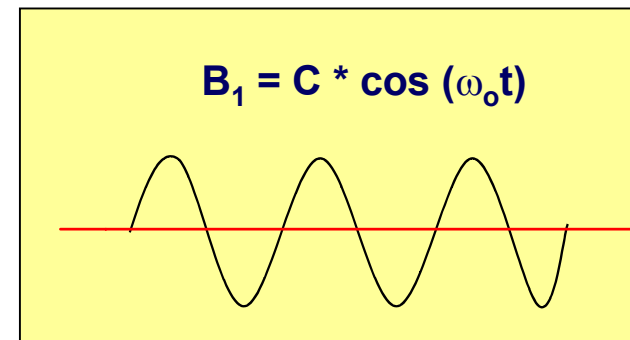
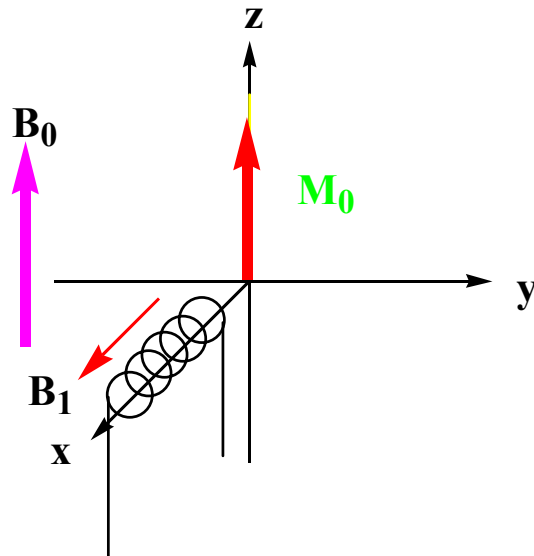


Διέγερση πυρήνων

Όταν η μαγνήτιση βρίσκεται στον άξονα z , τότε λέμε ότι το σύστημα των σπιν βρίσκεται στην **κατάσταση θερμικής ισορροπίας**.

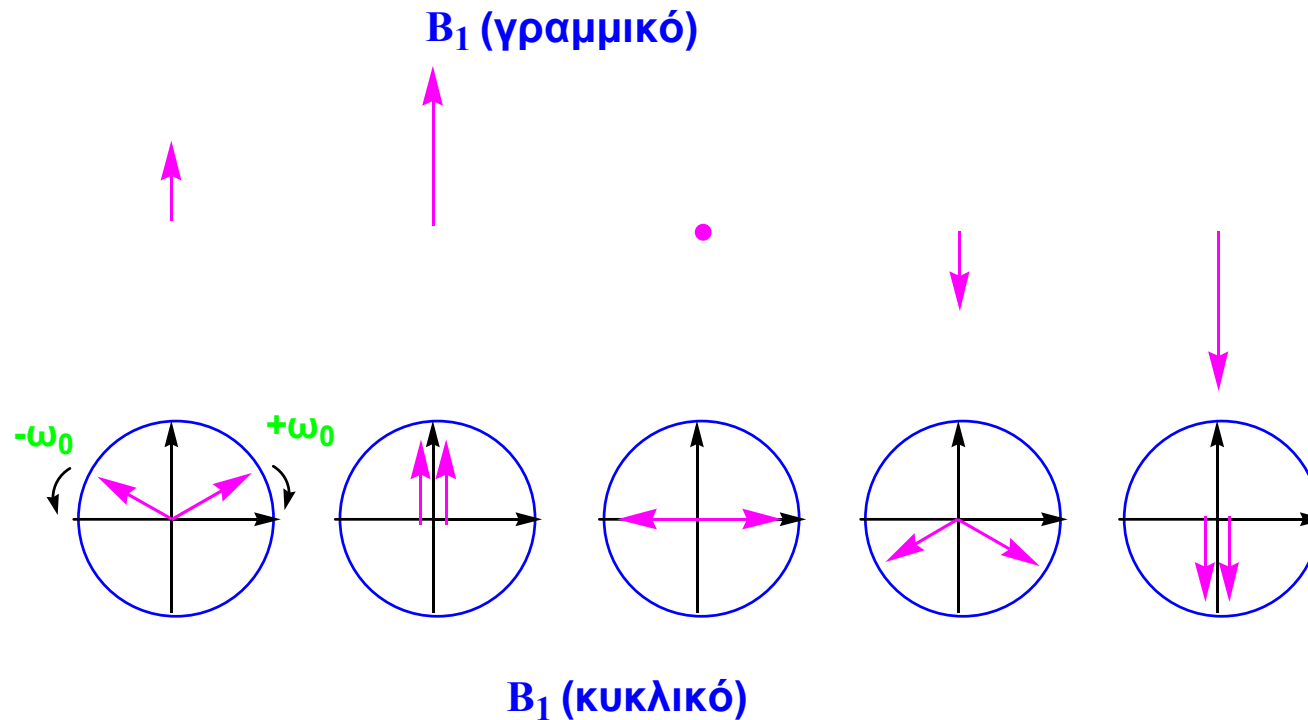
Για να διεγερθούν οι πυρήνες πρέπει να απορροφήσουν ενέργεια από κάποια πηγή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Η διέγερση των πυρήνων γίνεται με την εφαρμογή ενός δεύτερου μαγνητικού πεδίου B_1 που δημιουργείται από το πηνίο ενός ραδιοπομπού, ο οποίος διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα. Ο ραδιοπομπός τοποθετείται κατά μήκος του τον άξονα x , έτσι ώστε το πεδίο B_1 να εφαρμόζεται κάθετα προς το B_0 .



