

Βασικές Αρχές Απεικόνισης Μαγνητικού Συντονισμού (Μαγνητικής Τομογραφίας)

Ι. Σεϊμένης
iseimen@med.uoa.gr
Ακ. έτος 2023-2024

1

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ

- Το φαινόμενο NMR
- Δημιουργία MR σήματος
- Χρόνοι επαναφοράς (αποκατάστασης)
- Σχηματισμός εικόνας
- Υλικά μέρη, βιολογικές επιδράσεις & ασφάλεια
- Αντίθεση εικόνας
- Εφαρμογές

2

Πυρηνικός Μαγνητικός Συντονισμός (NMR)



Φυσικό φαινόμενο στο οποίο πυρήνες ευρισκόμενες μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο απορροφούν και επανεκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, σε μια συγκεκριμένη συχνότητα συντονισμού που εξαρτάται από την ισχύ του μαγνητικού πεδίου και τις μαγνητικές ιδιότητες του ισότοπου των ατόμων

3

Πυρηνικός Μαγνητικός Συντονισμός (NMR)

Ευαίσθητα στο πείραμα NMR είναι τα ισότοπα που περιέχουν έναν περιττό αριθμό πρωτονίων ή/και νετρονίων γιατί έχουν μη μηδενικό συνολικό spin (ιδιοστροφορμή)



ΥΓ. «ιδιοστροφορμή» δεν είναι ακριβής όρος

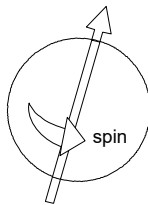
4

Πυρηνικός Μαγνητικός Συντονισμός (NMR)

Spin (ιδιοστροφορμή):

Είναι μία κβαντομηχανική ιδιότητα, χωρίς αναλογία στην κλασική μηχανική

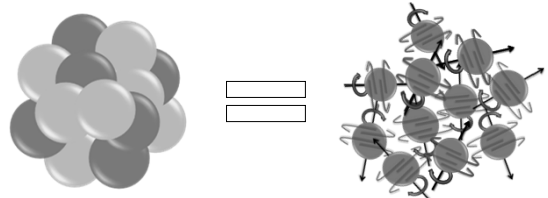
Σε μια υπεραπλουστευμένη προσέγγιση, το νουκλεόνιο εμφανίζεται να περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του ως αποτέλεσμα της ιδιοστροφορμής



5

Πυρηνικός Μαγνητικός Συντονισμός (NMR)

Πυρήνας



Γυροσκόπια που δημιουργούν τα δικά τους μαγνητικά πεδία...

6

Πυρηνικός Μαγνητικός Συντονισμός (NMR)

Όταν υπάρχουν ζεύγη νουκλεονίων τα spins τους αλληλοεξουδετερώνονται
Συνολικό spin πυρήνα: $s = 0$

7

Πυρηνικός Μαγνητικός Συντονισμός (NMR)

Συνολικό spin πυρήνα: $s \neq 0$

8

Πυρηνικός Μαγνητικός Συντονισμός (NMR)

Πυρήνας με συνολικό $s \neq 0$

Ο πυρήνας με περιττό # νουκλεονίων έχει spin & δημιουργεί ένα μικρό μαγνητικό πεδίο (συμπεριφέρεται σαν ένας μικροσκοπικός μαγνήτης), οπότε μπορεί να ανιχνευθεί σε ένα πείραμα NMR

9

Τι "βλέπουμε" στην ΑΜΣ;

Ισότοπο Πρώτιο ^1H

10

Από πού προέρχεται το σήμα στην ΑΜΣ;

Κυρίως από μόρια H_2O (τα οποία αποτελούν το 65-80% κ.β. του σώματός μας)...

11

Από πού προέρχεται το σήμα στην ΑΜΣ;

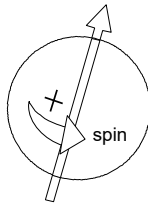
Triglyceride molecule

... αλλά κι από ^1H στις αλυσίδες λιπαρών οξέων διαφόρων ευκίνητων λιπιδίων (κυρίως των τριγλυκεριδίων)

12

Μαγνητικός Συντονισμός Πυρήνας ^1H

- Ο πυρήνας ^1H (πρωτόνιο) έχει **spin** $\frac{1}{2}$
- Ο πυρήνας ^1H έχει υψηλή ευαισθησία στο πείραμα NMR



13

Μαγνητικός Συντονισμός «Κοιτάζοντας μέσα στο πρωτόνιο»

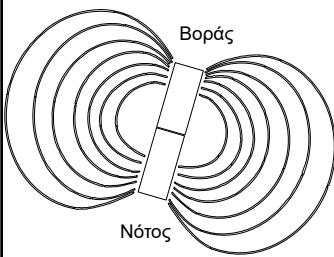


Επί του παρόντος πιστεύεται ότι το σπιν των πρωτονίων αποτελείται από ένα συνδυασμό των περιστροφών των κουάρκ σθένους (τρεις κεντρικές σφαίρες (2 up, 1 down)), των "θαλάσσιων" κουάρκ (μικρότερα ζεύγη σφαιρών (κουάρκ-αντικουάρκ)) και των γκλουονίων (κίτρινο), καθώς και της πιθανής τροχιακής τους κίνησης (λευκό)

Brookhaven National Laboratory

14

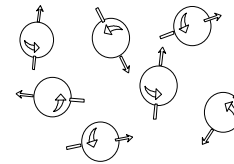
Μαγνητικός Συντονισμός Πυρήνας ^1H



- Η παρουσία ηλεκτρικού φορτίου και γωνιακής ορμής οδηγεί στην εμφάνιση μαγνητικής ροπής, μ
- Ο πυρήνας συμπεριφέρεται ως μικροσκοπικό μαγνητικό δίπολο

15

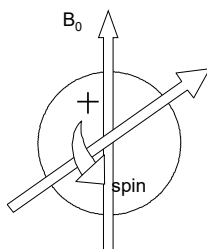
Πολλοί πυρήνες ^1H : Τυχαία προσανατολισμένα μαγνητικά δίπολα



- Όταν σε ένα υλικό (π.χ. ιστός) δεν εφαρμόζεται εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, η διάταξη αυτών των μαγνητικών διπόλων είναι τυχαία στον χώρο και η συνισταμένη τους είναι μηδέν
- Τι συμβαίνει όμως στα μαγνητικά δίπολα όταν βρεθούν σε ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο;

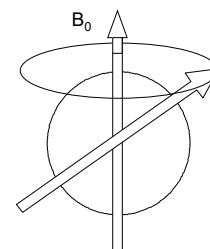
16

Κλασικό Μοντέλο αλληλεπίδρασης διπόλου & ισχυρού μαγνητικού πεδίου

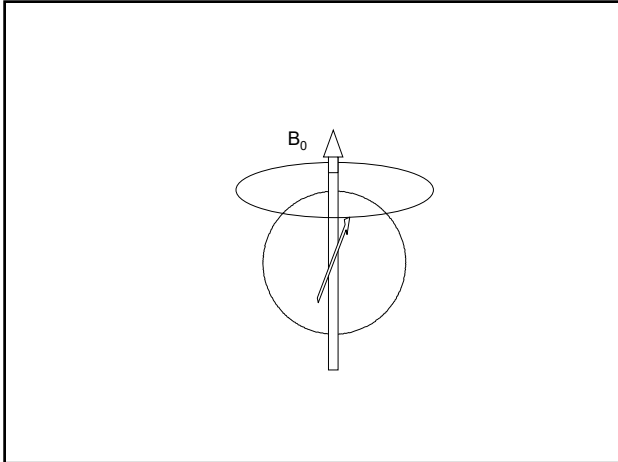


17

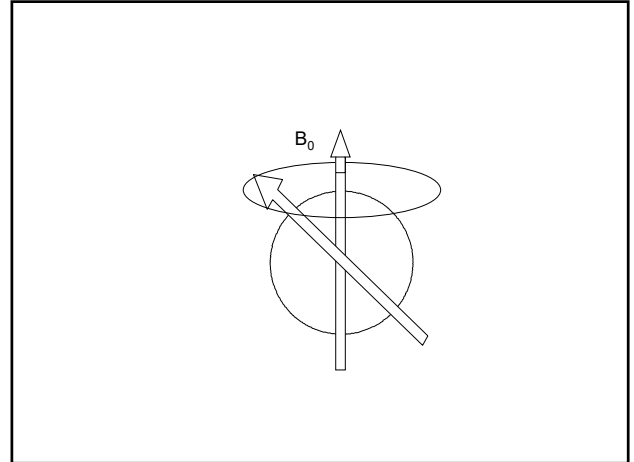
Ανάπτυξη Ροπής που οδηγεί σε Μετάπτωση



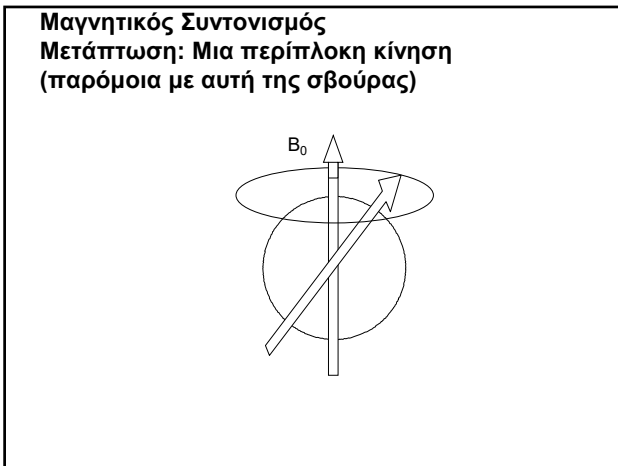
18



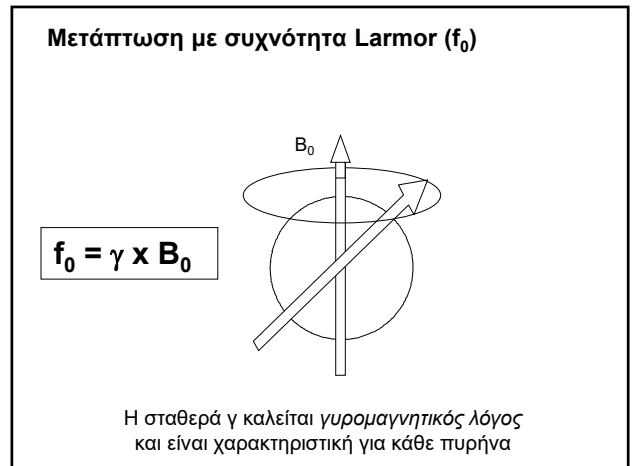
19



20



21



22

Μετάπτωση με συχνότητα Larmor (f_0)

Πυρήνας	^1H	^{13}C	^{31}P
γ (MHz/Tesla)	42,58	10,7	17,24

$f_0 = \gamma \times B_0$

- Για συγκεκριμένη τιμή B_0 , διαφορετικοί πυρήνες εκτελούν μετάπτωση με διαφορετική συχνότητα
- Αυτή τη διαφορά είναι που χρησιμοποιούν τα συστήματα MT για να παράγουν εικόνες βασισμένες στους πυρήνες υδρογόνου

23

Αδρανειακό σύστημα αναφοράς (σύστημα εργαστηρίου)

Μετάπτωση σε αργή κίνηση

Στην πραγματικότητα, η μετάπτωση του μαγνητικού διπόλου με συχνότητα πολλών MHz καθιστά την κίνηση αυτή θολερή

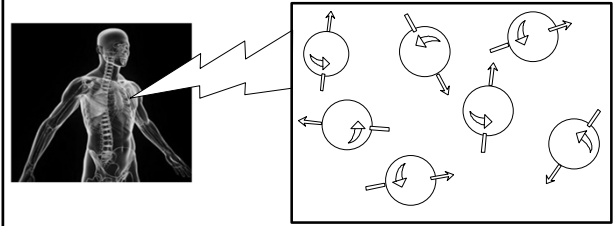
24

**ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ
ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ**

- Το φαινόμενο NMR
- Δημιουργία MR σήματος
- Χρόνοι επαναφοράς (αποκατάστασης)
- Σχηματισμός εικόνας
- Υλικά μέρη, βιολογικές επιδράσεις & ασφάλεια
- Αντίθεση εικόνας
- Εφαρμογές

25

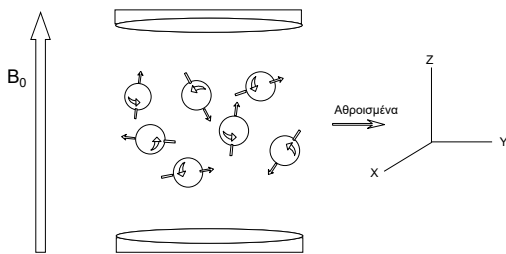
**Ανθρώπινος οργανισμός
Πολλοί πυρήνες ^1H**



$1 \text{ ml H}_2\text{O} = 3 \times 10^{22} \text{ } ^1\text{H}$

26

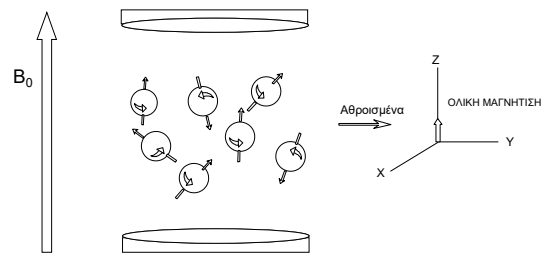
Πυρήνες ^1H σε ισχυρό Μαγνητικό Πεδίο



Ένας μεγάλος αριθμός ^1H , εξαιτίας των θερμικών κινήσεων, δεν παραλληλίζονται με το B_0 , αλλά διατηρούν τον τυχαίο προσανατολισμό τους και η συνισταμένη μαγνήτιση που δημιουργούν είναι μηδέν

27

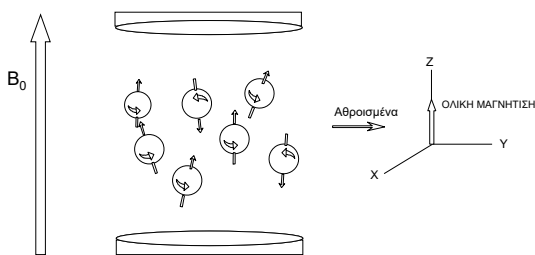
Πυρήνες ^1H σε ισχυρό Μαγνητικό Πεδίο



Τα υπόλοιπα ^1H διατάσσονται παράλληλα ή αντιπαράλληλα με το B_0

28

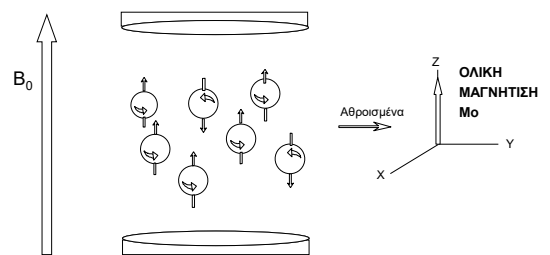
Πυρήνες ^1H σε ισχυρό Μαγνητικό Πεδίο



Τα υπόλοιπα ^1H διατάσσονται παράλληλα ή αντιπαράλληλα με το B_0

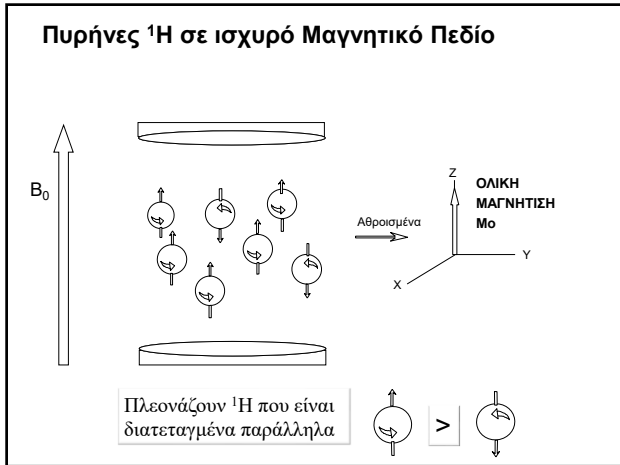
29

Πυρήνες ^1H σε ισχυρό Μαγνητικό Πεδίο

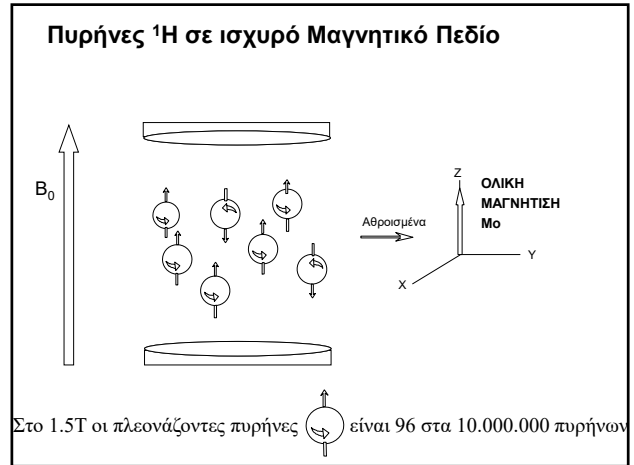


Απαιτείται λιγότερη ενέργεια για την παράλληλη, σε σχέση με την αντιπαράλληλη, ευθυγράμμιση

