

1 Μαγνητισμός και ηλεκτρομαγνητισμός

Μαγνητική επιδεκτικότητα

Η μαγνητική επιδεκτικότητα μίας ουσίας είναι η ικανότητα των εξωτερικών μαγνητικών πεδίων να επηρεάσουν τους πυρήνες ενός συγκεκριμένου ατόμου και σχετίζεται με τις διαμορφώσεις των ηλεκτρονίων του ατόμου. Ο πυρήνας του ατόμου, ο οποίος περιστοιχίζεται από συζευγμένα ηλεκτρόνια, είναι πιο προστατευμένος και ανεπηρέαστος από το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, από έναν πυρήνα ενός ατόμου με ασύζευκτα ηλεκτρόνια. Υπάρχουν τρεις τύποι μαγνητικής επιδεκτικότητας: ο παραμαγνητισμός, ο διαμαγνητισμός και ο σιδηρομαγνητισμός.

Παραμαγνητισμός

Οι παραμαγνητικές ουσίες περιέχουν ασύζευκτα ηλεκτρόνια μέσα στο ατόμο που προκαλούν μικρό μαγνητικό πεδίο γύρω τους, γνωστό ως **μαγνητική ροπή**. Χωρίς εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, οι μαγνητικές ροπές συμβαίνουν σε τυχαίο σχηματισμό και αλληλοεξουδετερώνονται. Στην παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, οι παραμαγνητικές ουσίες ευθυγραμμίζονται κατά τη φορά του πεδίου και έτσι αθροίζονται οι μαγνητικές ροπές. Οι παραμαγνητικές ουσίες επηρεάζουν θετικά τα εξωτερικά μαγνητικά πεδία και έχουν ως αποτέλεσμα την τοπική αύξηση του μαγνητικού πεδίου (Εικ. 1.1). Ένα παράδειγμα παραμαγνητικής ουσίας είναι το οξυγόνο.

Διαμαγνητισμός

Χωρίς την παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, οι διαμαγνητικές ουσίες δεν δίνουν συνισταμένη μαγνητική ροπή, αφού τα ρεύματα των ηλεκτρονίων που παράγονται λόγω των κινήσεών τους αθροίζονται σε μηδέν. Όταν εφαρμόζεται ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, οι διαμαγνητικές ουσίες παρουσιάζουν μικρή μαγνητική ροπή που αντιτίθεται στο εφαρμοζόμενο πεδίο (Εικ. 1.2). Οι ουσίες αυτού του τύπου ως εκ τούτου απωθούνται ελαφρά από το μαγνητικό πεδίο και έχουν αρνητικές μαγνητικές επιδεκτικότητες. Παραδείγματα διαμαγνητικών ουσιών περιλαμβάνουν το νερό και τα αδρανή αέρια.

Σιδηρομαγνητισμός

Όταν μία σιδηρομαγνητική ουσία έρχεται σε επαφή με ένα μαγνητικό πεδίο, έχει ως αποτέλεσμα την ισχυρή έλξη και ευθυγράμμιση. Η μαγνήτιση παραμένει και στην περίπτωση απουσίας του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου (Εικ. 1.3). Οι σιδηρομαγνητικές ουσίες παραμένουν μαγνητικές, μαγνητίζονται μόνιμα και ακολούθως γίνονται μόνιμοι μαγνήτες. Ένα παράδειγμα σιδηρομαγνητικής ουσίας είναι ο σίδηρος.