Διέγερση πυρήνων (συνέχεια)

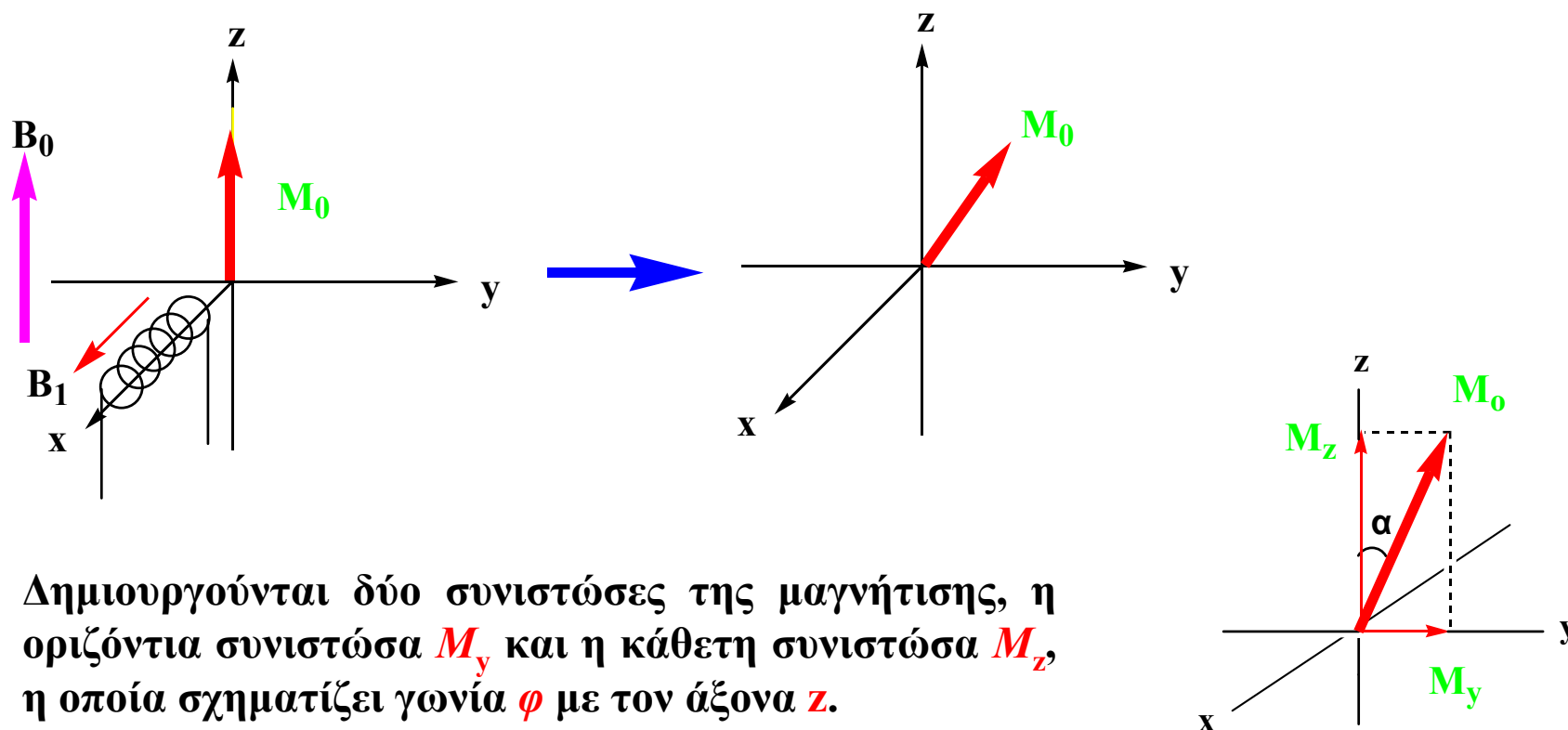
Επειδή το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο είναι εναλλασσόμενο, το πεδίο B_1 είναι γραμμικά πολωμένο.