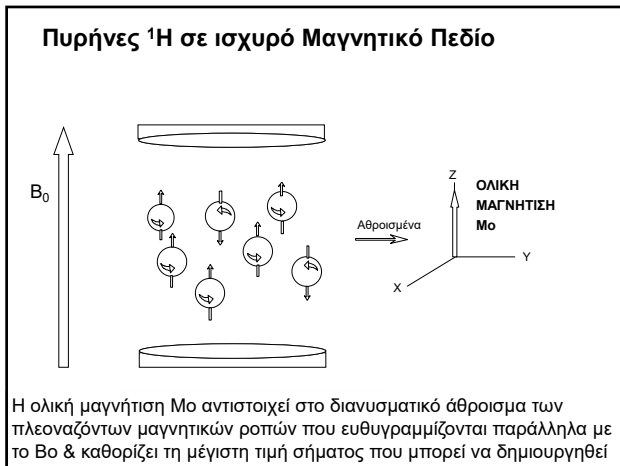
30



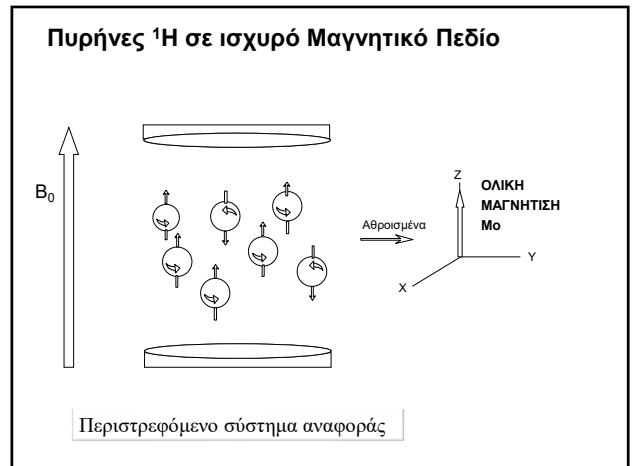
31



32



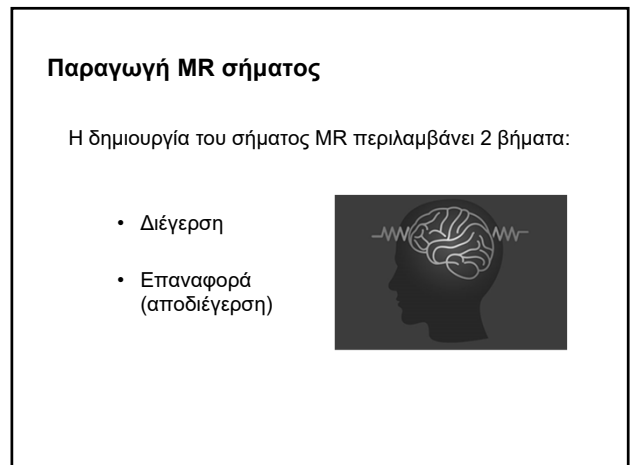
33



34



35



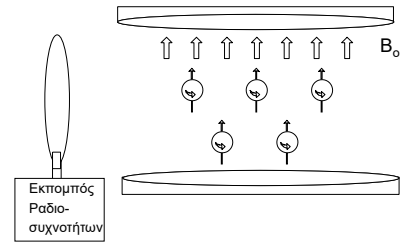
36

**Παραγωγή MR σήματος
Διέγερση**

Συχνότητα Διέγερσης =
Συχνότητα Larmor ($f_0 = \gamma B_0$) =
Συχνότητα Συντονισμού

37

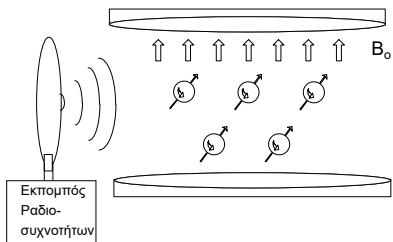
**Παραγωγή MR σήματος
Διέγερση**



Για τα μαγνητικά πεδία που χρησιμοποιούνται στις κλινικές εφαρμογές (1-3T), οι συχνότητες Larmor βρίσκονται στην περιοχή των ραδιοκυμάτων (βραχεία)

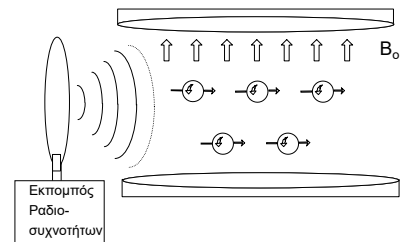
38

**Παραγωγή MR σήματος
Διέγερση**



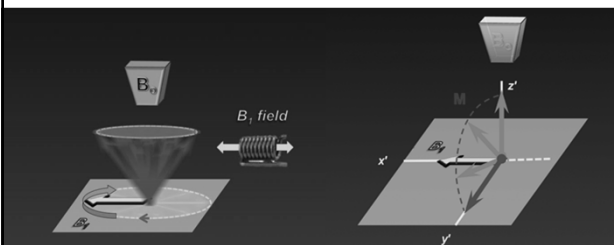
39

**Παραγωγή MR σήματος
Διέγερση**



40

**Αδρανειακό σύστημα αναφοράς (σύστημα εργαστηρίου)
& Περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς**



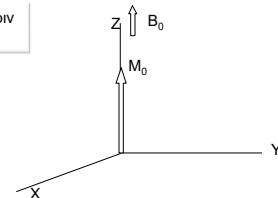
Το B_1 πεδίο, τα spins και η συνολική μαγνήτιση, M , περιστρέφονται πολύ γρήγορα

Το B_0 πεδίο είναι στατικό και η συνολική μαγνήτιση, M , αρχίζει μια μετάπτωση γύρω από το B_0 με συχνότητα $f_1 = \gamma B_1$. Η μετάπτωση αυτή ονομάζεται νεύση

41

**Παραγωγή MR σήματος
Διέγερση**

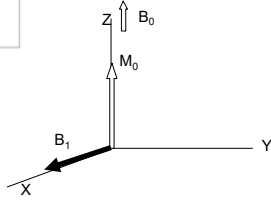
Ολική Μαγνήτιση πριν τον RF παλμό



42

Παραγωγή MR σήματος Διέγερση

Εφαρμόζεται ο
RF παλμός

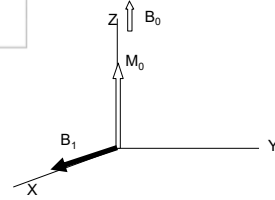


Στην πράξη, εφαρμόζεται ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, B_1 (ραδιοπαλμός, RF pulse), κάθετο στη διεύθυνση του B_0

43

Παραγωγή MR σήματος Διέγερση

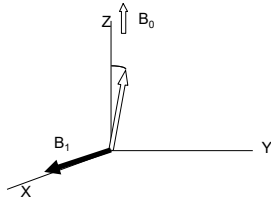
Εφαρμόζεται ο
RF παλμός



Το άνυσμα της μαγνήτισης M αλληλεπιδρά με το B_1 και εκτελεί μετάπτωση, οπότε παύει να είναι παράλληλο με το B_0

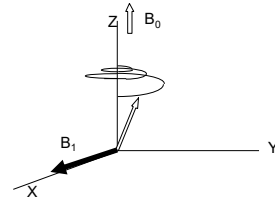
44

Παραγωγή MR σήματος Διέγερση



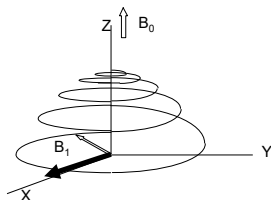
45

Παραγωγή MR σήματος Διέγερση



46

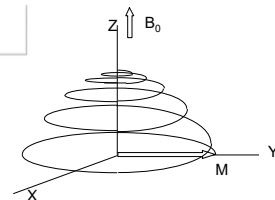
Παραγωγή MR σήματος Διέγερση



47

Παραγωγή MR σήματος Διέγερση

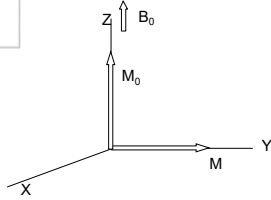
Παύση εφαρμογής
RF παλμού



48

Παραγωγή MR σήματος Διέγερση

Παύση εφαρμογής
RF παλμού



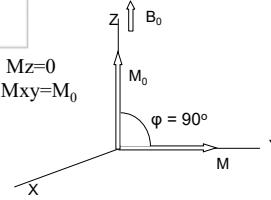
Η γωνία που σχηματίζει το M με την αρχική του θέση (M_0) ονομάζεται γωνία νεύσης (γωνία διέγερσης, flip angle) και η τιμή της εξαρτάται από την ένταση και τη χρονική διάρκεια εφαρμογής του B_1

49

Παραγωγή MR σήματος Διέγερση

Παύση εφαρμογής
RF παλμού 90°

- Διαμήκης μαγνήτιση, $M_z=0$
- Εγκάρσια μαγνήτιση $M_{xy}=M_0$



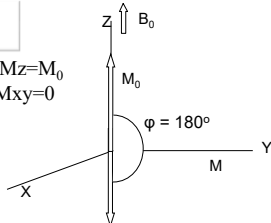
Η γωνία που σχηματίζει το M με την αρχική του θέση (M_0) ονομάζεται γωνία νεύσης (γωνία διέγερσης, flip angle) και η τιμή της εξαρτάται από την ένταση και τη χρονική διάρκεια εφαρμογής του B_1

50

Παραγωγή MR σήματος Διέγερση

Παύση εφαρμογής
RF παλμού 180°

- Διαμήκης μαγνήτιση, $M_z=M_0$
- Εγκάρσια μαγνήτιση $M_{xy}=0$



Η γωνία που σχηματίζει το M με την αρχική του θέση (M_0) ονομάζεται γωνία νεύσης (γωνία διέγερσης, flip angle) και η τιμή της εξαρτάται από την ένταση και τη χρονική διάρκεια εφαρμογής του B_1

51

Παραγωγή MR σήματος

Η δημιουργία του σήματος MR περιλαμβάνει 2 βήματα:

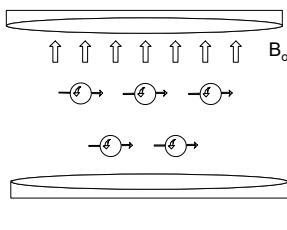
- Διέγερση
- Επαναφορά (αποδιέγερση)



52

Παραγωγή MR σήματος Επαναφορά

Εκπομπός
Ραδιο-
συχνοτήτων

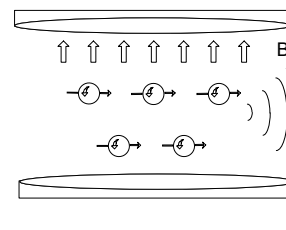


Γωνία νεύσης 90°

53

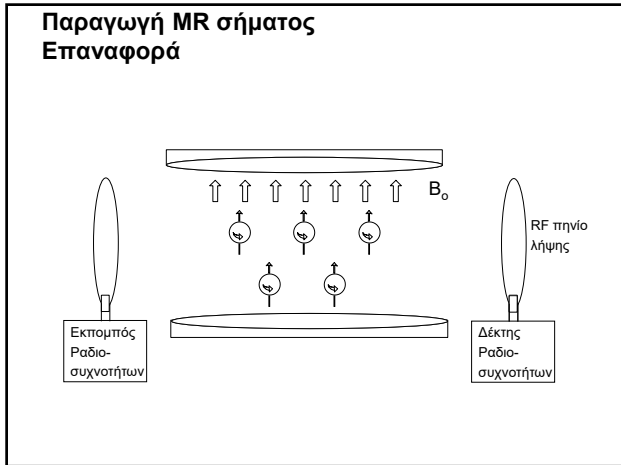
Παραγωγή MR σήματος Επαναφορά

Εκπομπός
Ραδιο-
συχνοτήτων

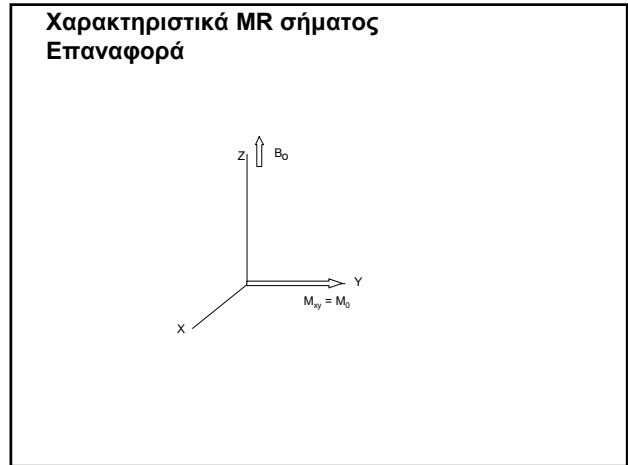


Δέκτης
Ραδιο-
συχνοτήτων

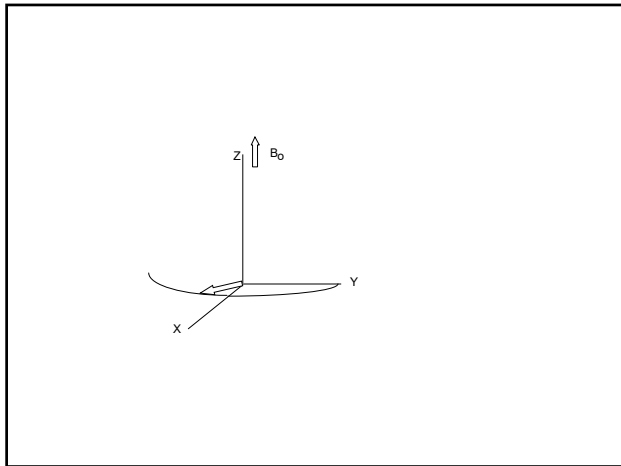
54



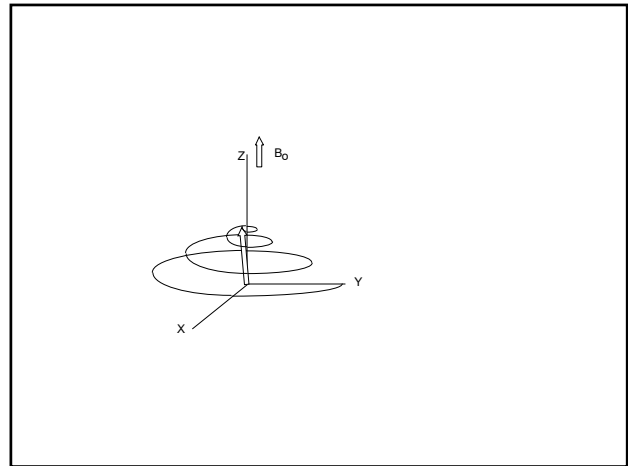
55



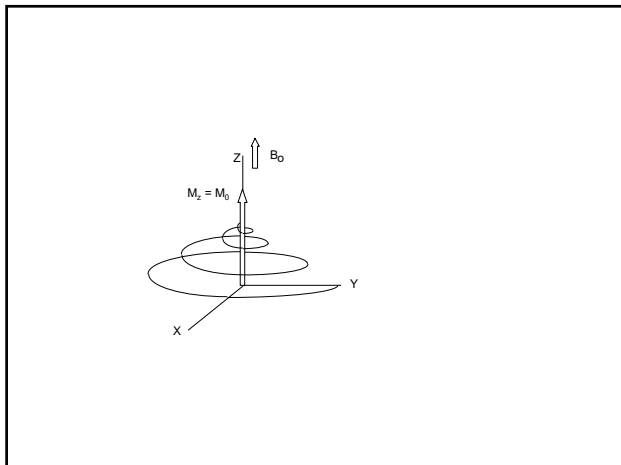
56



57



58

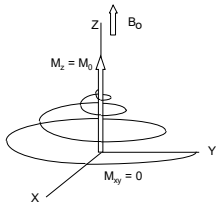


59

- ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ**
- Το φαινόμενο NMR
 - Δημιουργία MR σήματος
 - Χρόνοι επαναφοράς (αποκατάστασης)
 - Σχηματισμός εικόνας
 - Υλικά μέρη, βιολογικές επιδράσεις & ασφάλεια
 - Αντίθεση εικόνας
 - Εφαρμογές

