



**ΤΕΙ ΠΑΤΡΑΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ**



**ΘΕΜΑ: ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ  
ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ HALL.**

ΦΟΙΤΗΤΕΣ: Αγγέλης Σταμούλης

Σκιαδάς Παναγιώτης

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: Δροσόπουλος Αναστάσιος

ΠΑΤΡΑ 2013

## Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον κ. Δροσόπουλο Αναστάσιο καθώς και τον κ. Κατσαϊτη Ανδρέα για την στήριξη και την πολύτιμη βοήθεια τους που μας παρείχαν καθόλι την διάρκεια της πτυχιακής μας εργασίας. Επίσης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε για ακόμη μία φορά τον κ. Δροσόπουλο Αναστάσιο για την δυνατότητα που μας έδωσε να κατασκευάσουμε την διάταξη μας στο εργαστήριο της Ηλεκτροτεχνίας. Τέλος ευχαριστούμε τους γονείς μας που μας στήριξαν καθόλι τη διάρκεια των σπουδών μας.

## Περίληψη

Σκοπός της πτυχιακής μας εργασίας είναι να κατασκευαστεί μια διάταξη για την μέτρηση μαγνητικού πεδίου, η οποία θα είναι βασισμένη στον αισθητήρα Hall. Στο πρώτο κεφάλαιο θα κάνουμε μια ιστορική ανάδρομη του μαγνητισμού, από την αρχαιότητα έως το σήμερα. Στο δεύτερο κεφάλαιο θα αναλυθούν οι βασικότερες έννοιες του μαγνητισμού, όπως μεγέθη και μονάδες. Στην συνέχεια θα γίνει μία ανάλυση για το μαγνητικό πεδίο, το μαγνητισμό, τον παραμαγνητισμό, τη μαγνήτιση, το διαμαγνητισμό και για τον σιδηρομαγνητισμό. Τέλος στο δεύτερο κεφάλαιο θα αναφερθούμε στο φαινόμενο Hall. Στο τρίτο κεφάλαιο θα δείξουμε με λεπτομέρειες τον τρόπο κατασκευής της διάταξης. Θα αναφέρουμε με λεπτομέρεια τα στοιχεία από τα οποία θα αποτελείται και θα δείξουμε τον τρόπο λειτουργίας της διάταξης. Έπειτα θα αναλύσουμε τα πειραματικά αποτελέσματα και θα αναφερθούμε στα συμπεράσματα.

## Περιεχόμενα

|   |    |
|---|----|
| 1. Η ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΡΧΑΙΟΤΗΤΑ ΣΤΟ ΣΗΜΕΡΑ..... | 5  |
| 1.1 Ο μαγνητισμός στην αρχαιότητα .....                         | 5  |
| 1.2 Ο μαγνητισμός τον 19ο αιώνα .....                           | 6  |
| 1.3 Η εξέλιξη του μαγνητισμού στον 20 <sup>ο</sup> αιώνα .....  | 11 |
| 2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ .....                            | 13 |
| 2.1 Εισαγωγή .....  | 13 |
| 2.2 Μεγέθη και μονάδες.....                                     | 14 |
| 2.3 Μαγνητικό πεδίο .....                                       | 16 |
| 2.4 Μαγνητικό πεδίο της γης .....                               | 21 |
| 2.5 Φαινόμενο HALL .....  | 24 |
| 2.6 Παραμαγνητισμός.....  | 28 |
| 2.7 Διαμαγνητισμός.....   | 31 |
| 2.8 Σιδηρομαγνητισμός.....                                      | 32 |
| 2.9 Μαγνήτιση .....   | 35 |
| 3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ-ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ .....          | 37 |
| 3.1 Ανάλυση κυκλώματος.....                                     | 37 |
| 3.1.1 Περιγραφή αισθητήρα Hall .....                            | 37 |
| 3.1.2 Λειτουργία του αισθητήρα Hall.....                        | 39 |
| 3.2 Αρχή λειτουργίας διάταξης.....                              | 40 |
| 3.3 Μετρήσεις.....  | 44 |
| 3.4 Συμπεράσματα μετρήσεων.....                                 | 52 |
| 4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....  | 53 |

# 1. Η ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΡΧΑΙΟΤΗΤΑ ΣΤΟ ΣΗΜΕΡΑ

## 1.1 Ο μαγνητισμός στην αρχαιότητα

Παρόλο που έχουν περάσει εκατοντάδες χρόνια από την ημέρα που ανακαλύφθηκαν οι μαγνήτες ακόμα και σήμερα δεν έχει γίνει απολύτως σαφές που έγινε η ανακάλυψη. Δύο πολιτισμοί διεκδικούν την πατρότητα : ο ελληνικός και ο κινέζικος.

Όσον αφορά τον δυτικό πολιτισμό, ο μαγνητισμός, καθώς και η προέλευση της λέξης, μας επιστρέφουν στην ελληνική πόλη της Μαγνησίας, η οποία είναι κοντά στα σύνορα της Μακεδονίας Αυτό το διατύπωσε ο Lucretius της Ρώμης 96-53 Π.Χ., στο βιβλίο του "Η φύση των πραγμάτων".

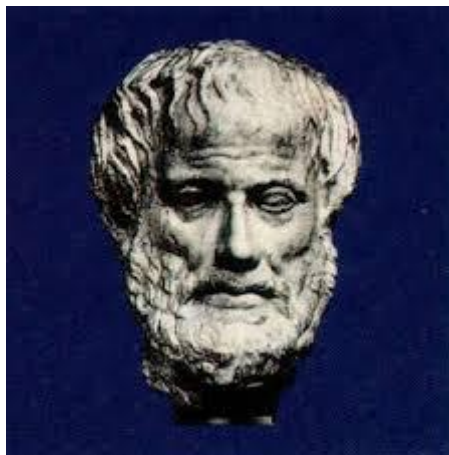
Ο Πλάτωνας έδωσε μια ακριβή περιγραφή των ιδιοτήτων των μαγνητών. Έγραψε ότι "Αυτή η πέτρα όχι μόνο προσελκύει τον σίδηρο, αλλά μεταδίδει σε αυτόν μια παρόμοια δύναμη και μπορείτε να δείτε πολλά κομμάτια σιδήρου να ενώνονται μεταξύ τους για να διαμορφώσουν μια μακριά σειρά. Όλα τα κομμάτια σιδήρου αντλούν τη δύναμη τους από την αρχική πέτρα". Με άλλα λόγια, ανακάλυψε ή τουλάχιστον κατέγραψε για πρώτη φορά ένα φαινόμενο που σήμερα καλείται μαγνητική επαγωγή.

Σύμφωνα με τους Επικούρειους , ο σχηματισμός ενός κενού διαστήματος μεταξύ του μαγνήτη και του αντικειμένου ήταν η αιτία κάποιας μετακίνησης των ατόμων από το σίδηρο προς το μαγνήτη προκειμένου να γεμιστεί το κενό. Συνεπεία αυτής της ατομικής μετακίνησης, ολόκληρο το αντικείμενο κινείται προς το κενό.

Οι Ανιμιστές εξέτασαν το μαγνήτη σαν να έχει μια θεία προέλευση και κατ' αυτό τον τρόπο εξήγησαν όλα τα χαρακτηριστικά του. Αυτή η υπόθεση έγινε αποδεκτή ακόμη και από τον Θαλή και τον Αναξαγόρα και βρήκε πολλούς σημαντικούς οπαδούς μέχρι το δέκατο έβδομο αιώνα.

Ο Διογένης εξήγησε τη μαγνητική έλξη με έναν παράξενο τρόπο. Είπε ότι "Η υγρασία του σιδήρου προσελκύεται στην ξηρότητα του μαγνήτη.

Ο Αριστοτέλης, 384-322 Π.Χ. διατύπωσε ότι ένας μαγνήτης δεν ήταν φυσικά ικανός να προσελκύσει το σίδηρο, αλλά ότι προκάλεσε μια "μαγνητική αρετή" μέσα στο αντικείμενο σιδήρου. Αυτή η μαγνητική αρετή ήταν υπεύθυνη για την πραγματική μετακίνηση.



Συνοπτικά η εξέλιξη του μαγνητισμού στην αρχαία Ελλάδα φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

|             |   |
|-------------|---|
| ΠΛΑΤΩΝΑΣ    | ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΕΠΑΓΩΓΗ                         |
| ΕΠΙΚΟΥΡΕΙΟΙ | ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΜΑΓΝΗΤΩΝ                     |
| ΑΝΙΜΙΣΤΕΣ   | ΘΕΙΑ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ                |
| ΔΙΟΓΕΝΗΣ    | ΥΓΡΑΣΙΑ ΤΟΥ ΣΙΔΗΡΟΥ ΞΗΡΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ |
| ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΗΣ | ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΡΕΤΗ                           |

## 1.2 Ο μαγνητισμός τον 19ο αιώνα

Ο Alexander Neckem, ένας Άγγλος μοναχός το 1175, περιγράφει την λειτουργία μιας πυξίδας, στο βιβλίο του « Σχετικά με την φύση των πραγμάτων. Η πρώτη προσπάθεια να περιγραφούν οι μαγνήτες, ξεφεύγοντας από την προκατάληψη, έγινε από τον Peter Peregrinus από την Maricourt, έναν Γάλλο σταυροφόρο, το 1296. Στο γράμμα του, “Επιστολή σχετικά με τους μαγνήτες” που λέγεται ότι το έγραψε ενώ ήταν φρουρός κατά την διάρκεια της πολιορκίας της πόλης Lucera, αναφέρει όλες τις γνώσεις του σχετικά με το ορυκτό μαγνητίτη, από το οποίο κατασκευάζονταν μέχρι τότε οι πυξίδες, και όλες τις ιδιότητες του.

Αρκετά πειράματα, περιγράφει και ο Peregrinus που θεωρούνται ως η απαρχή της επιστημονικής έρευνας του μαγνητισμού, αρχικά στο γράμμα του αναφέρει πώς θα μπορούσαμε να ξεχωρίσουμε τον μαγνήτη από μια κοινή πέτρα, στην συνέχεια περιγράφει την κατασκευή ενός σφαιρικού μαγνήτη και σχεδιάζει στην επιφάνειά του τις γραμμές που «προκαλούν οι μηχανικές δυνάμεις».

Εν τέλει καταλήγει στο συμπέρασμα ότι υπάρχουν δύο πόλοι, επειδή οι γραμμές ενώνονται σε δύο αντίθετα σημεία της σφαίρας. Ακόμη αναφέρει ότι η πολικότητα ενός μαγνήτη μπορεί να αντιστραφεί από την δράση ενός ισχυρότερου μαγνήτη από τον πρώτο.

Τρεις αιώνες μετά τελικά θα εκδοθεί η επιστολή , το 1558 λαμβάνοντας την αξία που της έπρεπε ως η πρώτη επιστημονική αναφορά πάνω στο θέμα που ξέφευγε από την μαγεία και την προκατάληψη. Παρ' όλα αυτά, μέχρι τον καιρό της Βασίλισσας Ελισάβετ, δεν ήξεραν πως στην πραγματικότητα λειτουργούσε η πυξίδα.

Με το θέμα των μαγνητών, ασχολούνται και άλλοι ερευνητές όπως τον Roger Bacon ( 1214-1292 ), τον Jean de Saint Amand (1261-1298), αλλά μπλέκουν την παρατήρηση με την μαγεία και τις απόκρυφες δυνάμεις, ενώ δεν μπορούν να ξεπεράσουν τους περιορισμούς που έθεσε ο Αριστοτέλης και απαιτούσε ένα μυστηριώδες μαγνητικό ρευστό ανάμεσα στα σώματα που αλληλεπιδρούν μαγνητικά. Η πρώτη αντίδραση στον Αριστοτέλη ήρθε από τον Άγγλο William of Ockham ( 1297-1350 ) που βασίστηκε στην απλή πειραματική μέθοδο. Με μία αξιοθαύμαστη δουλειά, αναφέρει ξεκάθαρα ότι δεν υπάρχει κάτι που θα εμποδίσει την μαγνητική έλξη, όταν δεν υπάρχει κάποιο υλικό ανάμεσα στα δύο σώματα.

Τους επόμενους αιώνες η έρευνα στον τομέα των μαγνητών πραγματοποιούνταν κυρίως από τεχνικούς και όχι από επιστήμονες, μάλλον γιατί οι μαγνήτες είχαν συνδεθεί με την πρακτική χρήση τους στην ναυσιπλοΐα. Κατά τον 15ο και 16ο αιώνα η ναυσιπλοΐα πήρε μεγαλύτερη οικονομική σημασία από τα οφέλη που θα μπορούσε να αποφέρει στα ανεπτυγμένα κράτη της εποχής και έτσι η θεωρητική και πρακτική έρευνα των μαγνητών αναζωπυρώθηκε. Ανάμεσα στους διακεκριμένους τεχνικούς της εποχής, σίγουρα ξεχωρίζει ο Robert Norman, ο οποίος έλυσε το πρόβλημα που εμφανίζονταν μέχρι τότε λόγω του κέντρου βάρους της μαγνητικής βελόνας τοποθετώντας την βελόνα έτσι που να κινείται όχι μόνο σε οριζόντιο επίπεδο αλλά και σε κατακόρυφο. Το 1550 ο Gerolamo Cardano διαπιστώνει ότι η «μαγνητική δύναμη» διαπερνάει το ξύλο, ενώ αντίθετα το ήλεκτρο δεν ασκεί δυνάμεις μέσω του ξύλου.

Ο Άγγλος William Gilbert (1544-1603), γιατρός της βασίλισσας Ελισάβετ της 1ης, ήταν ο πρώτος που ερεύνησε το φαινόμενο του μαγνητισμού, συστηματικά χρησιμοποιώντας επιστημονικές μεθόδους. Παράλληλα μελετούσε και τον ηλεκτρισμό. Μάλιστα, αυτός ήταν και ο πρώτος που χρησιμοποίησε την λέξη "electricity" από την ελληνική λέξη ήλεκτρο. Ακολούθησαν θεωρητικές ανακαλύψεις πάνω στην φύση του μαγνητισμού της γης από τον Γερμανό μαθηματικό Carl Friedrich Gauss (1777-1855). Αυτός ήταν και ο πρώτος που εισήγαγε την γλώσσα των μαθηματικών στην μελέτη του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού.

Ποιοτικές μελέτες των μαγνητικών φαινομένων πραγματοποιήθηκαν τον 18ο αιώνα από τον Γάλλο Charles Coulomb (1736-1806), ο οποίος εισήγαγε τον νόμο του αντίστροφου τετραγώνου της δύναμεις που αναπτύσσεται μεταξύ δυο σωμάτων που υπόκεινται σε μαγνητικές δυνάμεις και είναι ανάλογος των πεδίων του κάθε ενός και αντιστρόφως ανάλογος του τετραγώνου της μεταξύ τους απόστασης.

Ο Δανός φυσικός Hans Christian Oersted (1777-1851), καθηγητής στο πανεπιστήμιο της Κοπεγχάγης, ήταν ο πρώτος που συνέδεσε τον ηλεκτρισμό με τον μαγνητισμό. Το 1820 καθώς πραγματοποιούσε, σπίτι του μία επιστημονική επίδειξη σε φίλους και φοιτητές ανακάλυψε τυχαία την δύναμη που αναπτύσσεται μεταξύ ενός μαγνήτη και ενός σύρματος που διαρρέετε από ηλεκτρικό ρεύμα. Σκόπευε να δείξει πως ένα σύρμα που διαρρέετε από ηλεκτρικό ρεύμα, θερμαίνεται, καθώς και να κάνει και κάποια πειράματα μαγνητισμού, για τα οποία και είχε μία βελόνα πυξίδας, πάνω σε ξύλινη βάση.