Μόνο το διάνυσμα που περιστρέφεται με συχνότητα $+\omega_0$ (στην ίδια κατεύθυνση με την μεταπτωτική κίνηση της M_0) αλληλεπιδρά με μακροσκοπική μαγνήτιση.

Διέγερση πυρήνων (...)

Όταν η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος είναι ω_0 , η συχνότητα του δεξιού διανύσματος B_1 είναι $+\omega_0$. Κατά το συντονισμό, το εναλλασσόμενο πεδίο B_1 αλληλεπιδρά με τη μαγνήτιση M_0 , δημιουργεί μια ροπή στρέψης στη M_0 και το σύστημα απορροφά ενέργεια. Η M_0 αποκλίνει από την κατάσταση θερμικής ισορροπίας.

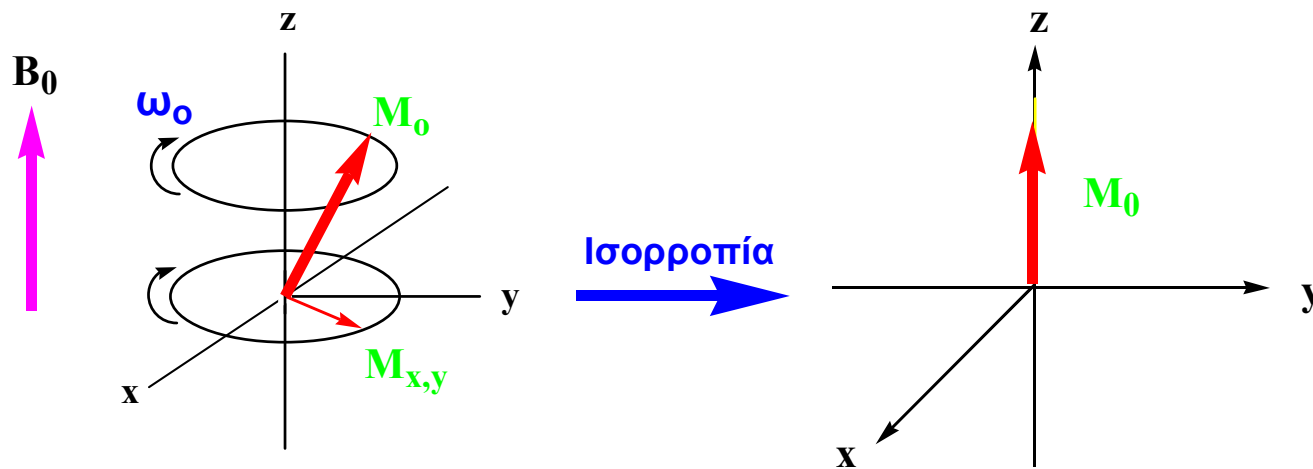


Δημιουργούνται δύο συνιστώσες της μαγνήτισης, η οριζόντια συνιστώσα M_y και η κάθετη συνιστώσα M_z , η οποία σχηματίζει γωνία φ με τον άξονα z .

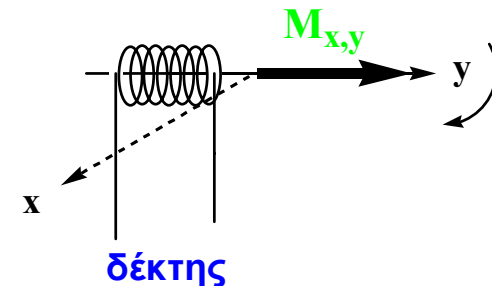
Διέγερση πυρήνων (...)

Επειδή το σύστημα απορρόφησε ενέργεια, η ισορροπία του έχει μεταβληθεί. Έχουν τροποποιηθεί οι πληθυσμοί N_α και N_β στις ενεργειακές στάθμες.

Στο σύστημα του εργαστηρίου (x,y,z), η μαγνήτιση M_0 και η οριζόντια συνιστώσα $M_{x,y}$ περιστρέφονται γύρω από τον άξονα z συχνότητα ω_0 .



Η απόσβεση της $M_{x,y}$ παράγει ταλαντευόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο δημιουργεί ηλεκτρικό ρεύμα στο πηνίο του δέκτη. Έτσι ανιχνεύεται το σήμα NMR.

