα με μεγάλη λεπτομέρεια και όχι απλά να λειτουργήσει ως ένας απλός

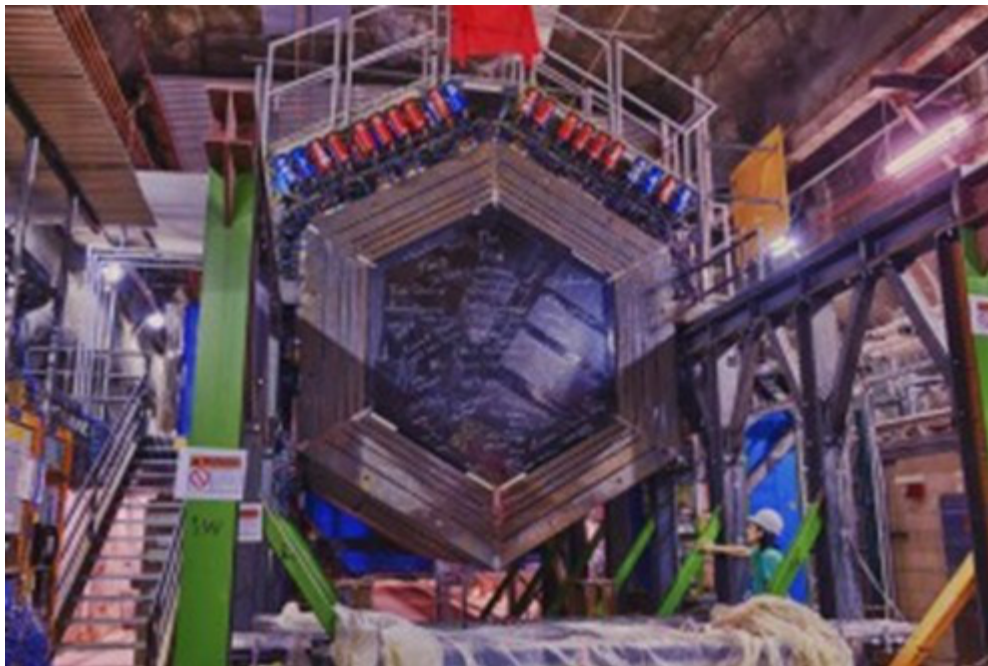
δέκτης νετρίνων (σαν τηλέγραφος). Βρισκόμενος κοντά σε μια από τις ισχυρότερες ακτίνες νετρίνων στον κόσμο, οι επιστήμονες κατάφεραν σε μόλις δύο ώρες να χειριστούν έναν παλμό και να μεταφέρουν τη λέξη «νεutrino».

Με λίγα λόγια, ο ηλεκτρολόγος μηχανικός Brian Hughes βοήθησε να γραφεί το μήνυμα σε ASCII κώδικα των 7 bit. Ο φυσικός Dave Capista του FermiLab προγραμματίσε τον επιταχυντή που έστειλε τους παλμούς των νετρίνων ώστε το 1 να παριστάνεται με έναν παλμό νετρίνων και το 0 με απουσία παλμού. Δηλαδή το νεutrino έγινε κάπως έτσι:

```
neutrino ≡ 0110111001100101011101010111010001110010011010010110111001101111
```

Ο δε ανιχνευτής αποκωδικοποίησε το μήνυμα με ακρίβεια 99% μετά από μόλις δυο επαναλήψεις του σήματος.

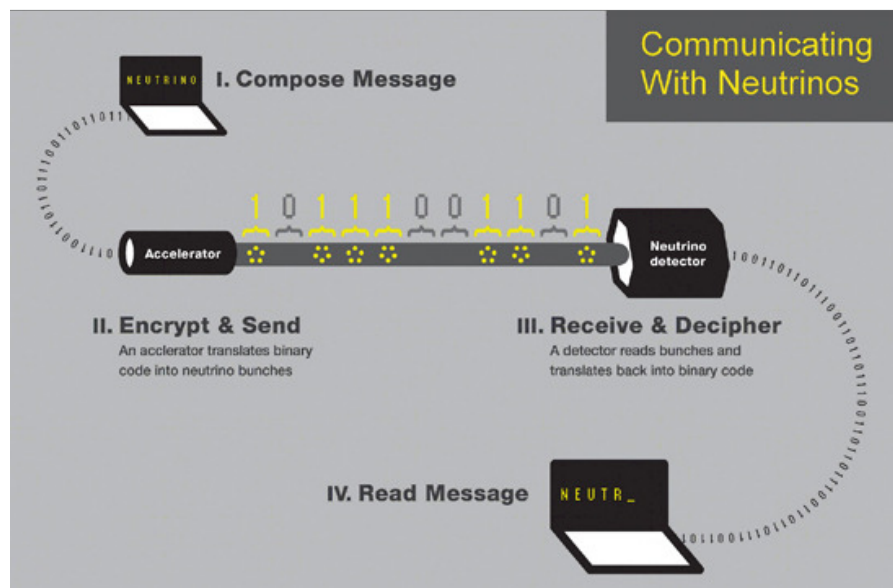
Η επίσημη περιγραφή του πειράματος έγινε τον Απρίλιο του 2012 στο περιοδικό Modern Physics Letters, όπου σύσσωμη η ερευνητική ομάδα περιγράφει το πείραμα που διεξήχθη τους προηγούμενους μήνες.



Εικόνα 4.1: Ανιχνευτής MINERvA που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα

Με λίγα λόγια, η επικοινωνία με νετρίνα θα ακολουθεί το πρότυπο του παρακάτω σχήματος, δηλαδή αρχικά θα συντίθεται ένα μήνυμα (I), το οποίο θα κωδικοποιείται και θα αποστέλλεται με τη βοήθεια ενός επιταχυντή (II), θα λαμβάνεται από έναν ανιχνευτή όπου θα

αποκρυπτογραφείται σε δυαδικό κώδικα (III), ώστε ο υπολογιστής τέλος να μπορεί να το διαβάσει (IV)



Εικόνα 4.2: Σχηματική παράσταση των βασικών αρχών της επικοινωνίας με νετρίνα

Για το συγκεκριμένο πείραμα στη θέση του επιταχυντή χρησιμοποιήθηκε η δέσμη NuMI και στη θέση του ανιχνευτή ο MINERvA.

Το πείραμα σχεδιάστηκε με βάση τους εξής στόχους:

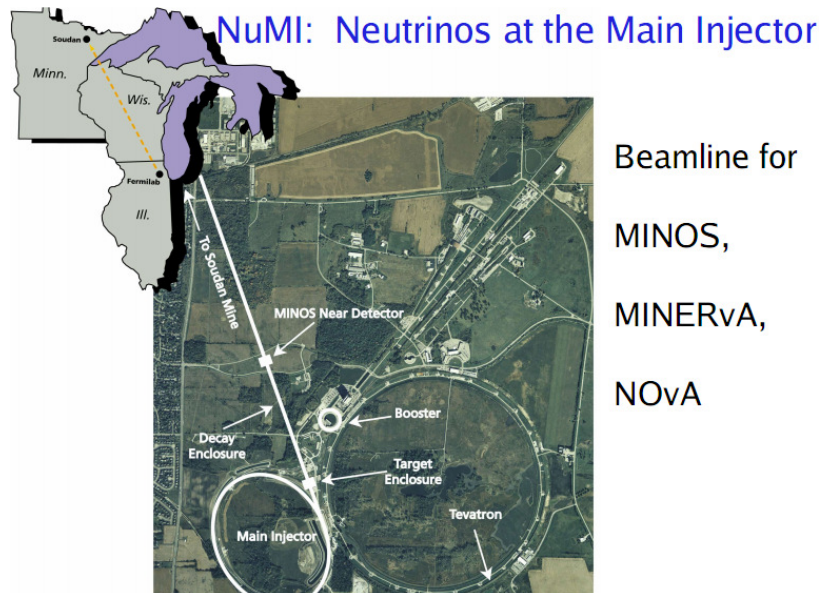
- Να μελετήσει πιο ευρείες ιδιότητες της φυσικής των νετρίνων.
- Να συλλέξει ένα μεγάλο δείγμα σκεδασμένων νετρίνων και αντινετρίνων.
- Να σχεδιάσει έναν ανιχνευτή με μεγάλη ενεργή επιφάνεια.
- Να χρησιμοποιήσει μια γνωστή και κατανοητή δέσμη με γνωστή ένταση σε νέες εφαρμογές (τη NuMI).
- Να φέρει σε επαφή την κοινότητα των φυσικών υψηλών ενεργειών και των ραδιοφυσικών και να εγκαθιδρύσει μια αρμονική συνεργασία ανάμεσά τους με τις αντίστοιχες ανταλλαγές τεχνογνωσίας.