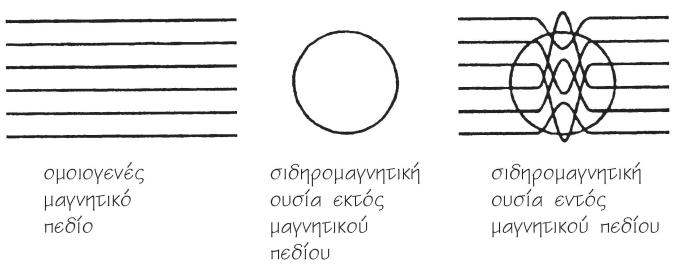
Οι μαγνήτες έχουν δύο πόλους, το βόρειο και το νότιο. Το μαγνητικό πεδίο που ασκείται από αυτούς παράγει μαγνητικές γραμμές ή δυναμικές γραμμές οι οποίες έχουν φορά από το νότιο στο βόρειο πόλο του μαγνήτη. Ονομάζονται **μαγνητικές γραμμές ροής** (Εικ. 1.4). Ο αριθμός των γραμμών ανά μονάδα επιφάνειας ονομάζεται **πυκνότητα μαγνητικής ροής**. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου, που εκφράζεται με το σύμβολο (B) (ή στην περίπτωση των περισσότερων από του ενός πεδίου, το πρωτεύον πεδίο (B_0) και το δευτερεύον πεδίο (B_r), μετριέται σε μία από τις τρεις μονάδες, gauss (G), kilogauss (kG) και tesla (T). Αν δύο μαγνήτες έρθουν κοντά, δημιουργούνται ελκτικές και απωθητικές δυνάμεις, οι οποίες εξαρτώνται από τον προσανατολισμό των πόλων σε σχέση με αυτούς. Οι ομώνυμοι πόλοι απωθούνται, ενώ οι ετερόνυμοι έλκονται.



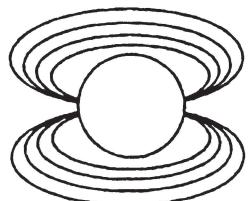
Εικ. 1.1 Παραμαγνητικές ιδιότητες.



Εικ. 1.2 Διαμαγνητικές ιδιότητες.



σιδηρομαγνητική ουσία μετά από έκθεση σε μαγνητικό πεδίο



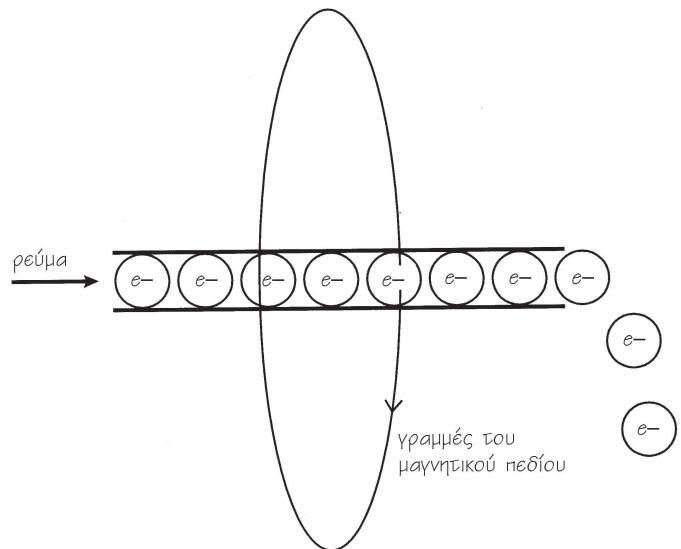
Εικ. 1.3 Σιδηρομαγνητικές ιδιότητες.