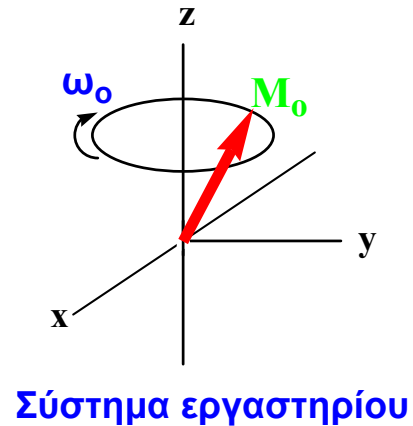
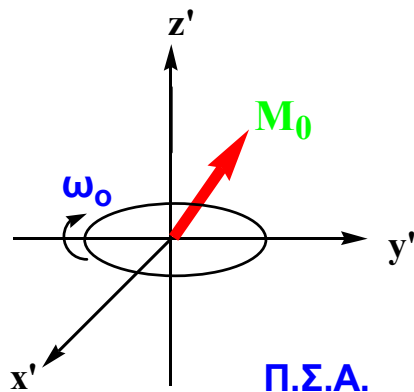
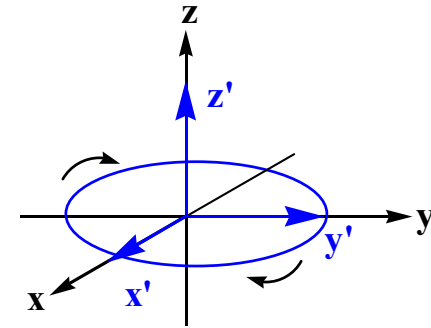


Περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς

Το σύστημα των συντεταγμένων (x,y,z) (σύστημα εργαστηρίου) που χρησιμοποιήσαμε στα προηγούμενα μαθήματα είναι παθητικό και περιπλέκει την ομαλή ανάλυση των φαινομένων NMR. Η λύση είναι να χρησιμοποιήσουμε ένα νέο σύστημα συντεταγμένων (x',y',z') , του οποίου οι άξονες x' και y' περιστρέφονται γύρω από τον άξονα z με συχνότητα ω_0 . Ο άξονας z' του νέου συστήματος συμπίπτει με τον άξονα του παλαιού συστήματος συντεταγμένων.

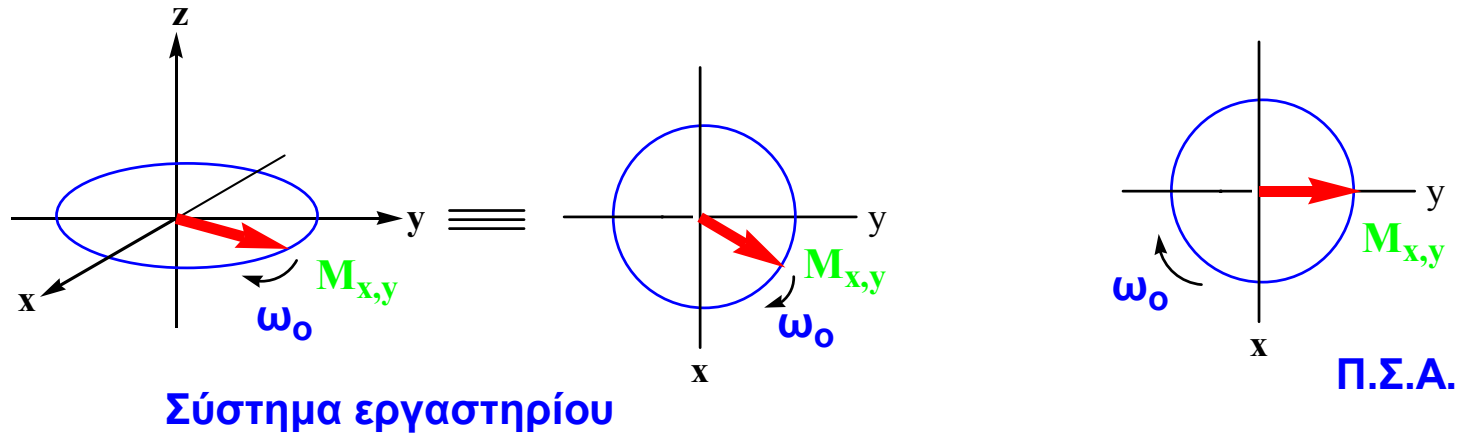
Στο περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς (Π.Σ.Α.)

1. “Ακυρώνεται” η επίδραση του πεδίου B_0 .
2. Η μαγνήτιση M_0 , η οποία περιστρέφεται με συχνότητα ω_0 στο σύστημα του εργαστηρίου, στο νέο σύστημα εμφανίζεται ακίνητη.