4.2 Περιγραφή του πειράματος

Όπως αναφέραμε και παραπάνω, τα συστήματα επικοινωνίας με τα νετρίνα έχουν προταθεί για διεθνή επικοινωνία σημείου με σημείο (point – to – point), επικοινωνία με υποβρύχια και διαστρική επικοινωνία. Η επικοινωνία με νετρίνα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διαπλανητική

επικοινωνία κατά περιόδους όπου οι δίοδοι επικοινωνίας μπλοκάρονται λόγω ενός πλανήτη. Καθώς η ικανότητα των νετρίνων να διεισδύουν στην ύλη είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα των νετρίνων, η ασθενής αλληλεπίδραση με την ύλη επίσης υποδεικνύει ότι απαιτούνται ισχυρές ακτίνες και μεγάλοι επιταχυντές ώστε να πραγματοποιηθεί αυτό το είδος επικοινωνίας.

Η πραγματοποίηση μικρής έκτασης δεσμών επικοινωνίας έχει γίνει εφικτή με τη χρήση της δέσμης NuMI (Neutrinos at the Main Injector) και του επιταχυντή MINERvA (Main Injector Experiment for ν -A) στο Fermilab κοντά στο Σικάγο. Ο ρυθμός αποκωδικοποίησης δεδομένων ήταν 0,1 bits/sec με μέσο σφάλμα της τάξης του 1 % σε απόσταση 1.035 μέτρων που περιλάμβαναν 240 m μέσα στη Γη. Αυτή η επίδειξη αποδεικνύει το εφικτό της χρήσης ακτίνων από νετρίνα ώστε να παρέχεται ένας μικρού ρυθμού δεσμός επικοινωνίας, ανεξάρτητος από την υπάρχουσα υποδομή των ηλεκτρομαγνητικών επικοινωνιών (δηλαδή τα ραδιοκύματα). Όμως, δεδομένου του μικρού εύρους, του μικρού ρυθμού παροχής δεδομένων και των υπερβολικά ακριβών εξοπλισμών που απαιτούνται για την επίτευξη του στόχου της επικοινωνίας, απαιτούνται σημαντικές βελτιώσεις στη τεχνολογία των νετρίνων για την πρακτική εφαρμογή και τη διάδοσή τους.

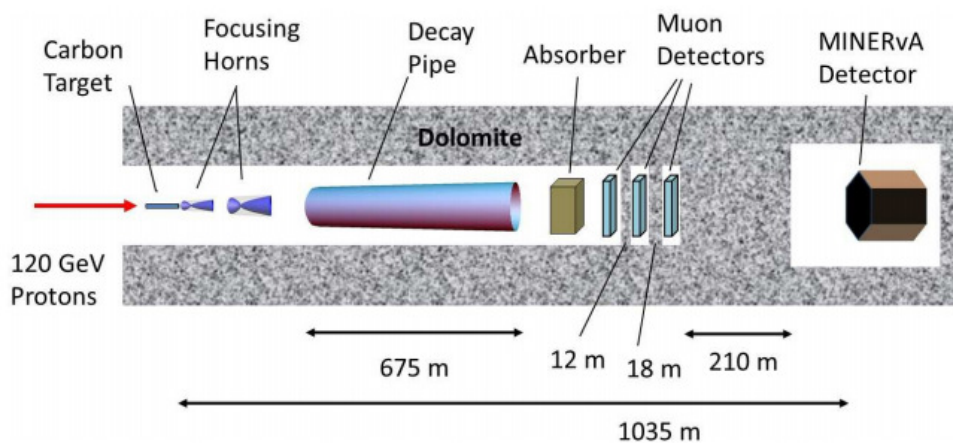


Εικόνα 4.3: Απεικόνιση στο χάρτη της διάταξης

Η ακτίνα των νετρίνων στο μεγάλο Injector (NuMI) στο Fermilab είναι μια από τις πιο ισχυρές ακτίνες υψηλής ενέργειας παγκόσμια, και παρέχει ένα φάσμα συνεχών τιμών υψηλής ενέργειας για χρήση σε πλήθος εφαρμογών της φυσικής στοιχειωδών σωματιδίων.

Μια απλοποιημένη σχηματική παράσταση της ακτινας φαίνεται στο σχήμα 4.4. Μια σειρά επιταχυντών παρέχει παλμούς περιόδου 8,1 μs από ενέργεια πρωτονίων 120 GeV κάθε 2,2 sec. Ο ρυθμός επαναληψιμότητας περιορίζεται από το χρόνο που απαιτείται για να επιταχύνει τα πρωτόνια σε τόσο υψηλή ενέργεια. Η ακτίνα πρωτονίων πέφτει πάνω σε στόχο από άνθρακα που παράγει πολλά πιόνια, καόνια και άλλα σωματίδια. Τα φορτισμένα σωματίδια εστιάζονται ώστε να χρησιμοποιηθούν σε μαγνήτες ώστε να παράγουν την ακτίνα που θα οδηθεί στους επιταχυντές. Σχεδόν όλα τα πιόνια και τα καόνια σκεδάζονται πάνω στα νετρίνα (κυρίως νετρίνα μιονίων) σε 675 m σωλήνα γεμάτο με ήλιο, με την ίδια κατεύθυνση (τα περισσότερα) με αυτή της ορμής του αρχικού μεσονίου. Αυτή η ακτίνα που διαχωρίζει τα στοιχειώδη σωματίδια περνάει μέσα από 240 m πέτρα (σχεδόν συμπαγή) και όλα τα σωματίδια απορροφώνται, εκτός από τα νετρίνα που συγκροτούν την ακτίνα NuMI.

Από τη στιγμή που οι αλληλεπιδράσεις στα πρωτόνια του άνθρακα στα 120 GeV παράγουν πιόνια πολύ πιο γρήγορα από τα καόνια, η ακτίνα κατά κύριο λόγο συγκροτείται από νετρίνα μιονίων (88%) και μικρότερα μίονια αντινετρίνων (11%) και νετρίνα ηλεκτρονίων (1%). Το ενεργειακό φάσμα έχει μέγιστο στα 3,2 GeV και έχει πλάτος (FWHM) περίπου 2,8 GeV. Ο ανιχνευτής απέχει ελαφρώς περισσότερο από 1 km από το στόχο, και, κατά τη μέγιστη ενέργειά της, η ακτίνα απέχει ένα εγκάρσιο μέγεθος μερικών μέτρων από την επιφάνεια του ανιχνευτή.



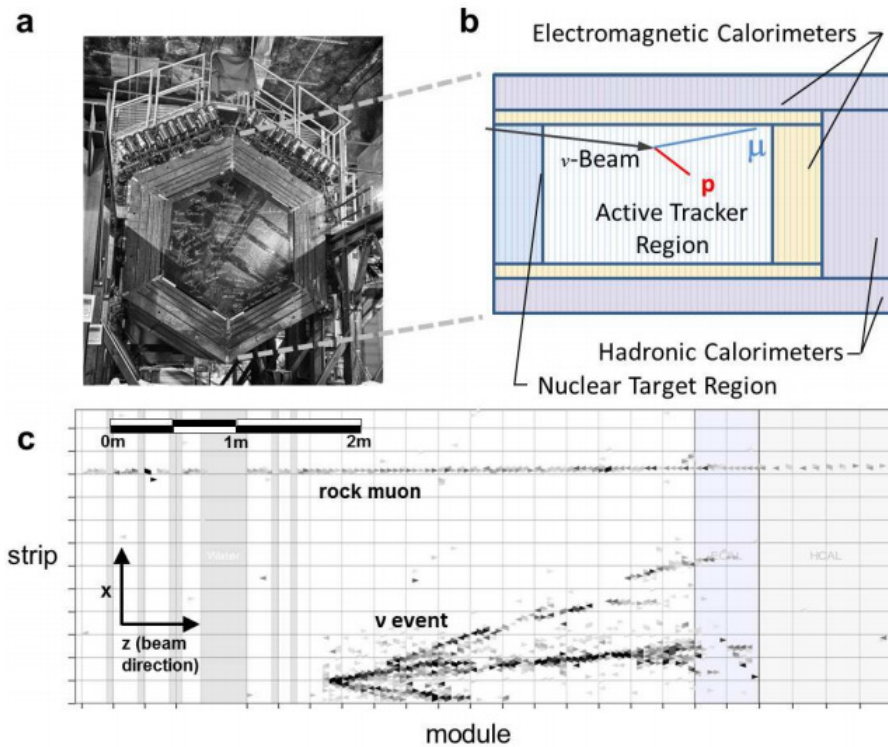
Εικόνα 4.4: περιγραφή της δέσμης NuMI που χρησιμοποιείται ως πηγή νετρίνων στον ανιχνευτή MINERvA