Ηλεκτρομαγνητισμός

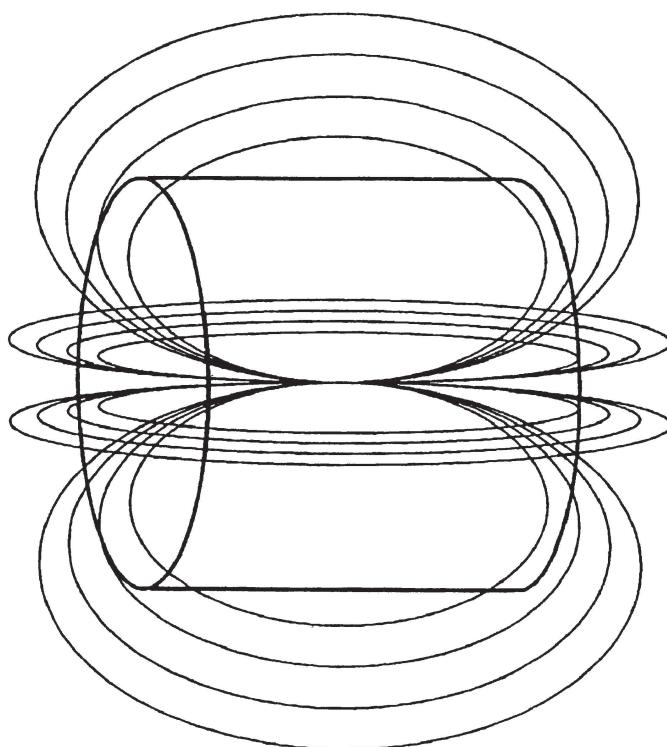
Τα μαγνητικά πεδία δημιουργούνται από κινούμενα φορτία (ηλεκτρικό ρεύμα) (Εικ. 1.5). Η διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου μπορεί να είναι κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού ή αντίθετα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού σε σχέση με τη διεύθυνση της ροής του ρεύματος. Ο **νόμος του Ampere ή ο κανόνας του δεξιού χεριού του Fleming** καθορίζει το πλάτος και τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου λόγω της παρουσίας ενός ρεύματος. Αν δειξεις με το δεξιό αντίχειρα κατά τη διεύθυνση του ρεύματος, τότε το μαγνητικό πεδίο δείχνει κατά τη διεύθυνση των υπόλοιπων δακτύλων.

Όπως το κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο δημιουργεί μαγνητικά πεδία, η μεταβολή μαγνητικών πεδίων δημιουργεί ηλεκτρικά ρεύματα. Όταν ένας μαγνήτης κινείται μέσα και έξω από ένα κλειστό κύκλωμα, παράγεται ένα ρεύμα ταλάντωσης το οποίο εξαφανίζεται τη στιγμή που ο μαγνήτης σταματά να κινείται. Ένα τέτοιο ρεύμα αποκαλείται **επαγωγικό ηλεκτρικό ρεύμα**.

Ο **νόμος της επαγωγής του Faraday** εξηγεί τη δημιουργία ενός επαγωγικού ρεύματος. Η αλλαγή της μαγνητικής ροής μέσα σε ένα κλειστό κύκλωμα προκαλεί μία **ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ)** στο κύκλωμα. Η ΗΕΔ οδηγεί το ρεύμα στο κύκλωμα και είναι το αποτέλεσμα ενός μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου το οποίο δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο.



Εικ. 1.5 Ροή ηλεκτρονίων κατά μήκος σύρματος και το επαγώμενο μαγνητικό πεδίο.



Εικ. 1.4 Μαγνητικές γραμμές ροής.

Οι νόμοι της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής δηλώνουν ότι η ηλεκτρεγερτική δύναμη εξ επαγωγής:

- Είναι ανάλογη του ρυθμού μεταβολής του μαγνητικού πεδίου και του εμβαδού του κυκλώματος.
- Είναι σε τέτοια κατεύθυνση έτσι ώστε να αντιτίθεται στην αλλαγή του μαγνητικού πεδίου το οποίο προκαλεί (**νόμος του Lenz**). Η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή είναι ένα βασικό φυσικό φαινόμενο της απεικόνισης μαγνητικού συντονισμού (ΑΜΣ), αλλά συγκεκριμένα εμπλέκεται στα παρακάτω:
 - Το ιδιοπεριστρεφόμενο φορτίο ενός πρωτονίου υδρογόνου επάγει ένα μαγνητικό πεδίο γύρω από αυτό (βλέπε Κεφάλαιο 2).
 - Η κίνηση του συνισταμένου ανύσματος της μαγνήτισης (ΣΑΜ) κατά μήκος της περιοχής ενός πηνίου δέκτη επάγει ηλεκτρικό ρεύμα στο πηνίο αυτό (βλέπε Κεφάλαιο 4).