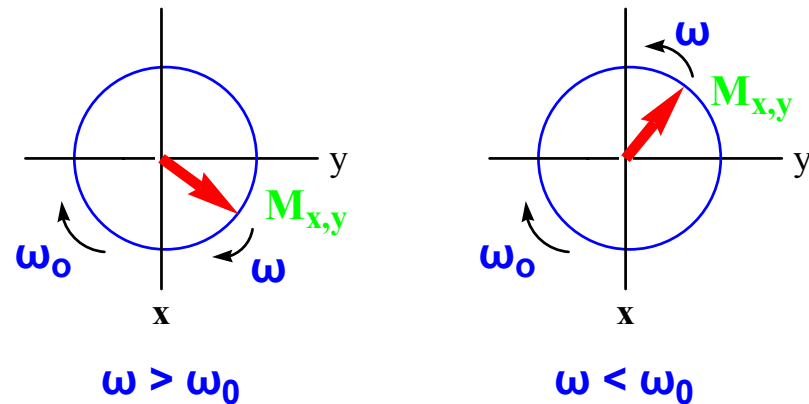
Περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς (συνέχεια)

3. Η οριζόντια συνιστώσα της μαγνήτισης στο επίπεδο x,y φαίνεται ακίνητη όταν περιστρέφεται με συχνότητα ίση με τη συχνότητα του Π.Σ.Α.



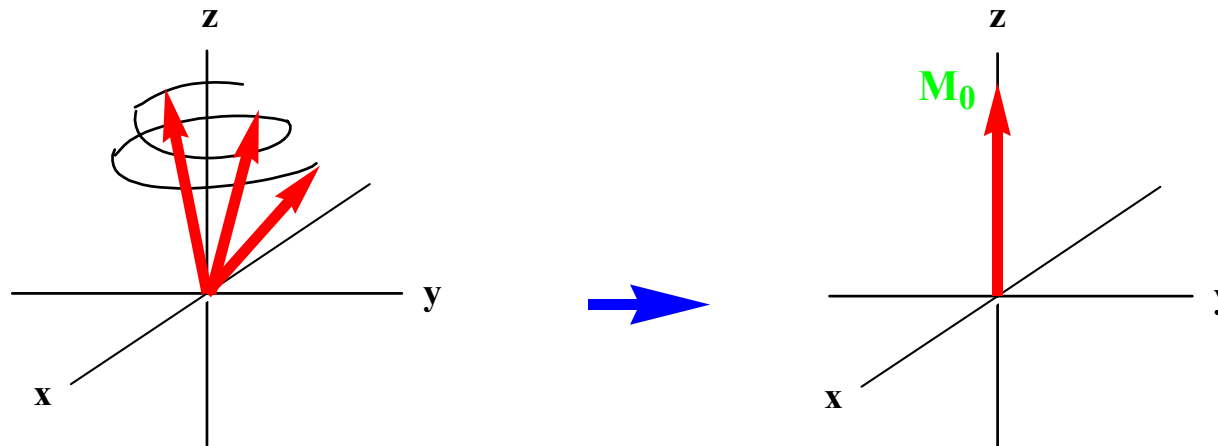
4. Όταν περιστρέφεται ταχύτερα από το Π.Σ.Α., τότε φαίνεται να περιστρέφεται δεξιόστροφα

5. Όταν περιστρέφεται πιο αργά από το Π.Σ.Α., τότε φαίνεται να περιστρέφεται αριστερόστροφα



Αποδιέγερση (αποκατάσταση) πυρήνων

Η μαγνήτιση μετά την παύση της λειτουργίας του πεδίου τείνει να επανέλθει στην κατάσταση θερμικής ισορροπίας. Δηλαδή οι πυρήνες αποβάλλουν την ενέργεια που απορρόφησαν κατά τη διέγερση και μεταπίπτουν στη βασική κατάσταση.

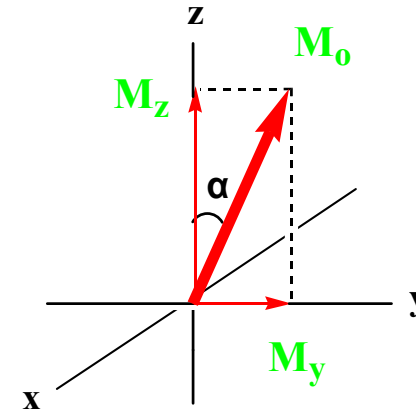


Η αποδιέγερση στη φασματοσκοπία NMR δεν είναι αυθόρμητη, αλλά εξαναγκασμένη. Γίνεται με δύο διεργασίες. Κατά την πρώτη διεργασία, η οποία ονομάζεται **αποδιέγερση σπιν-πλέγμα**, η αποβολή της ενέργειας γίνεται με την αλληλεπίδραση των πυρήνων με ταλαντευόμενα τοπικά μαγνητικά πεδία, τα οποία δημιουργούνται από το ατομικό και ηλεκτρονιακό περιβάλλον τους (**πλέγμα = lattice**). Κατά την δεύτερη διεργασία, η οποία ονομάζεται **αποδιέγερση σπιν-σπιν** γίνεται ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ διεγερμένων πυρήνων και πυρήνων που βρίσκονται στη βασική κατάσταση.