Ο ανιχνευτής MINERvA (εικόνα 4.5) τοποθετείται σε ένα σπήλαιο περίπου 100 m από την επιφάνεια. Οι αλληλεπιδράσεις των νετρίνων στη διατομή του μετριοούνται παρατηρώντας τις τροχιές των σωματιδίων που εκπέμπονται όταν τα νετρίνα αλληλεπιδρούν με τον ατομικό πυρήνα του υλικού του ανιχνευτή (άνθρακας, μόλυβδος, σίδηρος, νερό, ήλιο) και του

σπινθηριστή. Το βασικό κομμάτι του ανιχνευτή είναι ένα εξάγωνο επίπεδο που περιβάλλεται από παράλληλους τριγωνικούς σπινθηριστές. Ο συνολικός ανιχνευτής έχει 200 τέτοια επίπεδα, και συνολικά ζυγίζει περίπου 170 τόνους. Οι άξονες των επιπέδων κατευθύνονται παράλληλα προς έναν από τους τρεις προσανατολισμούς, περιστρέφονται το ένα ως προς το άλλο κατά 60° και συμβολίζονται με τα γράμματα X, U και V ανάλογα με τον προσανατολισμό.

Οι αναλύσεις στο πείραμα MINERvA εστιάζονται σε παρατηρήσεις των αλληλεπιδράσεων στον κεντρικό ανιχνευτή, (γενικά αυτός περιλαμβάνει από έναν ανιχνευτή στους τρεις προσανατολισμούς) και είναι απολύτως ευαίσθητος σε σωματίδια που παράγονται κατά τις συγκρούσεις των νετρίνων. Ένα φορτισμένο σωματίδιο που περνάει μέσα από έναν σπινθηριστή παράγει με το σπινθηρισμό φως ανάλογα με την εσωτερική του ενέργεια. Όταν το φως διαπεράσει τις ίνες του υλικού στο σπινθηριστή, που έχουν μέγεθος παρόμοιο με το μήκος κύματος της ακτίνας, οι φθορίζουσες προσμίξεις των ινών ακτινοβολούν φως σε ένα νέο μήκος κύματος (πράσινο), μεγάλο μέρος του οποίου μεταφέρεται μέσω οπτικών ινών. Τα οπτικά καλώδια μεταφέρουν αυτό το φως στο φωτοπολλαπλασιαστή που βρίσκεται ακριβώς κάτω από τον πολλαπλασιαστή.

Τα παραπάνω σήματα χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της αποθηκευμένης ενέργειας των σωματιδίων και την εύρεση της θέσης των σωματιδίων στις δυο διαστάσεις. Επίσης, αυτή η πληροφορία χρησιμοποιείται για να επαναπροσδιοριστεί η ταυτότητα των στοιχειωδών σωματιδίων και των τροχιών τους στις τρεις διαστάσεις, συνδυάζοντας τις προβολές κατά X, U και V ώστε να καθοριστούν τα παράγωγα από τις αλληλεπιδράσεις των νετρίνων. Ο κεντρικός ανιχνευτής περιβάλλεται από θερμιδόμετρα που έχουν εναλλάξ φύλλα μετάλλων και σπινθηριστών και χρησιμοποιούνται για να περιμαζεύουν και να μετράνε την υψηλή ενέργεια των σωματιδίων. Ο ανιχνευτής έχει συλλέξει περισσότερα από 16 εκατομμύρια συμβάντα (events) με νετρίνα μέσα στα τέσσερα χρόνια που λειτουργεί η δέσμη.

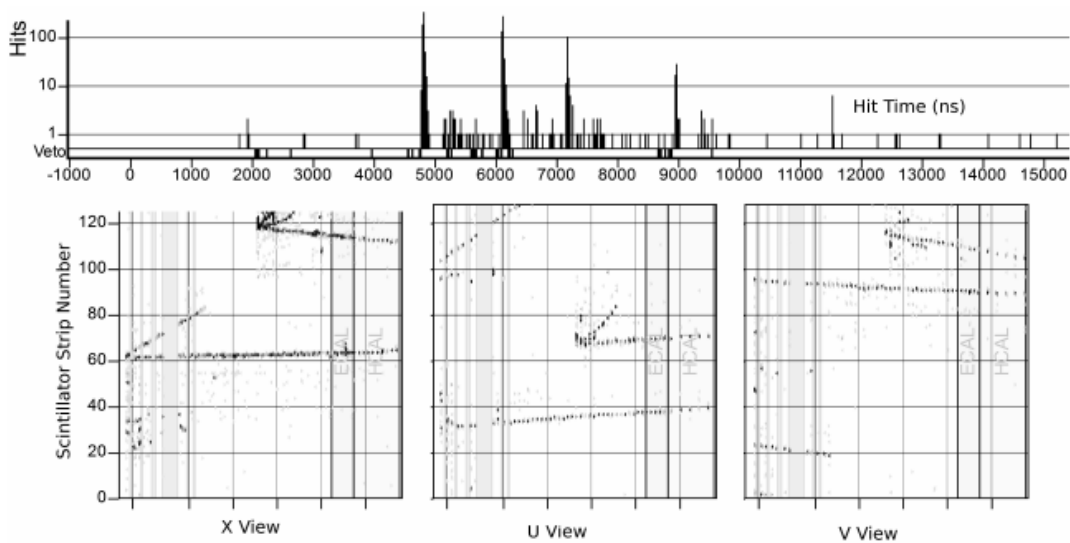


Εικόνα 4.5: ο ανιχνευτής MINERvA: α) φωτογραφία, β) διάγραμμα διατομής του ανιχνευτή γ) συμβάντα στον ανιχνευτή από μια μοναδική ακτίνα παλμών που περιέχει όλα τα είδη των νετρίνων που έχουν αλληλεπιδράσει με το στόχο και το βράχο και έχουν ληφθεί υπόψη στις μετρήσεις. Κάθε pixel περιέχει πληροφορίες για τη θέση και την ενέργεια, ενώ η οθόνη δείχνει μόνο την κεντρική περιοχή του ανιχνευτή

Το «σήμα» για τη μέτρηση είναι οι αλληλεπιδράσεις των φορτισμένων νετρίνων που στην τελική κατάσταση περιέχουν μόνια. Το εύρος της απόστασης αυτών των μιονίων είναι συνήθως αρκετά μέτρα μέσα στον σπινθηριστή, και τέτοια συμβάντα διακρίνονται από τη μεγάλη και ευθεία τροχιά τους. Η αποτελεσματικότητα της επανακατασκευής τέτοιων μακρών τροχιών μιονίων είναι καλύτερη από 95%, και υπάρχει πολύ μικρή πιθανότητα, σχεδόν μηδενική, ιδίως για τους σκοπούς της παρόντος πειράματος, να βρεθεί ένα μόνιο εκτός δέσμης.

Κατά τη διάρκεια του παρόντος πειράματος, τα περισσότερα σήματα προέρχονται από τις αλληλεπιδράσεις των νετρίνων με την ανάστροφη φορά ρεύματος του MINERvA, δηλαδή από τα παραγόμενα μόνια που εισέρχονται κατά την ανάστροφη φορά στον ανιχνευτή. Ένα μικρότερο συστατικό του σήματος είναι από τις αλληλεπιδράσεις των νετρίνων που παράγουν μόνια στην ενεργή περιοχή του ανιχνευτή. Στη μειωμένη ένταση των $2,25 \times 10^{13}$ πρωτονίων ανά παλμό που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα, ένας μέσος όρος 0,81 συμβάντων εμφανίζεται σε κάθε παλμό, μέσω της χρήσης ενός προγράμματος software για το φιλτράρισμα της

