

1

Βασικές αρχές

Εισαγωγή	1	Συντονισμός (resonance)	11
Δομή του ατόμου	1	Το σήμα στον μαγνητικό συντονισμό (ΜΣ)	15
Κινήσεις στο άτομο	2	Το σήμα ελεύθερης απόσβεσης επαγωγής (free induction decay, FID)	16
Ενεργοί πυρήνες στον μαγνητικό συντονισμό (ΜΣ)	4	Αποδιέγερση (relaxation)	16
Ο πυρήνας του υδρογόνου	4	T ₁ αποκατάσταση (T ₁ recovery)	16
Ευθυγράμμιση (alignment)	5	T ₂ απόσβεση (T ₂ decay)	16
Μετάπτωση (precession)	8	Χρονικές παράμετροι των RF παλμών (ραδιοπαλμών)	19
Η εξίσωση Larmor	9		

Εισαγωγή

Οι βασικές αρχές της μαγνητικής τομογραφίας [MT (magnetic resonance imaging, MRI)] αποτελούν το θεμέλιο για την περαιτέρω κατανόηση αυτού του πολύπλοκου θέματος. Είναι σημαντικό αυτές οι αρχές να γίνουν πλήρως κατανοητές, πριν να συνεχίσουμε σε πιο περύπλοκα πεδία. Ουσιαστικά, υπάρχουν δύο τρόποι, για να ερμηνευτούν οι βασικές αρχές της MT: ο κλασικός και εκείνος της κιβαντικής φυσικής. Οποιαδήποτε ανάλυση απαιτεί και τους δύο και γι' αυτόν τον λόγο προσπαθήσαμε να ενσωματώσουμε και τις δύο εκδοχές. Στο παρόν κεφάλαιο συζητούνται οι ιδιότητες των ατόμων και οι αλληλεπιδράσεις τους με τα μαγνητικά πεδία, η διέγερση και η αποδιέγερση (χαλάρωση).

Δομή του ατόμου

Όλες οι δομές, συμπεριλαμβανομένου και του ανθρώπινου σώματος, απαρτίζονται από άτομα. Τα άτομα είναι πολύ μικρά. Μισό εκατομμύριο άτομα παρατεταγμένα μαζί έχουν εύρος μικρότερο από μια τρίχα μαλλιών. Τα άτομα οργανώνονται σε **μόρια**, στα οποία δύο ή περισσότερα άτομα διατάσσονται μαζί. Το πολυπληθέστερο άτομο στο σώμα είναι το **υδρογόνο**, το οποίο βρίσκεται

συχνότερα στα μόρια του νερού (όπου δύο άτομα υδρογόνου ενώνονται με ένα άτομο οξυγόνου, H_2O) και στο λίπος (στο οποίο τα άτομα του υδρογόνου διατάσσονται με άτομα άνθρακα και οξυγόνου· ο αριθμός καθενός από αυτά εξαρτάται από τον τύπο του λίπους).

Το άτομο αποτελείται από τον **πυρήνα** στο κέντρο και τα **ηλεκτρόνια** σε τροχιές γύρω από αυτόν (Εικόνα 1.1). Ο πυρήνας είναι εξαιρετικά μικρός, ένα εκατομμυριοστό του δισεκατομμυριοστού του συνολικού όγκου του ατόμου, αλλά συγκεντρώνει όλη τη μάζα του ατόμου. Αυτή η μάζα προέρχεται κυρίως από σωματίδια, που αποκαλούνται **νουκλεόνια**, τα οποία διακρίνονται σε **πρωτόνια** και **νετρόνια**. Τα άτομα χαρακτηρίζονται με δυο τρόπους. Ο **ατομικός αριθμός** είναι το άθροισμα των πρωτονίων στον πυρήνα. Αυτός ο αριθμός προσδίδει στο άτομο τη χημική του ταυτότητα. Ο **μαζικός αριθμός** είναι το άθροισμα των πρωτονίων και των νετρονίων του πυρήνα. Οι αριθμοί των νετρονίων και των πρωτονίων του πυρήνα είναι συνήθως ίσοι, ώστε ο μαζικός αριθμός να είναι ζυγός. Σε μερικά άτομα, όμως, υπάρχουν ελαφρώς περισσότερα ή λιγότερα νετρόνια από πρωτόνια. Τα άτομα στα οποία είναι με τον ίδιο αριθμό πρωτονίων αλλά διαφορετικό αριθμό νετρονίων ονομάζονται **ισότοπα**. Πυρήνες με περιπτώ μαζικό αριθμό (διαφορετικό αριθμό πρωτονίων από νετρόνια) είναι σημαντικοί στη ΜΤ (βλ. παρακάτω).