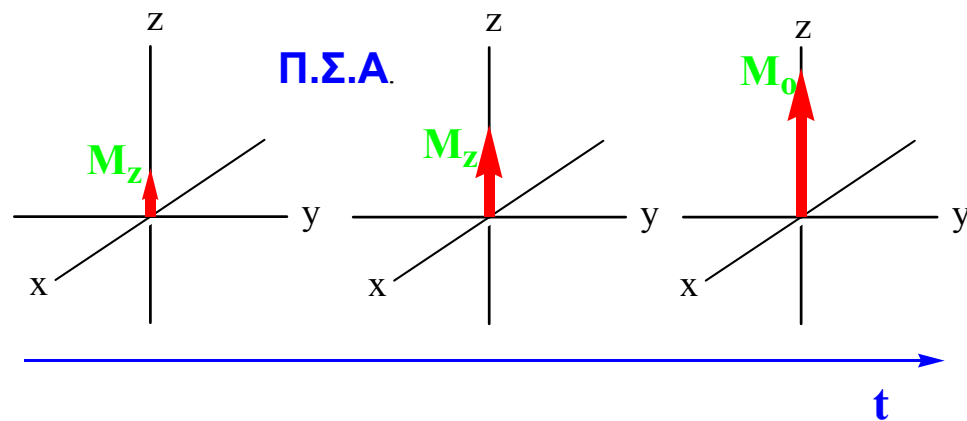
Αποδιέγερση πυρήνων (συνέχεια)

Όπως είδαμε, κατά τη διέγερση, η μαγνήτιση M_0 εκτρέπεται από την κατάσταση ισορροπίας, οπότε σχηματίζονται δύο συνιστώσες, η διαμήκης συνιστώσα M_z και η οριζόντια συνιστώσα M_y .

Κατά την αποδιέγερση, η διαμήκης συνιστώσα M_z αυξάνει σε μέγεθος και τείνει προς την αρχική τιμή M_0 , ενώ η οριζόντια συνιστώσα M_y αποσβαίνει ή φθίνει προς την τιμή μηδέν.



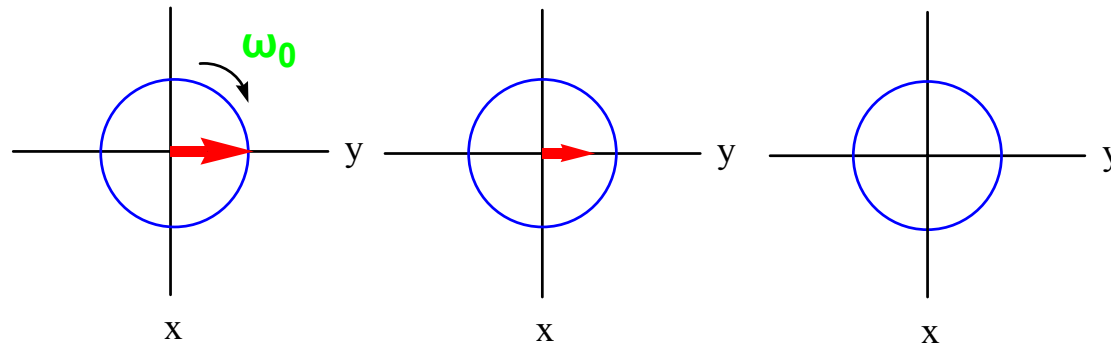
Η αύξηση της M_z προς την αρχική τιμή M_0 περιγράφει διανυσματικά την διεργασία αποδιέγερσης σπιν-πλέγμα. Η διάρκεια αυτής της διεργασίας ονομάζεται **χρόνος αποδιέγερσης σπιν-πλέγμα** και συμβολίζεται με T_1 .