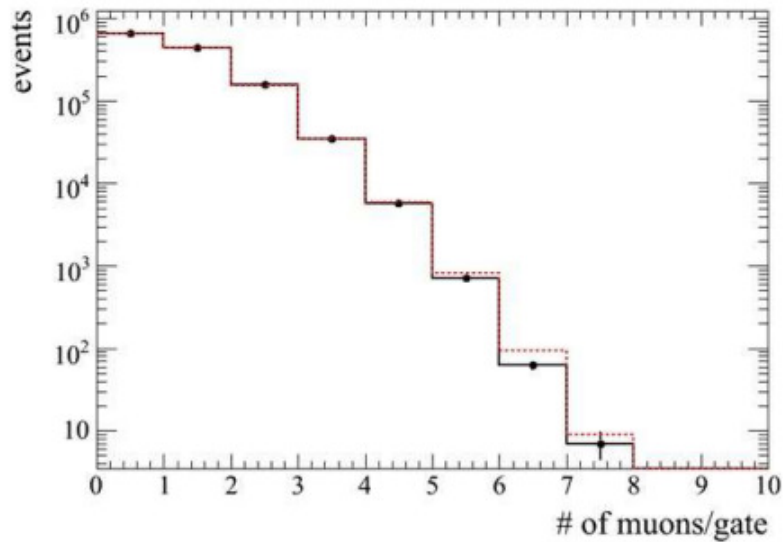
ακτίνας, ώστε να αναγνωριστούν αυτές οι δυο κατηγορίες των μιονίων (τα οποία αποδεικνύουν ότι η ακτίνα υπάρχει, δηλαδή εκπέμπεται). Με ανάλυση χρόνου (time resolution) σε μερικά nanoseconds για τα μίονια που μελετήθηκαν, είναι δυνατό να πάρουμε πολλαπλά συμβάντα ανά 8,1 μsec στα μέγιστα της δέσμης. Ένα παράδειγμα πολλαπλών συμβάντων που οφείλεται σε μια μόνο δέσμη ακτίνας φαίνεται στην εικόνα 4.5. Η εικόνα 4.6 επίσης δείχνει ένα ιστόγραμμα του αριθμού των μιονίων που παρατηρούνται ανά παλμό, όταν η ακτίνα δεν είναι μορφοποιημένη. Η μικρή απόκλιση ανάμεσα στα δεδομένα και η κατανομή Poisson δείχνει τη μη συσχετιζόμενη φύση των παρατηρήσεων, κάτι που αναλύεται παρακάτω στη στατιστική του πειράματος.



Εικόνα 4.6: Παράδειγμα εικόνων ανίχνευσης από τον ανιχνευτή MINERvA. Το πάνω σχέδιο δείχνει 6 διαφορετικά συμβάντα να λαμβάνουν χώρα σε διαφορετικούς χρόνους κατά τη διάρκεια 8,1 μs ενός παλμού με νετρίνα. Οι μετρήσεις του χρόνου τα διαχωρίζουν εύκολα. Μια υπέρθεση των ανιχνεύσεων αυτών των 6 παρατηρήσεων φαίνεται στα επίπεδα X, U και V ως συνάρτηση της μονάδας στο πλήθος των κατώτερων επιπέδων. Ο οριζόντιος άξονας είναι η απόσταση (περίπου 3,6 cm/μονάδα) κατά μήκος του άξονα του κεντρικού ανιχνευτή, και ο κάθετος άξονας είναι η απόσταση (περίπου 1,8 cm ανά λωρίδα) σε διευθύνσεις κάθετες στον κεντρικό άξονα

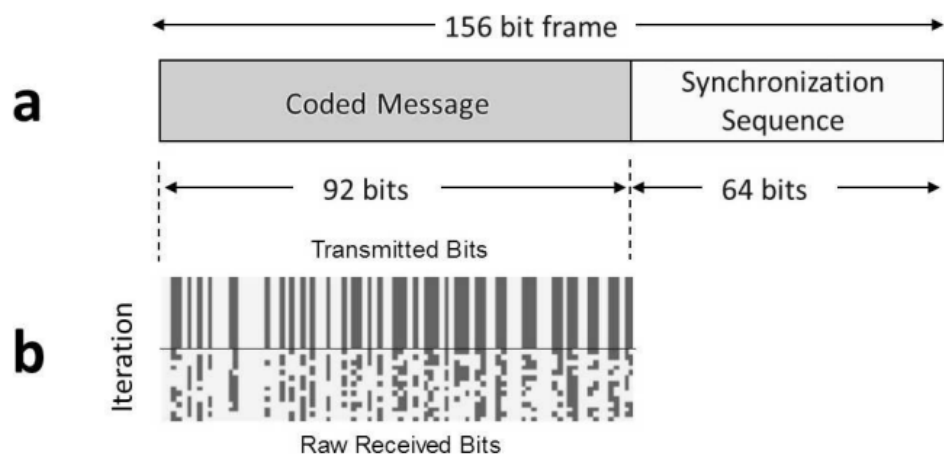
Η απλούστερη μέθοδος για κωδικοποίηση των πληροφοριών σχετικά με την ακτίνα των νετρίνων είναι η μέθοδος του 0 και του 1, δηλαδή η αναπαράσταση με το δυαδικό σύστημα: το «1» και το «0» αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα την παρουσία ή απουσία της ακτινοβολίας. Στη δέσμη NuMI, η παρουσία – απουσία ακτινοβολίας ελέγχεται από την ακτίνα των πρωτονίων από τον κύριο injector. Επειδή η ακτίνα έχει καθορισμένη συχνότητα και επειδή υπάρχουν πολλά ανεξάρτητα τμήματα του ανιχνευτή, η πιθανότητα να ανιχνευτεί

παρατήρηση που δεν οφείλεται στην ακτίνα NuMI (όπως για παράδειγμα από κοσμική ακτινοβολία) είναι εξαιρετικά χαμηλή. Γενικά, το «1» αντιστοιχεί σε δέσμη με ανίχνευση ενός ή περισσότερων συμβάντων, ενώ το «0» αντιστοιχεί σε δέσμη χωρίς ανίχνευση συμβάντων.



Εικόνα 4.7: Μιόνια ανά παλμό χωρίς μορφοποίηση της δέσμης και με υψηλότερη ένταση της ακτινοβολίας από αυτή που είναι δυνατή στο συγκεκριμένο πείραμα. Το μαύρο ιστόγραμμα είναι τα δεδομένα και το διακεκομμένο ιστόγραμμα η κατανομή Poisson για τις μετρήσεις. Οι γραμμές των στατιστικών σφαλμάτων σε πολλές περιπτώσεις είναι μικρότερες από τις βούλες των δεδομένων (δηλαδή τα στατιστικά σφάλματα προκύπτουν εξαιρετικά μικρά)

Αν η ύπαρξη των παρατηρήσεων μοντελοποιηθεί ως μια τυχαία διαδικασία Poisson, το κανάλι είναι μαθηματικά ισοδύναμο με το κανάλι μέτρησης φωτονίων (ή Poisson) στη θεωρία των επικοινωνιών για το μοντέλο της άμεσης ανίχνευσης οπτικών επικοινωνιών. Σε αυτό το μοντέλο, η πιθανότητα να μην έχουμε παρατήρηση συμβάντων κατά τη διάρκεια ενός παλμού είναι $e^{-\lambda}$, όπου το λ είναι ο αναμενόμενος αριθμός συμβάντων ανά παλμό όταν η ακτίνα είναι στο «on», δηλαδή υπάρχει διάδοση παλμών. Από τη στιγμή που το σύστημα για την ανίχνευση νετρίνων δεν παράγει σφάλματα όταν δέχεται ένα «0», η πιθανότητα ενός λάθους (bit-error rate, BER) είναι $e^{-\lambda}/2$ θεωρώντας ότι το 0 και το 1 είναι εξίσου πιθανά.



Εικόνα 4.8: Η μορφή και οι αναπαραστάσεις των εκπεμπόμενων δεδομένων: (α) δομή της μορφής της εκπομπής, (β) απεικόνιση των εκπεμπόμενων και εισερχόντων δεδομένων

Η δομή του μηνύματος φαίνεται στην εικόνα 4.7α. Η «νεutrino» με τους 8 χαρακτήρες (neutrino στα αγγλικά) εκφράζεται με ένα συντομευμένο κώδικα 5 bit που προκύπτει παραλείποντας τα πρώτα δυο αριστερά bit στον καθορισμένο κώδικα 7-bit ASCII (American Standard Code for Information Interchange). Αυτό το μήνυμα των 40 bits στη συνέχεια κωδικοποιείται χρησιμοποιώντας τον κώδικα με αναλογία 1/2 και σταθερό μήκος 7, το οποίο, σύμφωνα με τα πρότυπα των NASA/ESA, επεκτείνει το μήνυμα σε 92 bits. Αυτό το κωδικοποιημένο μήνυμα ενώνεται με ένα ψευδοθόρυβο 64 bits (PN) σε συγχρονισμό ώστε να σχηματίζεται ένα στιγμιότυπο 156 bits. Αυτό το στιγμιότυπο επαναλαμβάνεται για όλη τη χρονική διάρκεια του πειράματος. Ο επιταχυντής σε όλη τη διάρκεια της μελέτης λειτουργούσε στους 25 παλμούς ανά 2,2 sec, ακολουθούμενο από παύση 6,267 sec ώστε να σχηματίσει έναν κύκλο 61,267 sec ($25 \times 2,2 + 6,267 = 61,267$).

