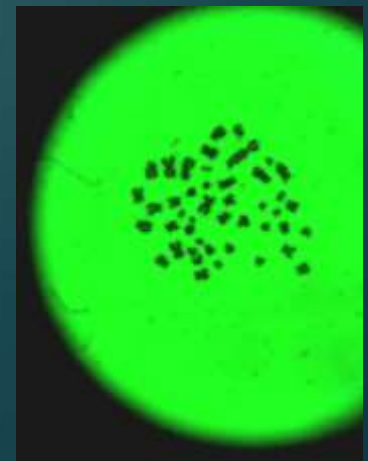


Φυσική



Ιατρικές
Επιστήμες

Έρευνα





Μαγνητική Τομογραφία

Konstantinos Kostakis

BSc in Physics – Aristotle University of Thessaloniki
MSc Student in Medical Physics - Radiation Physics
National and Kapodistrian University of Athens



Περιεχόμενα

- I. Γενικά - Ιστορική Αναδρομή
- II. Βασικές Φυσικές έννοιες
- III. Περιγραφή NMR
- IV. Από το NMR στο MRI
- V. Σύστημα MRI και Απεικόνιση

Γενικά - Ιστορική Αναδρομή

Οι μαγνητικές ιδιότητες των πυρήνων άρχισαν να μελετώνται στις αρχές του 1930 .

Ο **Πυρηνικός Μαγνητικός Συντονισμός (Nuclear Magnetic Resonance - NMR)** ανακαλύφθηκε σαν φαινόμενο στο πανεπιστήμιο του Καζαν από τον Ζανόισκι **1941** (ερευνητικά πορίσματα που αφορούσαν τον μαγνητικό συντονισμό περιστροφής ηλεκτρονίων) .

Συγχρόνως με τις μελέτες του Ζανόισκι , σημειώνεται και η πρώτη αναφορά του όρου NMR σε επιστημονική δημοσίευση από τον Gorter το 1942 στην Ολλανδία .

Μέχρι όμως το 1946 τα πορίσματα του Ζανόισκι δεν είχαν γίνει ευρέως γνωστά στην επιστημονική κοινότητα . Τότε ήταν που και επίσημα **το φαινόμενο του NMR ανακαλύφθηκε ανεξάρτητα από τους Bloch & Purcell** . Για το έργο τους αυτό και οι δύο επιστήμονες τιμήθηκαν με το βραβείο Nobel το 1952.

Γενικά-Ιστορική Αναδρομή

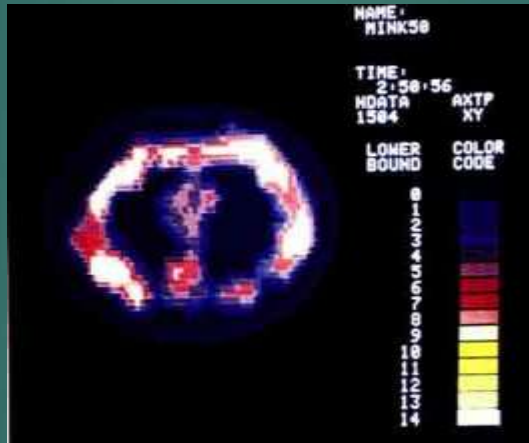
- ▶ Μέσω κυρίως από in vitro πειραματική έρευνα (δηλ. τα πειράματα που πραγματοποιούνται σε δοκιμαστικό σωλήνα ή υπό αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες έξω από τους ζωντανούς οργανισμούς) , αναπτύχθηκε η φασματοσκοπία NMR .
- ▶ Σταδιακά πολλές τεχνικές δυσκολίες όπως ο προσδιορισμός σημαντικών παραμέτρων {μέτρηση του χρόνου χαλάρωσης κ.τ.λ.} κάμπτονταν .
- ▶ Έτσι φτάσαμε στην δεκαετία του 1970 , όπου η **απεικόνιση με πυρηνικό μαγνητικό συντονισμό** δηλαδή η **μαγνητική τομογραφία (Magnetic Resonance Imaging - MRI)** γνώρισε αλματώδη ανάπτυξη , όπως μαρτυράνε οι ενδεικτικοί σταθμοί της ιστορίας της :
 - **1972 -Damadian** : Παθολογικοί ιστοί εμφανίζουν μεγαλύτερους χρόνους χαλάρωσης από τους υγείς ιστούς .
 - **1974 -Lauterbur** : 1η δημοσίευση θωρακικής κοιλότητας ενός ποντικιού
 - **1974-Ernst/Kumar/Welti** : εργασία που περιγράφει την εφαρμογή μετασχηματισμών Fourier για ανακατασκευή των εικόνων
 - **3/7/1977Damadian/Minkoff/Goldsmith** :Ολοκλήρωσαν την κατασκευή του πρώτου μαγνητικού τομογράφου (Indomitable) και μετά την πρώτη μέτρηση 6 ωρών και ανακατασκευή της εικόνας 22ωρών , παρήγαγαν την πρώτη ιατρική εικόνα του ανθρώπινου σώματος

Γενικά - Ιστορική Αναδρομή

- ▶ Όλα αυτά συντέλεσαν στο να καθιερωθεί η MRI ως μια ιατρική απεικονιστική μέθοδος που εισήχθηκε στην κλινική πράξη και εξελίχθηκε από την δεκαετία του 1980 και έπειτα .