Καθώς έκανε την επίδειξη του ηλεκτρισμού, παρατήρησε με έκπληξη ότι όποτε ο διακόπτης του ηλεκτρικού ρεύματος ήταν ανοιχτός, η μαγνητική βελόνα κινούταν. Εκείνη την στιγμή δεν είπε τίποτα, τέλειωσε την επίδειξη και τους επόμενους μήνες δούλεψε σκληρά, προσπαθώντας να εξηγήσει το νέο αυτό φαινόμενο που παρατηρούσε. Δεν μπόρεσε όμως, η βελόνα ούτε έλκονταν από το σύρμα, ούτε απωθούνταν από αυτό. Αντίθετα, έτεινε να στέκετε σε κάποιες σωστές γωνίες. Τελικά δημοσίευσε τις παρατηρήσεις του στα Λατινικά, χωρίς κάποια εξήγηση.

Πειράματα που αφορούσαν την επίδραση μεταξύ του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου πραγματοποιήθηκαν παράλληλα από τον Άγγλο Michael Faraday (1791-1869). Παιδί μεταναστών στο Λονδίνο στα 14 του, ενώ δούλευε ως βοηθός βιβλιοδέτη, άρχισε να μελετάει την πληθώρα των βιβλίων που είχε στην διάθεση του, αποκτώντας επαρκή μόρφωση έτσι που του επέτρεψε να ασχοληθεί με την έρευνα. Ήταν ένας ακούραστος ερευνητής που δεν απογοητευόταν όταν συναντούσε δυσκολίες,

Το 1831 ανακάλυψε και αυτός, ανεξάρτητα από τον Henry πως ηλεκτρισμός θα μπορούσε να παραχθεί από τον μαγνητισμό μέσω της κίνησης ενός μαγνήτη. Αφού το απέδειξε αυτό και πειραματικά, ήταν ικανός να εξηγήσει ότι τα μαγνητικά πεδία που κινούταν και παρήγαγαν ηλεκτρισμό αποτελούταν από δυναμικές γραμμές.

Αυτές μπορούσαν να προκαλέσουν ροή ρεύματος σε ένα σπειροειδές σύρμα που περιστρέφονταν ανάμεσα στους πόλους ενός μαγνήτη. Μάλιστα η πράξη δείχνει ότι όταν το πηνίο κόβει τις δυναμικές γραμμές, τότε κατά περίεργο τρόπο, παράγεται ηλεκτρισμός. Αυτά τα πειράματα επιδείκνυαν την ανακάλυψη της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής ( έννοια την οποία εισάγει το 1834 ο Faraday ) στην παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, με αλλαγή της μαγνητικής πυκνότητας. Παρατήρησε ακόμη πως η αλλαγή του ρεύματος που διαρρέει ένα κύκλωμα, επάγει ρεύματα σε ένα γειτονικό κύκλωμα.

Σε όλη την δουλειά του Faraday, δεν συμπεριλαμβάνονται μαθηματικά. Από τα εκατοντάδες πειράματα του, που όλα μπορούν να εξηγηθούν με την ιδέα της μεταβαλλόμενης μαγνητικής ροής θα μπορούσαν να προκύψουν αρκετές εφευρέσεις, αλλά αυτές εμφανίστηκαν 50 με 100 χρόνια αργότερα.

Ο Faraday χρησιμοποίησε την ανακάλυψη του για να κατασκευάσει την πρώτη γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος, στην οποία η συνεχής περιστροφή ενός αγωγίμου μεταλλικού ελάσματος ανάμεσα στους πόλους ενός μαγνήτη παρήγαγε συνεχές ρεύμα μετατρέποντας έτσι την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική, αλλά πέρασαν περίπου πενήντα χρόνια πριν χρησιμοποιηθεί η εφεύρεση του αυτή για την ευρεία παραγωγή ενέργειας. θεωρείται ο κορυφαίος πειραματικός φυσικός του 19ου αιώνα.





FARADAY

Το 1834 ο Emil Lenz διατυπώνει έναν κανόνα που προσδιορίζει την κατεύθυνση των επαγόμενων ρευμάτων. Στην πρότυπη μορφή του ήταν ένας νόμος που έδενε τις δυνάμεις και όχι τα ρεύματα, « Τα επαγόμενα ρεύματα ρέουν σε τέτοια κατεύθυνση, ώστε να παράγουν μαγνητικές δυνάμεις οι οποίες προσπαθούν να διατηρήσουν σταθερή την μαγνητική ροή ». Έτσι ο Lenz μπορούσε να προβλέψει ότι αν προσπαθούσες να σπρώξεις έναν αγωγό σε ένα δυνατό μαγνητικό πεδίο, αυτός θα απωθούταν. Ενώ αν θα προσπαθούσαμε να τραβήξουμε έναν αγωγό έξω από το πεδίο αυτό, τότε οι μαγνητικές δυνάμεις στα επαγόμενα ρεύματα θα αντιστέκονταν στην κίνηση μας.

Ο Σκοτσέζος μαθηματικός James Clerk Maxwell (1831-1879) όμως ήταν αυτός που θεμελίωσε θεωρητικά το ηλεκτρομαγνητισμό αναπαριστώντας τα διαφορετικά στοιχεία του ίδιου βασικού πεδίου δυνάμεων μετατρέποντας τις θεωρίες του Faraday σε ολοκληρωμένες μαθηματικές σχέσεις.

Το 1855 γράφει ένα σύγγραμμα στο οποίο κάνει μια προσπάθεια να ενώσει τις διορατικές σκέψεις του Faraday για τις μαγνητικές γραμμές με τις μαθηματικές αναλογίες του Thomson. Σε αυτό το σύγγραμμα πρώτη φορά γίνεται αισθητή η φυσική σημασία των τελεστών της απόκλισης και της καμπύλωσης στον ηλεκτρομαγνητισμό.

Το 1867 ο Ludwig Lorenz αναπτύσσει μια ηλεκτρομαγνητική θεωρία που περιγράφει την φύση του φωτός στην οποία τα δυναμικά, σε πολύ βασική μορφή, είναι το εναρκτήριο σημείο.

Ο Σκοτσέζος Alexander Graham Bell (1847-1922) , εφαρμόζοντας αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού και χρησιμοποιώντας ένα διάφραγμα για την μετατροπή του ήχου σε ηλεκτρικό σήμα, κατασκεύασε το πρώτο τηλέφωνο το 1876.

Ο Σέρβος Nikola Tesla (1856 – 1943) πειραματιζόμενος με γεννήτριες ανακάλυψε το 1883 το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, την βασική αρχή του εναλλασσόμενου ρεύματος. Αυτό το μαγνητικό πεδίο εναλλάσσονταν μεταξύ δύο αντίθετων κατευθύνσεων πενήντα φορές το δευτερόλεπτο (50 Hertz). Με ένα τέτοιο πεδίο κατασκεύασε την γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος. Εν συνεχεία ο Tesla, άρχισε να σχεδιάζει και έναν κινητήρα που θα μπορούσε να δουλέψει με αυτό το ρεύμα. Η δουλειά του Tesla ήταν η αφορμή στο να γίνει κατανοητό πως ήταν απαραίτητη παραγωγή AC ρεύματος αφού επέτρεπε την μεταφορά ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, αφού μεταφέρονταν μεγάλες τάσεις οι οποίες μέσω μετασχηματιστών, έδιναν μικρότερες όπου αυτό ήταν απαραίτητο.

Έτσι το 1886 κατασκευάστηκε το πρώτο εργοστάσιο που έδινε εναλλασσόμενο ρεύμα, αλλά αρχικά χρησιμοποιούνταν μόνο για φωτισμό αφού ο Tesla ανακοίνωσε την εφεύρεση μηχανικού κινητήρα που να λειτουργεί με AC το 1888, και τότε η χρήση του AC ρεύματος διαδόθηκε ευρέως και άρχισαν να λειτουργούν αποδοτικά υδροηλεκτρικά εργοστάσια σε Αμερική και Ευρώπη. Προς τιμήν του, η πυκνότητα της μαγνητικής ροής, που είναι ο αριθμός των μαγνητικών γραμμών που περνούνε την μονάδα επιφάνειας, μετριέται σε Tesla

Το 1884 ο Heinrich Hertz κάνει βέβαιο ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου  $E$  που προκύπτει από φόρτιση και η ένταση που προκύπτει επαγωγικά, αλλάζοντας το μαγνητικό πεδίο είναι ισοδύναμες.

Ο Oliver Heaviside το 1889 βρίσκει την σωστή έκφραση για τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία ενός κινούμενου φορτισμένου σωματιδίου που ισχύει για μη σχετικιστικές ταχύτητες.

### 1.3 Η εξέλιξη του μαγνητισμού στον 20<sup>ο</sup> αιώνα

Με μια λέξη, όλη η πρόοδος στους μαγνήτες τον 20ο αιώνα οφειλόταν στην γνώση της απομαγνητίζουσας ισχύς.

Η εξέλιξη άρχισε το 1917 όταν οι K. Honda και T. Takai πρόσθεσαν κοβάλτιο στο χάλυβα Βολφράμιου, αυξάνοντας σημαντικά την δύναμη των μόνιμων μαγνητών.

Το 1919 ήταν διαθέσιμοι εμπορικά οι πρώτοι μαγνήτες που κατασκευάζονταν από τήξη μετάλλων.

Το 1930 ο I. Mishima παράγει τον πρώτο μαγνήτη Alnico που αποτελούταν από κράμα σιδήρου, νικελίου και αλουμινίου. Το 1952 οι J.J. Went, G.W. Rathenau, E.W. Gorter, και G.W. Van Oosterhout της εταιρίας Phillips κατασκευάζουν και προωθούν στην αγορά τους πρώτους κεραμικούς μαγνήτες που βασίζονταν σε Βάριο, Στρόντιο και οξειδία στα οποία κυριαρχεί ο Σίδηρος.

Το 1966 ο Karl J. Strnat που εργάζονταν σε ένα εργαστήριο ερευνάς υλικών της Αμερικάνικης αεροπορίας ανακάλυψε ότι το μίγμα Σαμάριου – Κοβάλτιου,  $\text{SmCo}_5$  παράγαγε ακόμη καλύτερους μαγνήτες με υψηλό ενεργειακό παράγωγο (18 MGOe), ξεκινώντας έτσι την κατασκευή μαγνητών με μίγματα που περιέχουν σπάνιες γαίες. Ο ίδιος μαζί με τον Alden Ray ανέπτυξαν ένα ακόμη καλύτερο (30 MGOe) μίγμα Σαμάριου – Κοβάλτιου  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$

Το 1983, κάτω από την επίβλεψη της Κινέζικης ακαδημίας επιστημών αναπτύσσεται ένα κράμα μετάλλων που έδινε καλύτερους μαγνήτες (35 MGOe) και αποτελείται από μίγμα Νεοδύμιου, Σιδήρου και Βόριου ( $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ).

Το ενεργειακό παράγωγο των μαγνητών όπως παρατηρούμε διπλασιαζόταν κάθε 12 χρόνια, κατά μέσον όρο κατά την διάρκεια του 20ού αιώνα. Οι μαγνήτες που διαθέτουμε τώρα είναι περισσότερο από εκατό φορές πιο ισχυροί από αυτούς με τους οποίους έπαιζε ο Einstein σαν παιδί. Οι βελτιωμένοι αυτοί μαγνήτες εκτός της υψηλής μαγνήτισης τους, Curie η οποία υποδηλώνει ότι το βασικό στοιχείο τους είναι ο σίδηρος.

Οι βελτιωμένοι μόνιμοι μαγνήτες αρχίζουν να κερδίζουν έδαφος σε αρκετές εφαρμογές σε σχέση με τους ηλεκτρομαγνήτες, λαμβάνοντας υπόψη την προσαρμοστικότητα τους και το γεγονός ότι είναι πιο φτηνοί. Σήμερα το 55% του πλήθους των μόνιμων μαγνητών που παράγονται είναι μαγνήτες Φερρίτη, το 35% μαγνήτες σπάνιων γαιών και το υπόλοιπο κυρίως κράματος Alnico. Κατά όγκο, η παγκόσμια παραγωγή είναι κατά μέσον όρο 80g σκληρού μαγνήτη Φερρίτη και 1g μαγνήτη σπάνιων γαιών, για κάθε άνθρωπο στην γη ετησίως. Μια από τις κυριότερες χρήσεις των μαγνητών είναι σε κινητήρες, αυτοί αντέχουν σε θερμοκρασίες που φτάνουν τους 1000 C, ενώ γίνεται προσπάθεια ανάπτυξης μαγνητών που να μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέχρι και στους 4000 C.

Ο βασικός μαγνήτης δεν είναι πλέον ένα πέταλο, αλλά ένας μεταλλικός δίσκος με ύψος ίσο σε περίπου τη μισή διάμετρο του γουόκμαν, του βίντεο, ή του τηλεφώνου μας. Υπάρχουν πολλές χρήσεις αυτών των μαγνητών σε όλους τους τομείς της καθημερινής μας ζωής. Όταν μια μέση οικογένεια στη δεκαετία του '50 κατείχε δύο μαγνήτες, η ίδια οικογένεια έχει στο σπίτι της εκατοντάδες από αυτούς.

Οι υπεραγωγοί (superconductors) είναι μια άλλη κατηγορία πολύ δυνατών μαγνητών. Αυτοί χάνουν ξαφνικά την ηλεκτρική τους αντίσταση όταν η θερμοκρασία τους πέσει κοντά στο απόλυτο μηδέν. Τότε το ρεύμα ρέει μέσα τους ελεύθερα, χωρίς απώλειες ενέργειας και μπορούν να αναπτυχθούν πολύ ισχυρά μαγνητικά πεδία. Για να πετύχουμε την υπεραγωγιμότητα πρέπει το μέταλλο ή το μεταλλικό κράμα να ψυχθεί ανάμεσα στα 1 με 10 Kelvin με υγρό ήλιο. Βέβαια η χρήση του υγρού ήλιου είναι περιοριστική, αφού αυτό είναι αρκετά ακριβό. Επομένως θα θέλαμε υπεραγωγούς που να δουλεύουν σε υψηλότερη θερμοκρασία.

Οι επιστήμονες της IBM έχουν καταφέρει με την μέθοδο κατασκευής κυκλωμάτων για υπολογιστές να παράγουν με αέρια εναπόθεση έναν κρύσταλλο με διάμετρο μίας ίντσας και πάχος ένα micron, έναν υπεραγωγό από τον οποίο περνάει ένα ρεύμα 100.000 A ανά τετραγωνικό εκατοστό.

Αν καταφέρουν οι επιστήμονες να αυξήσουν και άλλο την θερμοκρασία, ώστε να φτάσουμε στην θερμοκρασία δωματίου και λυθούν τα προβλήματα που έχουν να κάνουν με την διάδοση τόσο υψηλών ρευμάτων, τότε οι υπεραγωγοί θα μπορέσουν να βγουν από τα εργαστήρια και να χρησιμοποιηθούν σε νέες αξιοθαύμαστες εφαρμογές. Με πιο αποτελεσματικά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας και εύκολη αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ρεύματος.

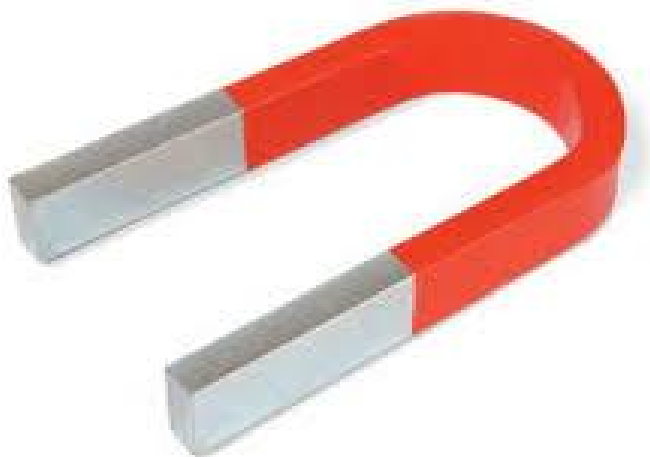
## 2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ

### 2.1 Εισαγωγή

Τόσο από θεωρητική, όσο και από πρακτική σκοπιά, η σπουδαιότερη κατηγορία μαγνητικών υλικών είναι οι σιδηρομαγνήτες (κατ' οικονομία στην έννοια αυτή συμπεριλαμβάνονται και τα σιδηρομαγνητικά υλικά). Οι εφαρμογές των υλικών αυτών καταλαμβάνουν ένα ευρύτατο τεχνολογικό φάσμα. Η χρησιμότητα των σιδηρομαγνητών πηγάζει από την υψηλή τους διαπερατότητα, που επιτρέπει την επίτευξη υψηλών τιμών μαγνητικής επαγωγής σε μέτρια μαγνητικά πεδία, την ικανότητά τους να παραμένουν μαγνητισμένα, και να δρουν, έτσι, ως πηγές μαγνητικού πεδίου, και από το γεγονός, ότι η ροπή στρέψης ενός μαγνητικού δίπολου παρουσία μαγνητικού πεδίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί στους ηλεκτρικούς κινητήρες.