2 Δομή του ατόμου

Το άτομο αποτελείται από τα παρακάτω σωματίδια (Εικ. 2.1):

- | | |
|------------|--|
| Πρωτόνια | • Βρίσκονται μέσα στον πυρήνα |
| Νετρόνια | • Είναι θετικά φορτισμένα |
| Ηλεκτρόνια | • Βρίσκονται μέσα στον πυρήνα |
| | • Δεν έχουν φορτίο |
| | • Περιστρέφονται γύρω από τον πυρήνα σε ξεχωριστές στοιβάδες |
| | • Είναι αρνητικά φορτισμένα |

Οι παρακάτω όροι χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίσουν ένα άτομο:

Ατομικός αριθμός είναι ο αριθμός πρωτονίων στον πυρήνα, καθορίζει τον τύπο του στοιχείου που σχηματίζουν τα άτομα.

Μαζικός αριθμός είναι το άθροισμα των νετρονίων και πρωτονίων στον πυρήνα.

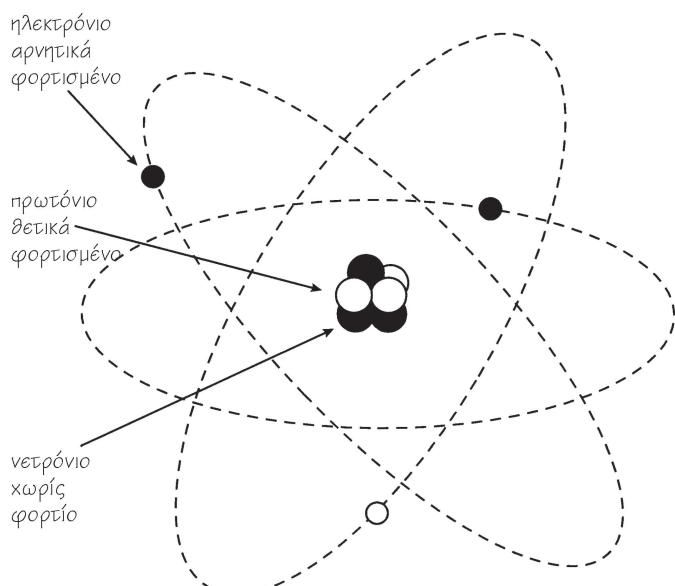
Άτομα του ίδιου στοιχείου που έχουν διαφορετικό μαζικό αριθμό ονομάζονται **Ισότοπα**.

Σε ένα σταθερό άτομο ο αριθμός των αρνητικά φορτισμένων ηλεκτρονίων ισούται με τον αριθμό των θετικά φορτισμένων πρωτονίων. Τα άτομα με έλλειμμα ή πληθώρα αριθμού ηλεκτρονίων ονομάζονται **Ιόντα**.

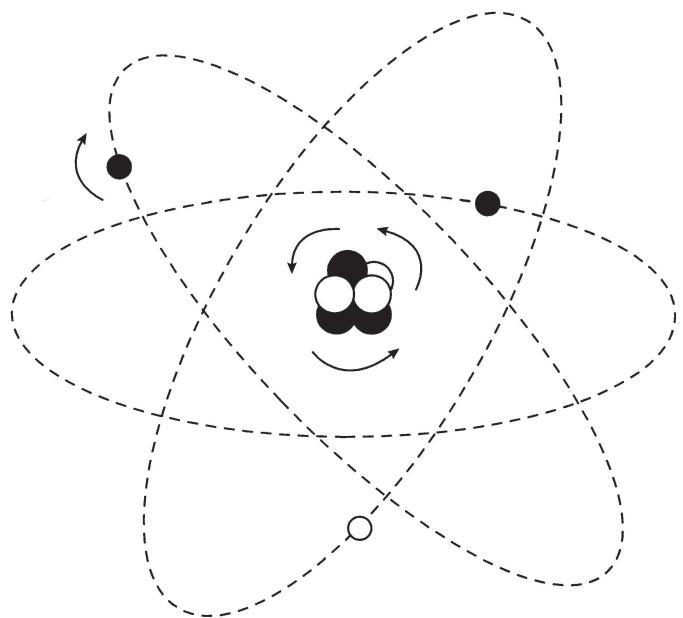
Κίνηση μέσα στο άτομο (Εικ. 2.2)

- Αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια περιστρέφονται γύρω από τον άξονά τους (ιδιοπεριστροφή).
- Αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια περιστρέφονται γύρω από τον πυρήνα.
- Ο πυρήνας περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του.