Τα δεδομένα που λαμβάνονται αντιστοιχούν σε 3454 εγγραφές και εκτείνονται σε ένα διάστημα μόλις 142 λεπτών, μαζί με τις διακοπές για κάθε εγγραφή. Ο ανιχνευτής διαβάζει (δηλαδή θα αναγνώσει) κάθε φορά που δέχεται δεδομένα, ανεξάρτητα από την ύπαρξη ή όχι άλλης ακτίνας. Κάθε εγγραφή περιέχει έναν αριθμό συμβάντων που παρατηρούνται στον ανιχνευτή κατά τη διάρκεια του παλμού.

Η αποκωδικοποίηση του μηνύματος απαιτεί να είναι γνωστές οι θέσεις των στιγμιότυπων μέσα στα δεδομένα. Αυτό επιτυγχάνεται ψάχνοντας τη σειρά των 64 bits (64 bits PN) ως λέξη – κλειδί που σημαίνει το τέλος του κάθε στιγμιότυπου. Αν η συνολική σειρά των εκπεμπόμενων bits είναι x_0, x_1, \dots, x_{N-1} , και K_0, \dots, K_{N-1} τα ληφθέντα μέτρα (counts), τότε τα K_i θα πρέπει να είναι μια τυχαία μεταβλητή Poisson, με παραμέτρους $\lambda x_i + \lambda_0$, όπου λ είναι

ο αναμενόμενος αριθμός συμβάντων από έναν εκπεμπόμενο παλμό, και $\lambda_0 \ll \lambda$ είναι ο αριθμός των συμβάντων στο υπόβαθρο, ο οποίος είναι κοντά στο μηδέν για το συγκεκριμένο πείραμα. Αν τα μέτρα (counts) είναι βάσει συνθήκης ανεξάρτητα μεταξύ τους (δηλαδή τα δεδομένα x_0, x_1, \dots, x_{N-1}), το μοντέλο που παίρνουμε τότε είναι μαθηματικά ισοδύναμο με την άμεση ανίχνευση ενός οπτικού καναλιού. Το τέλος μιας γνωστής sync λέξης, όπως για παράδειγμα S_0, S_1, \dots, S_{L-1} αναζητείται βρίσκοντας το μέγιστο στη λογαριθμική στατιστική:

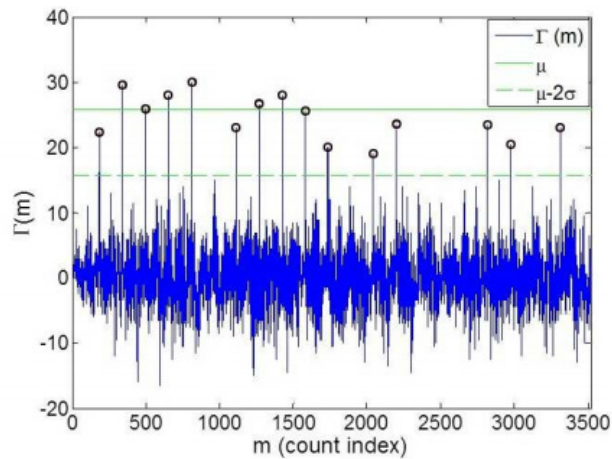
$$\Lambda(m) = \sum_{j=0}^{L-1} \left(S_{L-1-j} - \frac{1}{2} \right) K_{m-j}$$

Όμως, για να σιγουρέψουμε το συγχρονισμό των συμβόλων κατά τη διάρκεια του στιγμιότυπου, ψάχνουμε για δυο συγχρονισμένες λέξεις που απέχουν ακριβώς $m_0 = 156$ μονάδες (counts), έτσι ώστε ο στατιστικός έλεγχος να γίνει ίσος με $\Gamma(m) = \Lambda(m) + \Lambda(m - m_0)$. Στο τέλος της συγχρονισμένης λέξης, η στατιστική δίνει μια μέση τιμή $\mu = L\lambda/2$ και διακύμανση $\sigma^2 = L\lambda/2$. Για να ανιχνεύσουμε ένα στιγμιότυπο, ψάχνουμε για τέτοιο m ώστε $\Gamma(m) \geq \mu - 2\sigma$. Αν τα μισά bits είναι μηδέν και $\lambda_0 \approx 0$, το λ εκτιμάται σημειώνοντας ότι 1402 συμβάντα έχουν παρατηρηθεί σε 3454 μετρήσεις, οπότε $\lambda \approx 2 \times 1402/3454 = 0,81$.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.8, η στατιστική ανάλυση αναγνωρίζει 15 στιγμιότυπα με σύμβολα συγχρονισμού, τα οποία παριστάνονται με κενούς κύκλους. Υπάρχουν ξεκάθαρα και άλλα στιγμιότυπα που μπορεί να αποκωδικοποιηθούν επιτυχώς με πιο αναλυτικές διαδικασίες, εν τούτοις ξεφεύγουν από την παρούσα έρευνα.

Τα 15 συγχρονισμένα στιγμιότυπα χρησιμοποιούνται για την ανάκτηση του μηνύματος και τον υπολογισμό των ιδιοτήτων του καναλιού. Για κάθε μη μηδενική μέτρηση, το bit υπολογίζεται να έχει την τιμή 1 ή 0. Η εικόνα 4.7β απεικονίζει την ανάκτηση του μηνύματος σε εικονική μορφή, με κάθε γραμμή από τα pixel στο πάνω μισό της εικόνας να παριστάνει τα εκπεμπόμενα δεδομένα σε ένα από τα 15 στιγμιότυπα, όπου τα σκοτεινά pixel αντιστοιχούν στη μονάδα και τα φωτεινά στο μηδέν. Στο κάτω μισό της εικόνας φαίνεται η απόκριση που υπολογίζεται από τα bit στο δέκτη, όπου τα περισσότερα (78%) έχουν ληφθεί σωστά. Τα σφάλματα μπορούν να μειώνονται συνδυάζοντας πολλαπλά στιγμιότυπα και χρησιμοποιώντας τον κατάλληλο κώδικα για τον έλεγχο σφαλμάτων. Ο προφανής τρόπος για το συνδυασμό των στιγμιότυπων είναι να προσθέσουμε τις μονάδες (counts) από τα ληφθέντα συμβάντα. Στην πραγματικότητα, το εκπεμπόμενο μήνυμα ανακτάται τέλεια αν το αποτέλεσμα από όλα τα στιγμιότυπα συγκεντρώνεται, από τη στιγμή που τα συμβάντα που

παρατηρούνται σε κάθε στήλη αντιπροσωπεύουν το 1 και όταν δεν υπάρχουν συμβάντα η τιμή είναι 0. Κατά συνέπεια, το αποτέλεσμα αποδεικνύει την ικανότητα της ανταλλαγής πληροφοριών με τη χρήση νετρίνων.



Εικόνα 4.9: Η στατιστική που χρησιμοποιήθηκε για το συγχρονισμό των στιγμιότυπων. Οι κενοί κύκλοι αντιστοιχούν στις θέσεις των σωστά ανακατασκευασμένων στιγμιότυπων. Κάποια στιγμιότυπα δεν βρίσκονται σωστά λόγω του νεκρού χρόνου του επιταχυντή.