Τα στοιχεία του περιοδικού συστήματος που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή μαγνητών είναι ο σίδηρος, το κοβάλτιο, το νικέλιο και ορισμένες λανθανίδες (σπάνιες γαίες).

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται τα πιο χαρακτηριστικά στοιχεία των σιδηρομαγνητών.



## 2.2 Μεγέθη και μονάδες

Στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται τα σημαντικότερα μεγέθη, οι συμβολισμοί και οι μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιούνται στην περιγραφή των μαγνητικών ιδιοτήτων της ύλης.

| Μέγεθος                     | Συμβολισμός      | SI                   | Παράγοντας<br>Μετατροπής | Gaussian &<br>cgs emu |
|-----------------------------|------------------|----------------------|--------------------------|-----------------------|
| Μαγνητική<br>Επαγωγή        | B                | (T)                  | $10^4$                   | (G)                   |
| Μαγνητική Ροή               | $\Phi$           | (WB)                 | $10^8$                   | (Mx)                  |
| Ένταση μαγνητικού<br>πεδίου | H                | A/m                  | $4\pi/10^3$              | (Oe)                  |
| Μαγνήτιση                   | M                | A/m                  | $10^3$                   | Emu/cm <sup>3</sup>   |
| Ειδική Μαγνήτιση            | $\sigma$         | A*m <sup>2</sup> /kg | 1                        | Emu /g                |
| Μαγνητική ροπή              | m                | A*m <sup>2</sup>     | $10^3$                   | Emu                   |
| Μαγνητική<br>Επιδεκτικότητα | X                | Αδιάστατο            | $1/4\pi$                 | Αδιάστατο             |
| Ειδική<br>Επιδεκτικότητα    | X <sub>p</sub>   | M <sup>3</sup> /kg   | $10^3/4\pi$              | Cm <sup>3</sup> /g    |
| Μοριακή<br>Επιδεκτικότητα   | X <sub>mol</sub> | M <sup>3</sup> /mol  | $10^6/4\pi$              | Cm <sup>3</sup> /mol  |
| Μαγνητική<br>Διαπερατότητα  | $\mu$            | H/m                  | $10^7/4\pi$              | Αδιάστατο             |
| Σχετική<br>Διαπερατότητα    | $\mu_r$          | Αδιάστατο            |                          | Δεν ορίζεται          |

Πίνακας 2.1(Μεγεθών)

Στο Διεθνές Σύστημα (SI) όπως επίσης και στο Ορθολογισμένο Σύστημα MKSA (Meter Kilogram Second Ampere) η μαγνητική επαγωγή συμβολίζεται με B και η μονάδα της είναι το Tesla. Η σχέση της Μαγνητικής Επαγωγής B σχετίζεται με την Μαγνητική Ροή M και την Μαγνήτιση H με την σχέση  $B = \mu_0(H + M)$ , όπου  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m η μαγνητική διαπερατότητα του κενού.

Στο Γκαουσιανό σύστημα (Gaussian) όπως επίσης και στο σύστημα CGS emu (Centimetre Gram Second electro - magnetic units) η Μαγνητική Επαγωγή B μετριέται σε Gauss και η σχέση της με τις ποσότητες B και H δίνεται από την σχέση  $B = H + 4\pi M$ , ενώ η  $\mu_0 = 1$ .

Η μετάβαση από το ένα σύστημα στο άλλο γίνεται με πολλαπλασιασμό ή διαίρεση των μονάδων με το συντελεστή μετατροπής που δίνεται στον πίνακα 2.1. Π.χ. Για να βρούμε με ποσά Gauss ισούται ένα Tesla από τον πίνακα 2.1 βλέπουμε ότι ο συντελεστής μετατροπής είναι  $10^4$  ή 10000 και επομένως  $1 \text{ Tesla} = 10000 \text{ Gauss}$ .

Οι μαθηματικοί τύποι που συνδέουν τις κύριες Μονάδες που αναφέρονται σε μαγνητικά μεγέθη όπως Tesla (T), Gauss (G), Weber (W) Μαγνήτιση (M) με τις θεμελιώδεις μονάδες των Συστημάτων δίδονται στις παρακάτω σχέσεις:

- $$\text{Wb} = \frac{\text{J}}{\text{A}} = \frac{\text{Kg} \cdot \text{m}^2}{\text{A} \cdot \text{S}^2}$$
- $$\text{Mx} = \text{G} \cdot \text{cm}^3$$
- $$\text{T} = \frac{\text{J}}{\text{A} \cdot \text{m}^2} = \frac{\text{Kg}}{\text{A} \cdot \text{S}^2}$$
- $$\frac{\text{H}}{\text{m}} = \frac{\text{N}}{\text{A}^2} = \frac{\text{Kg} \cdot \text{m}}{\text{A}^2 \cdot \text{S}^2}$$
- $$\text{emu} = \text{G} \cdot \text{cm}^2$$
- $$\text{G} = \text{Oe} = \frac{\text{g}^{\frac{1}{2}}}{\text{cm}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{S}}$$

(Το emu δεν αποτελεί μονάδα, αλλά συντομογραφία του  $G \cdot cm^3$ )

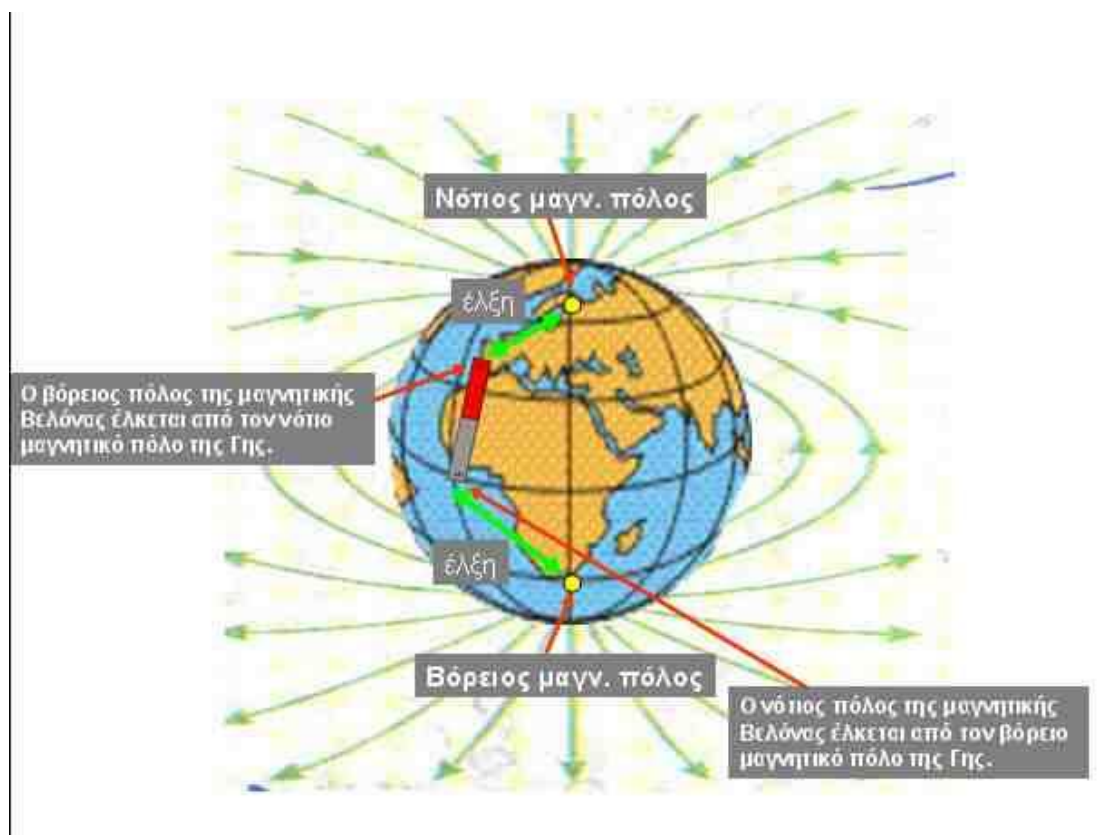
1  $\mu B = 9.274015 \cdot 10^{-24} A \cdot m^2$  (μαγνητόνη Bohr)

1  $\mu N = 5.050787 \cdot 10^{-27} A \cdot m^2$  (πυρηνική μαγνητόνη)

1  $\phi_0 = 2.067835 \cdot 10^{-15} Wb$  (quantum ροής)

## 2.3 Μαγνητικό πεδίο

Η επιστήμη του μαγνητισμού άρχισε από την παρατήρηση ότι ορισμένοι "λίθοι" (μαγνητίτης) έλκουν μικρά τεμάχια σιδήρου. Η λέξη μαγνητισμός προέρχεται από την επαρχία Μαγνησία της Μικράς Ασίας όπου βρέθηκαν λίθοι μαγνήτη. Ένας άλλος "φυσικός μαγνήτης" είναι η ίδια η γη, που η ικανότητά της να προσανατολίζει τη μαγνητική βελόνα ήταν γνωστή από τα αρχαία χρόνια.





Το 1820 ο Oersted ανακάλυψε πρώτος ότι το ρεύμα που περνάει από ένα καλώδιο προκαλεί επίσης μαγνητικά φαινόμενα, δηλαδή αλλάζει τον προσανατολισμό της μαγνητικής βελόνας. Αυτή η σπουδαία ανακάλυψη σύνδεσε τις μέχρι τότε χωριστές επιστήμες του μαγνητισμού και του ηλεκτρισμού. Τα μαγνητικά φαινόμενα που προκαλεί ένα ρεύμα όταν διαρρέει έναν αγωγό εντείνονται όταν ο αγωγός γίνει πηνίο με πολλές σπείρες και προστεθεί σίδηρο πυρήνας.

Ορίζουμε το χώρο γύρω από ένα μαγνήτη ή από ένα ρευματοφόρο αγωγό ως την περιοχή ενός μαγνητικού πεδίου, ακριβώς όπως ορίσαμε το χώρο γύρω από φορτισμένη ράβδο ως την περιοχή ενός ηλεκτρικού πεδίου». Το βασικό διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου  $B$ , που ορίζουμε στην επόμενη παράγραφο, λέγεται μαγνητική επαγωγή μπορεί να παρασταθεί με γραμμές επαγωγής, ακριβώς όπως το ηλεκτρικό πεδίο έχει παρασταθεί με δυναμικές γραμμές. Το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου συνδέεται με τις γραμμές επαγωγής όπως παρακάτω:

1. Η εφαπτόμενη σε κάθε σημείο της γραμμής επαγωγής δίνει τη διεύθυνση του  $B$  στο σημείο αυτό.
2. Οι γραμμές επαγωγής σχεδιάζονται ώστε ο αριθμός των γραμμών επαγωγής που περνάει από τη μονάδα επιφάνειας, όταν αυτή τοποθετηθεί κάθετα σ' αυτές, να είναι ανάλογη με το μέτρο του διανύσματος της μαγνητικής επαγωγής  $E$ . Όπου οι γραμμές είναι πυκνές το  $B$  είναι μεγάλο ενώ όπου είναι αραιές το  $B$  είναι μικρό.

Όπως και για το ηλεκτρικό πεδίο το διάνυσμα του πεδίου  $B$  έχει θεμελιώδη σημασία, ενώ οι γραμμές επαγωγής δίνουν μόνο τη γραφική απεικόνιση του τρόπου μεταβολής του  $B$  σε ορισμένη περιοχή του χώρου.

Η ροή  $\Phi_B$  για το μαγνητικό πεδίο ορίζεται με εντελώς ανάλογο τρόπο, όπως και η ροή  $\Phi_E$  για το ηλεκτρικό πεδίο, δηλαδή

$$\Phi_B = \int B \cdot dS$$

όπου το ολοκλήρωμα παίρνεται πάνω σε όλη την επιφάνεια (κλειστή ή ανοικτή) για την οποία ορίζεται η  $\Phi_B$

Θέλουμε εδώ να καθορίσουμε (α) το μέτρο και την κατεύθυνση του  $B$  σε ένα οποιοδήποτε σημείο  $P$ , ας πούμε π.χ. κοντά σε ένα μαγνήτη ή ένα ρευματοφόρο αγωγό, ή σε ένα κινούμενο φορτίο και (β) την επίδραση του μαγνητικού πεδίου σε σωματίδια, όπως είναι τα κινούμενα φορτία μέσα σ' αυτό.

Όπως και στο ηλεκτρικό πεδίο ένα σωματίδιο με φορτίο  $q_0$  χρησιμεύει σε σώμα ελέγχου. Τοποθετούμε το δοκιμαστικό σώμα σε ηρεμία σε ένα σημείο  $P$  κοντά

σ' ένα μόνιμο μαγνήτη. Πειραματικά βρίσκουμε ότι καμία δύναμη (οφειλόμενη μόνο στην παρουσία ή στην απουσία του μαγνήτη) δεν ενεργεί πάνω στο  $q_0$ . Όμως, αν εκτοξεύσουμε θετικό δοκιμαστικό φορτίο στο σημείο P, με ταχύτητα  $v$  βρίσκουμε ότι πάνω σε αυτό ασκείται πλάγια δύναμη  $F$  αν υπάρχει στην περιοχή μαγνήτης· με το πλάγια δύναμη εννοούμε μια δύναμη κάθετη στη  $v$ . Ορίζουμε τη μαγνητική επαγωγή  $B$  του πεδίου σε συνάρτηση με την  $F$  τη  $v$  και το  $q_0$ .

Αν μεταβάλουμε τη διεύθυνση της  $v$  στο σημείο P, ενώ διατηρούμε το μέτρο της αμετάβλητο, βρίσκουμε, γενικά, ότι ενώ η  $F$  παραμένει κάθετη στο  $v$  το μέτρο της  $F$  θα μεταβληθεί. Για ορισμένη κατεύθυνση της  $v$  (και για την αντίθετη κατεύθυνση  $-v$ ) η δύναμη  $F$  μηδενίζεται. Αυτή τη διεύθυνση ορίζουμε ως διεύθυνση της  $B$ , ενώ το πώς ακριβώς κατευθύνεται η  $B$  καθορίζεται στον παρακάτω πληρέστερο ορισμό της.

Αφού έχουμε βρει τη διεύθυνση της  $B$ , μπορούμε να προσανατολίσουμε τη  $v$  ώστε το δοκιμαστικό φορτίο να κινείται κάθετα στη  $B$ . Βρίσκουμε τότε ότι η δύναμη  $F$  γίνεται μέγιστη, και έτσι ορίζουμε το μέτρο της  $B$  σε συνάρτηση με το μέτρο της μέγιστης δύναμης  $F$  που έχουμε μετρήσει, ή

$$B = \frac{F}{q_0 v} \quad \text{Εξ 2.3.1}$$

Ας θεωρήσουμε αυτόν τον ορισμό της  $B$  (όπου έχουμε καθορίσει το μέτρο και τη διεύθυνση, αλλά όχι και τη φορά) σαν προκαταρκτικό του ολοκληρωμένου διανυσματικού ορισμού που δίνουμε πιο κάτω: Αν θετικό δοκιμαστικό φορτίο  $q_0$  κινείται με ταχύτητα  $v$  και περνάει από σημείο P και αν πάνω στο κινούμενο φορτίο δρα δύναμη  $F$ , τότε στο σημείο P υπάρχει μαγνητικό πεδίο  $B$ , όπου  $B$  είναι το διάνυσμα που ικανοποιεί τη σχέση

$$F = q_0 v * B \quad \text{Εξ 2.3.2}$$

όπου τα  $v$ ,  $q_0$  και  $F$  είναι ποσότητες που μπορούν να μετρηθούν. Το μέτρο της μαγνητικής δύναμης εκτροπής  $F$ , σύμφωνα με τους κανόνες του διανυσματικού γινομένου, δίνεται από την

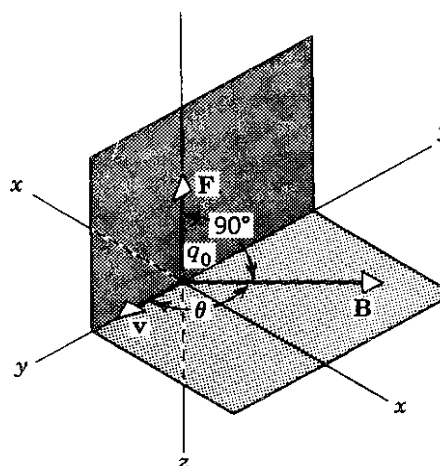
$$F = q_0 v B \sin\theta \quad \text{Εξ 2.3.3}$$

όπου  $\theta$  είναι η γωνία μεταξύ των  $v$  και  $B$ .