60

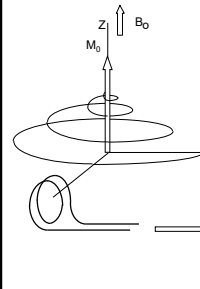
Δύο διαδικασίες Επαναφοράς (ή Αποκατάστασης ή Χαλάρωσης)



- Επαναφορά T2
 - Εγκάρσια επαναφορά (στο επίπεδο xy)
 - Mxy από M0 σε 0 (απόσβεση)
- Επαναφορά T1
 - Διαμήκης επαναφορά (κατά τον z άξονα)
 - Mz από 0 σε M0 (ανάκτηση)

61

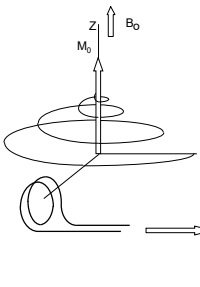
Χαρακτηριστικά MR σήματος



- Το μετρούμενο σήμα MR δεν είναι τίποτα άλλο παρά επαγόμενο ρεύμα στο πηνίο λήψης λόγω μεταβαλλόμενης μαγνητικής ροής (νόμος του Faraday)
- Το σήμα MR προέρχεται μόνο από τη συνιστώσα Mxy (η συνιστώσα Mz δεν συμβάλλει στο μετρούμενο σήμα)

62

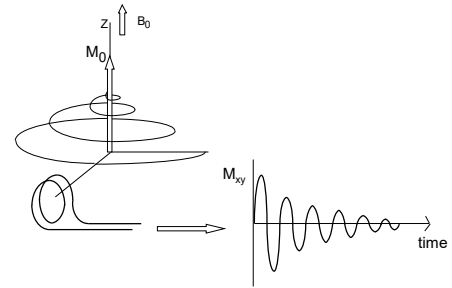
Χαρακτηριστικά MR σήματος



- Το Mxy είναι χρονοεξαρτώμενο (δηλ. περιστρέφεται γύρω από το z) και, συνεπώς, επάγει ρεύμα στο πηνίο λήψης
- Το Mz δεν περιστρέφεται, επομένως δεν δύναται να επάγει αλλαγή στη μαγνητική ροή εντός του πηνίου λήψης

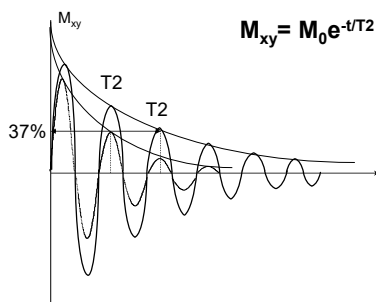
63

Εγκάρσια (T2) επαναφορά: Απόσβεση της Mxy συνιστώσας



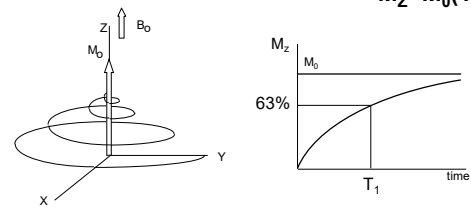
64

Χρόνος Επαναφοράς T2: Η χρονική σταθερά στην απόσβεση του Mxy



65

Χρόνος Επαναφοράς T1: Η χρονική σταθερά στην ανάκτηση του Mz



66

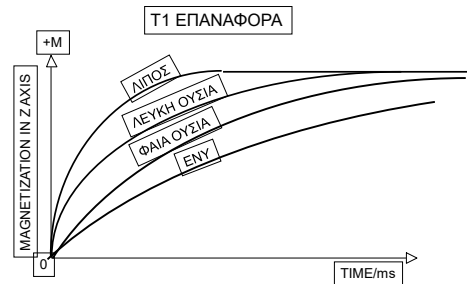
Φαινόμενα Επαναφοράς

- T1 Επαναφορά (T1 relaxation): απώλεια ενέργειας μέσω αλληλεπίδρασης των πρωτονίων με το γειτονικό μοριακό περιβάλλον (spin-lattice relaxation)
- T2 Επαναφορά (T2 relaxation): απώλεια συμφασικότητας μεταξύ των διπόλων (αύξηση εντροπίας συστήματος μέσω αλληλεπιδράσεων spin-spin)

Οι χρόνοι T1 και T2 είναι διακριτοί για ένα ομοιογενές δείγμα

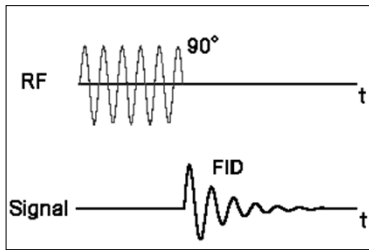
67

Χαρακτηριστικά MR σήματος Χρόνος διαμήκου επαναφοράς T1



68

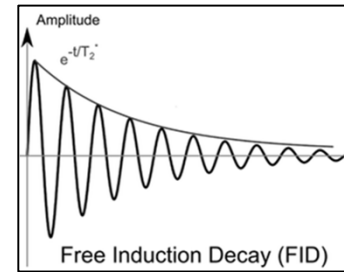
Free induction decay (FID)/Free induction signal (FIS) Σήμα ελεύθερης επαγωγικής απόσβεσης



Το σήμα ελεύθερης επαγωγικής απόσβεσης είναι το σήμα που επάγεται αμέσως μετά τον παλμό διέγερσης (RF) (δηλαδή, η μαγνήτιση στο επίπεδο xy την οποία μετράμε)

69

Free induction decay (FID)/Free induction signal (FIS) Σήμα ελεύθερης επαγωγικής απόσβεσης



Το σήμα ελεύθερης επαγωγικής απόσβεσης μειώνεται εκθετικά με σταθερά χρόνου ίση με T2*

70

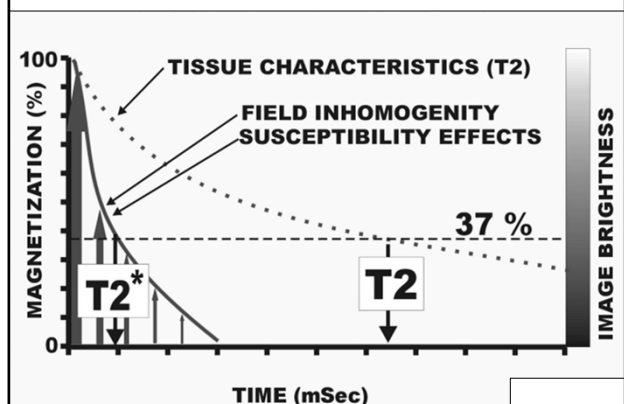
Ανομοιογένειες και T2*

- Μικρές ανομοιογένειες στο τοπικό μαγνητικό πεδίο (δηλ. στην περιοχή που καταλαμβάνει το δείγμα) οδηγούν σε αναστρέψιμη απώλεια συμφασικότητας των μαγνητικών ροπών, που προσομοιάζει την μη αναστρέψιμη απώλεια συμφασικότητας λόγω της χαλάρωσης T2 (η οποία οφείλεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ των πυρήνων)
- Εάν το ΔH_0 δηλώνει το μέγεθος της διακύμανσης του τοπικού μαγνητικού πεδίου, τότε το T2* συνδέεται με το T2 σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{1}{T_2^*} = \frac{1}{T_2} + \gamma \Delta H_0$$

71

Γραφική συσχέτιση μεταξύ T2* και T2



72

**ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ
ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ**

- Το φαινόμενο NMR
- Δημιουργία MR σήματος
- Χρόνοι επαναφοράς (αποκατάστασης)
- Σχηματισμός εικόνας
- Υλικά μέρη, βιολογικές επιδράσεις & ασφάλεια
- Αντίθεση εικόνας
- Εφαρμογές

73

Σχηματισμός Εικόνας

Εικόνα = πληροφορία της χωρικής κατανομής των ιστών



Ανάγκη χωρικής κωδικοποίησης του λαμβανόμενου σήματος

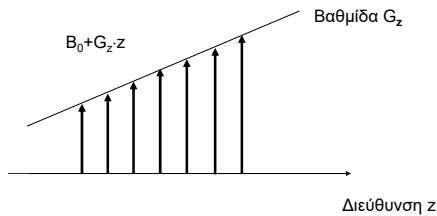


Επίτευξη με τη χρήση βαθμίδων πεδίου (field gradients)

74

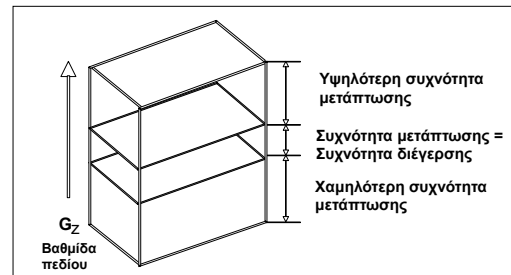
Βαθμίδα πεδίου (field gradient)

Η γραμμική μεταβολή του στατικού μαγνητικού πεδίου κατά μια διεύθυνση



75

**Επίδραση βαθμίδας πεδίου:
Χωρική βαθμίδωση συχνότητας Larmor**

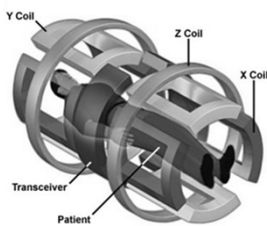


Ο παλμός διέγερσης διεγείρει μόνο τους πυρήνες μιας τομής που μεταπίπτουν στη σωστή συχνότητα: Μόνο αυτοί «αντιλαμβάνονται» τον παλμό και μόνο αυτοί «ανταποκρίνονται» για να παράγουν το σήμα MR

76

Σύστημα βαθμίδων πεδίου

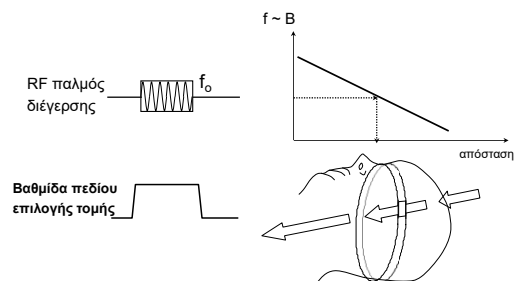
Τρεις βαθμίδες πεδίου σε ισάριθμες κατευθύνσεις στο χώρο:
X, Y και Z field gradients



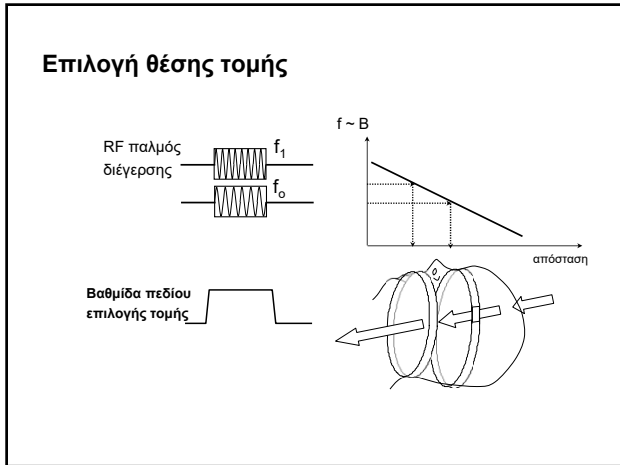
- 1η κατεύθυνση: επιλογή τομής
- 2η κατεύθυνση: κωδικοποίηση συχνότητας
- 3η κατεύθυνση: κωδικοποίηση φάσης

77

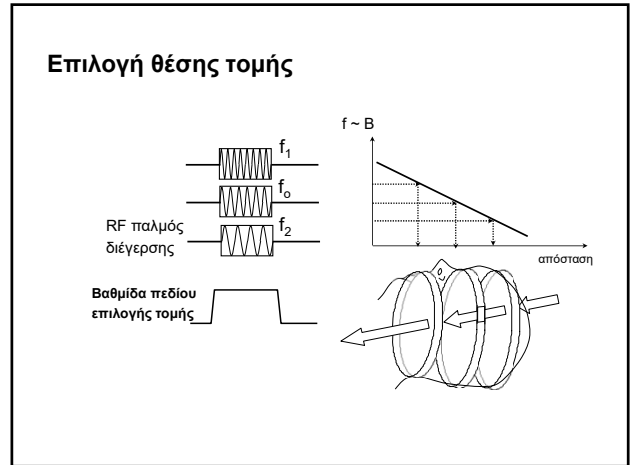
Επιλογή θέσης τομής



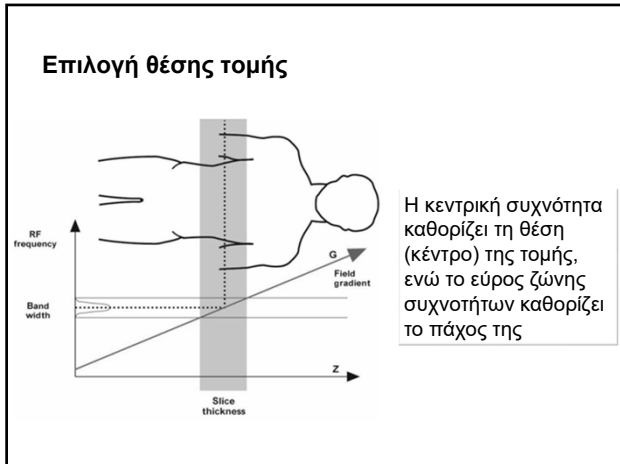
78



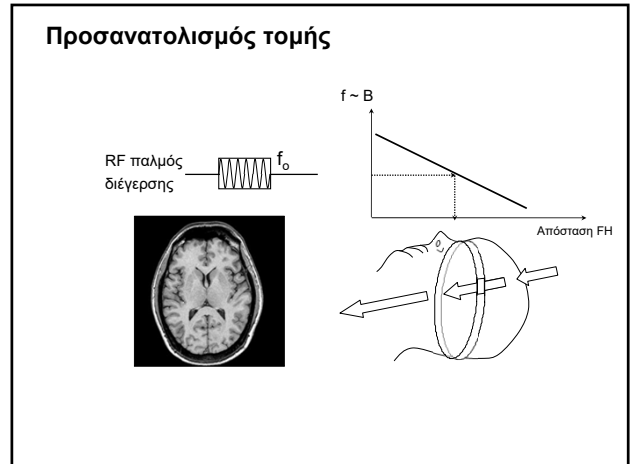
79



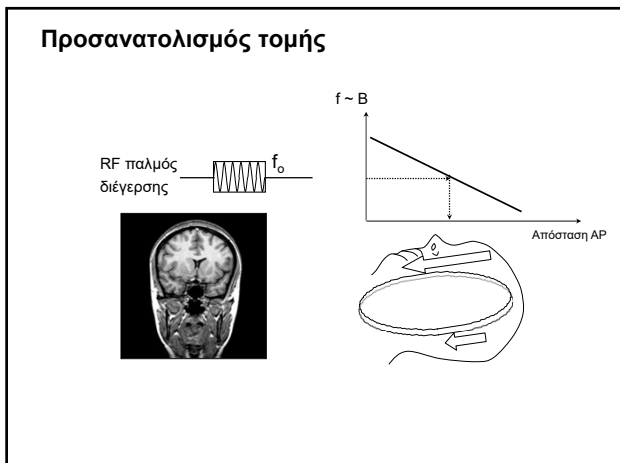
80



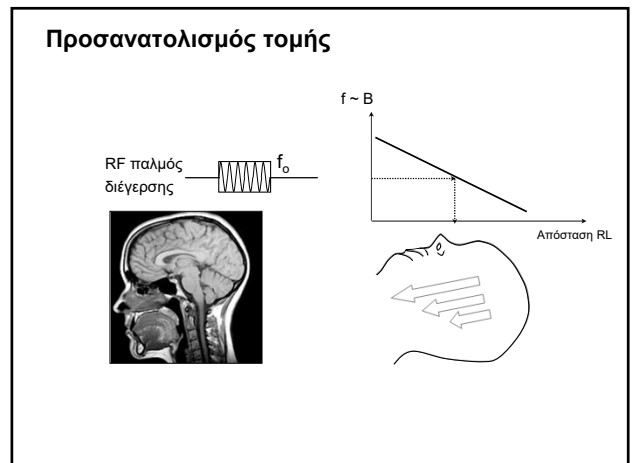
81



82



83



84

Προσανατολισμός τομής

Στην ΑΜΣ, σε αντίθεση με την ΥΤ, μπορούν να ληφθούν δεδομένα για ανασύνθεση εικόνων σε οποιοδήποτε ορθογώνιο (ή πλάγιο) επίπεδο