Ο μαγνητικός τομογράφος Indomitabel και οι Damadian , Minkoff και Goldsmith .



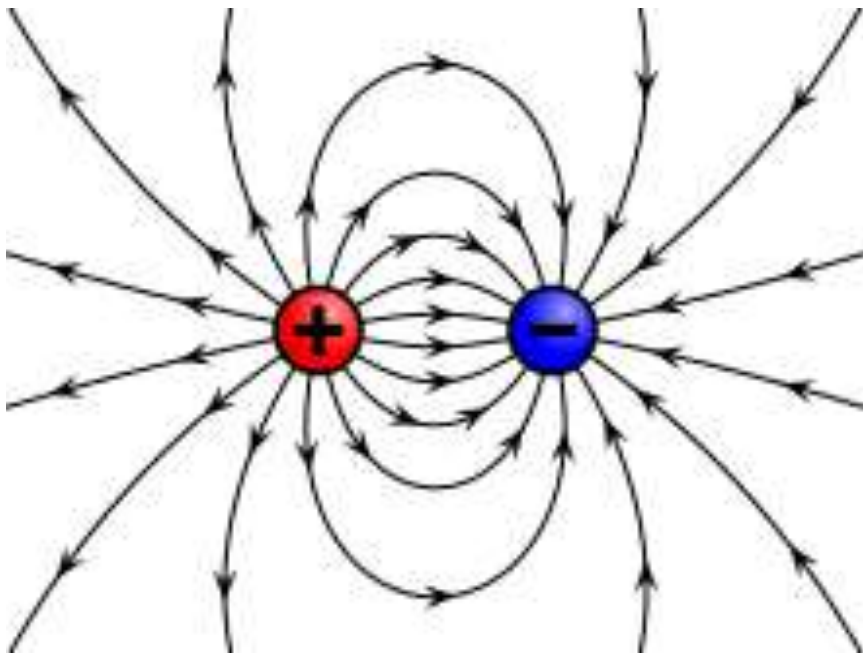
Η πρώτη MRI εικόνα του ανθρώπινου σώματος που πάρθηκε από τον μαγνητικό τομογράφο Indomitabel (θώρακας του Minkoff)



Σύγχρονος Μαγνητικός Τομογράφος 3.0 T

Μαγνητικός

Βασικές Φυσικές έννοιες



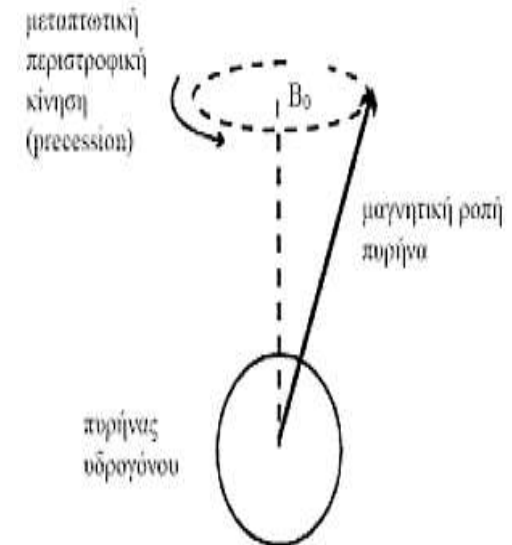
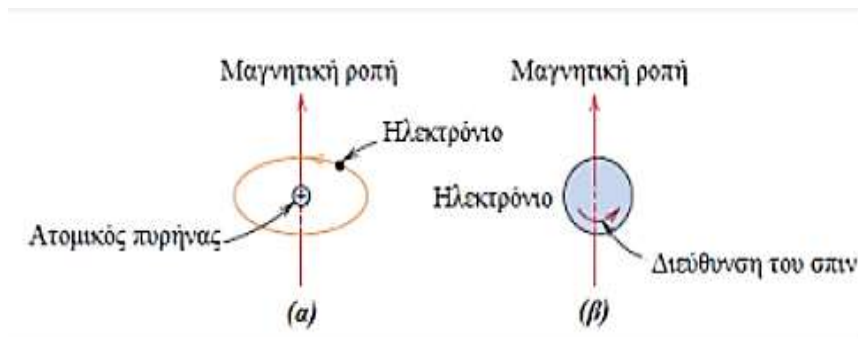
Η έννοια του Πεδίου στη Φυσική (19^{ος} αιώνας): Πρόκειται για μια φυσική ποσότητα που αντιπροσωπεύεται από ένα βαθμωτό ή διάνυσμα ή τανυστή, και έχει μια συγκεκριμένη τιμή για κάθε σημείο του χώρου.