Το παρακάτω σχήμα δείχνει τη σχέση μεταξύ των διανυσμάτων. Βλέπουμε ότι η  $\mathbf{F}$ , που είναι κάθετη στο επίπεδο που σχηματίζουν τα  $\mathbf{v}$  και  $\mathbf{B}$ , θα είναι πάντα κάθετη στο  $\mathbf{v}$  (και ακόμη στο  $\mathbf{B}$ ) και έτσι πάντα θα είναι πλάγια δύναμη. Η Εξ 2 είναι σύμφωνη με τις παρατηρήσεις ότι (α) η μαγνητική δύναμη μηδενίζεται όταν το  $\mathbf{v} \rightarrow \mathbf{0}$ , (β) η μαγνητική δύναμη μηδενίζεται όταν η  $\mathbf{v}$  είναι ή παράλληλη ή αντιπαράλληλη προς τη  $\mathbf{B}$  (στις περιπτώσεις αυτές  $\theta = 0^\circ$  ή  $180^\circ$  και  $\mathbf{v} * \mathbf{B} = 0$ ), και (γ) αν η  $\mathbf{v}$  είναι κάθετη στη  $\mathbf{B}$  ( $\theta = 90^\circ$ ), η δύναμη εκτροπής έχει μέγιστη τιμή που δίνεται από την Εξ 1, δηλαδή

$$F = q_0 v B$$

Απεικόνιση της  $F = q_0 v * B$ .  
Δοκιμαστικό φορτίο  $q_0$  εκτοξεύεται στην αρχή των αξόνων με ταχύτητα  $\mathbf{v}$ .



Ο ορισμός αυτός του  $\mathbf{B}$  είναι παρόμοιος, αν και πιο σύνθετος, με τον ορισμό της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου  $\mathbf{E}$  που μπορεί να τεθεί με τη μορφή: Αν θετικό δοκιμαστικό φορτίο  $q_0$  τοποθετηθεί σ' ένα σημείο  $P$  και αν πάνω σ' αυτό το στατικό φορτίο ασκείται (ηλεκτρική) δύναμη  $\mathbf{F}$  τότε στο  $P$  υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο  $\mathbf{E}$ , όπου  $\mathbf{E}$  είναι το διάνυσμα που ικανοποιεί τη σχέση :

$$\mathbf{F} = q_0 \mathbf{E}$$

Εξ 2.3.4

όπου τα  $q_0$  και  $F$  είναι ποσότητες που μπορούν να μετρηθούν. Στον ορισμό του  $\mathbf{E}$  η μόνο χαρακτηριστική διεύθυνση που εμφανίζεται είναι εκείνη της ηλεκτρικής δύναμης  $F_E$  που ασκείται πάνω στο στατικό θετικό δοκιμαστικό φορτίο. Η κατεύθυνση του  $\mathbf{E}$  παίρνεται η ίδια με εκείνη του  $F_E$ . Στον ορισμό του  $\mathbf{B}$  εμφανίζονται δύο χαρακτηριστικές διευθύνσεις εκείνη του  $\mathbf{v}$  και εκείνη του  $F_B$  που είναι πάντα, όπως αποδεικνύεται, κάθετες μεταξύ τους. Αν και μπορούμε εύκολα να λύσουμε την παραπάνω εξίσωση ως προς  $\mathbf{E}$ , δεν μπορούμε να λύσουμε την Εξ 2 ως προς  $\mathbf{B}$ . Η μονάδα του  $\mathbf{B}$  που βγαίνει από την Εξ 3 είναι:

$$\text{newton}/(\text{coulomb}) * (\text{meter}/\text{second})$$

Σ' αυτή δίνουμε στο SI το όνομα tesla (σύμβ. T) ή weber/meter<sup>2</sup> (συμβ. Wb/m<sup>2</sup>). Αν θυμηθούμε ότι ένα coulomb/second είναι ένα ampere τότε

$$1 \text{ telsa} = 1 \text{ weber}/\text{meter}^2 = 1 \text{ newton}/(\text{ampere} * \text{meter})$$

Μια παλιότερη μονάδα για το  $\mathbf{B}$ , που χρησιμοποιείται ακόμη, είναι το gauss. Η σχέση είναι

$$1 \text{ tesla} = 1 \text{ weber}/\text{meter}^2 = 10^4 \text{ gauss}$$

Το γεγονός ότι η μαγνητική δύναμη είναι πάντα κάθετη στη διεύθυνση της κίνησης σημαίνει ότι (για στατικά μαγνητικά πεδία) το έργο που παράγει η δύναμη που ασκείται στο σωματίδιο είναι μηδέν. Για στοιχείο δρόμου του σωματιδίου μήκους  $d\mathbf{l}$  το έργο αυτό  $dW$  είναι  $F_B \cdot d\mathbf{l}$  το  $dW$  είναι μηδέν γιατί το  $\mathbf{F}_B$  και το  $d\mathbf{l}$  είναι πάντα κάθετα μεταξύ τους. Έτσι ένα στατικό μαγνητικό πεδίο δεν μπορεί να μεταβάλει την κινητική ενέργεια κινούμενου φορτίου μπορεί μόνο να το εκτρέψει πλάγια.

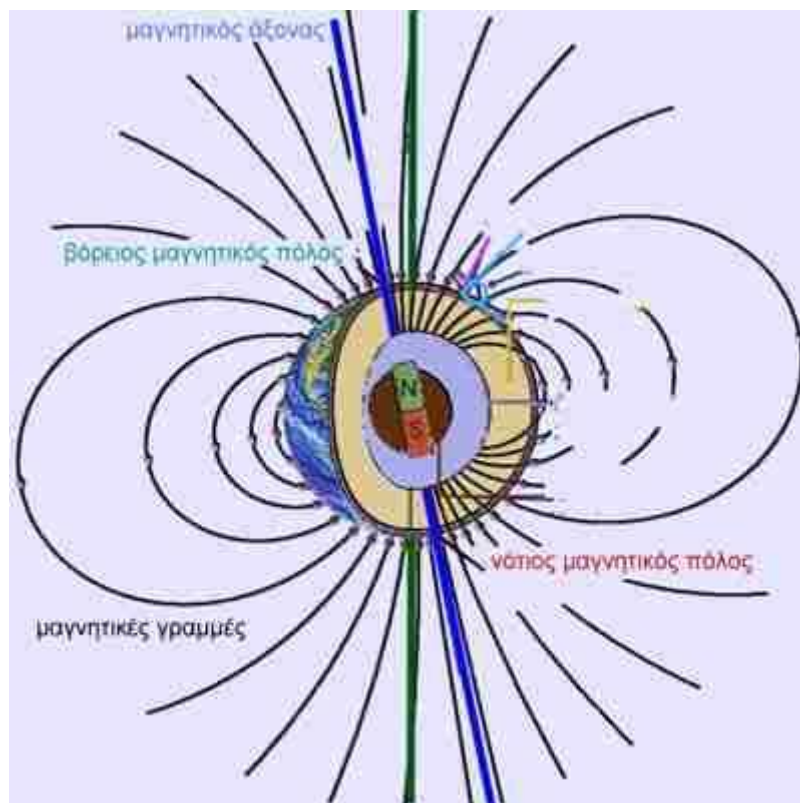
Αν ένα φορτισμένο σωματίδιο κινείται σε περιοχή που υπάρχουν τόσο ηλεκτρικό όσο και μαγνητικό πεδίο, η συνισταμένη δύναμη βρίσκεται με συνδυασμό των Εξ 2 και 3.

$$\mathbf{F} = q_0 \mathbf{E} + q_0 \mathbf{v} * \mathbf{B} \quad \text{Εξ 2.3.5}$$

Η σχέση αυτή λέγεται μερικές φορές και εξίσωση Lorentz σε ανάμνηση του Η.Α. Lorentz, που πρόσφερε πολλά στην ανάπτυξη και αποσαφήνιση των θεμάτων του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου.

## 2.4 Μαγνητικό πεδίο της γης

Ο μαγνήτης με τον οποίο είμαστε αρκετά εξοικειωμένοι είναι αυτός πάνω στον οποίο ζούμε, η γη. Η υπόθεση ότι η γη είναι ένας μεγάλος μαγνήτης με μαγνητικούς πόλους και ένα μαγνητικό ισημερινό, έγινε πρώτα από τον Sir William Gilbert (1544-1603), φυσικό στο Queen Elizabeth I. Ο Gilbert έφτιαξε μια μικρή σφαιρική *υδρόγειο* ("μικρή γη") από φυσικό μαγνητικό υλικό (επιστημονικότερα "μαγνητίτη λίθο" ή πυξίδα) και σχημάτισε τις μαγνητικές γραμμές της. Σ' εκείνη την περίοδο της ναυτιλίας και των εξερευνήσεων υπήρχε ένα φυσικό ενδιαφέρον για την πυξίδα και τι γήινο μαγνητισμό.



Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζονται οι μαγνητικές γραμμές (B) που οφείλονται στο γήινο μαγνητικό πεδίο, στην επιφάνεια και πάνω από την επιφάνεια της γης. Σε πρώτη προσέγγιση μπορούμε να φανταστούμε έναν ισχυρό ραβδόμορφο μαγνήτη τοποθετημένο στο κέντρο της γης. Προσέξτε ότι ο γήινος μαγνητικός άξονας και ο άξονας περιστροφής της γης (πράσινος άξονας RR) δεν συμπίπτουν, αλλά σχηματίζουν γωνία περίπου  $15^\circ$ .

Φυσικά, δεν υπάρχει κανένας ραβδόμορφος μαγνήτης στο κέντρο της γης. Ο γήινος μαγνητισμός πρέπει να συσχετισθεί με το γεγονός ότι ο κεντρικός πυρήνας της γης, που η ακτίνα του είναι 55% της γήινης ακτίνας, είναι (α) ρευστό, (β) υψηλής αγωγιμότητας και (γ) μετέχει στην περιστροφή της γης. Ένα φαινόμενο δυναμογεννήτριας, που περιλαμβάνει κυκλικά ρεύματα στον πυρήνα της γης των οποίων ο μηχανισμός δεν είναι ακόμη πλήρως κατανοητός, είναι η πιθανή εξήγηση.

Αρκετοί πλανήτες στο ηλιακό μας σύστημα, ο Ερμής και ο Δίας είναι μεταξύ αυτών, έχουν επίσης μαγνητικό πεδίο. Το ίδιο συμβαίνει με τον ήλιο και με πολλά άλλα αστέρια. Επίσης υπάρχει ένα μαγνητικό πεδίο που οφείλεται στο γαλαξία μας, το οποίο προέρχεται από την οικογένεια αστεριών που έχουν επίπεδο συμμετρίας αυτό που ορίζεται από το δίσκο του γαλαξία Milky Way. Το μαγνητικό πεδίο του γαλαξία είναι σχετικά ασθενές (γύρω στα 2 pT μέση τιμή) αλλά τα αποτελέσματά του μπορεί να είναι σημαντικά επειδή εκτείνεται σε τόσο μεγάλες αποστάσεις.

Δυο απλά όργανα για την εξερεύνηση του γήινου μαγνητικού πεδίου είναι η βελόνα απόκλισης και η βελόνα έγκλισης, (αυτή είναι μια μαγνητική βελόνα που ισορροπείται από την βαρύτητα και της οποίας ο άξονας είναι οριζόντιος και όχι κατακόρυφος.) Στο Tucson, στην Αριζόνα, για παράδειγμα, ο βόρειος πόλος μιας βελόνας απόκλισης (όπως ήταν το 1964) σχημάτιζε γωνία  $10^\circ$  ανατολικά ως προς το γεωγραφικό βορρά. Τέτοιες αποκλίσεις πρέπει να είναι γνωστές και να λαμβάνονται υπόψη όταν χρησιμοποιούμε την πυξίδα για τη ναυσιπλοία ή για τον προσανατολισμό στον ορίζοντα. Η οριζόντια συνιστώσα του γήινου μαγνητικού πεδίου,  $B_h$  στην οποία αποκρίνεται η βελόνα απόκλισης είναι, στην Tucson 26  $\mu\text{T}$  (= 0,26 Gauss).

Ας στρέψουμε τώρα τον (οριζόντιο) άξονα περιστροφής μιας βελόνας έγκλισης στην Tucson έτσι ώστε να είναι κάθετος στην οριζόντια συνιστώσα του B. Μπορείτε να πιστέψετε ότι η βελόνα θα δείχνει τώρα την κατεύθυνση του B; Αυτό γίνεται πράγματι και βρίσκουμε ότι, σ' αυτόν τον τόπο και σ' αυτήν την ημερομηνία το βόρειο άκρο της βελόνας δείχνει κάτω προς τη γη, ενώ η βελόνα σχηματίζει γωνία  $59^\circ$  (η έγκλιση) με το οριζόντιο επίπεδο που περιέχει τον άξονα περιστροφής της. Αυτό σημαίνει ότι, καθώς περιμένουμε, στην παραπάνω εικόνα οι γραμμές του B σ' αυτό το σημείο εισέρχονται στην επιφάνεια της γης.

Το γήινο μαγνητικό πεδίο δεν είναι ούτε τόσο απλό ούτε στατικό. Υπάρχουν, επίσης, παρατηρήσιμα φαινόμενα, που επιδρούν στη βελόνα απόκλισης και τα οποία δεν θα συνέβαιναν αν δεν υπήρχε αυτό το γήινο μαγνητικό πεδίο. Ας μελετήσουμε μερικά:

1. Τοπικές μεταβολές. Το γήινο μαγνητικό πεδίο έχει σημαντικές τοπικές μεταβολές, που οφείλονται στις διαφορές των μαγνητικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων που αποτελούν το φλοιό της γης και στη συγκέντρωση μαγνητικών μεταλλευμάτων.
  
2. Χρονικές μεταβολές. Η μέση μαγνητική απόκλιση και έγκλιση μεταβάλλονται αισθητά από χρόνο σε χρόνο σε οποιαδήποτε δεδομένη περιοχή» Για παράδειγμα, μεταξύ των ετών 1600 και 1800 η μαγνητική απόκλιση στο Λονδίνο μεταβαλλόταν συνεχώς από 11° ανατολική σε 24° δυτική. Ο βόρειος μαγνητικός πόλος (όπως ήταν το 1948) μετρήθηκε να κινείται βορειοδυτικά με 8 km/έτος περίπου.

Αυτή η μετακίνηση του γήινου μαγνητικού άξονα και η μεταβολή με το χρόνο της απόκλισης και της έγκλισης ενός τόπου, έχουν συνεισφορά σε μια νέα αρχαιολογική ειδικότητα, τον αρχαιομαγνητισμό, που ασχολείται με τις χρονολογίες στις οποίες έχουν δημιουργηθεί οι αρχαίοι κάμινοι, κλίβανοι και κατοικίες. Η αρχή βασίζεται στο γεγονός ότι πολλοί πλίνθοι, από τους οποίους έχουν φτιαχτεί τέτοια οικοδομήματα, περιέχουν μικρά ποσά μαγνητικών υλικών, των οποίων ο προσανατολισμός έχει σταθεροποιηθεί στην θέση του με θέρμανση στη διάρκεια της κανονικής τους χρήσης. Συγκρίνοντας τη σημερινή διεύθυνση του γήινου μαγνητικού πεδίου με εκείνη της "εποχής πήξης", μπορούμε να βρούμε μια προσεγγιστική ηλικία.