85

Κωδικοποίηση συχνότητας

Βαθμίδα πεδίου κωδικοποίησης συχνότητας

MR σήμα

Διεύθυνση κωδικοποίησης συχνότητας

Τα πρωτόνια έχουν την ίδια f μετάπτωσης κατά μήκος του x

86

Κωδικοποίηση συχνότητας

Βαθμίδα πεδίου κωδικοποίησης συχνότητας

MR σήμα

Διεύθυνση κωδικοποίησης συχνότητας

Τα πρωτόνια έχουν διαφορετική f μετάπτωσης κατά μήκος του x και οι συχνότητες του σήματος θα «αποκαλύψουν» τη θέση τους

87

Κωδικοποίηση φάσης

Βαθμίδα κωδικοποίησης φάσης: $G_y = 0$

Διεύθυνση κωδικοποίησης φάσης

Τα πρωτόνια έχουν την ίδια f μετάπτωσης κατά μήκος του y και περιστρέφονται συγχρονισμένα (σε συμφωνία φάσης)

88

Κωδικοποίηση φάσης

Βήμα κωδικοποίησης φάσης:

Διεύθυνση κωδικοποίησης φάσης

Τα πρωτόνια έχουν διαφορετική f μετάπτωσης κατά μήκος του y και αποσυγχρονίζονται (χάνουν τη συμφασικότητά τους)

89

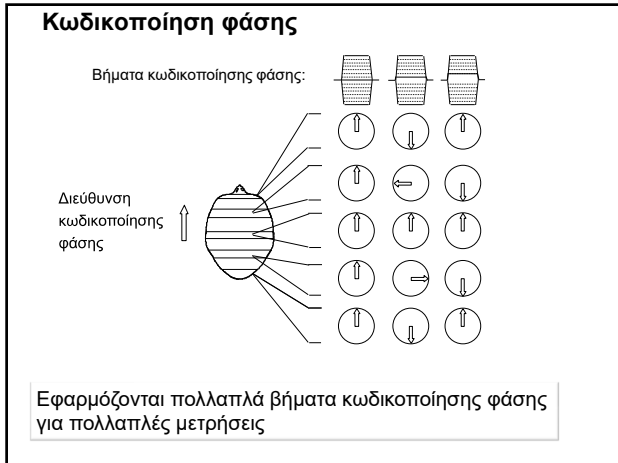
Κωδικοποίηση φάσης

Βαθμίδα κωδικοποίησης φάσης: $G_y = 0$

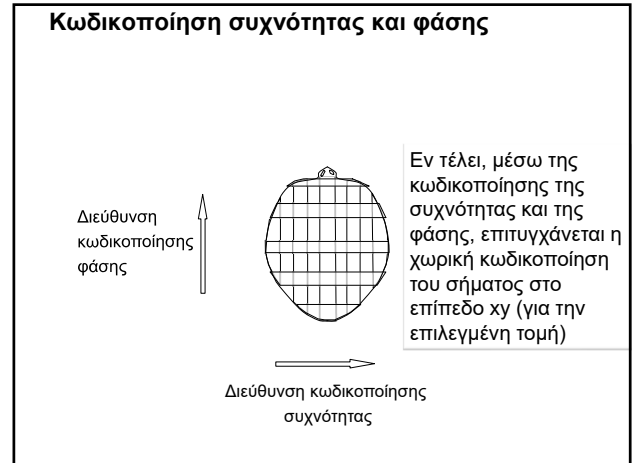
Διεύθυνση κωδικοποίησης φάσης

Όταν η βαθμίδα απενεργοποιείται οι πυρήνες αποκτούν ξανά την ίδια f μετάπτωσης αλλά παραμένουν εκτός φάσης

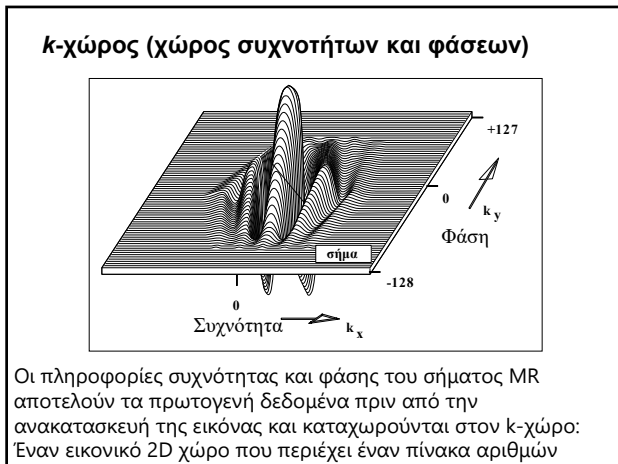
90



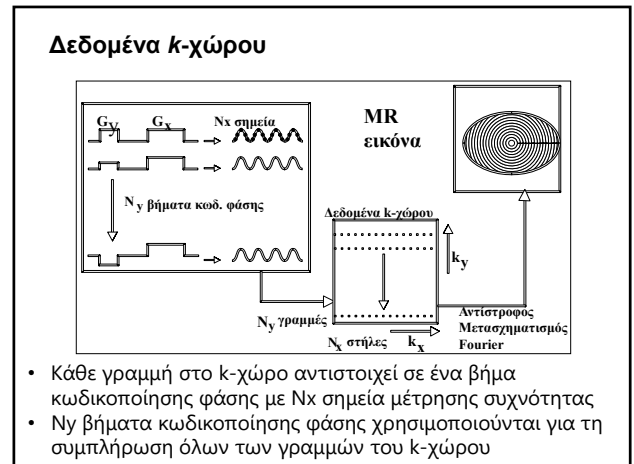
91



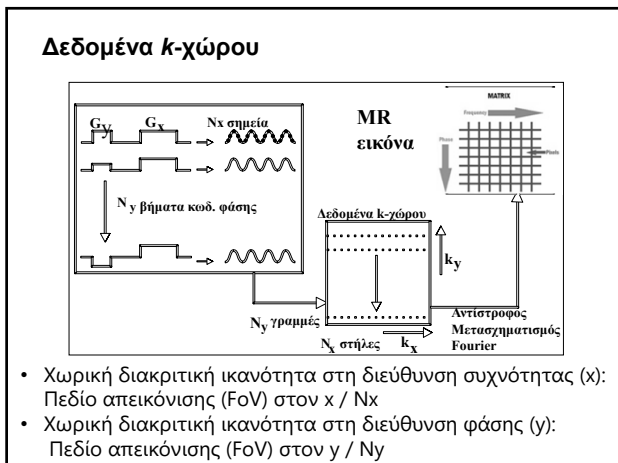
92



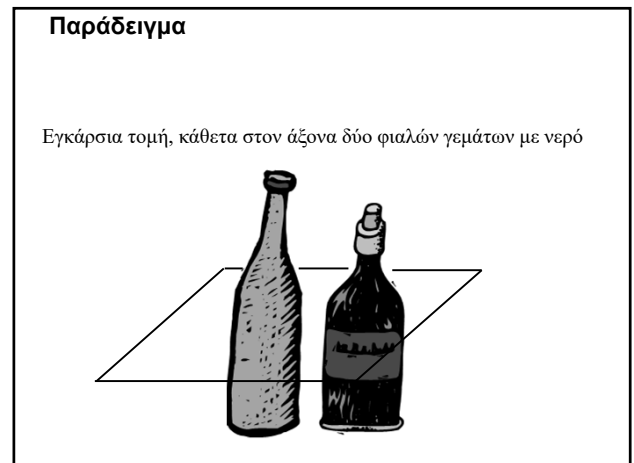
93



94

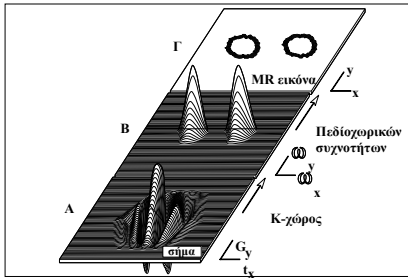


95



96

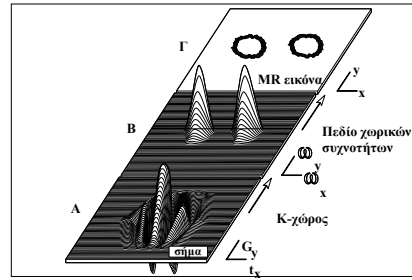
Ανακατασκευή εικόνας MT



Τα δεδομένα του k -χώρου (Α) χρησιμοποιούνται για την ανακατασκευή του διδιάστατου φάσματος χωρικών συχνοτήτων της εικόνας (Β) (η χωρική πληροφορία ανακατασκευάζεται στο «πεδίο συχνοτήτων»)

97

Ανακατασκευή εικόνας MT

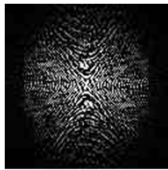


Η τελική εικόνα (Γ) παράγεται με αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier του διδιάστατου φάσματος χωρικών συχνοτήτων (Β)

98

k -χώρος και εικόνα MT

k -χώρος



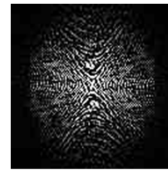
Ο k -χώρος εικονογραφικά αναπαρίσταται ως «γαλαξίας»

Κάθε «αστέρι» στον k -χώρο είναι απλώς ένα σημείο δεδομένων που προέρχεται απευθείας από το σήμα MR. Η φωτεινότητα κάθε «αστέρα» αντιπροσωπεύει τη σχετική συμβολή της μοναδικής χωρικής συχνότητας αυτού του «αστέρα» στην τελική εικόνα

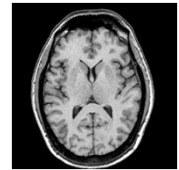
99

k -χώρος και εικόνα MT

k -χώρος



Εικόνα MT

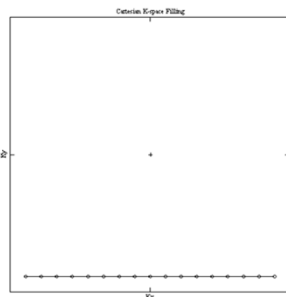


Αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier

Αν και ο "γαλαξίας" του k -χώρου και η εικόνα MT διαφέρουν πάρα πολύ, περιέχουν πανομοιότυπες πληροφορίες σχετικά με το προς απεικόνιση αντικείμενο. Οι δύο αναπαραστάσεις συνδέονται μεταξύ τους με μια προηγμένη μαθηματική διαδικασία: Τον **αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier**

100

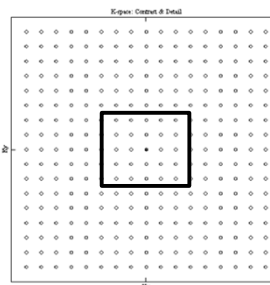
Πλήρωση του k -χώρου και ποιότητα απεικόνισης



- Η τέλεια ανακατασκευή ενός αντικειμένου θα απαιτούσε μέτρηση όλων των θέσεων στον k -χώρο (άπειρες μετρήσεις!)
- Τα δεδομένα λαμβάνονται σημείο προς σημείο στον k -χώρο ώστε να καλυφθεί επαρκώς (επαρκής δειγματοληψία)

101

Πλήρωση του k -χώρου και ποιότητα απεικόνισης



Η δειγματοληψία του κέντρου του k -χώρου (χαμηλές χωρικές συχνότητες) καθορίζει την αντίθεση της εικόνας

102

Πλήρωση του k -χώρου και ποιότητα απεικόνισης

Η δειγματοληψία των άκρων του k -χώρου (υψηλές χωρικές συχνότητες) καθορίζει τη χωρική ανάλυση της εικόνας

103

Διδιάστατη ΑΜΣ (Multi-slice MRI)

Όλες οι τομές διεγείρονται και τα δεδομένα τους λαμβάνονται ξεχωριστά και διαδοχικά για την ανακατασκευή των αντίστοιχων εικόνων

104

Τριδιάστατη ΑΜΣ («πραγματικά 3D»)

- Ολόκληρος ο όγκος ενδιαφέροντος (όλες οι τομές) διεγείρονται ταυτόχρονα
- Πλήρωση του k -χώρου που επεκτείνεται σε 3 διαστάσεις
- 3D μετασχηματισμός Fourier για ανακατασκευή όλων των τομών

105

ΑΜΣ: Σύνοψη

- Το δείγμα τοποθετείται σε υψηλό στατικό μαγνητικό πεδίο
- Επιλεκτική διέγερση τομής (RF παλμός + βαθμίδα πεδίου επιλογής τομής)
- Λήψη σήματος με ταυτόχρονη εφαρμογή βαθμίδων κωδικοποίησης φάσης και συχνότητας
- Πολλαπλές μετρήσεις, μέσω πολλαπλών βημάτων κωδικοποίησης φάσης, για επαρκή δειγματοληψία του k -χώρου
- Αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier των ληφθέντων δεδομένων για την ανακατασκευή της εικόνας MT

106

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ

- Το φαινόμενο NMR
- Δημιουργία MR σήματος
- Χρόνοι επαναφοράς (αποκατάστασης)
 - Σχηματισμός εικόνας
- Υλικά μέρη, βιολογικές επιδράσεις & ασφάλεια
 - Αντίθεση εικόνας
 - Εφαρμογές

107

Υπεραγωγίμος Μαγνήτης

- Περιελίξεις ειδικού κράματος (Nb-Ti) μέσα σε υγρό ήλιο (-269° C)



ΥΠΕΡ

- Ισχυρό μαγνητικό πεδίο
- Εξαιρετική ομοιογένεια πεδίου
- Μεγάλη σταθερότητα

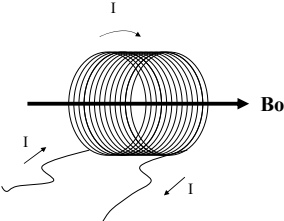
ΚΑΤΑ

- Υψηλότερο κόστος αγοράς - εγκατάστασης
- Χρήση κρυογόνων

108

Δημιουργία Μαγνητικού Πεδίου

Η ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα σωληνοειδές δημιουργεί μαγνητικό πεδίο B_0



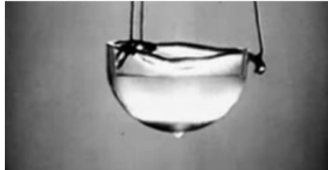
Η ένταση του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου, B_0 , είναι:

- Ανάλογη του ηλεκτρικού ρεύματος, I
- Αντιστρόφως ανάλογη της διαμέτρου του σωληνοειδούς, R