Κάθε είδος κίνησης δημιουργεί μαγνητικό πεδίο (δες Κεφάλαιο 1). Στο μαγνητικό συντονισμό (ΜΣ) μας απασχολεί η κίνηση του πυρήνα.



Εικ. 2.1 Το άτομο.



Εικ. 2.2 Η κίνηση των σωματιδίων στο άτομο.

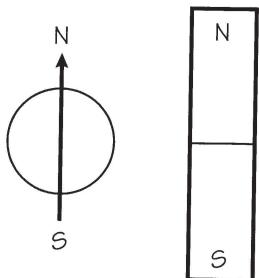
Ενεργοί πυρήνες στο μαγνητικό συντονισμό

Τα πρωτόνια και τα νετρόνια περιστρέφονται γύρω από τους άξονές τους μέσα στον πυρήνα. Η κατεύθυνση της περιστροφής είναι τυχαία, έτσι ώστε κάποια σωματίδια περιστρέφονται με φορά τους δείκτες του ρολογιού και άλλα αντίθετα με τους δείκτες του ρολογιού.

• Όταν ένας πυρήνας έχει **άρτιο μαζικό αριθμό**, οι ιδιοστροφορμές αλληλοεξουδετερώνονται και έτσι ο πυρήνας **δεν έχει συνισταμένη ιδιοστροφορμή**.

• Όταν ένας πυρήνας έχει **περιττό μαζικό αριθμό**, οι ιδιοστροφορμές δεν αλληλοεξουδετερώνονται και έτσι ο πυρήνας **αποκτά συνισταμένη ιδιοστροφορμή**.

Αφού τα πρωτόνια έχουν φορτίο, ένας πυρήνας με περιττό μαζικό αριθμό έχει συνολικό φορτίο, όπως επίσης συνισταμένη ιδιοστροφορμή. Λόγω των νόμων της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής (δες Κεφάλαιο 1), ένα κινούμενο φορτίο επάγει μαγνητικό πεδίο γύρω από αυτό. Η διεύθυνση και το πλάτος του μαγνητικού πεδίου δηλώνεται από τη μαγνητική ροπή ή το διάνυσμα (Εικ. 2.3). Η συνολική μαγνητική ροπή ενός πυρήνα είναι το διανυσματικό άθροισμα όλων των μαγνητικών ροπών των πρωτονίων του πυρήνα. Το μήκος του διανύσματος αναπαριστά το πλάτος της μαγνητικής ροπής. Η διεύθυνση του διανύσματος δηλώνει τη διεύθυνση ευθυγράμμισης της μαγνητικής ροπής.



Εικ. 2.3 Η μαγνητική ροπή του πυρήνα του υδρογόνου.

Οι πυρήνες με περιπτώ αριθμό πρωτονίων ονομάζονται **“ενεργοί” στο μαγνητικό συντονισμό**. Συμπεριφέρονται σαν μικροσκοπικοί μαγνητικοί ράβδοι. Υπάρχουν πολλοί τύποι στοιχείων που είναι ενεργοί στο μαγνητικό συντονισμό. Όλοι έχουν περιπτούς μαζικούς αριθμούς. Αυτοί είναι:

Υδρογόνο 1, Άνθρακας 13, Φθόριο 19, Φώσφορος 31,
Άζωτο 15, Οξυγόνο 17, Νάτριο 23

Ο πυρήνας **υδρογόνου** είναι ο “ενεργός” πυρήνας που χρησιμοποιείται στην απεικόνιση μαγνητικού συντονισμού. Αυτός ο πυρήνας αποτελείται από ένα πρωτόνιο (ατομικός αριθμός 1). Χρησιμοποιείται στην απεικόνιση μαγνητικού συντονισμού διότι:

- είναι άφθονος στο ανθρώπινο σώμα (π.χ. στο λίπος και στο νερό)
- το μοναδικό πρωτόνιο του δίνει μεγάλη μαγνητική ροπή.