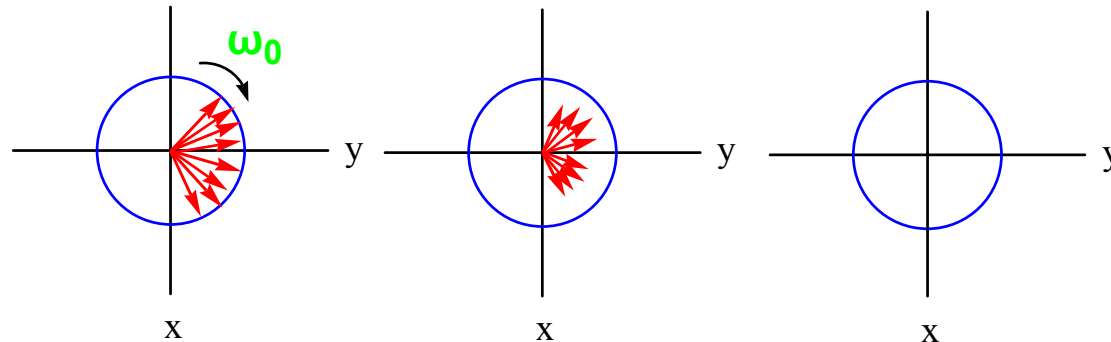
Αποδιέγερση πυρήνων (,,)

Η απόσβεση της M_y προς την τιμή μηδέν περιγράφει διανυσματικά την διεργασία αποδιέγερσης σπιν-σπιν. Η διάρκεια αυτής της διεργασίας ονομάζεται **χρόνος αποδιέγερσης σπιν-σπιν** και συμβολίζεται με T_2 .

- Όλα τα ανύσματα μ_i περιστρέφονται με τη συχνότητα ω_0 του Π.Σ.Α.



- Τα ανύσματα μ_i έχουν διαφορετικές συχνότητες.



Αποδιέγερση σπιν-πλέγμα

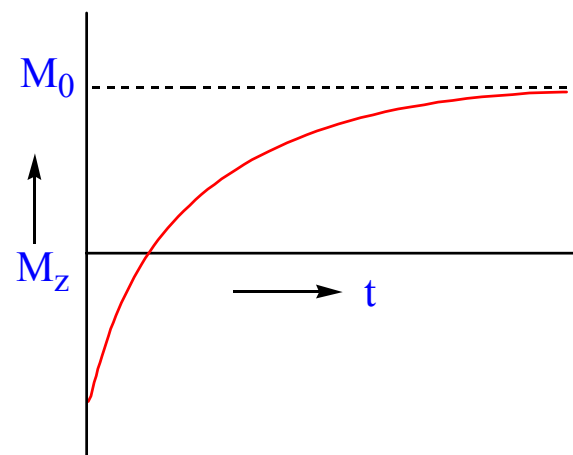
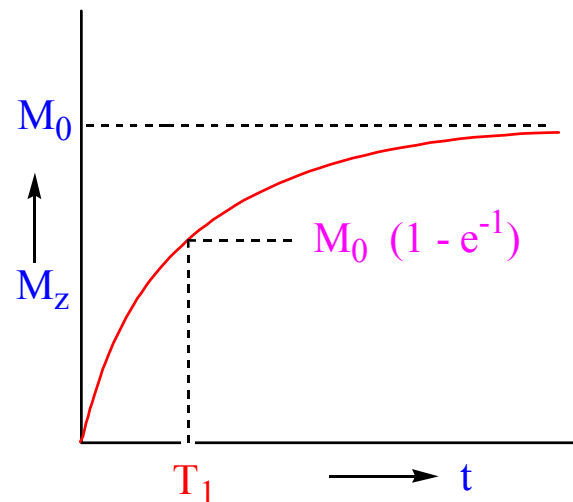
Η επιστροφή της συνιστώσας M_z στην κατάσταση ισορροπίας M_0 ακολουθεί την χρονική εκθετική εξίσωση

$$M_z(t) = M_0 (1 - e^{-t/T_1})$$

Επομένως, T_1 ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για να αυξηθεί η M_z κατά τον παράγοντα e .