109

Κρυογόνα


- Το υγρό He έχει θερμοκρασία ζέσης ελάχιστα πάνω από τους -269°C
- Αν ο μαγνήτης αρχίσει να «χάνει» την υπεραγωγιμότητά του, υγρό He περνά στην αέρια κατάσταση και αέριο He απελευθερώνεται. Αποτελεί φαινόμενο χιονοστιβάδας το οποίο διαρκεί περίπου 20 sec (quench)
- Το Ήλιο είναι αρκετά κρύο για να υγροποιήσει το οξυγόνο, γεγονός που αποτελεί μεγάλο κίνδυνο για πυρκαγιά



110

Κρυογόνα


- Το αέριο Ήλιο είναι άσπρο, άχρωμο και διαστέλλεται ταχύτατα
- Αν δεν διοχετευθεί αμέσως σε εξωτερικό χώρο θα αντικαταστήσει το περισσότερο από το οξυγόνο στο δωμάτιο, με κίνδυνο ασφυξίας



111

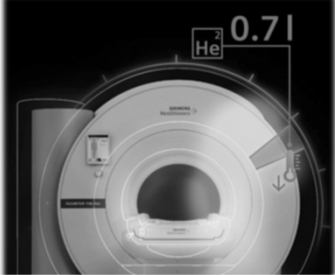
Κρυογόνα

- Η επαναφορά του μαγνήτη σε υπεραγώγιμη κατάσταση κοστίζει ακριβά
- Πίστετε το κουμπί ασφαλείας μόνο για πολύ σημαντικό λόγο..... εκτός εάν πρόκειται για απεγκατάσταση συστήματος



112

Υπεραγώγιμοι Μαγνήτες νέας γενιάς με ελάχιστο υγρό He



- Χωρίς ανάγκη για αναδόμηση
- Χωρίς αγωγή διαφυγής αέριου He (κανένας κίνδυνος για quench)
- Γρήγορος χρόνος ανόδου πεδίου

PHYSICS TODAY THE MAGAZINE LATEST COLLECTIONS WEBINARS & MORE PHYSICS JOBS ABOUT

Volume 76, Issue 9
1 September 2023
Helium prices surge to record levels as shortage continues

113

Έκθεση σε HM πεδία στην ΑΜΣ

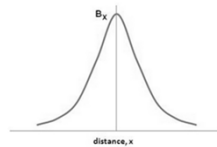
Πεδίο	Εύρος	Συχνότητα	Διάρκεια
Στατικό μαγνητικό πεδίο (B_0)	0.2–7 T	0 Hz	Συνεχής έκθεση
Χωρικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο (ασύμμετρο πεδίο) (dB/dx)	0–25 T/m	0 Hz	Πάντα ενεργό Μετακίνηση εντός αυτού ισοδυναμεί με ένα χρονικά (αργά) μεταβαλλόμενο πεδίο
Χρονικά μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία (βαθμιδωτά πεδία) (dB/dt)	0–66 mT/m	0– >10 kHz	Πολλαπλοί τραπεζοειδείς παλμοί διάρκειας λίγων ms Υψηλός κύκλος λειτουργίας Χρόνος ανόδου 0.1–1 ms Ρυθμός μεταβολής έως 220 T/m/s
Πεδίο ραδιοσυχνότητας (B_1)	0–50 μT	8–300 MHz	Παλμοί διαμόρφωσης μεγέθους ελάχιστων ms Χαμηλός κύκλος λειτουργίας

Τροποποιημένος Πίνακας από McRobbie, BJR, 85 (2012), 293–312

114

Ασύμμετρο Πεδίο

- Το μαγνητικό πεδίο έξω από τον μαγνήτη, το οποίο είναι σημαντικά υψηλότερο από το πεδίο της γης (fringe / stray field)
- Η έντασή του και η χωρική κατανομή του εξαρτώνται από
 - την ένταση του στατικού μαγνητικού πεδίου
 - Τον τύπο του μαγνήτη
 - Μαγνήτες χωρίς θωράκιση έχουν ιδιαίτερα εκτεταμένο ασύμμετρο πεδίο



Διακύμανση μαγνητικού πεδίου κατά μήκος του άξονα ενός κυκλικού πηνίου

115

Ασύμμετρο Πεδίο

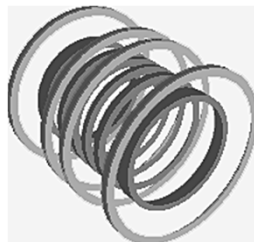
- Το μαγνητικό πεδίο έξω από τον μαγνήτη, το οποίο είναι σημαντικά υψηλότερο από το πεδίο της γης (fringe / stray field)
- Η έντασή του και η χωρική κατανομή του εξαρτώνται από
 - την ένταση του στατικού πεδίου
 - Τον τύπο του μαγνήτη
 - Παθητική θωράκιση



116

Ασύμμετρο Πεδίο

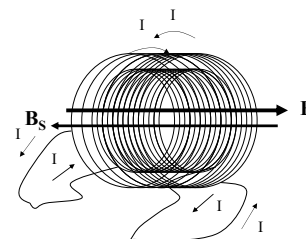
- Το μαγνητικό πεδίο έξω από τον μαγνήτη, το οποίο είναι σημαντικά υψηλότερο από το πεδίο της γης (fringe / stray field)
- Η έντασή του και η χωρική κατανομή του εξαρτώνται από
 - την ένταση του στατικού πεδίου
 - Τον τύπο του μαγνήτη
 - Ενεργή θωράκιση



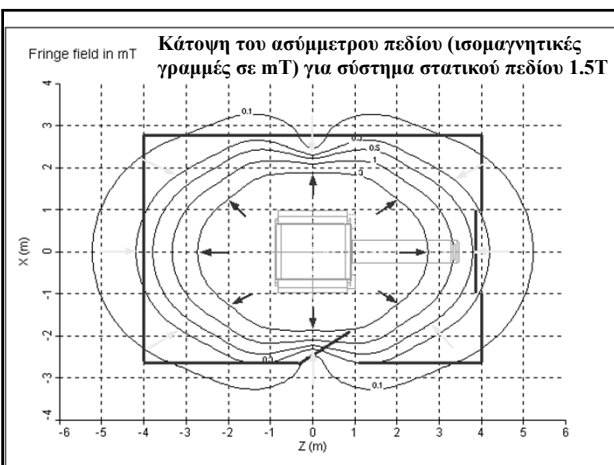
117

Ενεργή Θωράκιση Μαγνητικού Πεδίου

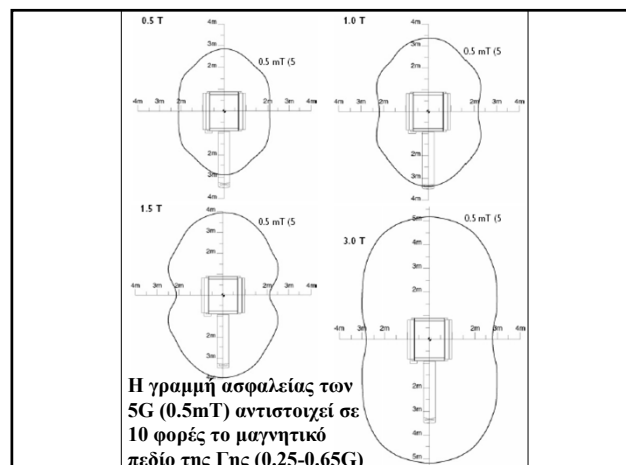
Ενσωμάτωση ενός επιπλέον υπεραγωγίμου πηνίου το οποίο δημιουργεί ένα αντίρροπο μαγνητικό πεδίο, B_s , και μειώνει δραστικά το ασύμμετρο πεδίο



118



119



Η γραμμή ασφαλείας των 5G (0.5mT) αντιστοιχεί σε 10 φορές το μαγνητικό πεδίο της Γης (0.25-0.65G)

120

Ασύμμετρο Πεδίο

- Πρόκειται ένα χωρικά διαμορφούμενο βαθμιδωτό μαγνητικό πεδίο
- Το βαθμιδωτό αυτό πεδίο αναφέρεται στο ρυθμό με τον οποίο το στατικό μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται με την απόσταση ή στο χώρο
- Εκφράζεται ως dB/dx (Tesla/meter)
- Θεωρείται ότι η κίνηση (της κεφαλής) εντός του χωρικά διαμορφούμενου πεδίου προκαλεί κάποια ήπια αισθητηριακά φαινόμενα



121

Βραχύβιες Επιδράσεις

Φαινόμενα που έχουν αναφερθεί σε σχέση με την κίνηση εντός ισχυρών μαγνητικών πεδίων:

- Ναυτία
- Ίλιγγος
- Πονοκέφαλος
- Ζάλη
- Αιμωδίες
- Μεταλλική γεύση
- Οπτικές διαταραχές
- Ερεθισμός περιφερικών νεύρων (έως πόνος)

Τα φαινόμενα αυτά είναι παροδικά και εξαρτώνται από το άτομο, ενώ οι όποιες επιδράσεις παύουν μετά την έξοδο του ατόμου από την αίθουσα του μαγνήτη

122

Βραχύβιες Επιδράσεις

Φαινόμενα που έχουν αναφερθεί σε σχέση με την κίνηση εντός ισχυρών μαγνητικών πεδίων:

- Ναυτία
- Ίλιγγος
- Πονοκέφαλος
- Ζάλη
- Αιμωδίες
- Μεταλλική γεύση
- Οπτικές διαταραχές
- Ερεθισμός περιφερικών νεύρων (έως πόνος)



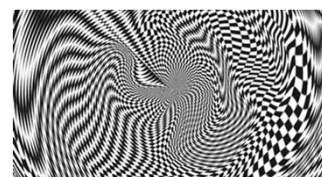
Η άμεση επίδραση του μαγνητικού πεδίου στα ρεύματα ιόντων στο αισθητικό σύστημα μπορεί να συνεισφέρει στο αίσθημα ίλιγγου

123

Βραχύβιες Επιδράσεις

Φαινόμενα που έχουν αναφερθεί σε σχέση με την κίνηση εντός ισχυρών μαγνητικών πεδίων:

- Ναυτία
- Ίλιγγος
- Πονοκέφαλος
- Ζάλη
- Αιμωδίες
- Μεταλλική γεύση
- Οπτικές διαταραχές
- Ερεθισμός περιφερικών νεύρων (έως πόνος)



Οι μαγνητικές φωσφίνες (φως φαίνεν) που γίνονται αντιληπτές ως λάμπει φωτός
Το μεταβαλλόμενο πεδίο επάγει ρεύμα στον αμφιβληστροειδή ή στον οπτικό φλοιό με αποτέλεσμα τη ψευδαίσθηση του φωτός

124

Εγκεφαλική Λειτουργία & κίνηση εντός του ασύμμετρου πεδίου

- Πρόσφατες μελέτες με εθελοντές καταδεικνύουν ότι επιδράσεις είναι πιθανές σε ανώτερες εγκεφαλικές δεξιότητες, όπως προσωρινές διαταραχές στην

- Συγκέντρωση
- Προσοχή
- Μνήμη
- Συντονισμός κίνησης οφθαλμών



- Η ευαισθησία διαφέρει από άτομο σε άτομο
- Τα φαινόμενα ελαχιστοποιούνται ή εξαφανίζονται με πολύ αργή κίνηση εντός του ασύμμετρου μαγνητικού πεδίου

INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION



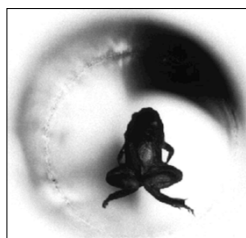
125

Είναι τα στατικά μαγνητικά πεδία ασφαλή για τους ζωντανούς οργανισμούς;

Αιωρούμενος βάτραχος σε 16T !

Οι βάτραχοι δεν υπέστησαν καμία βλάβη

Berry MV and Geim AK, Eur J Physics, 18, 307-313, 1997.



- Τα μέχρι σήμερα διαθέσιμα στοιχεία υποδηλώνουν ότι η βραχυχρόνια έκθεση δεν έχει σημαντικά επιβλαβή βιολογικά αποτελέσματα

Kangarlu A. and Robitaille P.L., Concepts Magn Reson, 16, 321-359, 2006.

Τα διαμαγνητικά αντικείμενα αποθωθούν από μαγνητικά πεδία. Εάν τα πεδία είναι αρκετά ισχυρά, αυτή η άπωση μπορεί να εξισορροπήσει τη βαρύτητα και τα αντικείμενα αιωρούνται

126

Στατικό Μαγνητικό Πεδίο & Εγκεφαλική Λειτουργία

Original Research

JOURNAL OF MAGNETIC RESONANCE IMAGING 18(12):2415 (2003)

Randomized Comparison of Cognitive Function in Humans at 0 and 8 Tesla

Donald W. Chakeres, MD,^{1*} Robert Bornstein, PhD

Original Research

JOURNAL OF MAGNETIC RESONANCE IMAGING 26(12):2227 (2007)

Safety of Human MRI at Static Fields Above the FDA 8T Guideline: Sodium Imaging at 9.4T Does Not Affect Vital Signs or Cognitive Ability

Ian C. Atkinson, PhD,^{1*} Laura Renteria, PhD,² Holly Burd, BA,² Neil H. Pliskin, PhD,² and Keith R. Thulborn, MD, PhD¹

Μελέτες υποδηλώνουν ότι η έκθεση του εγκεφάλου σε πεδία 8 & 9.4 T δεν επηρεάζουν την ανθρώπινη γνωστική ικανότητα

127

ΑΜΣ στην κλινική πράξη



1.5 Tesla – 30 000 X μαγν. πεδίο γης

3 Tesla – 60 000 X μαγν. πεδίο γης

128

Κλινικά συστήματα υπερ-υψηλού στατικού μαγνητικού πεδίου (7T)



7T : 140.000 X μαγνητικό πεδίο γης

129

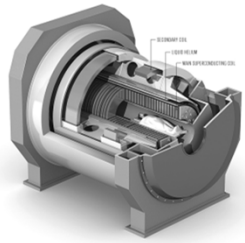
Συστήματα ολόσωμης ΑΜΣ

- > 25000 συστήματα
- http://www.magnetic-resonance.org/MagRes%20Chapters/21_03.htm
- Αυξητική τάση για συστήματα υψηλού πεδίου (3T) και υπερ-υψηλού πεδίου (5T, 7T)

- 1000 @ 3T
- ~70 @ 4T ή 7T
- ~5 @ 5T
- 1 @ 8 T
- 2 @ 9.4 T
- 1 @ 11.7 T

(Υπεραγωγίσιμος μαγνήτης 132 τόνων)

Νέες μελέτες χρειάζονται για την αξιολόγηση των δυνητικών κινδύνων της βραχύβιας έκθεσης σε υπερυψηλά πεδία



130

Εμφυτεύματα / Συσκευές

- Το μαγνητικό πεδίο μπορεί να διακόψει την κανονική λειτουργία ηλεκτρικών, μαγνητικών και μηχανικών συσκευών (π.χ., βηματοδότες, αντλίες ινσουλίνης, κλπ)
- Οι περισσότεροι κίνδυνοι σχετίζονται με την μετακίνηση εμφυτευμάτων ή ξένων υλικών με σιδηρομαγνητικές ιδιότητες



I think I am allergic to MRI's. Everytime I get one, I suddenly have the uncontrollable urge to itch and scratch everywhere violently.


somocards
use card

131

Επίδραση σε Σιδηρομαγνητικά Αντικείμενα

Υπάρχουν δύο κατηγορίες συνεπειών της έκθεσης σιδηρομαγνητικών αντικειμένων στο μαγνητικό πεδίο

- Μετατόπιση: "projectile" or "missile" effect



projectile effect

missile effect A term referring to the ability of an MRI scanner to dangerously attract ferromagnetic iron-based materials—which are core structural components of fire extinguisher, gas cylinders, carts, wheelchairs, floor polishers,