Σε μια μεγάλη (γεωλογική) περίοδο είναι σίγουρο ότι ο γήινος μαγνητικός άξονας έχει πραγματικά αντιστρέψει πλήρως την κατεύθυνση του, καθώς τα τελευταία  $4 * 10^6$  χρόνια αυτό έχει συμβεί 9 φορές. Η βεβαιότητα προκύπτει από τις μετρήσεις επί των πηγμένων μαγνητικών πετρωμάτων γνωστών γεωλογικών ηλικιών κατά την εποχή του σχηματισμού τους.

3. Αλληλεπιδράσεις με τον ηλιακό άνεμο. Ο ήλιος εκπέμπει ένα σταθερό ρεύμα ιονισμένων ατόμων υδρογόνου (πρωτόνια) και ηλεκτρονίων, το οποίο διασχίζει το ηλιακό σύστημα με υπερηχητικές ταχύτητες. Αυτό το ρεύμα που λέγεται "ηλιακός άνεμος" αλληλεπιδρά ισχυρά κατά πολλούς τρόπους με το γήινο μαγνητικό πεδίο. (α) Εποχιακές αυξήσεις της πυκνότητας του ηλιακού ανέμου προκαλούν γήινες μαγνητικές καταιγίδες, οι οποίες επηρεάζουν τις μεγάλων αποστάσεων ραδιοεπικοινωνίες. (β) τα πρωτόνια και τα ηλεκτρόνια του ηλιακού ανέμου, δέχονται δυνάμεις που δίνονται από την εξίσωση ( $F = qv_0 * B$ ), και κινούνται σπειροειδώς κατά μήκος των γραμμών του B, μπρος-πίσω μεταξύ των πολικών περιοχών του μαγνητικού βορρά και νότου. Αυτά τα "παγιδευμένα" ηλεκτρόνια και πρωτόνια σχηματίζουν τις ζώνες ακτινοβολίας Van Allen. Αυτά ανακαλύφθηκαν από τον

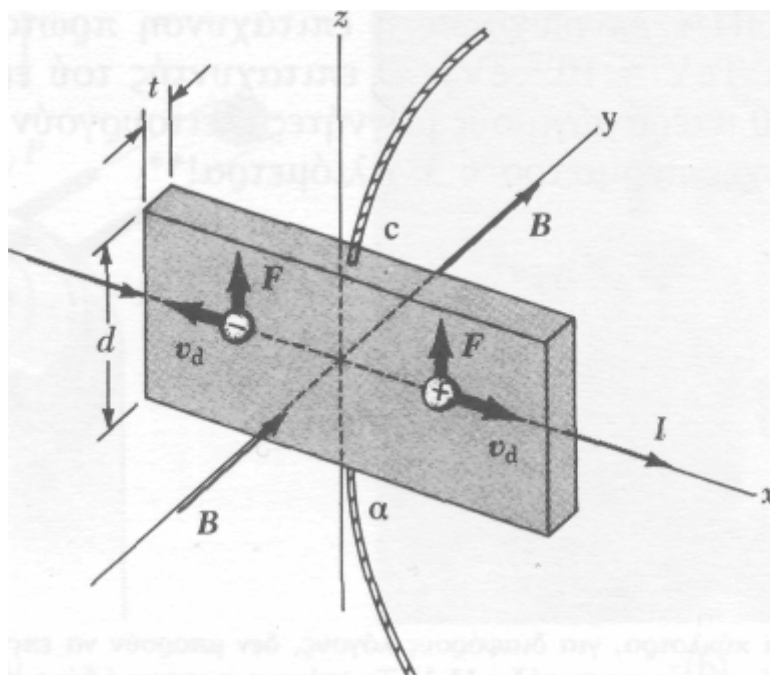
James A. Van Allen, του State University της Iowa, σε παλιότερα δορυφορικά πειράματα. (γ) Τα παγιδευμένα σωματίδια του ηλιακού ανέμου, καθώς αλληλεπιδρούν με την γήινη ατμόσφαιρα, παράγουν το εκθαμβωτικό θέαμα του σέλαος, που είναι περισσότερο έντονο σε γεωμαγνητικό πλάτος  $\pm 75^\circ$  περίπου.

## 2.5 Φαινόμενο HALL

Το 1879 ο Edwin Hall ανακάλυψε ότι όταν θέσουμε σε μαγνητικό πεδίο ένα αγώγιμο έλασμα που διαρρέεται από ρεύμα, τότε αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού σε διεύθυνση που είναι κάθετη στο ρεύμα και στο μαγνητικό πεδίο. Το φαινόμενο αυτό, γνωστό ως φαινόμενο Hall, το προξενεί η μονομερής απόκλιση των φορέων φορτίου, λόγω της αλληλεπίδρασης με το μαγνητικό πεδίο. Η σωστή ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων δίνει πληροφορίες για το πρόσημο του φορτίου των φορέων και για την πυκνότητα τους. Το φαινόμενο Hall χρησιμοποιείται επίσης για τη μέτρηση μαγνητικών πεδίων.

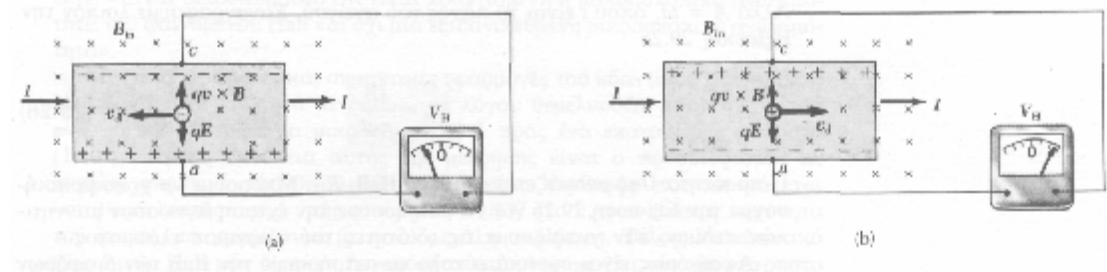
Η πειραματική διάταξη για την παρατήρηση του φαινομένου Hall είναι η ακόλουθη: Παίρνουμε έναν αγωγό σε σχήμα πλάκας που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα  $I$  κατά τη θετική κατεύθυνση του άξονα  $x$ , το οποίο φαίνεται και στην Εικόνα 1. Κατά την κατεύθυνση  $y$  υπάρχει ομογενές μαγνητικό πεδίο  $\mathbf{B}$ . Εάν οι φορείς φορτίου είναι ελεύθερα ηλεκτρόνια, αυτά θα κινούνται κατά την αρνητική κατεύθυνση των  $x$ , με διάνυσμα ταχύτητας διολίσθησης  $v_d$ . Έτσι θα υποστούν μαγνητική δύναμη  $\mathbf{F}$  προς τα επάνω.





Εικόνα 1

Και, συνεπώς, θα αποκλίνουν προς το επάνω μέρος, συγκεντρωμένα μονομερώς σε αυτό το μέρος της πλάκας, αφήνοντας έτσι περίσσειμα θετικού φορτίου στο κάτω μέρος αυτό μας δείχνει και η Εικόνα 2 (a). Αυτή η μονομερής συγκέντρωση φορτίου θα συνεχιστεί ωσότου το ηλεκτροστατικό πεδίο που δημιουργείται από την άνιση συσσώρευση φορτίου εξισορροπήσει τη μαγνητική δύναμη. Όταν ικανοποιηθεί αυτή η συνθήκη ισορροπίας, τα ηλεκτρόνια δεν θα αποκλίνουν προς τα επάνω. Στη συνέχεια μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα ευαίσθητο βολτόμετρο ή ένα πολύμετρο για να μετρήσουμε αυτήν τη διαφορά δυναμικού που υπάρχει κατά το πλάτος του αγωγού. Η διαφορά αυτή δυναμικού ονομάζεται τάση **Hall**  $V_H$ . Εάν οι φορείς φορτίου είναι θετικοί και επομένως κινούνται παράλληλα προς το ρεύμα κατά τη θετική κατεύθυνση  $x$  Εικόνα 2 (b), θα κινηθούν και αυτοί προς τα επάνω υφιστάμενοι την μαγνητική δύναμη  $qv_d B$ . Κατά τη διαδικασία αυτή συγκεντρώνονται μονομερώς θετικά φορτία στο επάνω μέρος του αγωγού, ενώ στο κάτω μέρος υπάρχει περίσσειμα αρνητικών φορτίων. Έτσι, τώρα, το πρόσημο της τάσης Hall είναι αντίθετο προς την τάση Hall που είχε δημιουργηθεί από φορείς φορτίου οι οποίοι ήταν ηλεκτρόνια. Και, προσδιορίζοντας την πολικότητα της τάσης Hall, προσδιορίζουμε το πρόσημο των φορέων φορτίου.



Εικόνα 2

Για να βρούμε μια έκφραση για την τάση Hall, θα σημειώσουμε πρώτα ότι η μαγνητική δύναμη που ασκείται πάνω στους φορείς φορτίου έχει μέτρο  $qvB$ . Όταν η κατάσταση έχει ισορροπήσει, η δύναμη αυτή αντισταθμίζεται από την ηλεκτροστατική δύναμη  $qE_H$ , όπου  $E_H$  είναι το ηλεκτρικό πεδίο το οποίο δημιουργήθηκε από τον διαχωρισμό των φορτίων (λέγεται και πεδίο Hall).

Γράφουμε λοιπόν

$$qvB = qE_H \quad \text{και} \quad E_H = U_d B$$

Εάν το πλάτος του αγωγού είναι  $d$ , τότε η τάση Hall,  $V_H$ , που μετρούμε με το βολτόμετρο ισούται με  $E_H d$ , δηλαδή

$$V_H = E_H d = U_d B d \quad \text{Εξ 2.5.1}$$

Βλέπουμε λοιπόν, ότι, εάν γνωρίζουμε το  $d$  και το  $B$ , μπορούμε να βρούμε την ταχύτητα διολίσθησης των φορέων φορτίου.

Ο αριθμός των φορέων φορτίου ανά μονάδα όγκου (δηλαδή, η πυκνότητα φορτίου),  $n$ , υπολογίζεται με τη μέτρηση του ρεύματος του αγωγού. Ξέρουμε ότι:

$$U_d = \frac{I}{nqA} \quad \text{Εξ 2.5.2}$$

όπου  $A$  είναι η επιφάνεια της διατομής του αγωγού. Θέτουμε την Εξίσωση 2.5.2 στην Εξίσωση 2.5.1 και βρίσκουμε

$$V_H = \frac{IBd}{nqA} \quad \text{Εξ 2.5.3}$$

Αλλά  $A = td$ , όπου  $t$  είναι το πάχος του αγωγού. Ξαναγράφουμε λοιπόν την Εξίσωση 2.5.3

$$V_H = \frac{IB}{nqt} \quad \text{Εξ 2.5.4}$$

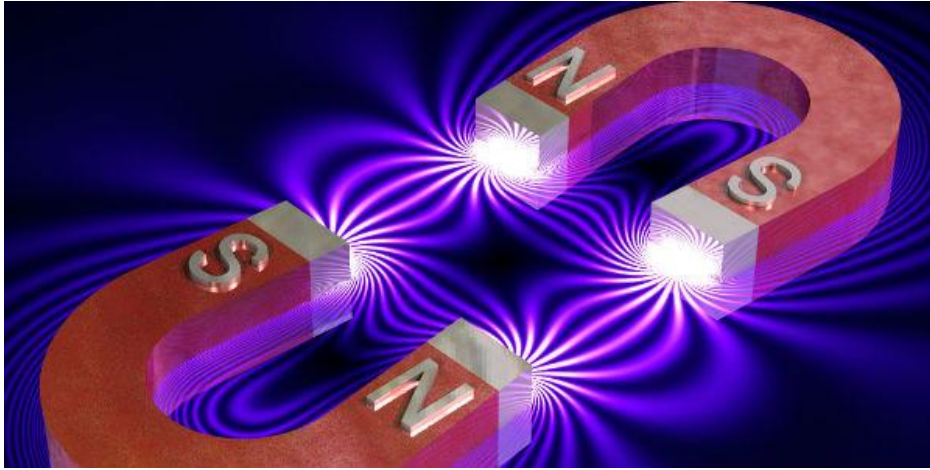
Η ποσότητα  $1/nq$  ονομάζεται σταθερά **Hall**,  $R_H$ . Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την Εξίσωση 2.5.4 για να μετρήσουμε την ένταση άγνωστων μαγνητικών πεδίων, εάν γνωρίζουμε τις ιδιότητες του αγώγιμου ελάσματος.

Αφού όμως είναι σχετικά εύκολο να μετρήσουμε την τιμή των διαφόρων ποσοτήτων (εκτός της  $nq$ ) της Εξίσωσης 2.5.4 δεν είναι δύσκολο να υπολογίσουμε τη σταθερά Hall. Το πρόσημο της  $R_H$  δίνει το πρόσημο των φορέων φορτίου, ενώ η τιμή της δίνει την πυκνότητα τους. Στα περισσότερα μέταλλα οι φορείς φορτίου

είναι ηλεκτρόνια και η πυκνότητα φορτίου που μετρούμε από το φαινόμενο Hall συμφωνεί με τις υπολογισμένες τιμές των μονοσθενών μετάλλων, όπως είναι τα Li, Na, Cu και Ag, όπου χονδρικά το  $n$  ισούται με τον αριθμό των ηλεκτρονίων σθένους ανά μοναδιαίο όγκο. Το μοντέλο αυτό, όμως, που βασίζεται στην Κλασική Φυσική, δεν ισχύει για μέταλλα όπως είναι τα Ρε, Βί και Cd ή για ημιαγωγούς όπως είναι το πυρίτιο ή το γερμάνιο. Γι' αυτό, χρησιμοποιούμε άλλο μοντέλο, που βασίζεται στην Κβαντομηχανική.

## 2.6 Παραμαγνητισμός

Φαινόμενο κατά το οποίο ορισμένα υλικά (παραμαγνητικά), όπως π.χ. το αλουμίνιο, το χρώμιο, ο λευκόχρυσος, το οξυγόνο, με την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου παρουσιάζουν μακροσκοπικά αισθητή μαγνήτιση. Ο βαθμός της μαγνητίσεως εξαρτάται από την ένταση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου και τη θερμοκρασία του υλικού. Ο βαθμός της μαγνητίσεως οφείλεται στο βαθμό του προσανατολισμού του συνόλου των μαγνητικών ροπών των ατόμων του υλικού. Πλήρης προσανατολισμός δε συμβαίνει, επειδή σ' αυτό αντιτίθεται η θερμική κίνηση των ατόμων. Ελαττώνοντας τη θερμοκρασία ή αυξάνοντας την ένταση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, πετυχαίνει κανείς πιο πλήρη προσανατολισμό των μαγνητικών ροπών των ατόμων, με αποτέλεσμα την εμφάνιση ισχυρότερων μαγνητικών πόλων σε δύο "εκ διαμέτρου" αντίθετα άκρα του σώματος.



Στα παραμαγνητικά υλικά, όταν βρίσκονται εκτός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, ο προσανατολισμός της μαγνητικής ροπής κάθε ατόμου (κάθε στοιχειώδη μαγνήτη) είναι τυχαίος και μόνο με την επίδραση κατάλληλου εξωτερικού μαγνητικού πεδίου τείνει να συμπέσει με τον προσανατολισμό του πεδίου αυτού. Η μαγνητική διαπερατότητα  $\sigma'$  αυτά είναι πάντοτε λίγο μεγαλύτερη της μονάδας.