Τα ηλεκτρόνια είναι σωματίδια που περιστρέφονται γύρω από τον πυρήνα. Παραδοσιακά θεωρούνται ως το ανάλογο των πλανητών που περιστρέφονται γύρω από τον ήλιο. Στην πραγματικότητα, τα ηλεκτρόνια βρίσκονται γύρω από τον πυρήνα σαν σε νέφος· η εξώτατη περίμετρος του νέφους αποτελεί το όριο του ατόμου. Η θέση ενός ηλεκτρονίου στο νέφος δεν είναι προβλέψιμη, καθώς εξαρτάται από την ενέργεια του συγκεκριμένου ηλεκτρονίου στην εκάστοτε χρονική στιγμή [οι φυσικοί το αποκαλούν Αρχή της Αβεβαιότητας (Heisenberg's Uncertainty Principle)]. Ο αριθμός των ηλεκτρονίων είναι συνήθως ίσος με τον αριθμό των πρωτονίων στον πυρήνα.

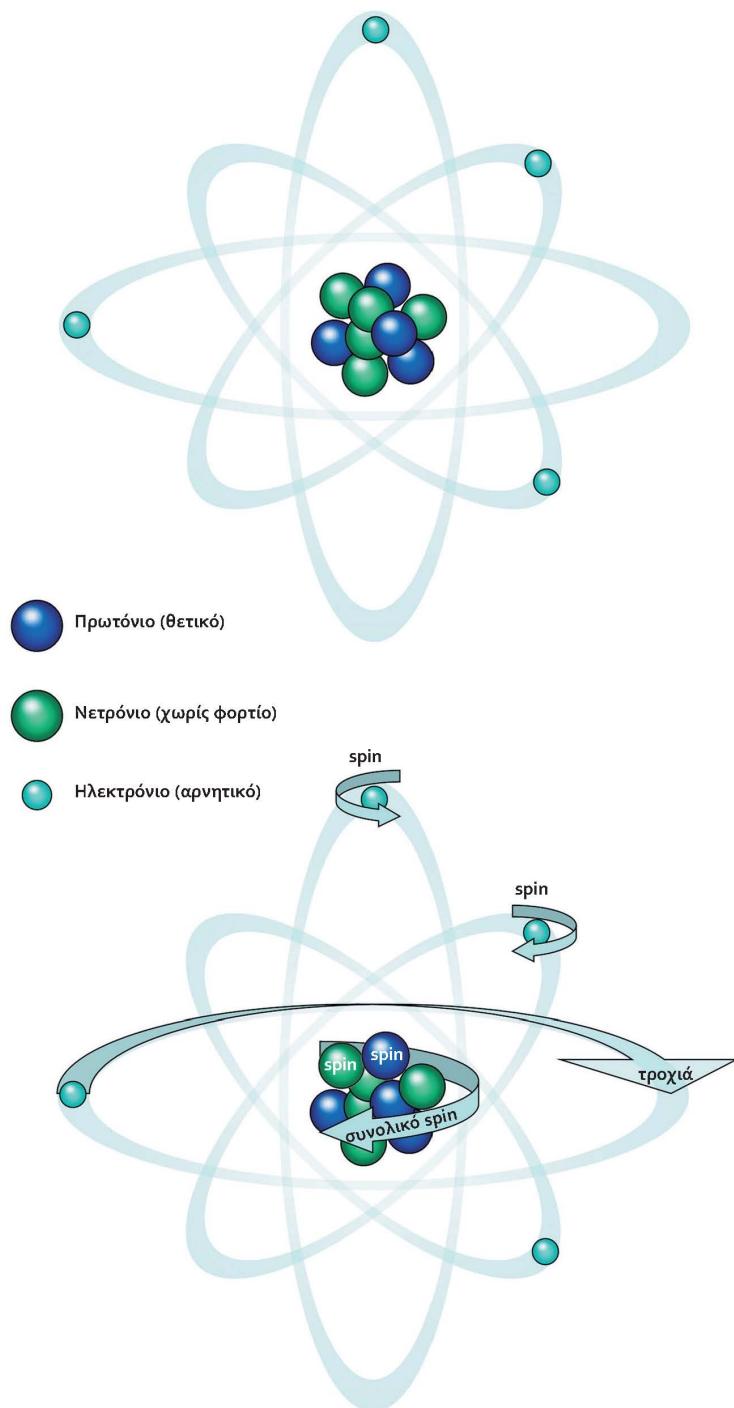
Τα πρωτόνια έχουν θετικό ηλεκτρικό φορτίο, τα νετρόνια έχουν μηδενικό ή ουδέτερο φορτίο και τα ηλεκτρόνια είναι αρνητικά φορτισμένα. Έτσι, τα άτομα είναι ηλεκτρικά σταθερά, εάν ο αριθμός των αρνητικά φορτισμένων ηλεκτρονίων είναι ίσος με τον αριθμό των θετικά φορτισμένων πρωτονίων. Αυτή η ισορροπία μερικές φορές διαταράσσεται με την απόδοση εξωτερικής ενέργειας, έτσι ώστε να αποσπαστούν ηλεκτρόνια από το άτομο. Αυτό προκαλεί έλλειμμα στον αριθμό των ηλεκτρονίων σε σύγκριση με εκείνο των πρωτονίων και προκαλεί ηλεκτρική αστάθεια. Άτομα στα οποία έχει συμβεί αυτό ονομάζονται **ιόντα**.