3 Ευθυγράμμιση και μετάπτωση

Ευθυγράμμιση

Σε ένα φυσιολογικό περιβάλλον οι μαγνητικές ροπές των ενεργών πυρήνων ΜΣ έχουν τυχαίες διευθύνσεις ώστε δεν παράγουν συνολικό μαγνητικό αποτέλεσμα. Όταν οι πυρήνες τοποθετηθούν σε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, οι μαγνητικές ροπές τους ευθυγραμμίζονται με τις μαγνητικές γραμμές. Αυτό ονομάζεται **ευθυγράμμιση** (Εικ. 3.1). Η ευθυγράμμιση μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας δύο θεωρίες: την κλασική θεωρία και την κβαντική θεωρία.

Η κλασική θεωρία

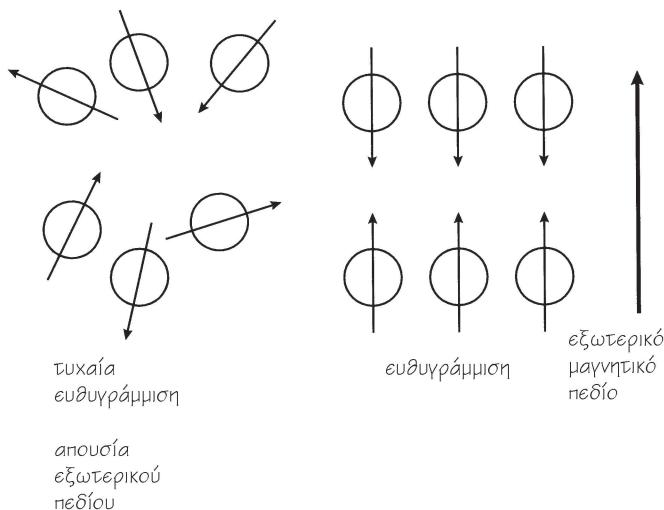
Αυτή χρησιμοποιεί την κατεύθυνση των μαγνητικών ροπών για να επεξηγήσει την ευθυγράμμιση (Εικ. 3.2).

- **Η παράλληλη ευθυγράμμιση** περιγράφει την ευθυγράμμιση των μαγνητικών ροπών με την **ιδια** φορά με το κυρίως πεδίο.
- **Η αντιπαράλληλη ευθυγράμμιση** περιγράφει την ευθυγράμμιση των μαγνητικών ροπών με την **αντίθετη** φορά από το κυρίως πεδίο.

Σε θερμοκρασία δωματίου υπάρχουν πάντα περισσότεροι πυρήνες με τις μαγνητικές ροπές τους ευθυγραμμισμένες παράλληλα ως προς το κύριο πεδίο αντί ευθυγραμμισμένες αντιπαράλληλα. Ο συνολικός μαγνητισμός του ασθενή (ορίζεται συνιστάμενο άνυσμα της μαγνήτισης ή ΣΑΜ), ο οποίος αντανακλά την ισορροπία μεταξύ των παράλληλων και αντιπαράλληλων μαγνητικών ροπών, ως εκ τούτου ευθυγραμμίζεται παράλληλα στο κυρίως πεδίο σε θερμοκρασία δωματίου (θερμική ισορροπία).

Η κβαντική θεωρία

Αυτή χρησιμοποιεί το ενεργειακό επίπεδο των πυρήνων για να επεξηγήσει την ευθυγράμμιση. Υπάρχουν κάποιοι παράγοντες που καθορίζουν αν η μαγνητική ροπή ενός πυρήνα ευθυγραμμίζεται σε παράλληλη ή αντιπαράλληλη διεύθυνση.