Σε παραμαγνητικά μετατρέπονται και τα σιδηρομαγνητικά υλικά, όταν θερμανθούν πέρα από τη θερμοκρασία Κιουρί. Όταν τα παραμαγνητικά υλικά υποβληθούν σε διαδοχικές αδιαβατικές (χωρίς δηλαδή ανταλλαγή θερμότητας) μαγνητίσεις και απομαγνητίσεις, πραγματοποιούνται πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, γιατί για τον προσανατολισμό και αποπροσανατολισμό των μαγνητικών ροπών χρειάζεται ενέργεια, που την προσφέρει το υλικό. Με τη μέθοδο αυτή κατορθώθηκαν θερμοκρασίες λίγα χιλιοστά του βαθμού πάνω από το απόλυτο μηδέν.

## ΠΑΡΑΜΑΓΝΗΤΙΚΑ

- Οξυγόνο
- Λευκόχρυσος
- Χρώμιο
- Αργίλιο
- Διοξείδιο του χλωρίου
- Οξείδιο του αζώτου
- Όζον
- Παλλάδιο
- Νάτριο
- Κάλιο
- Αλουμίνιο
- Άλατα χρωμίου, μαγγανίου, χαλκού

## 2.7 Διαμαγνητισμός

Γενικό φαινόμενο όλων των σωμάτων, όταν βρεθούν υπό την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

Είναι μία εξ επαγωγής μαγνήτιση με φορά αντίθετη προς εκείνη του μαγνητικού πεδίου. Αυτό σημαίνει ότι διαμαγνητικό υλικό, όταν βρεθεί κοντά σε ένα βόρειο ή νότιο μαγνητικό πόλο, δημιουργεί εξ επαγωγής βόρειο ή νότιο μαγνητικό πόλο αντίστοιχα, με συνέπεια όλα τα διαμαγνητικά υλικά να απωθούνται από μαγνητικά πεδία. Ο διαμαγνητισμός, αν και γενική ιδιότητα όλων των σωμάτων (δηλαδή ποτέ δεν θα είχαμε μαγνητική έλξη, αλλά μόνο άπωση), εντούτοις άλλα φαινόμενα εξουδετερώνουν και υπερισχύουν του διαμαγνητισμού σε τρόπο, ώστε όλα τα σώματα να διαιρούνται σε τρεις κατηγορίες, αριθμητικώς πολύ άνισες: α) Στα "σιδηρομαγνητικά" υλικά που υπερνικούν κατά πολύ το διαμαγνητισμό και έλκονται ισχυρά, όταν βρεθούν σε μαγνητικό πεδίο (μαγνητίζονται παράλληλα και κατά την ίδια φορά με το επαγωγικό μαγνητικό πεδίο) και γι' αυτό έχουν συντελεστή μαγνητίσεως  $\mu \gg 1$  (πολύ μεγαλύτερο της μονάδας), β) Στα "παραμαγνητικά" υλικά, που απλώς κατορθώνουν να υπερνικήσουν το διαμαγνητισμό, και να δημιουργήσουν και αυτά ένα παράλληλο και της ίδιας φοράς μαγνητικό πεδίο· αυτά έχουν συντελεστή μαγνητίσεως λίγο μεγαλύτερο της μονάδας ( $\mu > 1$ ).

Τα διαμαγνητικά υλικά (που είναι και τα περισσότερα) δημιουργούν μαγνητικό πεδίο παράλληλο, αλλά αντίθετης φοράς (άπωση) με το επαγωγικό, με συντελεστή μαγνητίσεως  $\mu < 1$ .

Σήμερα ξέρουμε ότι ο διαμαγνητισμός έχει τη βάση του στην κατασκευή του ατόμου και οφείλεται στη μικρή μεταβολή των τροχιών των ηλεκτρονίων, όταν επιδρά εξωτερικό μαγνητικό πεδίο (επίσης επηρεάζεται σημαντικά και η ταχύτητα περιστροφής του - σπιν - γύρω από τον πυρήνα)· είναι δηλαδή μία κλασική αντίδραση του ατόμου σε μία εξωτερική δράση.

Ο διαμαγνητισμός για πρώτη φορά παρατηρήθηκε από το Φάραντεϋ στο βισμούθιο, που είναι περισσότερο διαμαγνητικό υλικό. Γενικά όμως έντονο διαμαγνητικό φαινόμενο παρουσιάζουν άτομα στοιχείων που στερούνται μονήρων ηλεκτρονίων.

## ΔΙΑΜΑΓΝΗΤΙΚΑ

- Βισμούθιο
- Χαλκός
- Αντιμόνιο
- Άργυρος
- Χρυσός
- Υδράργυρος
- Νερό
- Όλα τα αέρια (εκτός του οξυγόνου)

## 2.8 Σιδηρομαγνητισμός

Ο σιδηρομαγνητισμός είναι δυνατός μόνο όταν τα άτομα είναι τοποθετημένα σε ένα κρυσταλλικό πλέγμα και οι μαγνητικές στιγμές των ατόμων μπορούν να επιδράσουν στο να παραταχθούν παράλληλα μεταξύ τους. Αυτό το φαινόμενο εξηγείται από την κλασική θεωρία με την παρουσία ενός μοριακού πεδίου μέσα στο σιδηρομαγνητικό υλικό, το οποίο πρώτα τέθηκε από τον Weiss το 1907. Αυτό το πεδίο είναι αρκετό για να μαγνητίσει έως κορεσμού το υλικό. Στην κβαντομηχανική, το μοντέλο του Heisenberg στον σιδηρομαγνητισμό περιγράφει την παράλληλη παράταξη μαγνητικών στιγμών με όρους ανταλλαγής επίδρασης μεταξύ γειτονικών στιγμών.

Ο Weiss έθεσε την παρουσία μαγνητικών κυριοτήτων μέσα στο υλικό, οι οποίες είναι περιοχές όπου οι ατομικές μαγνητικές στιγμές είναι παραταγμένες. Η κίνηση αυτών των περιοχών καθορίζει το πώς αντιδρά το υλικό σε ένα μαγνητικό πεδίο και ως συνέπεια η ευπάθεια είναι μία λειτουργία του εφαρμοσμένου μαγνητικού πεδίου. Για αυτό, τα φερρομαγνητικά υλικά συνήθως συγκρίνονται με όρους κορεσμός μαγνητισμός (μαγνητισμός όταν όλες οι περιοχές είναι παραταγμένες) παρά με μαγνητική επιδεκτικότητα.

Στον περιοδικό πίνακα στοιχείων μόνο τα Fe, Co και Ni είναι σιδηρομαγνητικά και πάνω από την θερμοκρασία δωματίου. Καθώς τα φερρομαγνητικά υλικά θερμαίνονται τότε η θερμική υποκίνηση του ατόμου σημαίνει πως το σημείο παράταξης της ατομικής μαγνητικής στιγμής μειώνεται και εξού και ο μαγνητικός κορεσμός επίσης μειώνεται. Τελικά η θερμική υποκίνηση γίνεται τόσο μεγάλη που το υλικό γίνεται παραμαγνητικό η θερμοκρασία αυτής της μετάβασης είναι η θερμοκρασία Curie,  $T_C$  (Fe:  $T_C = 770^\circ\text{C}$ , Co:  $T_C = 1131^\circ\text{C}$  και Ni:  $T_C = 358^\circ\text{C}$ ). Πάνω από το  $T_C$  μετά η επιδεκτικότητα ποικίλει σύμφωνα με τον νόμο Curie-Weiss.



Ως σιδηρομαγνητικά χαρακτηρίζονται εκείνα τα υλικά τα οποία αποκτούν πολύ ισχυρή μαγνήτιση όταν βρεθούν μέσα σε μαγνητικό πεδίο, ακόμα και ασθενές. Σε ισχυρότερα πεδία η μαγνήτισή τους φτάνει τον κόρο και μετά παραμένει σταθερή όσο και αν αυξάνεται το πεδίο. Μερικά από τα υλικά αυτά έχουν ακόμα την ιδιότητα να διατηρούνται μαγνητισμένα κι όταν το εξωτερικό τους πεδίο μηδενίζεται. Τα μεγέθη  $B$ ,  $M$  και  $H$  στα υλικά αυτά δεν είναι πάντα παράλληλα και οι σχέσεις που τα συνδέει δεν είναι γραμμικές. Εν τούτοις, αν και τα υλικά αυτά δεν είναι γραμμικά, χρησιμοποιούνται σε αυτά οι σχέσεις:

$$\mathbf{B}=\mu\mathbf{H} \text{ και } \mathbf{M}=\chi\mathbf{H},$$

όπου τα μεγέθη όμως  $\mu$  και  $\chi$  δεν είναι σταθερά, αλλά εξαρτώνται τόσο από την τιμή της έντασης  $H$ , όσο και από τη μηχανική, θερμική και μαγνητική προϊστορία του υλικού.

Από τη θεωρία του Weiss για το σιδηρομαγνητισμό προκύπτει ότι το εσωτερικό πεδίο των σιδηρομαγνητών είναι ένα πολύ ισχυρό πεδίο. Αποτέλεσμα του ισχυρού εσωτερικού πεδίου είναι να παραλληλιζονται οι ατομικές μαγνητικές ροπές και να εμφανίζεται αυτόματη μαγνήτιση μέσα σε περιοχές των μικροκρυστάλλων του υλικού. Οι περιοχές αυτές με την αυτόματη μαγνήτιση ονομάζονται **περιοχές Weiss**.

Μέσα σε κάθε περιοχή Weiss οι ατομικές ροπές είναι προσανατολισμένες παράλληλα προς ορισμένο κρυσταλλογραφικό άξονα, ώστε κάθε περιοχή Weiss έχει συνισταμένη μαγνητική ροπή κι όταν δεν επιδρά εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Κι όμως το υλικό δεν παρουσιάζει σαν σύνολο μαγνήτιση έξω από το πεδίο, γιατί οι μαγνητικές ροπές των διαφόρων περιοχών Weiss προσανατολίζονται προς όλες τις διευθύνσεις των ισοδύναμων κρυσταλλικών αξόνων με την ίδια πιθανότητα και δίνουν συνισταμένη μηδέν.

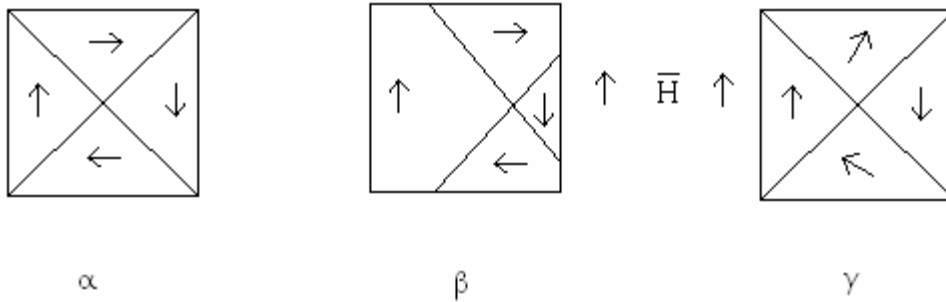
Το ίδιο υλικό, όταν επιδράσει σ' αυτό εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, εμφανίζει μαγνήτιση που αυξάνει όταν αυξάνει η ένταση του πεδίου. Η αύξηση της μαγνήτισης γίνεται με δύο μηχανισμούς.

Σύμφωνα με τον πρώτο μηχανισμό η αύξηση της έντασης μαγνήτισης οφείλεται στην αύξηση του όγκου των περιοχών εκείνων που η μαγνητική τους ροπή σχηματίζει μικρότερη γωνία με τη διεύθυνση του εξωτερικού πεδίου και γίνεται σε βάρος των άλλων περιοχών, των οποίων οι ροπές σχηματίζουν μεγαλύτερη γωνία.

Κατά το δεύτερο μηχανισμό η αύξηση της μαγνήτισης οφείλεται στη στροφή των μαγνητικών ροπών των περιοχών Weiss. Οι ροπές αυτές τείνουν να γίνουν παράλληλες προς τη διεύθυνση του εξωτερικού πεδίου.

Τους παραπάνω μηχανισμούς δείχνει το επόμενο σχήμα. Στο α σχήμα δίνεται η εικόνα των περιοχών Weiss πριν από την επίδραση του εξωτερικού πεδίου. Το

σχήμα β δείχνει τον πρώτο μηχανισμό και το σχήμα γ το δεύτερο μηχανισμό που προαναφέρθηκε.



#### ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ

- Νικέλιο
- Κοβάλτιο
- Σίδηρος
- Κράμα Νικελίου, Σιδήρου
- Κράμα περμαλλίου

## 2.9 Μαγνήτιση

Μαγνήτιση λέγεται η διαδικασία (τρόπος) μετάδοσης των ιδιοτήτων του μαγνήτη σε μεταλλικά ή μαγνητικά σώματα

Τρόποι μαγνήτισης

- Η Μαγνήτιση μπορεί να γίνει δι' επαφής, δι' επαγωγής και διά μηχανικών παραμορφώσεων.  
Η Μαγνήτιση δι' επαφής ή εξ επαφής, γίνεται με την επαφή μαλακού σιδήρου ή χαλύβδινου τεμαχίου με τον πόλο ενός μαγνήτη, οπότε ο μαλακός μαγνήτης ή το χαλύβδινο τεμάχιο αποκτά μαγνητικές ιδιότητες, εμφανίζοντας δηλαδή δύο πόλους εκ των οποίων αυτός που είναι προς τον επιδρώντα μαγνήτη να είναι ετερόνυμος εκείνου.
- Η Μαγνήτιση δι' επαγωγής ή εξ επαγωγής, δημιουργεί τα ίδια παραπάνω αποτελέσματα με τη διαφορά ότι αυτή γίνεται από κάποια απόσταση με μαγνήτη, είτε αν το τεμάχιο του χάλυβα ή του μαγνητικού σώματος τοποθετηθεί ή βρεθεί μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Η μετάδοση των μαγνητικών ιδιοτήτων δια του τρόπου αυτού ονομάζεται μαγνητική επαγωγή ή μαγνήτιση εξ επαγωγής.
- Τέλος μαγνήτιση μπορεί να προκληθεί και από μηχανικές παραμορφώσεις (κάμψης, διάτασης, κρούσης, ρίξης, κ.λπ.), που μπορεί να υποστεί τεμάχιο μαλακού σιδήρου ή χάλυβος.
- Η επίδραση της θερμοκρασίας επί των μαγνητικών ιδιοτήτων της ύλης χαρακτηρίζεται περίπλοκος. Ερευνήθηκε από τον Κιουρί ο οποίος και διατύπωσε επ' αυτού τους φερώνυμους νόμους του, που ισχύουν όμως για περιορισμένες περιοχές (κλίμακας τιμών) της θερμοκρασίας.

Ως μαγνήτιση **M** ορίζεται η μαγνητική ροπή στη μονάδα του όγκου ενός υλικού:

$$M = n \cdot m$$

όπου  $n$  είναι ο αριθμός των μαγνητικών διπολικών ροπών  $m$  ανά κυβικό μέτρο. Η μονάδα της μαγνήτισης θα είναι τότε A/m, όπως και της έντασης του μαγνητικού πεδίου.