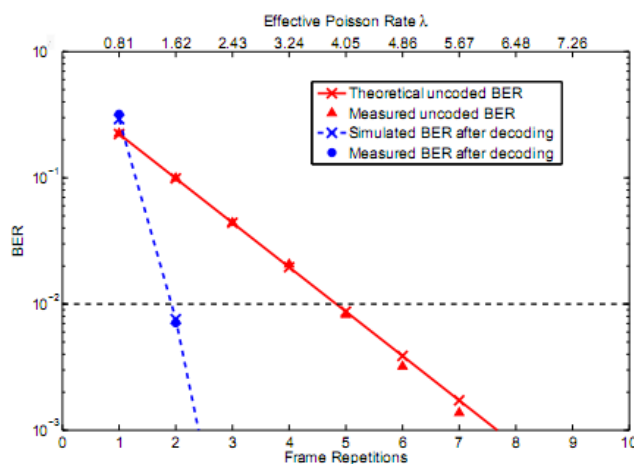
Η εικόνα 4.9 παριστάνει τη σχέση ανάμεσα στον αριθμό των συνδυασμένων στιγμιότυπων και το μη κωδικοποιημένο ρυθμό σφαλμάτων των bits (BER) του καναλιού, το οποίο είναι το μέσο κλάσμα των μη σωστά ληφθέντων bits. Επίσης φαίνεται για σύγκριση η θεωρητική τιμή για την καμπύλη Poisson με $BER = e^{-\lambda}/2$ για $\lambda = 0.81$. Τα μετρούμενα αποτελέσματα είναι σε συμφωνία με το μοντέλο Poisson. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι το 99% των εκπεμπόμενων bits αποκωδικοποιούνται σωστά χρησιμοποιώντας μόνο 5 στιγμιότυπα. Επίσης δεν παρατηρήθηκαν καθόλου λάθη για κανέναν συνδυασμό από 9 ή περισσότερα στιγμιότυπα.

Η εικόνα 4.9 επίσης δείχνει το BER μετά από την αποκωδικοποίηση error – control με τον αλγόριθμο του Viterbi. Αυτές οι τιμές είναι σε καλή συμφωνία με τις αντίστοιχες της προσομοίωσης του καναλιού Poisson για $\lambda = 0.81$ για τον ίδιο τύπο αποκωδικοποίησης. Σε αυτή την περίπτωση, περίπου το 99% των εκπεμπόμενων bits λαμβάνονται σωστά μετά από μόλις 2 στιγμιότυπα και δεν παρατηρούνται λάθη αποκωδικοποίησης όταν συνδυάζονται 3 στιγμιότυπα.

Η θεωρητική χωρητικότητα του καναλιού μέτρησης των φωτονίων με τη διαμόρφωση OOK και ρυθμό υποβάθρου $\lambda_0 = 0$ δίνεται από τη σχέση

$$C/B = \log_2 \left[1 + (1 - e^{-\lambda}) \cdot \exp \left(-\frac{\lambda}{e^{\lambda} - 1} \right) \right] \text{ (bits/pulse)}$$

όπου B είναι οι παλμοί ανά δευτερόλεπτο, C είναι η χωρητικότητα του καναλιού (bits/sec) και λ είναι ο μέσος αριθμός των συμβάντων ανά παλμό όπως ορίστηκε παραπάνω. Στο παρόν πείραμα $\lambda \approx 0.81$, το οποίο υπολογίζεται θεωρητικά ότι αντιστοιχεί σε χωρητικότητα $C/B \approx 0,37$ bits ανά παλμό. Για σύγκριση, το μήνυμα επίσης αποκωδικοποιήθηκε με 1% σφάλμα μετά από δυο επαναλήψεις ή για την εκπομπή $2 \times 92 = 184$ παλμών. Από τη στιγμή που εκπέμπονται μόνο 40 bits δεδομένων, ο ρυθμός των πειραματικών δεδομένων μπορεί να υπολογιστεί σε 0,22 bits ανά παλμό, ή περισσότερο από το μισό της θεωρητικής χωρητικότητας των 0,37 bits ανά παλμό. Επίσης, μιας και ο ρυθμός των παλμών είναι περίπου 1/2.2 bits ανά δευτερόλεπτο, ο πειραματικός ρυθμός δεδομένων και με σφάλμα περίπου 1% μπορεί να εκτιμηθεί περίπου στην τιμή $0,22 \times (1/2.2) \approx 0,1$ bits ανά δευτερόλεπτο. Παρατηρούμε ότι αυτή είναι μια πρόχειρη εκτίμηση, καθώς υπάρχουν μόνο 105 συνδυασμοί από 2 στιγμιότυπα που επιλέγονται από τα αρχικά 15 και αυτοί συνδυασμοί δεν αντιστοιχούν σε ανεξάρτητες μετρήσεις, λόγω επαναχρησιμοποίησης των στιγμιότυπων κατά τη σύνθεση των συνδυασμών.

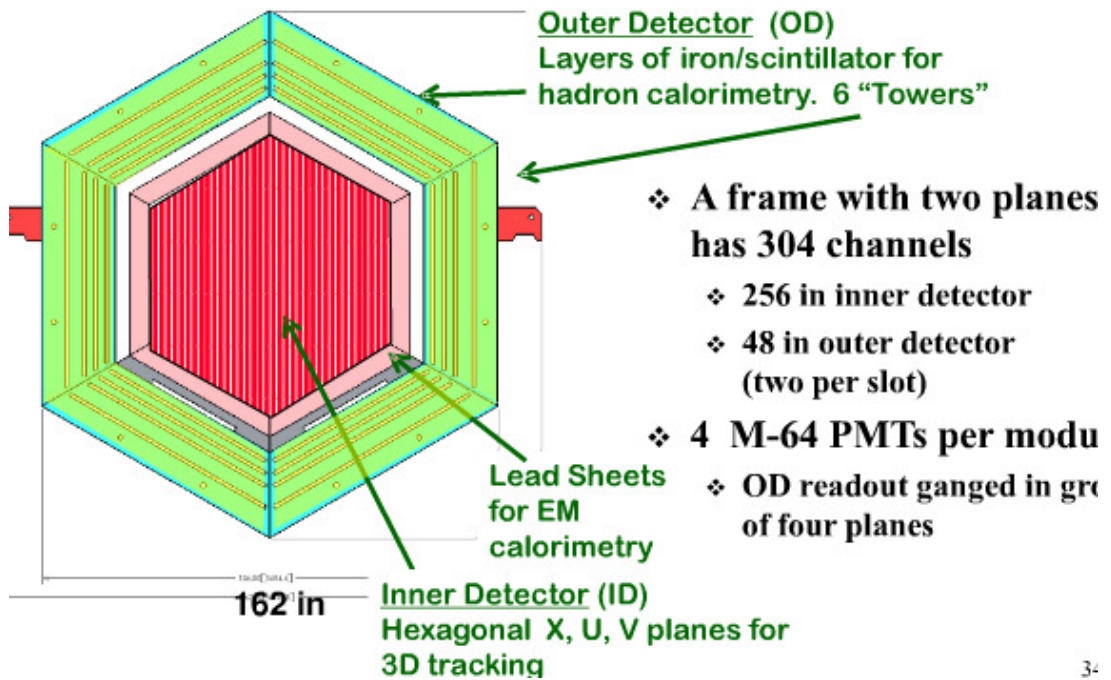


Εικόνα 4.10: Σύγκριση ανάμεσα στους προβλεπόμενους και τους μετρούμενους ρυθμούς σφαλμάτων (bit-errors), με και χωρίς κωδικοποίηση ελέγχου σφάλματος

Συνοπτικά, χρησιμοποιήθηκε η ακτίνα NuMI από το FermiLab, μαζί με τον ανιχνευτή MINERvA για να αναπαρασταθεί η ικανότητα για ψηφιακή επικοινωνία χρησιμοποιώντας νετρίνα. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν πολλές μετρήσεις με ρυθμό δεδομένων περίπου στο 0,1 Hz, ρυθμό σφάλματος μικρότερο του 1% για εκπομπή νετρίνων κατά μήκος λίγων μέτρων συμπαγούς βράχου. Αυτό το αποτέλεσμα αναδεικνύει τη σκοπιμότητα του πειράματος, αλλά

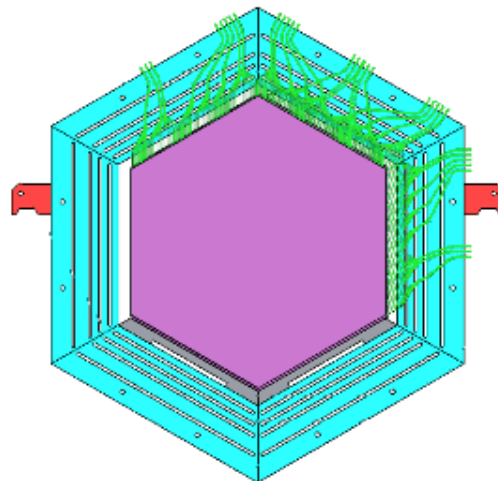
επίσης και τις σημαντικές βελτιώσεις που έγιναν τα τελευταία χρόνια τόσο στις δέσμες νετρίνων όσο και στους ανιχνευτές που είναι απαραίτητοι για πρακτικές εφαρμογές.