Κινήσεις στο άτομο

Τρεις τύποι κίνησης συμβαίνουν εντός του ατόμου (Εικόνα 1.1). Αυτοί είναι:

- Περιστροφή των ηλεκτρονίων γύρω από τον άξονά τους
- Περιστροφή των ηλεκτρονίων σε τροχιά γύρω από τον πυρήνα
- Περιστροφή του πυρήνα γύρω από τον άξονά του

Οι αρχές της ΜΤ στηρίζονται στην περιστροφική κίνηση συγκεκριμένων πυρήνων που βρίσκονται στους βιολογικούς Ιστούς. Αυτή η περιστροφή (*spin*) προκύπτει από την ξεχωριστή περιστροφή των πρωτονίων και των νετρονίων μέσα στον πυρήνα. Τα υποατομικά σωματίδια περιστρέφονται αυτομάτως σε ζεύγη με αντίθετη φορά αλλά με τον ίδιο ρυθμό μεταξύ τους. Σε πυρήνες που έχουν άρτιο μαζικό αριθμό, όπου δηλαδή ο αριθμός των πρωτονίων είναι ίσος με τον αριθμό των νετρονίων, τα μισά νουκλεόνια περιστρέφονται προς τη μία κατεύθυνση και τα άλλα μισά προς την άλλη. Ο πυρήνας δεν εμφανίζει συνολικό *spin*. Σε πυρήνες, όμως, με περιπτώ μαζικό αριθμό, όπου δηλαδή ο αριθμός των νετρονίων είναι ελαφρώς μεγαλύτερος ή μικρότερος του αριθμού των πρωτονίων, οι διευθύνσεις περιστροφής των νουκλεονίων δεν είναι ίσες και αντίθετες, με αποτέλεσμα ο πυρήνας να εμφανίζει **στροφορμή** (*angular momentum*). Αυτοί είναι γνωστοί ως οι **ενεργοί πυρήνες στον μαγνητικό συντονισμό (ΜΣ)**.



Εικόνα 1.1 Το άτομο.

Ενεργοί πυρήνες στον μαγνητικό συντονισμό (ΜΣ)

Οι ενεργοί πυρήνες στον ΜΣ χαρακτηρίζονται από την τάση τους να ευθυγραμμίσουν παράλληλα τον άξονα περιστροφής τους στο εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο. Αυτό συμβαίνει, διότι έχουν στροφορμή (angular momentum) ή περιστροφή (spin) και, επειδή περιέχουν θετικά φορτισμένα πρωτόνια, έχουν ηλεκτρικό φορτίο. Ο νόμος της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής (που αναπτύχθηκε από τον Michael Faraday το 1883) αναφέρεται σε τρεις ανεξάρτητες δυνάμεις –κίνηση, μαγνητισμός και φορτίο– και ορίζει ότι, εάν είναι παρούσες δύο από αυτές, η τρίτη επάγεται αυτομάτως. Οι ενεργοί στον ΜΣ πυρήνες που έχουν μηδενικό φορτίο και περιστροφική κίνηση, αυτομάτως αποκτούν μαγνητική ροπή (magnetic moment) και μπορούν να ευθυγραμμιστούν με ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.