Για να αντιληφθεί κανείς το πόσο ισχυρό ή ασθενές είναι ένα πεδίο, ορίζεται η έντασή του. Πρόκειται για διανυσματικό μέγεθος που εκφράζεται από το πηλίκο της δύναμης που ασκείται σε ένα κατάλληλο υπόθεμα προς το υπόθεμα αυτό.

► **ΙΔΙΑΙΤΕΡΗ ΠΡΟΣΟΧΗ !!** Η ένταση του πεδίου δεν εξαρτάται από το υπόθεμα αλλά ούτε και από την δύναμη που του ασκείται.

Βασικές Φυσικές έννοιες

- ▶ **Μαγνητική Ροπή ($\vec{\mu}$)** : Ονομάζεται το διανυσματικό μέγεθος που ισούται με το βαθμωτό γινόμενο της μαγνητικής μάζας ενός από τους μαγνητικούς πόλους ενός μαγνήτη , επί την απόσταση των δύο πόλων αυτών .



Βασικές Φυσικές έννοιες

Πείραμα του Stern-Gerlach

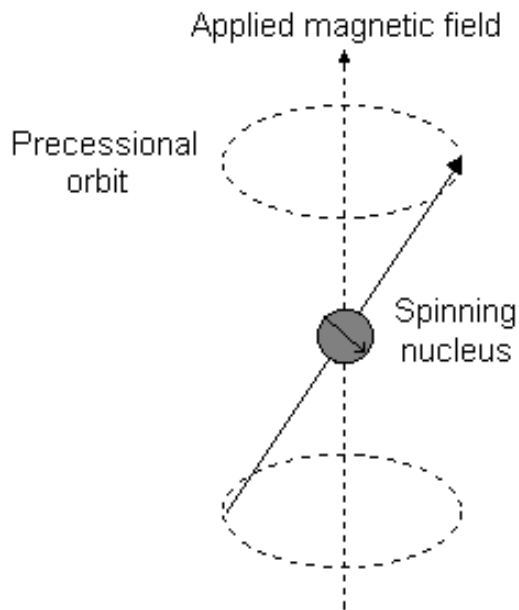
τα ηλεκτρόνια παρουσιάζουν μαγνητική ροπή

Επανάληψη πειράματος με μόρια του (H) υδρογόνου → μετρήθηκε η μαγνητική ροπή του πυρήνα του υδρογόνου , δηλαδή η μαγνητική ροπή του πρωτονίου (γεγονός που προκάλεσε έκπληξη καθώς αναμένονταν να είναι μικρότερη κατά 3 τάξεις μεγέθους από αυτή του ηλεκτρονίου λόγω μεγαλύτερης μάζας → υπόθεση των quarks)

Ιδιαίτερα σημαντική όμως είναι η **μελέτη της συμπεριφοράς του πυρήνα μέσα σε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο** , καθώς σε αυτήν βασίζεται το φαινόμενο του NMR που αποτελεί και την «αρχή λειτουργίας» της MRI τομογραφίας .

Επομένως για να γίνει κατανοητή η λειτουργία των MRI είναι αναγκαία πρώτα η ανάλυση της **κλασικής περιγραφής** της συμπεριφοράς του πυρήνα σε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο και εν συνεχεία η συμπλήρωση αυτής της περιγραφής με άλλες φυσικές θεωρίες .

Κλασική περιγραφή



- ▶ Υποθέτουμε την ύπαρξη ενός πυρήνα με spin $\frac{1}{2}$ εκτός μαγνητικού πεδίου .
- ▶ Αυτός ο πυρήνας βρίσκεται στο χαμηλότερο επίπεδο ενέργειάς του και περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του .
- ▶ **Εφαρμόζοντας ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο $\vec{B}_{εξ}$ ο άξονας περιστροφής του πυρήνα μεταπίπτει γύρω από την διεύθυνση του $\vec{B}_{εξ}$.**
- ▶ Άρα και ο άξονας της μαγνητικής ροπής μ περιστρέφεται γύρω από το $\vec{B}_{εξ}$.
- ▶ Όπως φαίνεται και στην εικόνα , **εμφανίζεται μια κυκλική συχνότητα μετάπτωσης που καλείται συχνότητα μετάπτωσης Larmor (ω_L).**

Κλασική περιγραφή

Η δυναμική ενέργεια του πυρήνα που κάνει μετάπτωση δίνεται από την σχέση :
 $E = -\mu B \cos\theta$, όπου θ είναι η γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης του πεδίου και του άξονα περιστροφής του πυρήνα .