Εάν ένα υλικό τοποθετηθεί μέσα σε εξωτερική μαγνητική επαγωγή  $B_0$  ή σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο έντασης η εσωτερική μαγνητική επαγωγή στο υλικό,  $B_{int}$ , θα δίνεται από τη σχέση:

$$B_{int} = B_0 + \mu_0 \cdot M = \mu_0 \cdot (H + M)$$

Στη σχέση αυτή δεν λαμβάνονται υπ' όψιν φαινόμενα απομαγνήτισης κι έτσι το  $H_{int}$  δίνεται προσεγγιστικά από το  $H$  . Στα διαμαγνητικά και παραμαγνητικά υλικά η σχέση που ισχύει για την μαγνήτιση είναι :

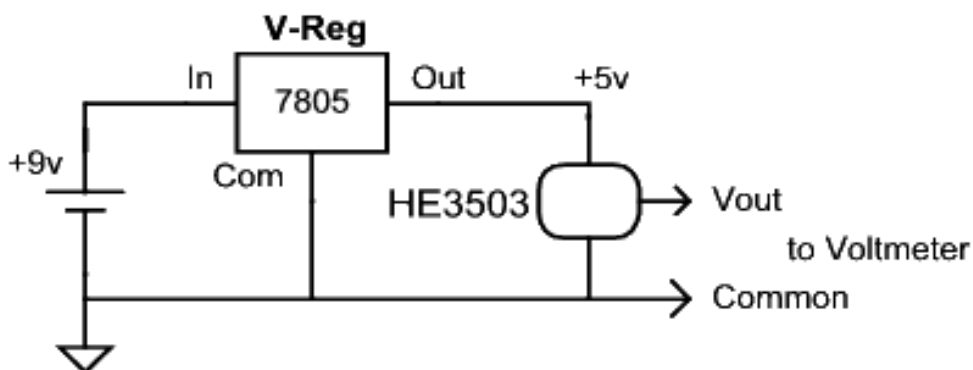
$$M=(\mu_r-1)*H$$

### 3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ-ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

#### 3.1 Ανάλυση κυκλώματος

Όπως βλέπουμε και στο παρακάτω σχήμα για να τροφοδοτηθεί ο αισθητήρας ο οποίος έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (4,5 έως 6v) θα πρέπει να προσαρμόσουμε την τάση του τροφοδοτικού σε αυτή την τιμή. Για να το πετύχουμε αυτό θα τροφοδοτήσουμε έναν σταθεροποιητή τάσης έτσι ώστε να επιτύχουμε την τάση λειτουργίας του αισθητήρα. Τέλος για την απεικόνιση της μέτρησης του αισθητήρα θα τροφοδοτηθεί ένα βολτόμετρο από την έξοδο  $V_{out}$  του αισθητήρα A1302 KUA-T. Με βάση το παρακάτω κύκλωμα για την μετατροπή της τάσης θα χρησιμοποιήσουμε τον παρακάτω τύπο:

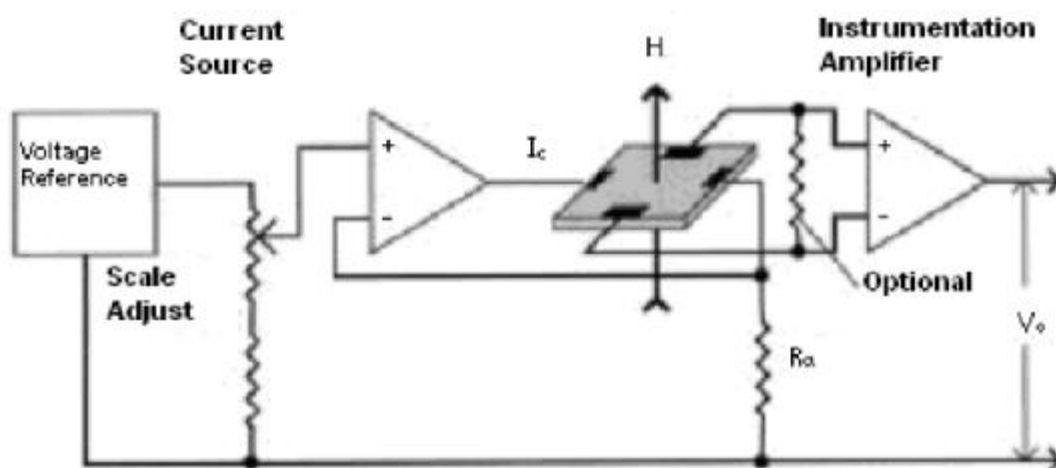
$$B = 1000 * (V_0 - V_1) / K$$



#### 3.1.1 Περιγραφή αισθητήρα Hall

Ο αισθητήρας Hall Effect στηρίζεται σε ένα φυσικό φαινόμενο που ανακαλύφθηκε από τον Hall πριν από 100 χρόνια. Το φαινόμενο Hall είναι ένα επακόλουθο της δύναμης Lorentz που είναι η δύναμη που δέχεται ένα ηλεκτρόνιο που κινείται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο. Αυτή η δύναμη είναι κάθετη τόσο κατά

μήκος της διεύθυνσης της κίνησης όσο και στη διεύθυνση του πεδίου. Ο αισθητήρας Hall αποτελείται από ένα λεπτό ορθογώνιο πλαίσιο από κάποιο αγωγίμο ή ημιαγωγίμο υλικό που τοποθετείται μέσα σε ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο κάθετο προς το επίπεδο του ορθογωνίου. Όταν κατά μήκος της διάστασης  $x$  εφαρμόζεται ένα ρεύμα τότε, στα άκρα κατά την διεύθυνση  $y$  παρατηρείται μια τάση.



Εικόνα 1

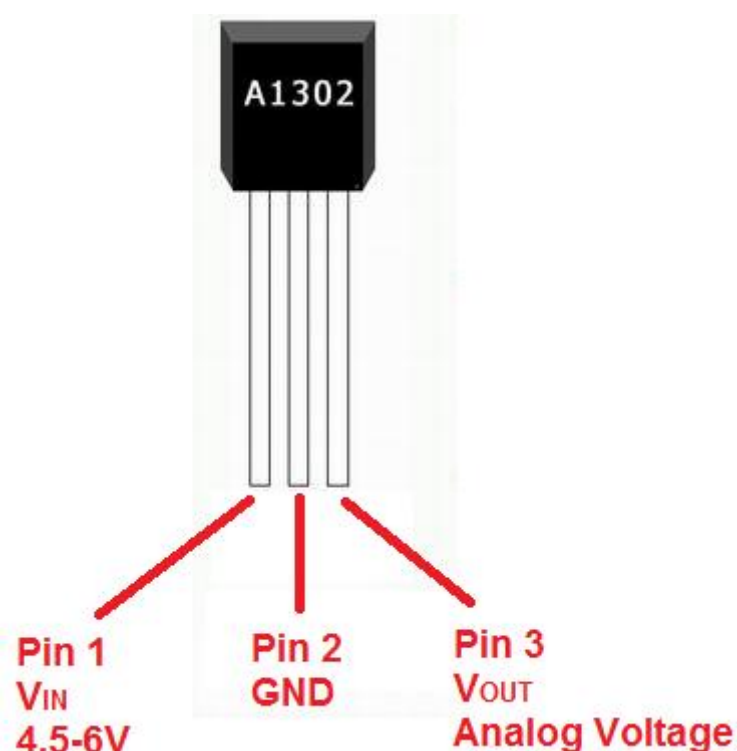
Το υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του αισθητήρα Hall μπορεί να είναι Χαλκός ή ημιαγωγίμο υλικό όπως Γάλλιο Αρσενικό (GaAs). Στη Εικόνα 1 είναι το σχηματικό διάγραμμα ενός αισθητήρα Hall. Η τάση αναφοράς, ο τελεστικός ενισχυτής και η αντίσταση  $R_s$  σχηματίζουν μια πηγή ρεύματος για τον έλεγχο του ρεύματος στον αισθητήρα Hall. Για την καλύτερη λειτουργία του αισθητήρα η τάση αναφοράς και η αντίσταση  $R_s$  πρέπει να έχουν μεγάλη σταθερότητα. Η τάση Hall που παράγεται ενισχύεται από έναν ενισχυτή με μεγάλη αντίσταση εισόδου και είναι ανάλογη του μαγνητικού πεδίου.

Hall Effect αισθητήρες με μικρό κόστος κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας πυρίτιο. Πιο ευαίσθητοι αισθητήρες κατασκευάζονται από ημιαγωγούς III-IV, οι οποίοι έχουν ηλεκτρόνια μεγαλύτερης ευκινησίας από αυτά του πυριτίου. Οι πιο εμπορικά διαθέσιμοι αισθητήρες έχουν στοιχεία κατασκευασμένα από IIIIV ημιαγωγούς ινδίου αντιμονίου.

Οι συσκευές πυριτίου έχουν κλίμακα ευαισθησίας από 10G έως 1000G και οι αισθητήρες ινδίου αντιμονίου έχουν χαμηλότερο όριο στα επίπεδα 1-10G. Οι Hall Effect αισθητήρες μπορούν να μετρούν σταθερή ή μεταβαλλόμενη ροή. Είναι ελαφροί με μέγεθος περίπου 0.1 in<sup>2</sup>. Η απαιτούμενη ισχύς για την λειτουργία τους είναι μεταξύ 0.1 και 0.2W και μπορούν να λειτουργούν σε εξαιρετικά ευρεία κλίμακα θερμοκρασίας. Συσκευές τέτοιου είδους είναι διαθέσιμες με κλίμακα θερμοκρασίας από 200°C έως περίπου στο απόλυτο μηδέν (-273°C).

### 3.1.2 Λειτουργία του αισθητήρα Hall

Ένα χαρακτηριστικός αισθητήρας Hall έχει τρία καλώδια ή τερματικά: ένας για τη γείωση, ένας για την τάση μπαταρίας ή αναφοράς και ένας για το σήμα εξόδου. Για να παραγάγει ένα σήμα εξόδου, ένας αισθητήρας Hall πρέπει να τροφοδοτηθεί με μια τάση αναφοράς από 4,5 έως 6 volt. Η τάση τροφοδότησης είναι απαραίτητη για να δημιουργήσει το φαινόμενο που πραγματοποιείται μέσα στον αισθητήρα.



Η λειτουργούσα αρχή στην οποία οι αισθητήρες Hall είναι βασισμένοι (και έτσι ονομασμένη) χρονολογείται από 1879 όταν ανακάλυψε ο Edwin H. Hall, ένας αμερικάνος επιστήμονας, ένα νέο ηλεκτρικό φαινόμενο. Όταν εφάρμοσε ένα ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα κομμάτι του μετάλλου που παρεμβλήθηκε μεταξύ δύο μαγνητών, δημιούργησε μια δευτεροβάθμια τάση μέσα στο μέταλλο όταν τοποθετήθηκε σε μια σωστή γωνία στην εφαρμοσμένη τάση.

### 3.2 Αρχή λειτουργίας διάταξης

Η διάταξη αυτή αποτελείται από:

- Ένα DC τροφοδοτικό
- Έναν σταθεροποιητή τάσης
- Έναν Αισθητήρα Hall
- Ένα βολτόμετρο



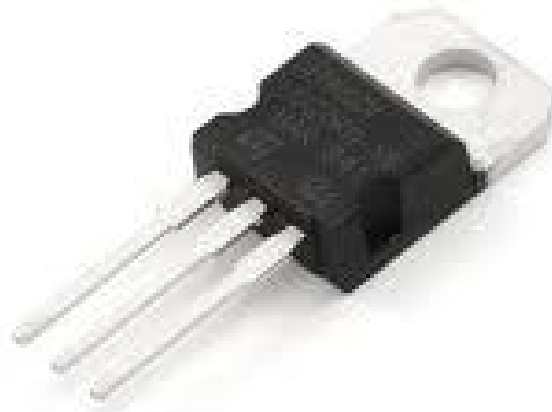
- DC τροφοδοτικό

Το DC τροφοδοτικό χρησιμοποιείται για να μας παρέχει την απαιτούμενη τάση για την λειτουργία του κυκλώματος, στην προκειμένη περίπτωση θα χρησιμοποιήσουμε ένα τροφοδοτικό 6 volt.



- Regulator

Για να τροφοδοτηθεί ο αισθητήρας Hall ο οποίος έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά θα πρέπει να προσαρμόσουμε την τάση τροφοδοσίας στα (4,5v-6v) με την οποία λειτουργεί ο αισθητήρας. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας έναν σταθεροποιητή τάσης ο οποίος προσαρμόζει την τάση του τροφοδοτικού στην τάση λειτουργία του αισθητήρα. Ο σταθεροποιητής τάσης έχει τρία ποδαράκια , το πρώτο το οποίο θα τροφοδοτιδεται από το θετικό πόλο της πηγής Vin, το δεύτερο το οποίο είναι το GND και θα τροφοδοτηθεί από το αρνητικό πόλο της πηγής και το τρίτο ποδαράκι το Vout το οποίο θα παρέχει την τάση στον αισθητήρα.

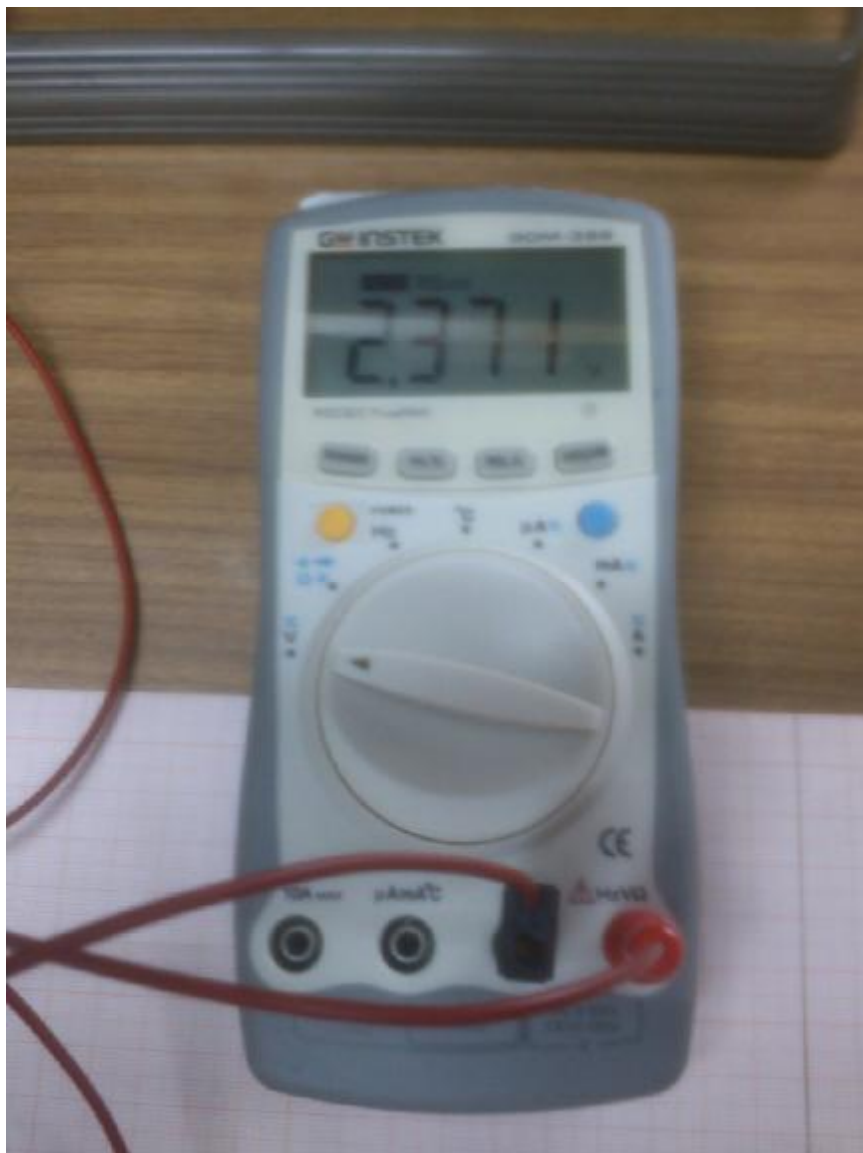


- ο Αισθητήρας Hall

Ο αισθητήρας Hall είναι το βασικό στοιχείο της διάταξης. Για να τροφοδοτηθεί ο αισθητήρας απαιτείται μία τάση η οποία θα βρίσκεται στα όρια ανοχής του αισθητήρα (4,5v-6v). Αυτήν την τάση μας την παρέχει ο σταθεροποιητής. Εν συνεχεία θα παρατηρήσουμε ότι το βολτόμετρο θα μας δείχνει 2,5 volt περίπου η οποία θα είναι και η εν κενό.

- ο Βολτόμετρο

Για την απεικόνιση των μετρήσεων που προκύπτουν από τον αισθητήρα τις παίρνουμε με την βοήθεια ενός βολτομέτρου.



### 3.3 Μετρήσεις

Παίρνοντας τις μετρήσεις από τον αισθητήρα ο οποίος μας παράγει volt χρησιμοποιούμε τον εξής τύπο:

$$B = 1000 * (V_0 - V_1) / K$$

για να μετατρέψουμε τα volt σε ένταση μαγνητικού πεδίου (Gauss) .