- Στρέψη/περιστροφή: The "rotational" effect

132

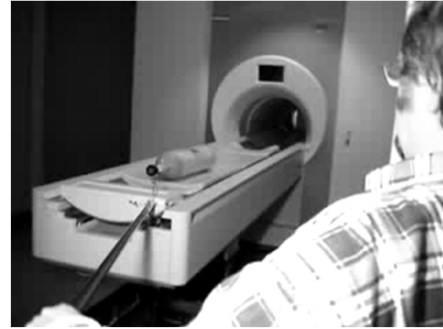
The Projectile Effect

- Το αντικείμενο έλκεται προς το ισόκεντρο και μετατρέπεται σε «βλήμα» καθώς επιταχύνεται σε ταχύτητες ως 70 km/hr
- Η δύναμη μετατόπισης καθίσταται μέγιστη όπου το ασύμμετρο πεδίο είναι μέγιστο και είναι σχεδόν μηδενική στο ισόκεντρο
- Το αντικείμενο θέτει σε κίνδυνο τον ασθενή κι οποιονδήποτε βρεθεί στην πορεία του



133

Μην ξεχνάτε ότι το μαγνητικό πεδίο είναι συνεχώς σε ισχύ

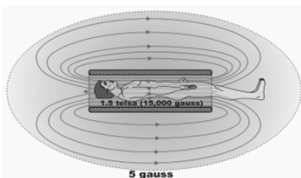


Οποιοδήποτε αντικείμενο με σιδηρομαγνητικές ιδιότητες μπορεί να μεταβληθεί σε βλήμα

134

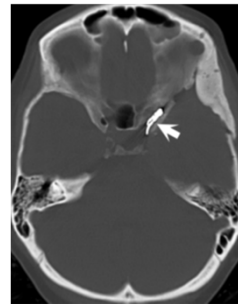
The Rotational Effect

- Το αντικείμενο περιστρέφεται έως ότου ο μεγάλος άξονάς του ευθυγραμμιστεί με τις μαγνητικές γραμμές
- Η δύναμη στρέψης καθίσταται μέγιστη στο ισόκεντρο
- Η δύναμη στρέψης σε σύστημα 3T είναι 4πλασια της δύναμης σε σύστημα 1.5T
- Ο συνεπαγόμενος κίνδυνος αφορά κυρίως εμφυτεύματα



135

The Rotational Effect



Πρόθεμα ανευρύσματος (εικόνα CT):

Μια μαγνητική τομογραφία αντενδείκνυται σε έναν ασθενή με ένα πρόθεμα ανευρύσματος, όπως αυτό που απεικονίζεται (βέλος), για το οποίο ο ακριβής τύπος δεν μπορεί να τεκμηριωθεί

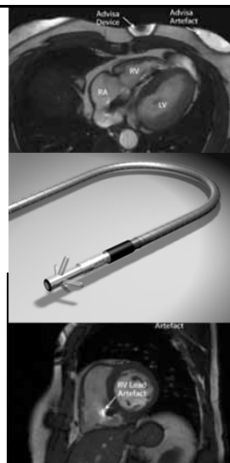
Ενδελεχές ιστορικό απαιτείται πάντα!

136

Εμφυτεύματα

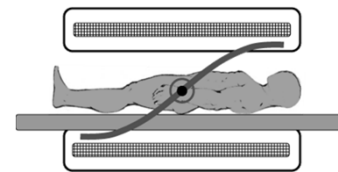
- Μπορούν να δράσουν ως δέκτες, με επαγόμενα ρεύματα κατά μήκος των αγωγίμων επιφανειών τους
- Σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας (>10° C) μπορεί να συμβεί σε αγωγίμα εμφυτεύματα με μεγάλο μήκος ακροδέκτες (βηματοδότες, απινιδωτές, κλπ)

<https://www.medgadget.com/2012/03/medtronic-mr-conditional-leads-cleared-in-europe.html>



137

Βαθμίδες πεδίου

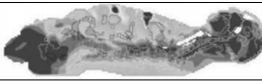


Πρόκειται για χρονικά μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία

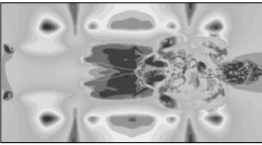
- Παράγουν ηλεκτρικά πεδία τα οποία μπορεί να διεγείρουν το νευρικό ή/και το μυϊκό σύστημα
- Οι επιπτώσεις κυμαίνονται από ένα ήπιο αίσθημα καύσου και μυϊκή σύσπαση έως το αίσθημα του πόνου
- Το αντιδραστικό αίσθημα εξαρτάται από το άτομο

138

Βαθμίδες πεδίου



Επαγόμενα ηλεκτρικά πεδία εντός του σώματος κατά τη διάρκεια μιας τυπικής σάρωσης



- Η τιμή κατωφλίου για την αντίληψη της διέγερσης των περιφερικών νεύρων κυμαίνεται από 20 ως 50 T/sec
- Αίσθημα πόνου υφίσταται σε σχεδόν διπλάσιες τιμές
- Διέγερση του μυοκαρδίου (αρρυθμίες) μπορεί να συμβεί για τιμές >60T/sec (πειραματόζωα)
- Κοιλιακή μαρμαρυγή θα μπορούσε να συμβεί για τιμές 50x
- Τα θεσπισμένα όρια ασφαλούς λειτουργίας μας προστατεύουν επαρκώς

139

Ακουστικός Θόρυβος

- Κυρίως κατά τη διάρκεια της σάρωσης
- Υπάρχει επίσης θόρυβος υποβάθρου



140

Ακουστικός Θόρυβος: Πηγές

Διάφορες πηγές ακουστικού θορύβου υπάρχουν στο χώρο του μαγνητικού τομογράφου

- Πηνία βαθμίδων πεδίων (λόγω της πρόσκρουσής τους πάνω στα πλαίσια στήριξής τους, που οφείλεται στις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την γρήγορη εναλλαγή ρεύματος παρουσία του B_0)
- RF θόρυβος (ήχος που γίνεται αντιληπτός, λόγω θερμοελαστικής επέκτασης, όταν η κεφαλή υπόκειται σε παλμική RF ακτινοβολία συγκεκριμένων συχνοτήτων, 2.4-170 MHz)
- Βοηθητικά συστήματα (π.χ., κρυογεννήτρια, ανεμιστήρες)

<http://www.mrisafety.com/SafetyInfo.asp?SafetyInfoID=252>

141

Ακουστικός Θόρυβος: Επιπτώσεις

- Προβλήματα που σχετίζονται με το θόρυβο στην ΑΜΣ
 - Δυσκολία στη συνεννόηση
 - Ενόχληση
 - Ανησυχία & άγχος
 - Παροδική απώλεια ακοής
 - Μόνιμη έκπτωση ακοής



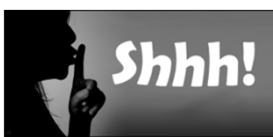
142

Ακουστικός Θόρυβος: Προστασία

- Ωτοασπίδες ή/και ακουστικά πρέπει πάντα να χρησιμοποιούνται (μείωση 10-30 dB)



- Ειδικές «αθόρυβες» ακολουθίες



- Κατασκευή πηνίων με καταστολή των κραδασμών και του αερογενούς ήχου

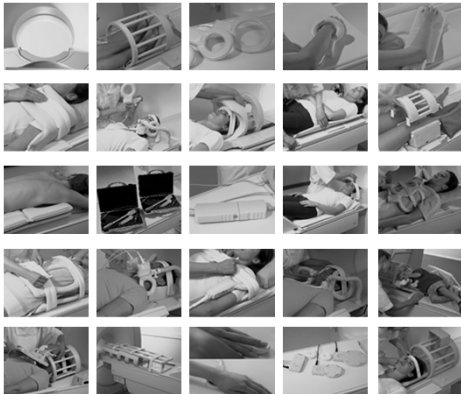
143

Πηνία Ραδιοσυχνότητας

- Συσκευές που εκπέμπουν ή λαμβάνουν ραδιοσυχνότητες
- Συντονισμένα σε συγκεκριμένη συχνότητα λειτουργίας
- Χρησιμοποιούνται στην εκπομπή RF παλμών και στην λήψη του MR σήματος
- Έχουν σχεδίαση και γεωμετρία κατάλληλη για συγκεκριμένες εφαρμογές – ανατομικές περιοχές

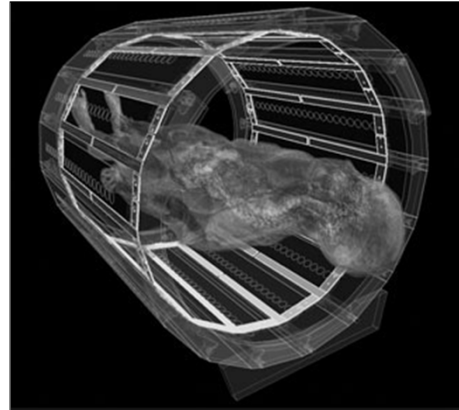
144

Πηνία Λήψης Σήματος



145

Πηνίο Εκπομπής RF



146

Κλωβός Faraday

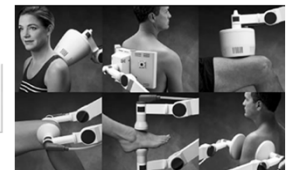
- Απαραίτητος για τον αποκλεισμό RF παρεμβολών από το εξωτερικό περιβάλλον, μέσα στον χώρο του MT
- Συνήθως δημιουργείται από επιφάνειες χαλκού συνδεδεμένες με απόλυτη ακρίβεια για «RF στεγανότητα»
- Περιλαμβάνει παράθυρο με κατάλληλο πλέγμα θωράκισης για θέαση του εσωτερικού



147

Πεδίο Ραδιοσυχνότητας (RF)

- Το μεγαλύτερο μέρος της εκπεμπόμενης RF ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα μέσα στους ιστούς λόγω των ωμικών απωλειών
- Συνεπώς το κυρίαρχο βιολογικό αποτέλεσμα από την έκθεση σε RF πεδία οφείλεται στις θερμογόνες ιδιότητες τους



Η RF διαθερμία (1-100 MHz) χρησιμοποιεί ηλεκτρικά παραγόμενη θερμότητα για θεραπευτικούς σκοπούς

148

Specific Absorption Rate (SAR)

- Ο ειδικός ρυθμός απορρόφησης (SAR) εκφράζει την εναποτιθέμενη ενέργεια (W) ανά μονάδα μάζας (kg) ιστού

$$SAR = 0.5 \sigma \frac{E^2}{\rho}$$

Ε επαγόμενο ηλεκτρικό πεδίο, σ αγωγιμότητα, ρ πυκνότητα

- $SAR \sim B_0^2 \times (FA)^2 \times (RF \text{ duty cycle})$
FA: γωνία νέυσης (διέγερσης)
Duty cycle: το ποσοστό του χρόνου σάρωσης που εκπέμπεται RF
- Το μέγεθος του ασθενή παίζει ρόλο: Το SAR αυξάνει με το (r^2)
r, ενεργή ακτίνα

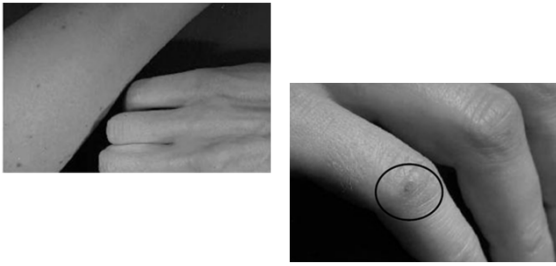
149

Πεδίο Ραδιοσυχνότητας και Θερμότητα

- Η επαγωγή ηλεκτρικών τάσεων και ρευμάτων είναι πιθανή σε ηλεκτρικά αγωγιμα υλικά
- Σε αυτά περιλαμβάνονται τα καλώδια για τον καρδιακό συγχρονισμό και άλλα συστήματα ιατρικής χρήσης
- Κάποια τατουάζ, καλλυντικά, κοσμήματα μπορεί να περιέχουν σιδηρομαγνητικά υλικά τα οποία μπορεί να θερμανθούν ή να προκαλέσουν οίδημα
- Ακόμη και βρόχοι που σχηματίζονται από το σώμα και τα άκρα του εξεταζόμενου μπορούν να άγουν θερμότητα

150

Πεδίο Ραδιοσυχνότητας και Θερμότητα



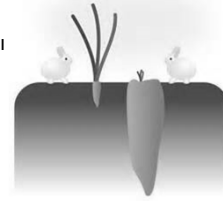
Prof. Dr. Volker Rasche
Experimental Cardiovascular Imaging
University Ulm, Department of Internal Medicine II

151

Ασφάλεια στην ΑΜΣ: Δύο κατηγορίες σφαλμάτων

Υπερεκτίμηση
κινδύνων

Μπορεί να οδηγήσει
σε απόρριψη
ασθενών που θα
ωφελοούνταν από
την εξέταση



Υποεκτίμηση
κινδύνων

Μπορεί να
οδηγήσει σε
συμβάντα ή
ατυχήματα

152

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ

- Το φαινόμενο NMR
- Δημιουργία MR σήματος
- Χρόνοι επαναφοράς (αποκατάστασης)
- Σχηματισμός εικόνας
- Υλικά μέρη, βιολογικές επιδράσεις & ασφάλεια
- Αντίθεση εικόνας
- Εφαρμογές

153

Παράγοντες που επηρεάζουν την αντίθεση εικόνας στη ΜΤ

Η ένταση σήματος καθορίζεται από:

- Ένταση μαγνητικού πεδίου
- Ενδογενή χαρακτηριστικά ιστών
- Παραμέτρους του συστήματος
- Εξωγενείς παράγοντες

154

Ενδογενή χαρακτηριστικά ιστών

Τα κύρια ενδογενή χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την αντίθεση εικόνας είναι

- Πυκνότητα πρωτονίων
- Χρόνος Επαναφοράς T1
- Χρόνος Επαναφοράς T2

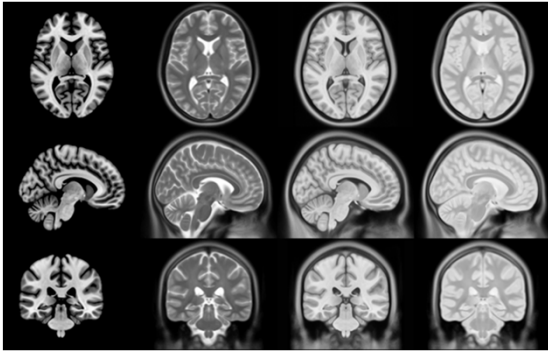
155

Ενδογενή χαρακτηριστικά ιστών

Ιστός	Πυκνότητα πρ.	T1 (msec)	T2 (msec)
Λίπος	100	260	85
Μυελός οστών	40	400	60
Λευκή ουσία	85	790	90
Φαϊά ουσία	80	920	100
Αίμα	95	1200	100
ΕΝΥ	100	>4000	>2000
Οστό	<10		
Αέρας	<1		

156

Ενδογενή χαρακτηριστικά ιστών & αντίθεση



T2-βαρύτητα T1-βαρύτητα ΠΠ-βαρύτητα

157

Παράγοντες που επηρεάζουν την αντίθεση εικόνας στη ΜΤ

Η ένταση σήματος καθορίζεται από:

- Ένταση μαγνητικού πεδίου
- Ενδογενή χαρακτηριστικά ιστών
- Παραμέτρους του συστήματος
- Εξωγενείς παράγοντες

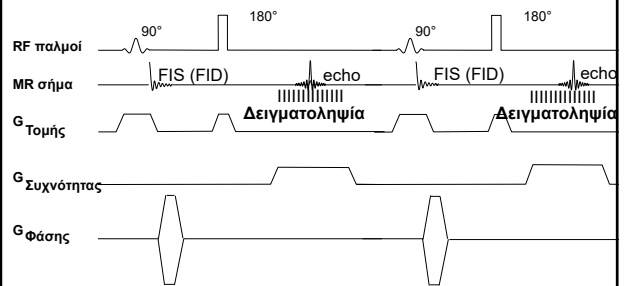
158

Παράμετροι συστήματος

- Είδος ακολουθίας ραδιοπαλμών
- Χαρακτηριστικά ακολουθίας παλμών
- Τύπος απεικονιζόμενης εικόνας

159

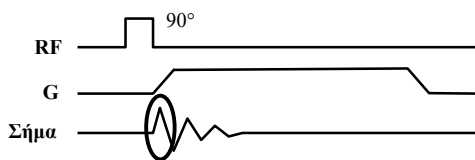
Διάγραμμα Ακολουθίας Ραδιοπαλμών



Επαναλαμβανόμενη ακολουθία από RF παλμούς διέγερσης, συνοδευόμενη από αυξομειώσεις των βαθμιδωτών πεδίων και από δειγματοληψίες

160

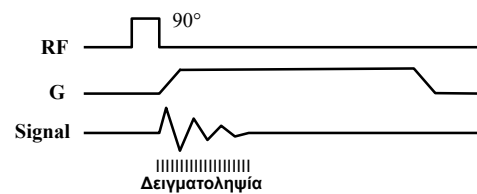
Free induction delay (FID)



- Για την κωδικοποίηση συχνότητας χρειάζεται να συλλέξουμε το σήμα έχοντας ενεργοποιήσει τη σχετική βαθμίδα πεδίου
- Αλλά η βαθμίδα δεν μπορεί να ενεργοποιηθεί ακαριαία
- Συνεπώς, πολύτιμη πληροφορία που αφορά στο αρχικό τμήμα του ελεύθερου επαγωγικού σήματος (FID) δε θα καταγραφεί

161

Free induction delay (FID)



Η δειγματοληψία του FID δεν αποτελεί αποτελεσματική προσέγγιση



162

Αντήχηση (echo)

RF 90°

Σήμα

FID Echo

- Χρειάζεται να καθυστερήσουμε τη δειγματοληψία έως ότου η βαθμίδα πεδίου έχει σταθεροποιηθεί
- Δημιουργούμε ένα σήμα αντήχησης (echo) το οποίο εν τέλει συλλέγουμε (αντί για το FID)

Echo ο ο ο !