Επομένως:

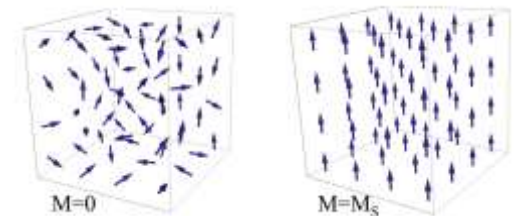
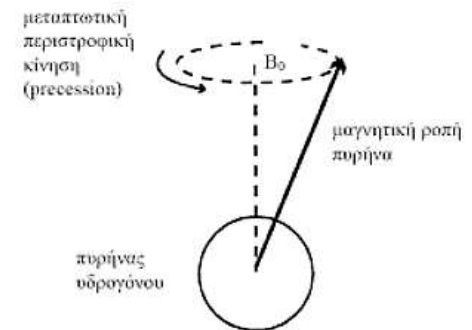
η ελάχιστη τιμή της δυναμικής ενέργειας είναι ίση με $E_{min} = -\mu B$ για $\vec{\mu} \uparrow \uparrow \vec{B}$

και η μέγιστη τιμή της δυναμικής ενέργειας είναι ίση με $E_{max} = \mu B$ για $\vec{\mu} \uparrow \downarrow \vec{B}$

▶ Όταν ο πυρήνας απορροφήσει ενέργεια , τότε η γωνία μετάπτωσης αλλάζει ώστε να αναγκάσει την μαγνητική ροπή να γίνει αντίθετη με το πεδίο και έτσι να μεταβεί στην κατάσταση υψηλότερης ενέργειας .

▶ Χρησιμοποιώντας την **τεχνική του πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού** , ανιχνεύουμε μεταβάσεις ανάμεσα στις δύο καταστάσεις του spin . Αναλυτικότερα εφαρμόζεται ένα σταθερό $\vec{B}_{1\text{εξ}}$ ώστε να προσανατολιστούν οι μαγνητικές ροπές και ταυτόχρονα εφαρμόζεται ένα ασθενές ταλαντωμένο $\vec{B}_{2\text{εξ}}$ κάθετο στο πρώτο .

▶ Για συχνότητα ταλάντωσης του $\vec{B}_{2\text{εξ}}$ ίση με την ω_L οι μαγνητικές ροπές αλλάζουν κατάσταση. Οι μεταβάσεις αυτές έχουν ως αποτέλεσμα την απορρόφηση ενέργειας από τον πυρήνα , κάτι που ανιχνεύεται πειραματικά .



Συμπλήρωση της κλασικής περιγραφής με απαραίτητα στοιχεία από άλλες φυσικές θεωρίες

- ▶ Για να γίνουν πιο εύκολα αντιληπτά τα όσα αναφέρθηκαν πρωτύτερα , έστω **ένας πυρήνας**, όπως το πρωτόνιο **στο άτομο του H** .
- ▶ Αυτός μπορεί να καταλάβει μια από τις δύο πιθανές ενεργειακές καταστάσεις όταν βρεθεί σε $\vec{B}_{εξ}$.
- ▶ Η **χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη E1 αντιστοιχεί σε προσανατολισμό του άξονα της μαγνητικής ροπής (μ) παράλληλο με το $\vec{B}_{εξ}$** (και έχει $m = + \frac{1}{2}$)

Ενώ

- ▶ **Υψηλότερη ενεργειακή στάθμη E2 αντιστοιχεί σε προσανατολισμό του άξονα της μαγνητικής ροπής (μ) αντιπαράλληλο με το $\vec{B}_{εξ}$** (και έχει $m = - \frac{1}{2}$)

Επίπεδα ενέργειας για ένα πυρήνα με σπιν 1/2



Είναι πολύ σημαντικό να τονιστεί πως για τον πυρήνα εντός μαγνητικού πεδίου , οι αρχικοί πληθυσμοί των δύο επιπέδων ενέργειας καθορίζονται από την ΘΔΜ ισορροπία και άρα από την κατανομή Boltzmann.

Αυτό σημαίνει ότι το **χαμηλότερο επίπεδο ενέργειας περιέχει ελαφρώς περισσότερους πυρήνες** από ότι το **υψηλότερο επίπεδο ενέργειας** .