Εικ. 3.1 Ευθυγράμμιση.

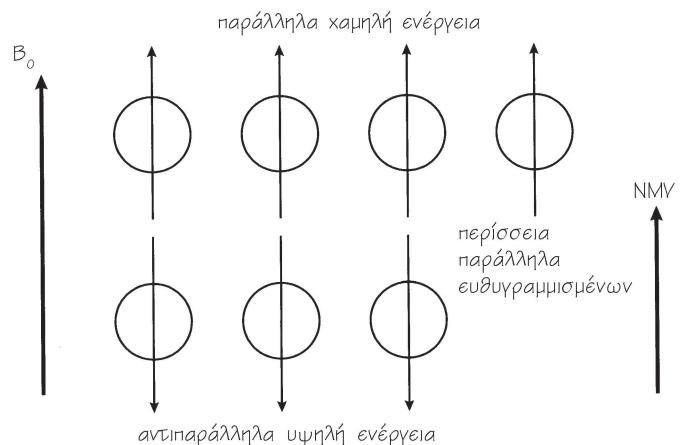
Αυτοί είναι:

- το πλάτος ή η ένταση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου ορίζεται B_0 και μετράται σε tesla (T)
- το ενεργειακό επίπεδο του πυρήνα.

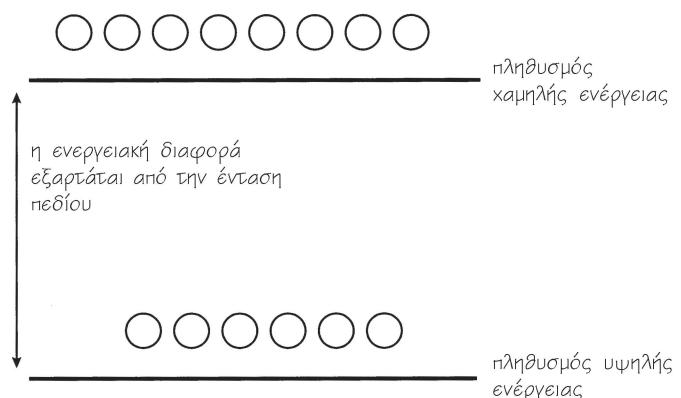
Με βάση την κβαντική θεωρία οι μαγνητικές ροπές των πυρήνων υδρογόνου ευθυγραμμίζονται κατά την παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου στις ακόλουθες δύο ενεργειακές καταστάσεις ή πληθυσμούς (Εικ. 3.3).

- Οι πυρήνες με ιδιοστροφορμή προς τα πάνω έχουν χαμηλή ενέργεια και δεν έχουν αρκετή ενέργεια να αντισταθούν στο κυρίως πεδίο. Αυτοί είναι οι πυρήνες που ευθυγραμμίζουν τις μαγνητικές ροπές τους παράλληλα στο κυρίως πεδίο στην κλασική περιγραφή.
- Οι πυρήνες με ιδιοστροφορμή προς τα κάτω (σε σχέση με τη φορά εξωτερικού μαγνητικού πεδίου B_0) έχουν υψηλή ενέργεια και έχουν αρκετή ενέργεια να αντισταθούν στο κυρίως πεδίο. Αυτοί είναι οι πυρήνες που ευθυγραμμίζουν τις μαγνητικές ροπές τους αντιπαράλληλα στο κυρίως πεδίο στην κλασική περιγραφή.

Οι μαγνητικές ροπές των πυρήνων ευθυγραμμίζονται στην πράξη σε γωνία με το B_0 λόγω της απωστικής δύναμης μεταξύ του B_0 και των μαγνητικών ροπών.



Εικ. 3.2 Ευθυγράμμιση: η κλασική θεωρία.



Εικ. 3.3 Ευθυγράμμιση: η κβαντική θεωρία.