Παρακάτω αναφέρονται παραδείγματα σημαντικών ενεργών πυρήνων στον ΜΣ με τον μαζικό τους αριθμό:

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

Παρ' όλο που τα νετρόνια είναι ηλεκτρικά ουδέτερα, τα υποατομικά τους σωματίδια δεν είναι ομοιόμορφα διατεταγμένα στην επιφάνειά τους. Αυτή η έλλειψη ισορροπίας επιτρέπει στον πυρήνα που ανήκει το νετρόνιο να είναι ενεργός στον ΜΣ, με την προϋπόθεση ότι ο μαζικός αριθμός είναι περιττός. Η ευθυγράμμιση μετράται ως το σύνολο των μαγνητικών ροπών των σωματιδίων του πυρήνα και εκφράζεται με τη μορφή ανύσματος. Η ένταση της συνολικής μαγνητικής ροπής είναι συγκεκριμένη για κάθε πυρήνα και καθορίζει την ευαισθησία του στον μαγνητικό συντονισμό.

Ο πυρήνας του υδρογόνου

Το ισότοπο του πυρήνα του υδρογόνου, που καλείται **πρώτιο (protium)**, αποτελεί τον ενεργό πυρήνα στον ΜΣ, που χρησιμοποιείται στην κλινική ΜΤ. Περιέχει μόνο ένα πρωτόνιο (ατομικός και μαζικός αριθμός 1). Χρησιμοποιείται, επειδή βρίσκεται σε μεγάλη αφθονία στο ανθρώπινο σώμα και επειδή το μοναδικό πρωτόνιο του προσδίδει σχετικά μεγάλη μαγνητική ροπή. Και τα δύο αυτά χαρακτηριστικά επιτρέπουν τη χρήση της μέγιστης, διαθέσιμης στο σώμα, ποσότητας μαγνητισμού. Στο εξής σε αυτό το βιβλίο, όταν χρησιμοποιούνται οι όροι περιστροφή (spin), πυρήνας ή πυρήνας υδρογόνου, θα αναφερόμαστε στο συγκεκριμένο ισότοπο του υδρογόνου.

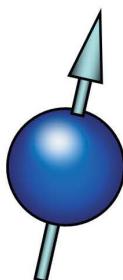
Ο πυρήνας του υδρογόνου ως μαγνήτης

Οι νόμοι του ηλεκτρομαγνητισμού ορίζουν ότι, όταν ένα φορτισμένο σωμάτιο κινείται, δημιουργείται μαγνητικό πεδίο. Ο πυρήνας του υδρογόνου περιέχει ένα φορτισμένο σωματίδιο που περιστρέφεται, δηλαδή κινείται. Επομένως, ο πυρήνας του υδρογόνου περιβάλλεται από το μαγνητικό πεδίο που επάγει και λειτουργεί σαν μικρός μαγνήτης. Ο μαγνήτης κάθε πυρήνα υδρογόνου έχει έναν βόρειο και έναν νότιο πόλο ίσης έντασης. Ο άξονας βορά/νότου κάθε πυρήνα απεικονίζεται με μια μαγνητική ροπή και χρησιμοποιείται στην κλασική θεωρία των αρχών της ΜΤ. Η μαγνητική ροπή κάθε

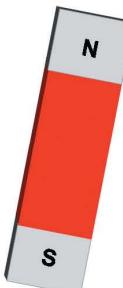
πυρήνα έχει ιδιότητες ανύσματος, δηλαδή έχει μέτρο και διεύθυνση και συμβολίζεται με ένα βέλος. Η διεύθυνση του ανύσματος παριστά τη φορά της μαγνητικής ροπής και το μήκος του ανύσματος παριστά το μέγεθος της μαγνητικής ροπής όπως στην Εικόνα 1.2.

Ευθυγράμμιση (alignment)

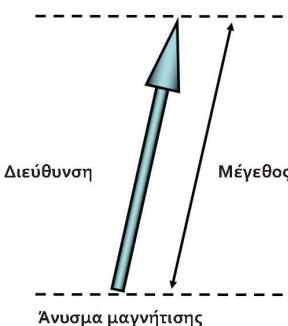
Σε απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, οι μαγνητικές ροπές των πυρήνων των υδρογόνων έχουν τυχαίο προσανατολισμό. Όταν, όμως, τοποθετούνται σε ισχυρό, στατικό, μαγνητικό πεδίο (απεικονίζεται με λευκό βέλος στην Εικόνα 1.3 και αποκαλείται B_0), οι μαγνητικές ροπές των πυρήνων των υδρογόνων ευθυγραμμίζονται με αυτό το μαγνητικό πεδίο. Μερικοί πυρήνες υδρογόνων ευθυγραμμίζονται παράλληλα με το μαγνητικό πεδίο (με την ίδια φορά), ενώ μικρότερος



Μαγνητική ροπή



Ράβδος μαγνήτη



Εικόνα 1.2 Η μαγνητική ροπή του πυρήνα του υδρογόνου.