Συμπλήρωση της κλασικής περιγραφής με απαραίτητα στοιχεία από άλλες φυσικές θεωρίες

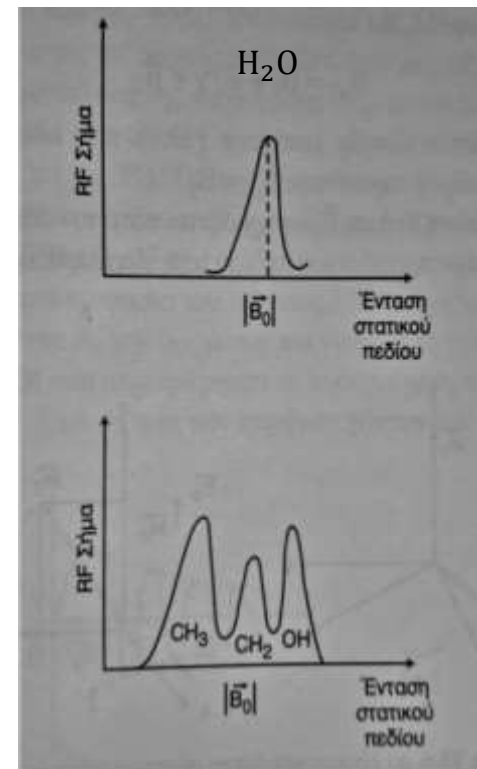
- ▶ Σύμφωνα με τον κβαντικό κανόνα επιλογής , για να συμβεί μετάπτωση των πρωτονίων από την μια στάθμη ενέργειας στην άλλη , πρέπει να απορροφήσει ένα κβάντο ενέργειας ($\hbar\omega$) ακριβώς ίσο με την ΔE :

$\Delta E = \gamma\hbar B = \hbar\omega \rightarrow \vec{\omega} = -\gamma\vec{B}$ (το $-$ εκφράζει την απορρόγηση)

Αυτή είναι η σχέση που εκφράζει το φαινόμενο του NMR .

Δηλαδή η μετάβαση του πυρήνα από την κατάσταση χαμηλής ενέργειας στην κατάσταση υψηλής γίνεται **ΜΟΝΟ** στην περίπτωση που **συντονίζεται** από εξωτερικό πεδίο .

Στον συντονισμό τα πρωτόνια θα εκπέμπουν ή θα απορροφούν(E) λόγω μετάπτωσης από την μια ενεργειακή στάθμη στην άλλη και έτσι λαμβάνεται το NMR φάσμα της εκάστοτε ουσίας (γνωστή και ως καμπύλη Lorentz) .



Οι πυρήνες H στην αιθυλική αλκοόλη βρίσκονται σε διαφορετικά ηλεκτρονιακά περιβάλλοντα.

ΑΠΌ ΤΟ NMR ΣΤΟ MRI

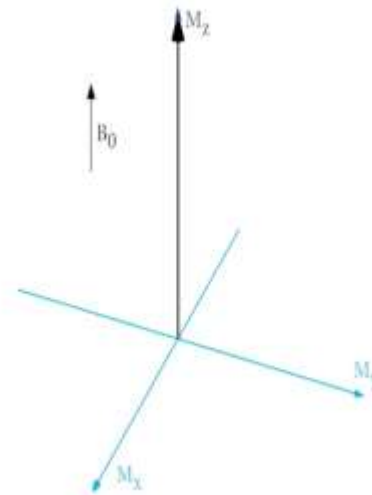


► Επομένως συνοπτικά έχουμε :

1. Η συχνότητα συντονισμού ω_0 μεταβάλλεται με το εξωτερικό \vec{B}_0 γραμμικά :
$$\vec{\omega}_0 = -\gamma \vec{B}_0$$
2. Η επίδραση του \vec{B}_0 οδηγεί στην εμφάνιση μαγνήτισης \vec{M}_0 κατά την διεύθυνση του \vec{B}_0
3. Η εφαρμογή της διέγερσης RF οδηγεί στην εμφάνιση μαγνήτισης \vec{M}_z και $\vec{M}_{y'}$
4. Παύση της RF οδηγεί στην αποκατάσταση της \vec{M}_0 με T_1 για την διαμήκη συνιστώσα και T_2 για την εγκάρσια
5. Τα σήματα FID (σήματα αποκαταστάσεως) έχουν ανάλογη ένταση με τον αριθμό πυρήνων που τα εκπέμπουν