Όπου:

B είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου

$V_0$  είναι η τάση εν κενό

$V_1$  είναι η μετρούμενη τιμή

και K είναι η σταθερά σφάλματος

Οι μετρήσεις που έγιναν ήταν σε έναν κυκλικό μαγνήτη. Πήραμε μετρήσεις οριζόντια και κάθετα με κέντρο το μέσο του μαγνήτη.

| ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ<br>ΑΠΟΣΤΑΣΗ<br>(Cm) | ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ<br>ΑΡΙΣΤΕΡΑ<br>(V) | ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ<br>ΔΕΞΙΑ<br>(V) |
|-------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| 11                            | 2,355                        | 2,355                     |
| 10                            | 2,357                        | 2,357                     |
| 9                             | 2,360                        | 2,362                     |
| 8                             | 2,363                        | 2,366                     |
| 7                             | 2,377                        | 2,385                     |
| 6                             | 2,408                        | 2,416                     |
| 5                             | 2,490                        | 2,503                     |
| 4                             | 2,695                        | 2,682                     |

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3.1

Παίρνοντας τις μετρήσεις και με την βοήθεια του τύπου:

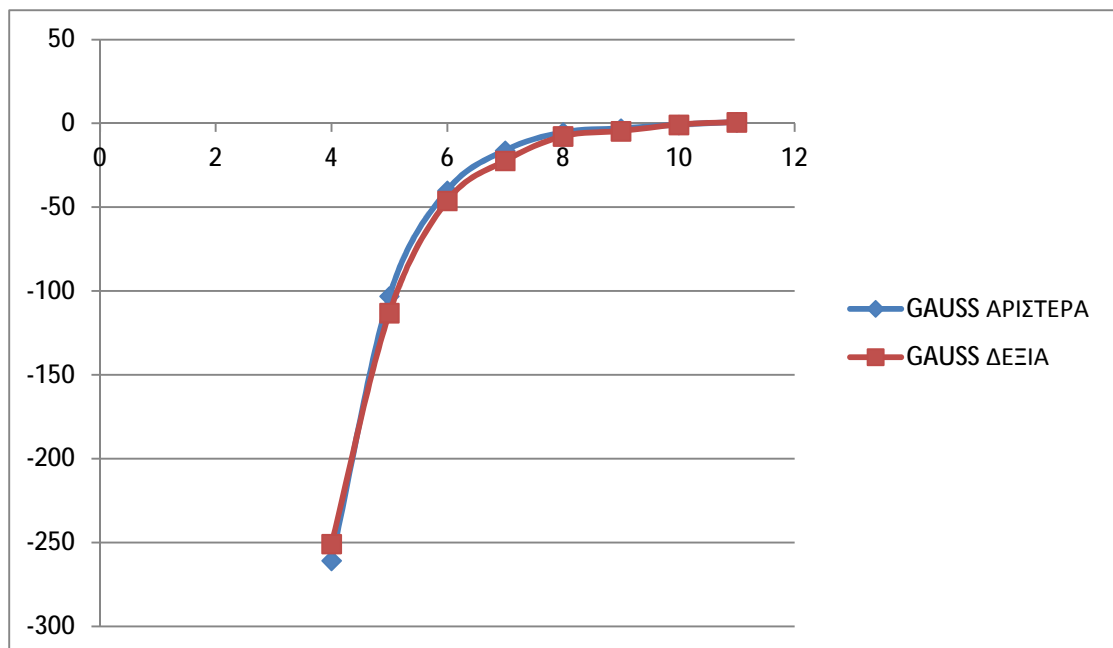
$$B = 1000 * (V_0 - V_1) / K$$

θα βρούμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου.

| ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ (Cm) | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΑΡΙΣΤΕΡΑ (GAUSS) | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΔΕΞΙΑ (GAUSS) |
|-------------------------|---|--------------------------------------|
| 11                      | 0,769                                   | 0,769                                |
| 10                      | -0,769                                  | -0,769                               |
| 9                       | -3,07                                   | -4,61                                |
| 8                       | -5,38                                   | -7,69                                |
| 7                       | -16,15                                  | -22,3                                |
| 6                       | -40                                     | -46,15                               |
| 5                       | -103                                    | -113                                 |
| 4                       | -260,7                                  | -250,76                              |

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3.2

Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου οριζόντια, αριστερά και δεξιά του μαγνήτη.



ΓΡΑΦΗΜΑ 3.3.2

Μετρήσεις κάθετα επάνω και κάτω από το μαγνήτη με κέντρο το μέσο του μαγνήτη.

| ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ<br>ΑΠΟΣΤΑΣΗ<br>(Cm) | ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ<br>ΚΑΤΩ<br>(V) | ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ<br>ΠΑΝΩ<br>(V) |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 11                            | 2,355                    | 2,357                    |
| 10                            | 2,354                    | 2,358                    |
| 9                             | 2,355                    | 2,361                    |
| 8                             | 2,365                    | 2,367                    |
| 7                             | 2,370                    | 2,380                    |
| 6                             | 2,292                    | 2,425                    |
| 5                             | 2,465                    | 2,521                    |
| 4                             | 2,760                    | 2,790                    |

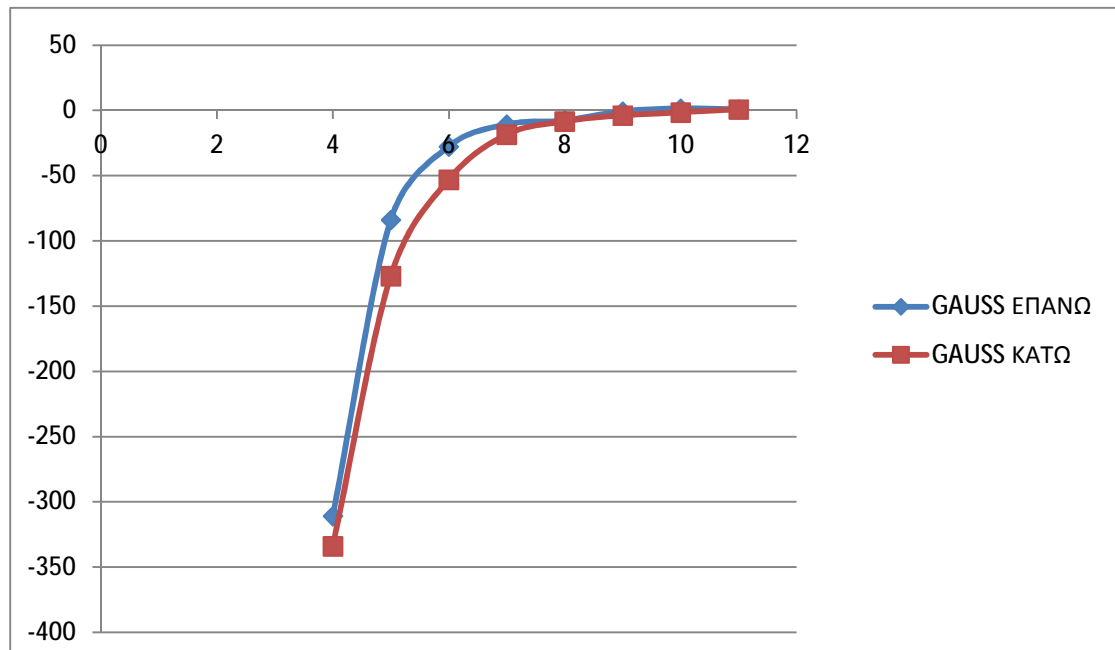
ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3.3

Παίρνοντας τις μετρήσεις με την χρήση του παραπάνω τύπου βγαίνουν τα παρακάτω αποτελέσματα.

| ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ<br>ΑΠΟΣΤΑΣΗ<br>(Cm) | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ<br>ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ<br>ΚΑΤΩ<br>(GAUSS) | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ<br>ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ<br>ΠΑΝΩ<br>(GAUSS) |
|-------------------------------|--|--|
| 11                            | 0,769  | 0,769  |
| 10                            | 1,53   | -1,53  |
| 9                             | -0,769                                       | -3,84  |
| 8                             | -7,69  | -8,46  |
| 7                             | -10,76                                       | -18,46                                       |
| 6                             | -27,69                                       | -53,07                                       |
| 5                             | -83,84                                       | -126,9                                       |
| 4                             | -310,76                                      | -333,84                                      |

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3.4

Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου κάθετα, επάνω και κάτω του μαγνήτη.



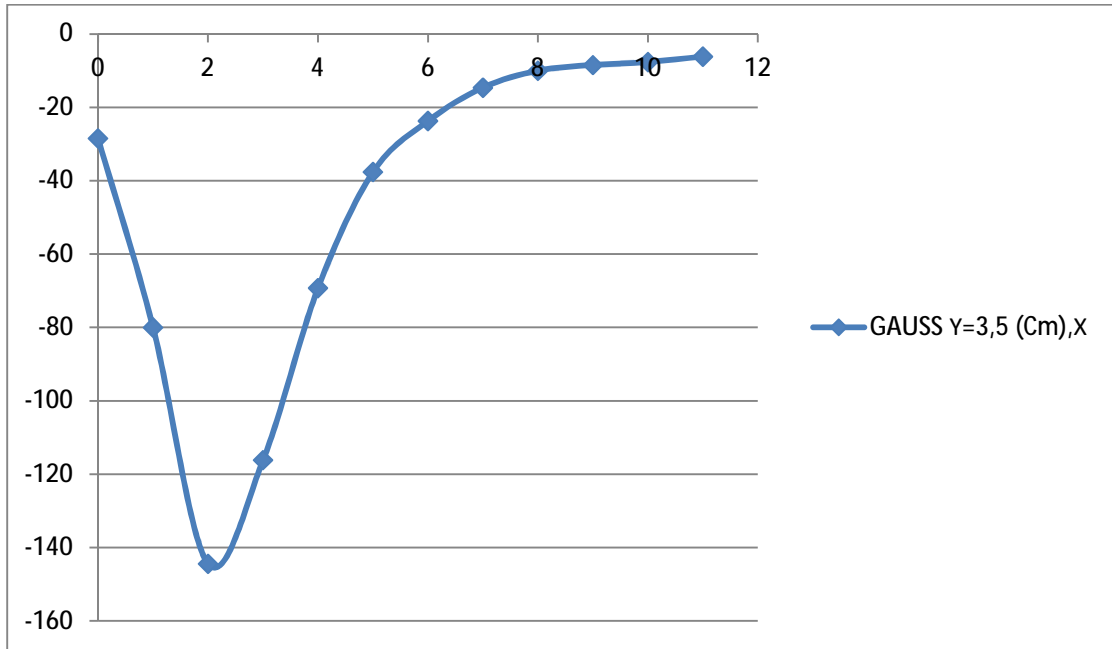
ΓΡΑΦΗΜΑ 3.3.4



Κάναμε και μια διαφορετική μέτρηση στο μαγνήτη, αυτή τη φορά πήραμε μετρήσεις οριζόντια αλλά τοποθετώντας τον αισθητήρα στο άκρο του και όχι στο μέσο όπως έγιναν οι προηγούμενες. Λαμβάνοντας τα παρακάτω αποτελέσματα.

| ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ<br>ΑΠΟΣΤΑΣΗ<br>(Cm) | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ<br>ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ<br>(V) | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ<br>ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ<br>ΤΥΠΟΥ<br>(GAUSS) |
|-------------------------------|----------------------------------|--|
| 11                            | 2,364                            | -6,15  |
| 10                            | 2,366                            | -7,64  |
| 9                             | 2,367                            | -8,46  |
| 8                             | 2,369                            | -10  |
| 7                             | 2,375                            | -14,61   |
| 6                             | 2,386                            | -23,7  |
| 5                             | 2,405                            | -37,6  |
| 4                             | 2,446                            | -69,23   |
| 3                             | 2,507                            | -116,15  |
| 2                             | 2,544                            | -144,41  |
| 1                             | 2,460                            | -80  |
| 0                             | 2,393                            | -28,46   |

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3.5



ΓΡΑΦΗΜΑ 3.3.5

Για να κατανοήσουμε πλήρως τη συμπεριφορά του μαγνητικού πεδίου από τον μαγνήτη κάναμε και μία μέτρηση κυκλικά σε διαφορετικές αποστάσεις από το κέντρο του. Λαμβάνοντας, τα παρακάτω αποτελέσματα.

| ΑΠΟΣΤΑΣΗ<br>5,2 Cm | ΜΕΤΡΗΣΗ<br>(V) | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ<br>ΜΕ ΧΡΗΣΗ<br>ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ<br>(GAUSS) |
|--------------------|----------------|--|
| 5.2                | 2,482          | -96.4  |
| 5.2                | 2,500          | -110.76  |
| 5.2                | 2,482          | -96.72   |
| 5.2                | 2,470          | -87.69   |

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3.6

| ΑΠΟΣΤΑΣΗ<br>6,2 Cm | ΜΕΤΡΗΣΗ<br>(V) | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ<br>ΜΕ ΧΡΗΣΗ<br>ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ<br>(GAUSS) |
|--------------------|----------------|--|
| 6,2                | 2,414          | -44,61   |
| 6,2                | 2,427          | -54,61   |
| 6,2                | 2,412          | -43  |
| 6.2                | 2,405          | -37,69   |

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3.7

### 3.4 Συμπεράσματα μετρήσεων

Κάνοντας αρκετές μετρήσεις ώστε να καταλάβουμε πλήρως την συμπεριφορά του μαγνητικού πεδίου από τον στρογγυλό μαγνήτη, παρατηρούμε ότι όλες οι μετρήσεις μας βγάζουν αρνητικά GAUSS. Αυτό μας δείχνει ότι εξωτερικά του μαγνήτη θα πρέπει να βρίσκεται ο νότιος πόλος. Επίσης από τις μετρήσεις συμπεραίνουμε ότι η ένταση του μαγνητικού πεδίου καθώς πλησιάζουμε τον αισθητήρα στο μαγνήτη αυξάνεται, αυτό κρίνεται απολύτως φυσιολογικό.

Επίσης από τις μετρήσεις που έγιναν συμπεραίνουμε ότι η ένταση του μαγνητικού πεδίου στα άκρα του μαγνήτη είναι μικρότερη από την ένταση του μαγνητικού πεδίου στο κέντρο. Αυτό θα πρέπει να οφείλεται στις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου.

Εν συνεχεία θα πρέπει να αναφέρουμε ότι λόγω έλλειψης οργάνου για την μέτρηση του μαγνητικού πεδίου (μαγνητόμετρο), δεν γνωρίζουμε κατά πόσο ακριβής είναι οι μετρήσεις μας. Οπότε δεν γνωρίζουμε και το ποσοστό λάθους στις μετρήσεις. Τέλος αυτό που θα θέλαμε να αναφέρουμε είναι πώς ο αισθητήρας που χρησιμοποιήσαμε έχει ευαισθησία 1,3 mV /Gauss .

#### 4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλίο: ΦΥΣΙΚΗ ΜΕΡΟΣ ΙΙ .DAVID HALLIDAY ΚΑΙ ROBERT RESNICK.  
(ΕΚΔΟΣΗ Γ.Α. ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΟΥ)

Ο ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ. GRAHAM IAN.  
(ΕΚΔΟΤΗΣ :ΣΑΒΒΑΛΑ)

ΜΙΚΡΟΑΙΣΘΗΡΗΡΕΣ ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ. JULIAN W.  
GARRDNER (ΕΚΔΟΤΗΣ :ΤΖΙΟΛΑ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ)

Πηγές: <http://el.wikipedia.org>

<http://www.teicrete.gr/physics/lab/fdm/eppa/mk/Hall%20effect.pdf>

<http://magnmat.physics.auth.gr/documents/History2001.pdf>

<http://www.livepedia.gr>

[http://vivliothmy.ee.auth.gr/271/1/ΣΧΕΔΙΑΣΗ\\_ΚΑΙ\\_ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ\\_ΔΙΑΤΑΞΗΣ\\_ΘΕΡΜΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ\\_ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.pdf](http://vivliothmy.ee.auth.gr/271/1/ΣΧΕΔΙΑΣΗ_ΚΑΙ_ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ_ΔΙΑΤΑΞΗΣ_ΘΕΡΜΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ_ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.pdf)