Για καλύτερη κατανόηση του αναγνώστη, στις παρακάτω εικόνες φαίνεται πιο αναλυτικά η δομή του ανιχνευτή MINERνA:

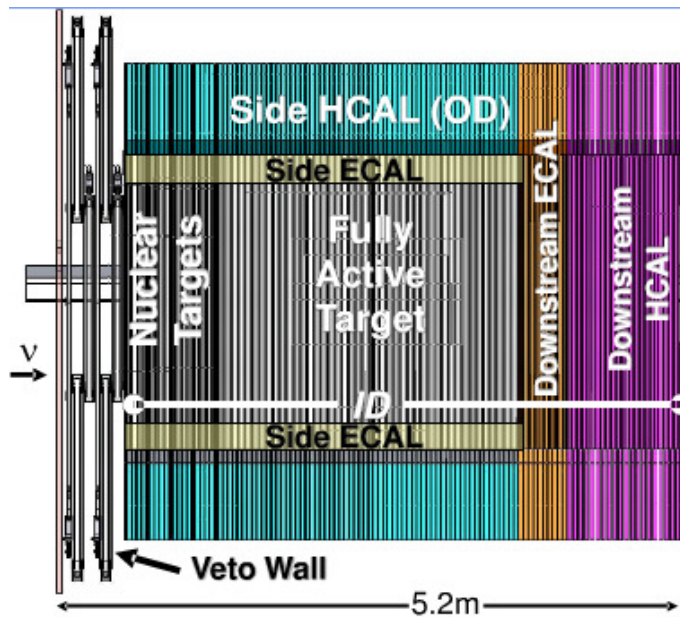


34

Εικόνα 4.11: Ανιχνευτές στον ανιχνευτή MINERνA στα διάφορα επίπεδα



Εικόνα 4.12: Δομή των θερμιδομέτρων: τα modules δημιουργούνται προσθέτοντας απορροφητές: ένας 1'' απορροφητής από ασάλι και ένας επίπεδος σπινθηριστής σε DS HCAL και δύο 5/64'' απορροφητές από μόλυβδο και δυο σπινθηριστές σε DS ECAL



Εικόνα 4.13: Διαφορετική ενεργότητα των διαφόρων στρωμάτων του ανιχνευτή. Γενικά χρησιμοποιούνται πολλά λεπτά modules που, τοποθετημένα το ένα πάνω στο άλλο συγκροτούν τον ανιχνευτή, ενώ υπάρχουν διαφορετικοί απορροφητές για διαφορετικές περιοχές του ανιχνευτή

Ακολουθεί ένας πίνακας με τον αριθμό των στιγμιότυπων που απαιτούνται και τους σπινθηριστές, ανάλογα με την περιοχή του ανιχνευτή:

	Στιγμιότυπα	Σπινθηριστές
Πυρηνικοί Στόχοι	18	36
Ενεργός Στόχος	60	120
DDS ECAL	10	20
DS HCAL	20	20
Συνολικά	108	196

Πίνακας 4.1: Αριθμός στιγμιότυπων ανάλογα με την περιοχή του ανιχνευτή

4.3 Περισσότερες πληροφορίες για τις εγκαταστάσεις του πειράματος

Το *FermiLab* (Fermi National Accelerator Laboratory) βρίσκεται στο Ιλινόις, κοντά στο Σικάγο και ανήκει στο Εθνικό Τμήμα Έρευνας για την Ενέργεια και ειδικεύεται στα

Στοιχειώδη Σωματίδια Υψηλής Ενέργειας. Ιδρύθηκε το 1967 και το 1974 άλλαξε το όνομά του προς τιμή του Enrico Fermi, του γνωστού Ιταλού φυσικού. Διαθέτει το δεύτερο μεγαλύτερο επιταχυντή στον κόσμο το Tevatron (ο πρώτος είναι ο LHC του CERN), ενώ πολλά σημαντικά πειράματα διεξάγονται σε αυτό, με ιδιαίτερη έμφαση στα νετρίνα (MiniBooNE, SciBooNE, MINOS, MINERvA, NOVA).

Η δέσμη *NuMI* δεν δημιουργήθηκε για το συγκεκριμένο πείραμα, αλλά προϋπήρχε για την ανίχνευση δέσμης νετρίνων από τον ανιχνευτή **MINOS**, του οποίου σκοπός είναι να ανιχνεύει και να αναλύει νετρίνα, ώστε να βελτιωθεί η έρευνα σε αυτόν τον τομέα.



Εικόνα 4.14: Ανιχνευτής MINOS στο FermiLab

Να σημειωθεί ότι στο πείραμα υπάρχει και ελληνική συμμετοχή. Είναι προφανές ότι ένα πρόγραμμα τέτοιου μεγέθους θα δημιουργεί συνεργασίες ανάμεσα σε εργαστήρια πολλών πανεπιστημίων στον κόσμο. Ένα από τα συνεργαζόμενα εργαστήρια είναι το Πανεπιστήμιο Αθηνών με τους Δ. Δρακουλάκο, Π. Σταμουλή, Γ. Τζανάκο και Μ Ζώη.

4.4 Τελευταία νέα για το πείραμα, αποδοχή από τον επιστημονικό κόσμο

Στο σημείο αυτό να αναφέρουμε ότι ο ανιχνευτής MINERvA δεν κατασκευάστηκε μόνο για το συγκριμένο πείραμα, καθώς συμμετέχει σε διάφορα project και πειράματα που διεξάγονται στο FermiLab.

Η κατασκευή του ολοκληρώθηκε το Μάρτιο του 2010 και άρχισε τη δοκιμαστική λειτουργία του σε αλληλεπιδράσεις λίγων GeV με νετρίνα και αντινετρίνα μέχρι τον Απρίλιο του 2012. Τα πρώτα αποτελέσματά του είχαν να κάνουν με τη μελέτη της ελαστικής σκέδασης σε διαδικασίες με πολλούς πυρήνες. Αυτές οι μελέτες έδωσαν περισσότερες πληροφορίες για την ενεργειακή αναδόμηση σε πειράματα με ταλαντώσεις νετρίνων.

Το καλοκαίρι του 2013 θα γίνει αναβάθμιση της δέσμης των νετρίνων με μία νέα υψηλότερης ενέργειας. Οι υψηλότερες ενέργειες και οι μεγαλύτεροι ρυθμοί θα μας βοηθήσουν να μετρήσουμε το EMC φαινόμενο στα νετρίνα το οποίο θα δώσει φως για τη μελέτη της τροποποίησης των πυρήνων και τις πυρηνικές ιδιότητες. Το site του ανιχνευτή είναι το: <http://minerva.fnal.gov/>

Τον Απρίλιο του 2011 το προσωπικό του MINERvA έλαβε το βραβείο της Secretary of Energy's Award for Achievement για την κατασκευή του. Ο λόγος για τη βράβευση ήταν ότι η κατασκευή του ολοκληρώθηκε στην ώρα της, σύμφωνα με το χρονοδιάγραμμα και κόστισε 9% λιγότερο από τον προϋπολογισμό. Για τη δημιουργία του δούλεψαν 100 φυσικοί από 25 διαφορετικά ινστιτούτα. «Το βραβείο αναγνωρίζει την τεχνική και διαχειριστική αρτιότητα του FermiLab που μπορεί να δημιουργήσει τόσο σημαντικά πράγματα δουλεύοντας με ομάδες πανεπιστημίων. Το παράδειγμα του MINERvA δίνει το στίγμα για το πώς θα πρέπει τα διάφορα εργαστήρια να συνεργάζονται μεταξύ τους», αναφέρει ο υπεύθυνος επικοινωνίας του FermiLab, Kevin McFarland.



Εικόνα 4.15: Προσωπικό του MINERvA

Τα πειράματα στα οποία χρησιμοποιείται το MINERvA αφορούν τη μελέτη των παρακάτω ιδιοτήτων των νετρίνων που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

- Quasi-elastic
- Resonance Production – 1π
- Resonance/transition Region – $n\pi$ resonance to DIS
- Deep-Inelastic Scattering

- Coherent Pion Production
- Strange and Charm Particle Production
- σT , Structure Functions and PDFs
 - $s(x)$ and $c(x)$
 - High- x parton distribution functions
- Nuclear Effects
- Generalized Parton Distributions

Η τελευταία ανακοίνωση έγινε το Μάιο του 2013 και αφορά μια μελέτη του φορτισμένου νετρίνου του μιονίου για ημι-ελαστικά συμβάντα σε τμήματα του σπινθηριστή στα εσωτερικά τμήματα του MINERvA χρησιμοποιώντας τη δέσμη NuMI στο FermiLab. Μετρούνταν η ροή κατά μήκος του άξονα και μελετήθηκε το χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο των σωματιδίων στην τελική κατάσταση. Παρατήθηκαν αποκλίσεις ανάμεσα στις μετρούμενες τιμές και τις αναμενόμενες, οι οποίες είχαν προκύψει από ένα μοντέλο για ανεξάρτητα νουκλεόνια σε ένα σχετικιστικό φερμιονικό υγρό. Επίσης παρατηρήθηκε ένα μέγιστο της ενέργειας κοντά στην κορυφή, που αποτελούνταν από πολλά φωτόνια στην τελική κατάσταση.