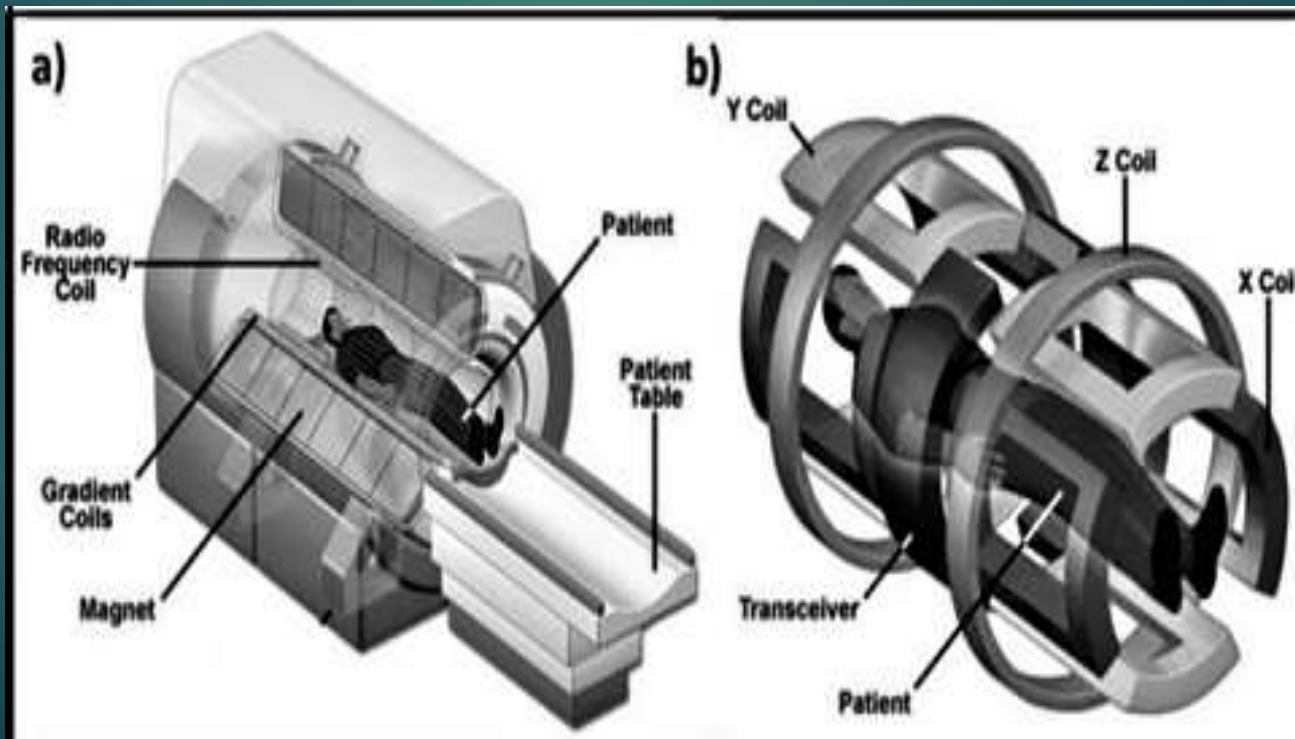
Αποκατάσταση Χαλάρωση Relaxation

- ▶ Μέσω αυτών των σύντομων video γίνεται η οπτικοποίηση (των χρόνων αποκατάστασης T_1 και T_2) και της μεταπτωτικής κίνησης της μαγνήτισης, εν προκειμένω τα όσα ειπώθηκαν προηγουμένα να καταστούν πιο σαφή.