163

Αντήχηση

Η μερική επανάκτηση συμφασικότητας των μαγνητικών ροπών σε ένα μεταγενέστερο χρονικό σημείο

time [ms]

FID (T_2^*) Χειρισμός echo

164

Αντήχηση

- **Spin Echo:** Η μερική επανάκτηση συμφασικότητας των μαγνητικών ροπών (αντήχηση) επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός RF παλμού 180°

time [ms]

FID (T_2^*) Χειρισμός spin echo (T_2)

165

Διάγραμμα ακολουθίας παλμών spin echo

RF παλμοί 90° 180° 90° 180°

MR σήμα FID echo FID

G Τομής Δειγματοληψία

G Συχνότητας

G Φάσης

Η δειγματοληψία αφορά στο spin echo το οποίο δημιουργείται λόγω μερικής επανάκτησης συμφασικότητας των μαγνητικών ροπών που επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός RF παλμού 180°

166

Ακολουθία ραδιοπαλμών spin echo

90°

- Εφαρμόζεται ραδιοπαλμός 90°
- Η μαγνήτιση πέφτει στο επίπεδο $x'y'$

B_1 x' y'

167

Ακολουθία ραδιοπαλμών spin echo

90° T_2^*

- Επάγεται το σήμα FID
- Αρχίζει ο αποσυγχρονισμός των φάσεων των μαγνητικών ροπών (απώλεια συμφασικότητας) καθώς αποκλίνουν

168

Ακολουθία ραδιοπαλμών spin echo

- Ένας ραδιοπαλμός 180° εφαρμόζεται μετά από χρόνο TE/2
- Οι μαγνητικές ροπές αντιστρέφονται

169

Ακολουθία ραδιοπαλμών spin echo

- Ένας ραδιοπαλμός 180° εφαρμόζεται μετά από χρόνο TE/2
- Οι μαγνητικές ροπές αντιστρέφονται και αρχίζουν να επανασυγχρονίζουν τη φάση τους καθώς συγκλίνουν

170

Ακολουθία ραδιοπαλμών spin echo

- Το κέντρο του echo σήματος (αντήχηση) δημιουργείται σε χρόνο TE μετά τον ραδιοπαλμό διέγερσης (90°)
- Επανευθυγράμμιση των μαγνητικών ροπών

171

Ακολουθία ραδιοπαλμών spin echo

- Απώλεια συμφασικότητας των μαγνητικών ροπών και απομείωση του spin echo καθώς αρχίζουν να αποκλίνουν

172

Παράμετροι συστήματος

- Είδος ακολουθίας παλμών
- Χαρακτηριστικά ακολουθίας παλμών
 - Χρόνος επανάλυσης (TR): το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών 90° Σημαντικός στην T1 Επαναφορά
 - Χρόνος αντήχησης (TE): ο χρονικό διάστημα από τον RF παλμό μέχρι τη στιγμή της μέτρησης Σημαντικός στην T2 Επαναφορά
 - Χρόνος αντιστροφής (TI)
 - Γωνία διέγερσης
 - Προπαλμοί
- Τύπος απεικονιζόμενης εικόνας

173

Κύριες χρονικές παράμετροι ακολουθίας (spin echo)

Επαναλαμβανόμενη ακολουθία από RF παλμούς διέγερσης, συνοδευόμενη από αυξομειώσεις των βαθμιδωτών πεδίων και από δειγματοληψίες

174

Ακολουθία ραδιοπαλμών spin echo και αντίθεση

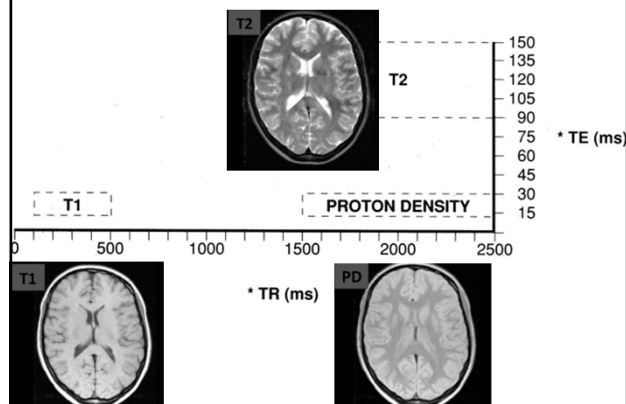
- Η αντίθεση εξαρτάται από την ΠΠ (πυκνότητα πρωτονίων), το T1 και το T2 των ιστών που απεικονίζονται
- Με χρήση των κατάλληλων χρονικών παραμέτρων (TE, TR) επιτυγχάνεται η επιθυμητή στάθμιση στην αντίθεση εικόνας

	Μικρό TR	Μεγάλο TR
Μικρό TE	T1-στάθμιση	ΠΠ-στάθμιση
Μεγάλο TE		T2-στάθμιση

Η στάθμιση ή βαρύτητα υποδηλώνει το χαρακτηριστικό (T1, T2, ΠΠ) που επηρεάζει περισσότερο την αντίθεση μεταξύ των απεικονιζόμενων ιστών

175

Ακολουθία ραδιοπαλμών spin echo και αντίθεση



176

Παράγοντες που επηρεάζουν την αντίθεση εικόνας στη ΜΤ

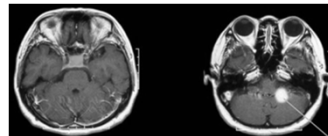
Η ένταση σήματος καθορίζεται από:

- Ένταση μαγνητικού πεδίου
- Ενδογενή χαρακτηριστικά ιστών
- Παραμέτρους του συστήματος
- Εξωγενείς παράγοντες

177

Σκιαγραφικά μέσα στην ΑΜΣ

- Κυρίως ιόντα του χημικού στοιχείου γαδολίνιου, τα οποία είναι ισχυρά παραμαγνητικά διότι διαθέτουν 7 ασύζευκτα e (4f shell)
- Τα ελεύθερα ιόντα του γαδολίνιου είναι ιδιαίτερα τοξικά, οπότε δεσμεύονται σε μεγάλα μόρια (π.χ. DTPA) χηλικών ενώσεων, χωρίς να χάνουν την παραμαγνητική τους ισχύ
- Το Gd είναι έμμεσα ορατό στην ΑΜΣ, μιας και επιταχύνει τη χαλάρωση των γεινιαζόντων ¹H. Συνεπώς μειώνεται το T1 των ιστών στους οποίους συσσωρεύεται και απεικονίζονται με υψηλή ένταση σε εικόνες T1-στάθμισης



178

Ακολουθία spin echo



Πλεονεκτήματα:

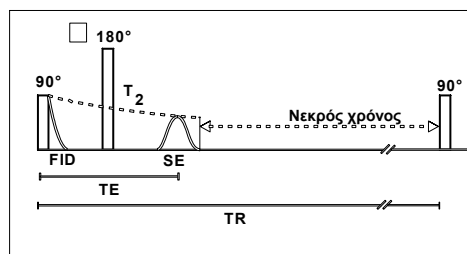
- Ικανοποιητική αντίθεση
- Αντανακλά την πραγματική απώλεια φάσης (T2) του δείγματος καθώς αντισταθμίζει την απώλεια φάσης λόγω
 - ο τοπικών μαγνητικών ανομοιογενειών
 - ο φαινόμενα μαγνητικής επιδεκτικότητας
 - ο ασυμφωνία νερού-λίπους (χημική μετατόπιση)

Μειονεκτήματα:

- Αργή διαδικασία μέτρησης (λήψης δεδομένων)
- Ευαίσθητη διαδικασία μέτρησης σε ψευδείς κινήσεις

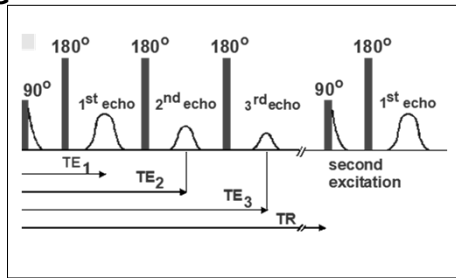
179

Ακολουθία spin echo



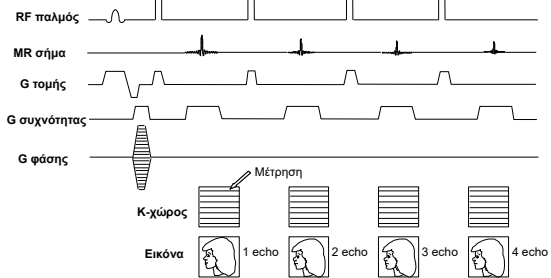
180

Ακολουθία spin echo με πολλαπλές αντηχήσεις CPMG



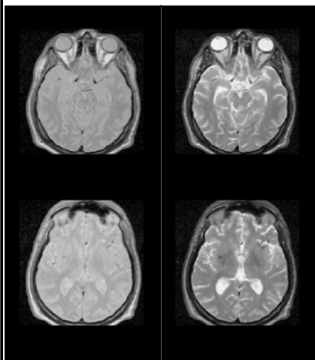
181

Ακολουθία spin echo με πολλαπλές (4) αντηχήσεις CPMG



182

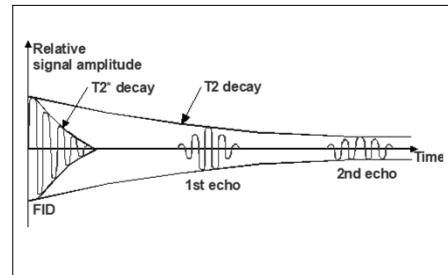
Ακολουθία spin echo με δύο αντηχήσεις



Δύο σειρές εικόνων λαμβάνονται ταυτόχρονα

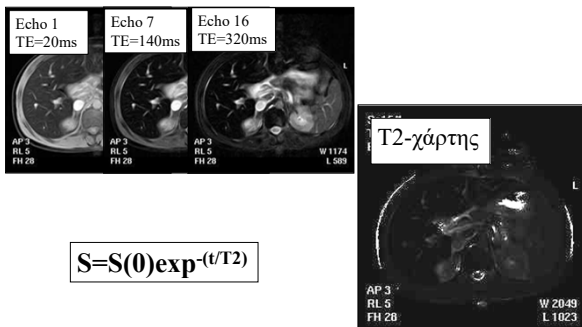
183

Ακολουθία spin echo με πολλαπλές αντηχήσεις



184

Ακολουθία spin echo με πολλαπλές (16) αντηχήσεις για παραγωγή T2-χάρτη

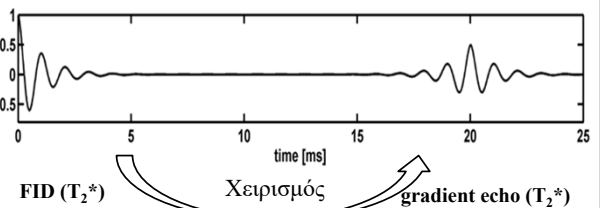


Παραμετρικός χάρτης που δίνει ποσοτικά το T2 σε κάθε voxel

185

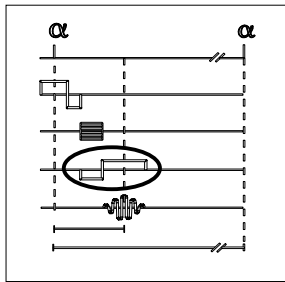
Αντήχηση

- **Gradient Echo:** Η μερική επανάκτηση συμφασικότητας των μαγνητικών ροπών (αντήχηση) επιτυγχάνεται με την αντιστροφή της βαθμίδας πεδίου κωδικοποίησης συχνότητας



186

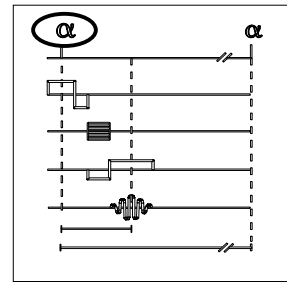
Ακολουθία gradient echo



Ανάκτηση φάσης μέσω της αντιστροφής της πολικότητας της βαθμίδας πεδίου κωδικοποίησης συχνότητας

187

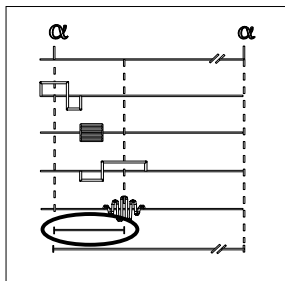
Ακολουθία gradient echo



Γενικά, $RF < 90^\circ$

188

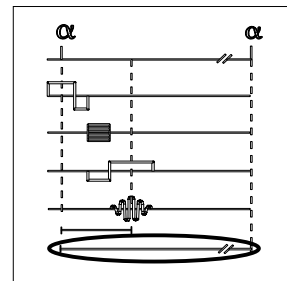
Ακολουθία gradient echo



Σχετικά μικρό TE (εφαρμογή μόνο ενός RF παλμού)

189

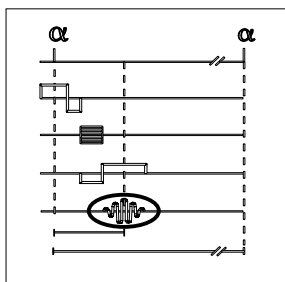
Ακολουθία gradient echo



Μικρό TR

190

Ακολουθία gradient echo

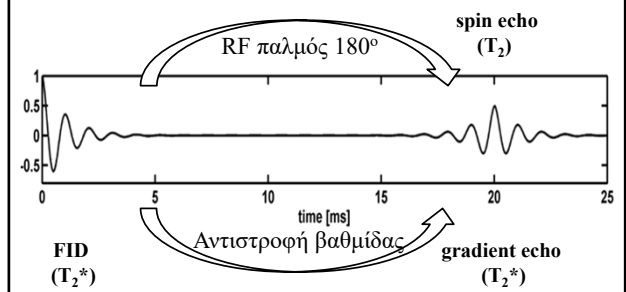


Η αντήχηση «φέρει» πληροφορία T_2^* , αφού η αντιστροφή της βαθμίδας αντισταθμίζει μόνο την απώλεια φάσης που οφείλεται στην ίδια τη βαθμίδα (κι όχι αυτή λόγω τοπικών ανομοιογενειών)