Βιβλιογραφία – Αναφορές 4^ο Κεφαλαίου

Stancil D.D., Adamson P., Alania M., Aliaga L., “Demonstration of communication using neutrinos”, Modern Physics Letters A, Volume 17, Issue 12, 20 April 2012

<http://www.docstoc.com/docs/132709628/MINERvA-Sem-June-MINERvA-Fermilab>

<http://indico.cern.ch/getFile.py/access?contribId=67&sessionId=0&resId=0&materialId=poster&confId=147174>

<http://minerva.fnal.gov/>

Κεφάλαιο 5 – Συμπεράσματα

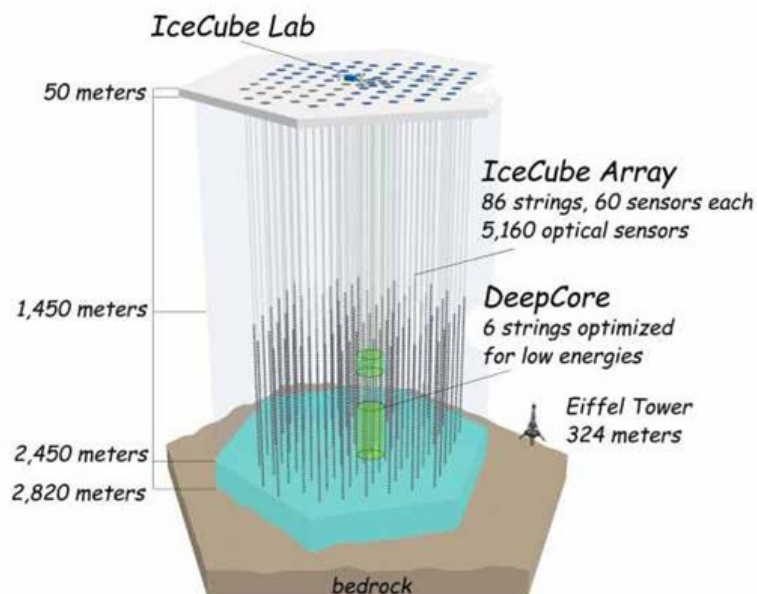
Γενικά οι επιστήμονες πάντα ενθουσιάζονταν με αυτό το παράξενο σωματίδιο – φάντασμα και ήθελαν να βρουν εφαρμογές ώστε να το χρησιμοποιήσουν. Υπάρχουν διάφοροι ανιχνευτές νετρίνων ανά τον κόσμο, για την ανίχνευση της κοσμικής ακτινοβολίας και ίχνη εξωγήινων πολιτισμών, ο μεγαλύτερος της Ευρώπης μάλιστα υπάρχει στον υποθαλάσσιο χώρο ανατολικά της Πύλου, ο Νέστωρ.

Όσον αφορά στο πείραμα, οι φυσικοί ασφαλώς είναι ευχαριστημένοι με τα αποτελέσματα. Η δοκιμή έδειξε ότι οι επιστήμονες μπορούν να διαμορφώσουν δέσμες νετρίνων για να στείλουν μηνύματα και ότι οι ανιχνευτές τους μπορούν να διαβάσουν αυτά τα μηνύματα, τουλάχιστον από 600 μέτρα μακριά. Ωστόσο, για να διαδοθεί η μέθοδος θα πρέπει να καλύψει μεγαλύτερες αποστάσεις.

Γενικά, εκτιμάται ότι οι επικοινωνίες σε μεγάλες αποστάσεις με χρήση νετρίνων θα είναι πιο εύκολες για τους ανιχνευτές που μπορούν να αναγνωρίζουν αλληλεπιδράσεις σε μεγαλύτερο στόχο από αυτόν που είναι ορατός στο MINERvA και ακτίνες με μεγαλύτερη ένταση από τις ακτίνες υψηλής ενέργειας του NuMI, γιατί η ακτίνα γίνεται πιο αραιή και ο ρυθμός αλληλεπίδρασης των νετρίνων αυξάνεται με την ενέργεια των νετρίνων.

Δηλαδή, όπως και τα ραδιοκύματα, έτσι και οι ακτίνες νετρίνων απλώνουν καθώς ταξιδεύουν. Τελικά το σήμα χάνεται σε μεγάλη απόσταση. Μέχρι τη δημιουργία πιο έντονων δεσμών ακτίνων νετρίνων ή την οικοδόμηση πιο ισχυρών ανιχνευτών ο στόχος της χρήσης των νετρίνων για να χρησιμοποιηθούν ώστε να επικοινωνούμε με τους ανθρώπους κάτω από τη θάλασσα ή έξω από την τροχιά της Γης θα παραμείνει μακριά.

Να αναφέρουμε ότι ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν διάφοροι μεγάλοι ανιχνευτές, όπως για παράδειγμα ο Ice Cube στην Ανταρκτική (<http://iccube.wisc.edu/>), που χρησιμοποιεί τους πάγους για να ανιχνεύει συμβάντα και τα μόνια που παράγονται κατευθείαν στις ακτίνες των νετρίνων. Πρόκειται για το πρώτο τηλεσκόπιο για κοσμικά νετρίνα, του οποίου η κατασκευή ολοκληρώθηκε το 2010



Εικόνα 5.1: Ανιχνευτής κοσμικών νετρίνων IceCube

Τα τελευταία 15 περίπου χρόνια, με τη λειτουργία ενός υπερσύγχρονου και πρωτοποριακού ερευνητικού πιλοτικού έργου με την ονομασία «NESTOR» (Neutrino Extended Submarine Telescope with Oceanographic Research), η Ελλάδα θέτει σημαντική υποψηφιότητα για τη διεκδίκηση ενός μελλοντικού Νόμπελ φυσικής. Από το 2003 το πιλοτικό πρόγραμμα «NESTOR» λειτουργεί ως μέρος του Ινστιτούτου Αστροσωματιδιακής Φυσικής του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, με διευθυντή τον καθηγητή Λεωνίδα Ρεσβάνη. Η λειτουργία του Ινστιτούτου καταδεικνύει τη θέληση της χώρας μας να αποτελέσει, στα αμέσως επόμενα χρόνια, το επίκεντρο της παγκόσμιας επιστημονικής πρωτοπορίας στην εφαρμογή της Αστρονομίας νετρίνων, μέσω της πόντισης του υποβρύχιου Τηλεσκοπίου νετρίνων διαστάσεων κυβικού χιλιομέτρου 48 km ανοιχτά της Πύλου.

Έξω από τη Σφακτηρία υπάρχει μια μεγάλη υποθαλάσσια πεδιάδα σε βάθος 3000 m, στη συνέχεια μια δεύτερη στα 4500 m και λίγο πιο μακριά βρίσκεται το φρέαρ του Οινουσών με βάθος 5200 m, που είναι το βαθύτερο σημείο της Μεσογείου. Σε αυτές τις περιοχές βρίσκεται το NESTOR, το οποίο στην τελική του μορφή (που δεν έχει ολοκληρωθεί ακόμα) θα αποτελείται από 50 δωδεκάροφους πύργους με συνολικό ύψος μεγαλύτερο από τον πύργο του Άιφελ και σε απόσταση 150 m μεταξύ τους. Το δάπεδο κάθε ορόφου θα έχει σχήμα εξαγώνου με ευαίσθητους φωτοπολλαπλασιαστές στην κάθε του γωνία, που θα ανιχνεύσουν τη φωτεινή λάμψη (ακτινοβολία Τσερένκοβ) που θα εκπέμπεται όταν κάποιο νεutrίνο αλληλεπιδράσει με τα άτομα του νερού της θάλασσας.

Βιβλιογραφία – Αναφορές 5^ο Κεφαλαίου

<http://icecube.wisc.edu/>

<http://www.nestor.org.gr>