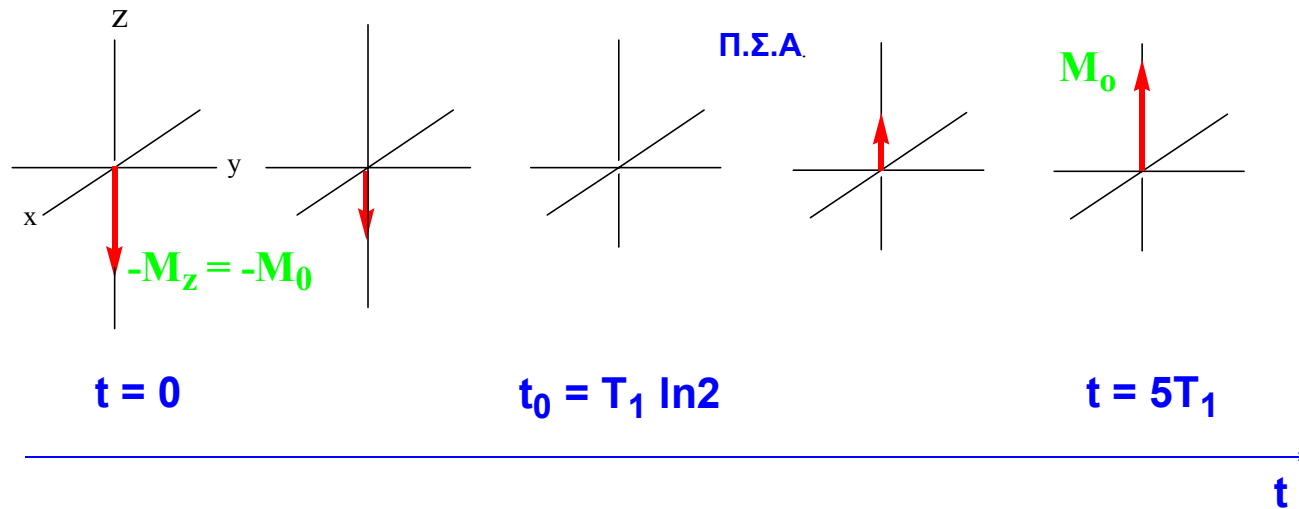
Εάν η μαγνήτιση M_z τοποθετηθεί στην αρχή του χρόνου ($t = 0$) στον άξονα $-z$, τότε αυτή βαθμιαία επιστρέφει κατά μήκος του άξονα $+z$ στην αρχική θέση ισορροπίας με ταχύτητα, η οποία ελέγχεται από τον T_1 . Στην περίπτωση αυτή, η μεταβολή της ακολουθεί την εξίσωση

$$M_z(t) = M_0 (1 - 2e^{-t/T_1})$$



Αποδιέγερση σπιν-πλέγμα (συνέχεια)

Πριν την αποδιέγερση, η μαγνήτιση M_0 έχει αναστραφεί κατά 180° από τη θέση ισορροπίας (βρίσκεται στον άξονα $-z$).



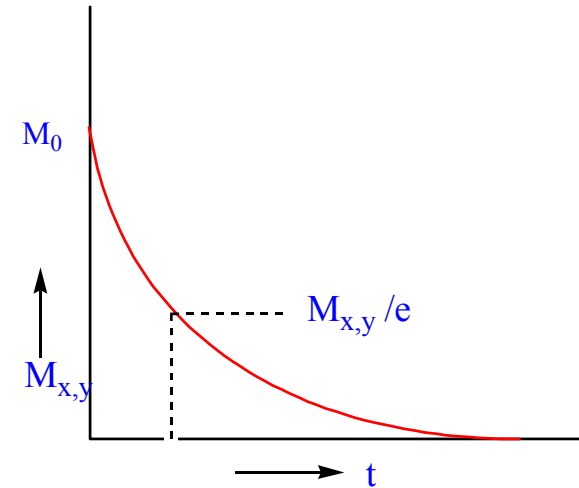
Αποδιέγερση σπιν-σπιν

Η απόσβεση της συνιστώσας $M_{x,y}$ ακολουθεί την χρονική εκθετική εξίσωση

$$M_{x,y}(t) = M_{x,y}(0) e^{-t/T_2}$$

Επομένως, T_2 ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για να μειωθεί η $M_{x,y}$ κατά τον παράγοντα e .

Ο χρόνος T_2 είναι πάντα μικρότερος ή ίσος με τον χρόνο T_1 . Αυτό σημαίνει ότι η οριζόντια συνιστώσα $M_{x,y}$ στο επίπεδο (x,y) φθίνει προς το μηδέν και κατόπιν η διαμήκης συνιστώσα M_z αυξάνει κατά τον άξονα z μέχρι την τιμή M_0 .



Στα υγρά με μικρό ιξώδες $\longrightarrow T_1 = T_2$

Στα υγρά με μεγάλο ιξώδες
και στα στερεά $\longrightarrow T_1 > T_2$

Συνολική αποδιέγερση

Στις προηγούμενες διαφάνειες, οι αποδιεγέρσεις σπιν-πλέγμα και σπιν-σπιν παρουσιάστηκαν χωριστά για λόγους σαφήνειας. Στην πραγματικότητα, και οι δύο διεργασίες αποδιέγερσης συμβαίνουν ταυτόχρονα. Η $M_{x,y}$ περιστρέφεται και διασπείρεται καλύπτοντας όλο το επίπεδο (x,y) , πριν επιστρέψει στον άξονα z κατά τη διεργασία σπιν-πλεγμα. Ο μόνος περιορισμός είναι ότι ο χρόνος T_2 είναι μικρότερος ή ίσος με τον T_1 .