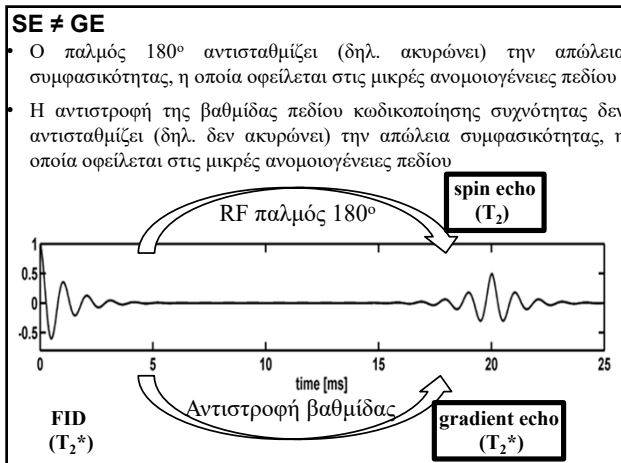
191

SE ≠ GE

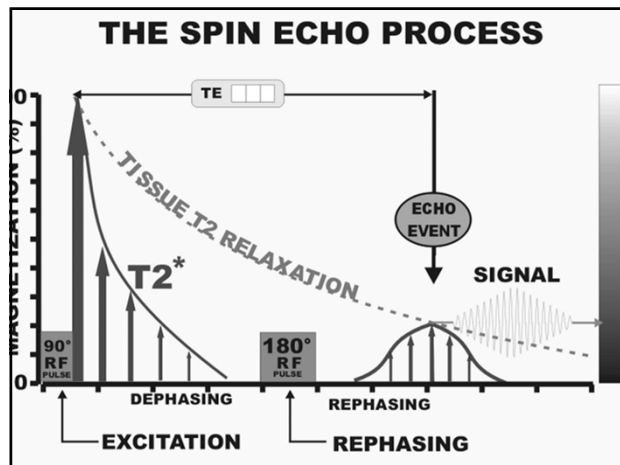
Δεν πρόκειται για δύο εναλλακτικές διαδικασίες που οδηγούν ακριβώς στο ίδιο αποτέλεσμα



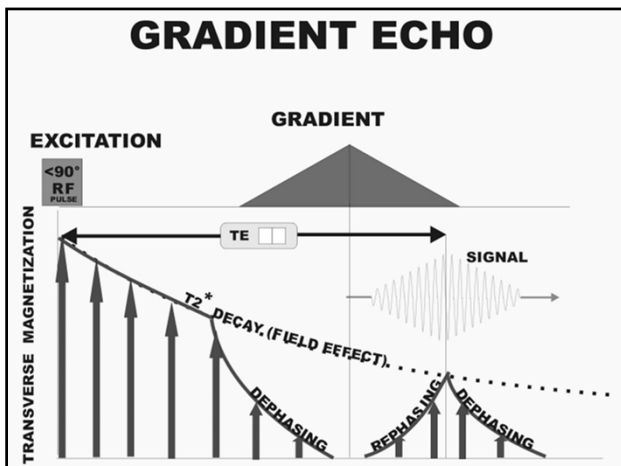
192



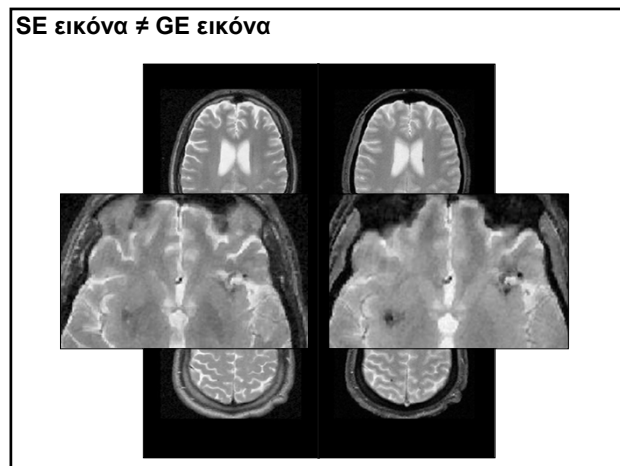
193



194



195



196

- ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ**
- Το φαινόμενο NMR
 - Δημιουργία MR σήματος
 - Χρόνοι επαναφοράς (αποκατάστασης)
 - Σχηματισμός εικόνας
 - Υλικά μέρη, βιολογικές επιδράσεις & ασφάλεια
 - Αντίθεση εικόνας
 - Εφαρμογές

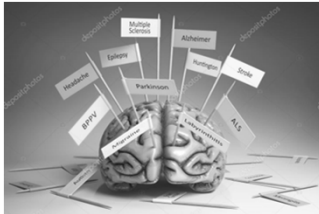
197



198

**Ένα παράδειγμα:
Η ΜΤ στην απεικόνιση του ΚΝΣ**

- Η ΜΤ αποτελεί εργαλείο για τη μελέτη ενός μεγάλου εύρους παθήσεων του εγκεφάλου και του ΚΝΣ γενικότερα (Ισχαιμία, Αγγειοπάθειες, Νεοπλασίες, Απομυελινωτικές ασθένειες, Επιληψία, κλπ)



199

Η ΜΤ στην Απεικόνιση του ΚΝΣ

Συμβατικές Μέθοδοι

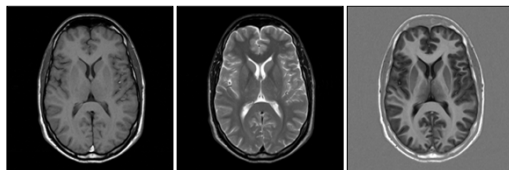
- Ανατομία εγκεφάλου / Μορφολογική Απεικόνιση ΣΣ
- Μαγνητική Αγγειογραφία

Λειτουργικές (ποσοτικές) μέθοδοι:

- Ογκομετρία (Voxel based morphometry)
- Απεικόνιση Διάχυσης (Diffusion Imaging)
- Απεικόνιση Τανυστή Διάχυσης (Diffusion Tensor Imaging)
- Απεικόνιση Κύρτωσης Διάχυσης (Diffusion Kurtosis Imaging)
- Απεικόνιση Αιμάτωσης (Perfusion Imaging)
- Λειτουργική Απεικόνιση (fMRI, BOLD Imaging)
- Μαγνητική Φασματοσκοπία (MR Spectroscopy, CSI)
- Απεικόνιση ροής ENY (CSF flow)

200

Ανατομία / Μορφολογία Εγκεφάλου



T1W

T2W

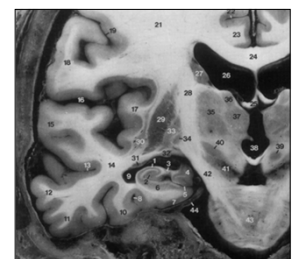
Real-IR

201

**Απεικόνιση σε Υψηλό Πεδίο (3T):
Στεφανιαία Διατομή κατά τον Ιππόκαμπο**



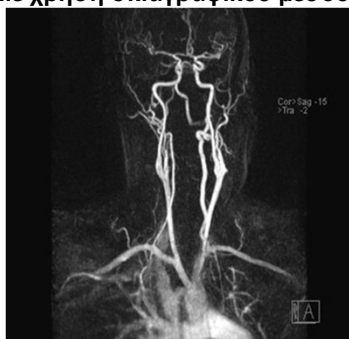
IR-TSE, TE/TR/TI 10/4000/550, 3mm
AQT 5:20 min, matrix 364 x 512



*Henri M. Duvernoy.
The Human Springer 1998

202

**Μαγνητική Αγγειογραφία:
Με χρήση σκιαγραφικού μέσου**



203

**Τεχνικές Ποσοτικής Απεικόνισης
στη ΜΤ του ΚΝΣ**

- Ογκομετρία (Voxel based morphometry)
- Απεικόνιση Διάχυσης (Diffusion Imaging)
- Απεικόνιση Τανυστή Διάχυσης (Diffusion Tensor Imaging)
- Απεικόνιση Κύρτωσης Διάχυσης (Diffusion Kurtosis Imaging)
- Απεικόνιση Αιμάτωσης (Perfusion Imaging)
- Λειτουργική Απεικόνιση (fMRI, BOLD Imaging)
- Μαγνητική Φασματοσκοπία (MR Spectroscopy, CSI)
- Απεικόνιση ροής ENY (CSF flow)

204

Λειτουργική Απεικόνιση (fMRI, BOLD)

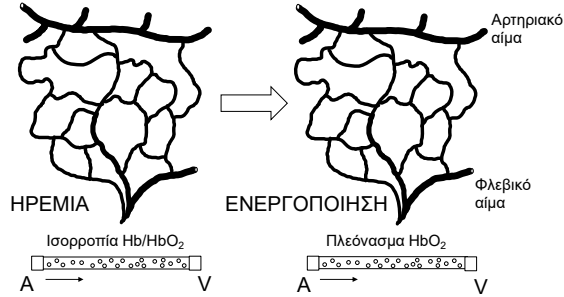
Απεικόνιση περιοχών ενεργοποίησης του φλοιού που σχετίζονται με συγκεκριμένες λειτουργίες

- Σχεδιασμός χειρουργικής αγωγής
 - Προ-χειρουργική χαρτογράφηση του φλοιού (όγκοι, AVM's)
 - Εκτίμηση μεταχειρουργικών κινδύνων
- Μελέτη εκφυλιστικών νόσων
- Ψυχιατρική, Παιδιατρική, Φαρμακολογία



205

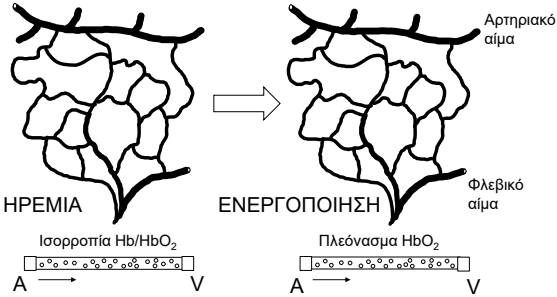
Μηχανισμός αντίθεσης BOLD (Blood Oxygen Level Dependent)



- Η νευροφυσιολογική λειτουργία οδηγεί σε τοπική αύξηση αιμάτωσης ~ 30 %
- Αύξηση ~ 5% του τοπικού μεταβολισμού
- Αύξηση της οξυ- σε σχέση με τη δεοξυ- αιμογλοβίνη

206

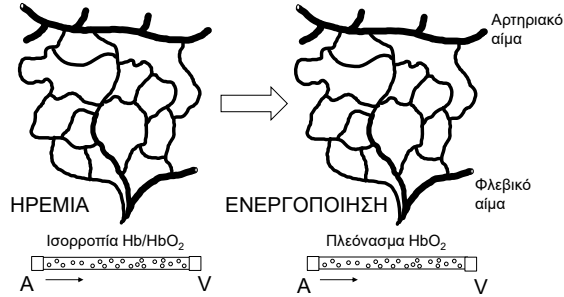
Μηχανισμός αντίθεσης BOLD (Blood Oxygen Level Dependent)



- Η οξυ-αιμογλοβίνη είναι διαμαγνητική
- Η δεοξυ-αιμογλοβίνη είναι παραμαγνητική & μειώνει το σήμα τοπικά

207

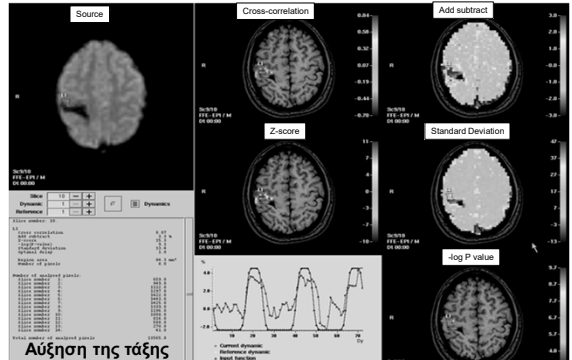
Μηχανισμός αντίθεσης BOLD (Blood Oxygen Level Dependent)



- Η σχετική περίσσεια διαμαγνητικού αίματος σε σχέση με το παραμαγνητικό αίμα στις ενεργοποιημένες περιοχές θα οδηγήσει σε μια μικρή αύξηση του σήματος σε σχέση με την κατάσταση ηρεμίας

208


Επεξεργασία δεδομένων BOLD fMRI: Κινητικός φλοιός: Χτύπημα δαχτύλων



Αύξηση της τάξης του 2% – 4%

209

fMRI και Συναισθήματα

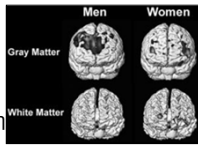


Ενεργοποίηση διαφορετικών περιοχών του εγκεφάλου ανάλογα με το επικρατέστερο συναίσθημα

210

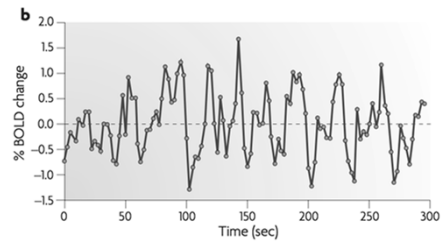
fMRI και ευφύια: Διαφορές μεταξύ των δύο φύλων

- Η νοημοσύνη συνδέεται με πολλές και διαφορετικές νευροανατομικές περιοχές
- Διαφορετικές μορφές εγκεφαλικής λειτουργίας μπορεί να επιτύχουν την ίδια νοητική απόδοση
- Στη φαιά ουσία βρίσκονται τα κέντρα επεξεργασίας πληροφοριών, ενώ η λευκή ουσία αποτελεί το δίκτυο σύνδεσης μεταξύ των κέντρων



211

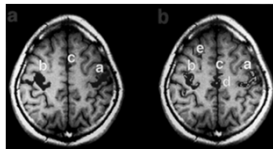
Λειτουργική απεικόνιση σε κατάσταση ηρεμίας (resting state fMRI)



- Κανένας ερεθισμός
- Συνεχή καταγραφή του αυθόρμητου σήματος BOLD

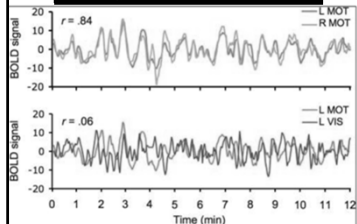
212

Λειτουργική απεικόνιση σε κατάσταση ηρεμίας (resting state fMRI)



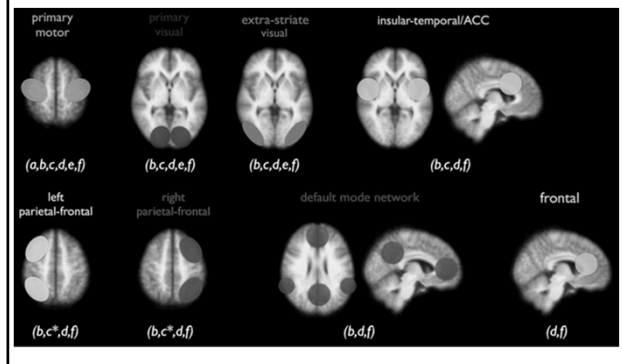
Ανάδειξη δικτύων

Συσχέτιση των σημάτων BOLD από περιοχές που έχουν λειτουργική διασύνδεση μεταξύ τους



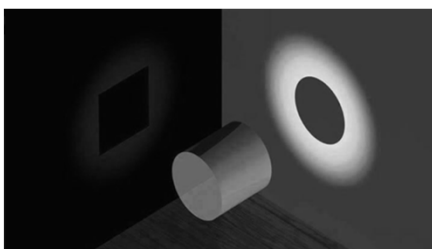
213

Δίκτυα διασύνδεσης σε κατάσταση ηρεμίας



214

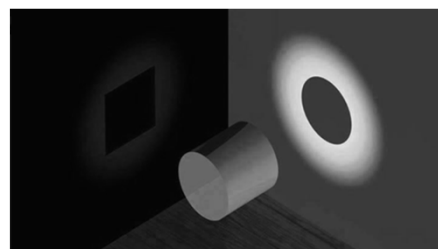
Γιατί χρειαζόμαστε πολλές & διαφορετικές τεχνικές;



Σαν να κοιτάμε το ίδιο αντικείμενο (ίδια σκηνή) από διαφορετική οπτική γωνία...

215

Γιατί χρειαζόμαστε πολλές & διαφορετικές τεχνικές;



- Κάθε μέθοδος αντικατοπτρίζει τη διαφοροποίηση μεταξύ ιστών/οργάνων ως προς μία φυσική ιδιότητα
- Ιστοί που είναι όμοιοι ως προς δύο φυσικές ιδιότητες μπορεί να διαφέρουν ως προς μία τρίτη...

216