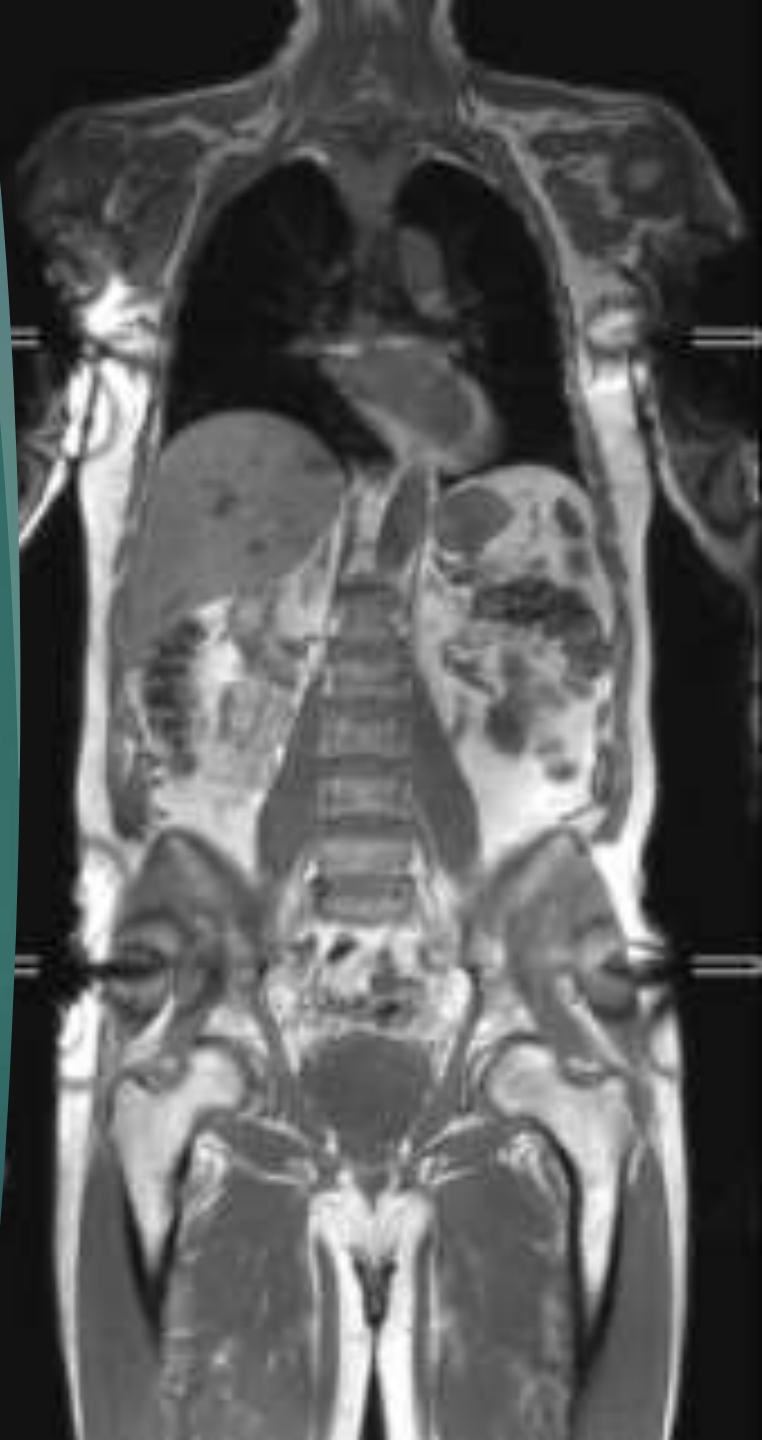
Σύστημα MRI & Απεικόνιση

- ▶ Ένα πλήρες σύστημα MRI περιλαμβάνει
 - 1) Μαγνήτη για το στατικό εξωτερικό πεδίο
 - 2) Πηνία G_x , G_y , G_z για την βαθμίδωση του πεδίου
 - 3) Αντένα-Εκπομπό των RF σημάτων
 - 4) Δέκτη RF σημάτων
- i. Κυκλώματα για ενίσχυση/εκπομπή/λήψη RF παλμών .
- ii. Μετατροπείς ψηφιακών πληροφοριών σε αναλογικές (DAC)
- iii. Υπολογιστή επεξεργασίας δεδομένων για ανασύνθεση της εικόνας
- iv. Σύστημα απεικόνισης και ελέγχου



Σύστημα MRI & Απεικόνιση

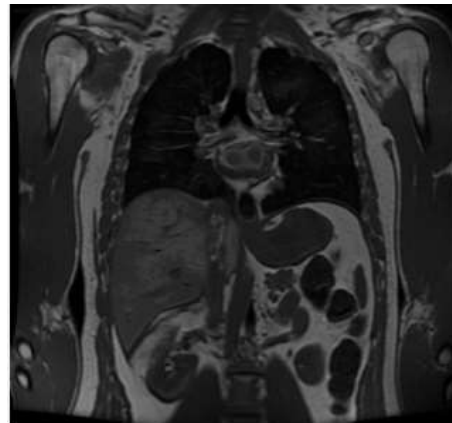
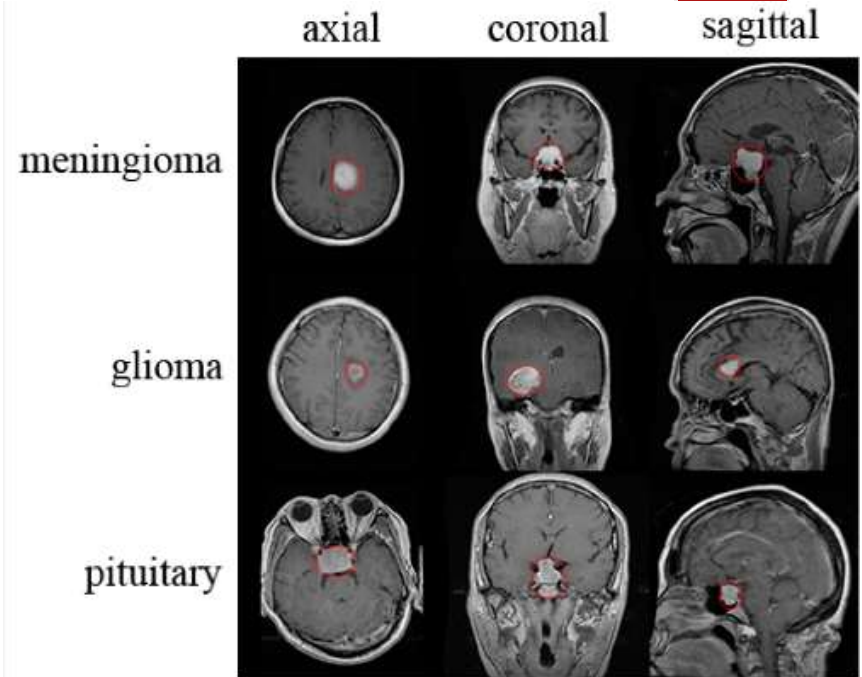
- ▶ Όπως και οι υπόλοιπες απεικονιστικές τεχνικές υψηλής τεχνολογίας που αξιοποιούνται στην Ιατρική (PET , ECAT , CT) , το MRI στηρίζεται στην χρήση Η/Υ για να λάβει τις πληροφορίες και να τις μετατρέψει σε εικόνες .
- ▶ Λόγω της βαθμίδωσης του μαγνητικού πεδίου ο υπολογιστής επιλύει ταχύτατα μαθηματικούς αλγορίθμους ώστε να προσδιορίσει την θέση του σημείου εκπομπής και άρα να κάνει μια χαρτογράφηση της κατανομής του πυρηνικού spin .



Σύστημα MRI & Απεικόνιση

Με την απεικόνιση με MRI , λαμβάνονται πολύ καλής ποιότητας εικόνες περιοχών μαλακού ιστού ,δίχως να ακτινοβολείται ο ασθενής .

Μέσος όρος διάρκειας εξέτασης είναι τα 25 -30 λεπτά .



Νεότερες Τάσεις στο MRI

- ▶ Επειδή τα συστήματα MRI παρουσιάζουν **μειονεκτήματα** λόγω μεγέθους , ανάγκης θωράκισης από εξωτερικά μαγνητικά πεδία και δυσχέρεια στην πραγμάτωση μετρήσεων ταχέως κινούμενων οργάνων όπως η καρδιά , η τεχνολογία προχωρά σε συστήματα με υπερασθενή εξωτερικά πεδία \vec{B}_0 από 0,02-0,04 Tesla (0,15-1,5 Tesla κλασσικοί MRI) .





Σας ευχαριστώ πολύ για την προσοχή σας.

Πηγές

- 1) https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CE%B1%CE%B3%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CF%84%CE%BF%CE%BC%CE%BF%CE%B3%CF%81%CE%B1%CF%86%CE%AF%CE%B1
- 2) <http://www.physics4u.gr/faq/mri.html>
- 3) https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CF%85%CF%81%CE%B7%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CF%82_%CE%BC%CE%B1%CE%B3%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CF%82_%CF%83%CF%85%CE%BD%CF%84%CE%BF%CE%BD%CE%B9%CF%83%CE%BC%CF%8C%CF%82#%CE%99%CE%B1%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%AE
- 4) http://www.iedep.gr/images/stories/sinedria/9/friday18_00mixail1.pdf
- 5) https://eclass.uoa.gr/modules/document/file.php/MED684/%CE%94%CE%B9%CE%B1%CE%BB%CE%AD%CE%BE%CE%B5%CE%B9%CF%82%20%CE%B1%CE%BA%CE%B1%CE%B4%CE%B7%CE%BC%CE%B1%CF%8A%CE%BA%CE%BF%CF%8D%20%CE%AD%CF%84%CE%BF%CF%85%CF%82%202020%20-%202021/%CE%94%CE%B9%CE%B1%CE%BB%CE%AD%CE%BE%CE%B5%CE%B9%CF%82%20%CE%99.%20%CE%A3%CE%B5%CF%8A%CE%BC%CE%AD%CE%BD%CE%B7/%CE%92%CE%B1%CF%83%CE%B9%CE%BA%CE%AD%CF%82%20%CE%B1%CF%81%CF%87%CE%AD%CF%82%20%CE%B1%CF%80%CE%B5%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CE%BD%CE%B9%CF%83%CE%B7%CF%82%20%CE%BC%CE%B1%CE%B3%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CF%8D%20%CF%83%CF%85%CE%BD%CF%84%CE%BF%CE%BD%CE%B9%CF%83%CE%BC%CE%BF%CF%8D_%CE%A3%CE%B5%CF%8A%CE%BC%CE%AD%CE%BD%CE%B7%CF%82_%CE%9F%CE%B4%CE%BF%CE%BD%CF%84%CE%B9%CE%B1%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%AE%202021_%CE%95%CE%BA%CF%84%CF%85%CF%80%CF%8E%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82.pdf
- 6) «Ιατρική Φυσιική» , Ψαρράκος-Μολυβδά-Ψαρράκου-Σιούντας