

## Μαγνήτιση και μαγνητική επιδεκτικότητα

Εάν μια ουσία τοποθετηθεί σε ένα μαγνητικό πεδίο εντάσεως  $H_0$  η μαγνητική ροή μέσα στην ουσία δίδεται από τη σχέση:

$$B = H_0 + 4\pi M$$

$B$  = μαγνητική επαγωγή (magnetic induction or field within the body): διάνυσμα

$M$  = ένταση της μαγνήτισης (magnetization or magnetic moment): διάνυσμα

$$\frac{B}{H_0} = 1 + 4\pi \frac{M}{H_0}$$

$B/H_0$  = μαγνητική διαπερατότητα

$M/H_0$  = μαγνητική επιδεκτικότητα ανά μονάδα όγκου (“volume magnetic susceptibility”:  $\chi_v$ )

Είναι μέτρο της μαγνήτισης ( $M$ )

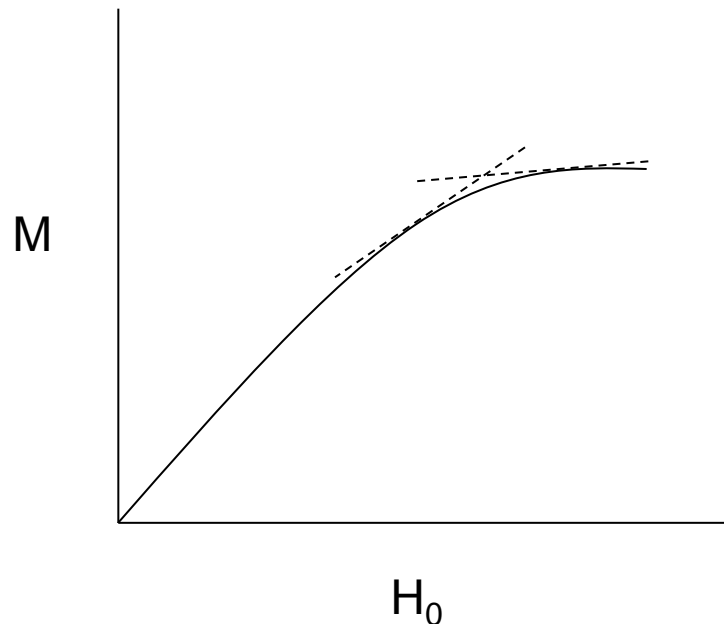
$$\frac{B}{H_0} = \mu_0 = 1 \quad \text{η μαγνητική διαπερατότητα του κενού (=1 στο cgs)}$$

$$\frac{B}{H_0} = 1 + 4\pi \frac{M}{H_0} \Rightarrow \frac{B}{H_0} = 1 + 4\pi \chi_v$$

$$\chi_v = \frac{M}{H_0} \text{ αδιάστατο μέγεθος (δεν έχει μονάδες)}$$

$\chi_v$ : δεν εξαρτάται από το  $H_0$  αλλά αυτό ισχύει για ασθενές  $H_0$

$$\text{σε ισχυρό πεδίο } H_0: \chi_v = \frac{\delta M}{\delta H_0}$$



$$\chi_g = \chi_v / \text{density} = \chi \text{ per gram}$$

$$\chi_m = \chi_g (\text{MB}) = \chi \text{ per mole}$$

$\chi_v$  : αδιάστατο

$\chi_g$  :  $\text{cm}^3/\text{g}$  or  $\text{cm}^3\text{g}^{-1}$

$\chi_m$  :  $\text{cm}^3/\text{mol}$  or  $\text{cm}^3\text{mol}^{-1}$

“emu” = electromagnetic unit :  $\text{cm}^3$

$H_0$  : gauss (G) ή oersted (Oe) στο cgs (1 G = 1 Oe), tesla (T) στο SI

$$(1 \text{ tesla (T)} = 10^4 \text{ G} = 10^4 \text{ Oe})$$

Η μαγνήτιση μπορεί επίσης να εκφραστεί ως  $M_v$ ,  $M_g$  ή  $M_m$

Συνήθως εργαζόμαστε με τη  $\chi_m$  ( $\text{cm}^3\text{mol}^{-1}$ ) και τη  $M_m$  ( $\text{cm}^3\text{Gmol}^{-1}$ )

Η μαγνήτιση μπορεί να εκφραστεί σε “μονάδες” Nβ (N= Avogadro, β = μαγνητόνη του Bohr)  $1\text{N}\beta = 5585 \text{ cm}^3\text{Gmol}^{-1}$

Χρησιμοποιούμε, επίσης το γινόμενο  $\chi_m T$  ( $\text{cm}^3\text{Kmol}^{-1}$ )

Η ενέργεια εκφράζεται συνήθως σε  $\text{cm}^{-1}$  ή kelvin (K).  $1 \text{ cm}^{-1} = 1.4388 \text{ K}$

## Διαμαγνητισμός και παραμαγνητισμός

Η μαγνήτιση ( $M$ ) σχετίζεται με το ρυθμό μεταβολής της ενέργειας ( $E$ ) της ουσίας που βρίσκεται μέσα σε πεδίο  $H_0$  με τη σχέση:

$$M = -\frac{\delta E}{\delta H_0}$$

Το πρόσημο της μαγνήτισης ( $M$ ) ορίζει δύο μαγνητικές συμπεριφορές:

Εάν  $M$  (και  $\chi_m$ ) είναι αρνητικά έχουμε το διαμαγνητισμό

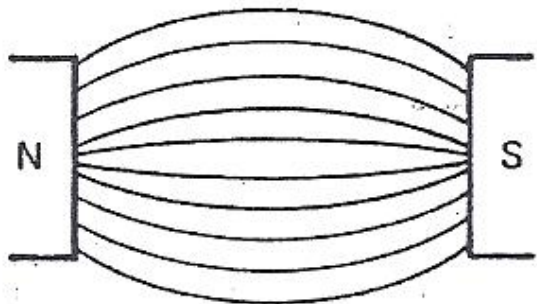
Εάν  $M$  (και  $\chi_m$ ) είναι θετικά έχουμε τον παραμαγνητισμό

Ουσίες με συζευγμένα και ασύζευκτα ηλεκτρόνια καλούνται παραμαγνητικές

Ουσίες με συζευγμένα (μόνο) ηλεκτρόνια καλούνται διαμαγνητικές

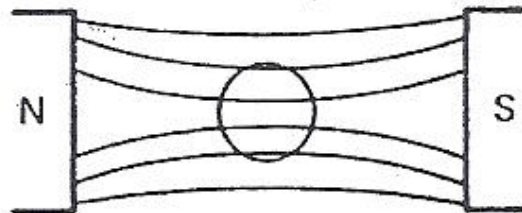
Με τα φαινόμενα του σιδηρομαγνητισμού, του αντισιδηρομαγνητισμού και του σιδηριμαγνητισμού που εντάσσονται στον παραμαγνητισμό θα ασχοληθούμε αργότερα

# Τύποι μαγνητικής συμπεριφοράς



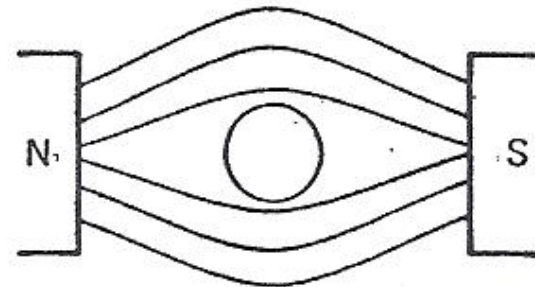
(A)

κενό



(B)

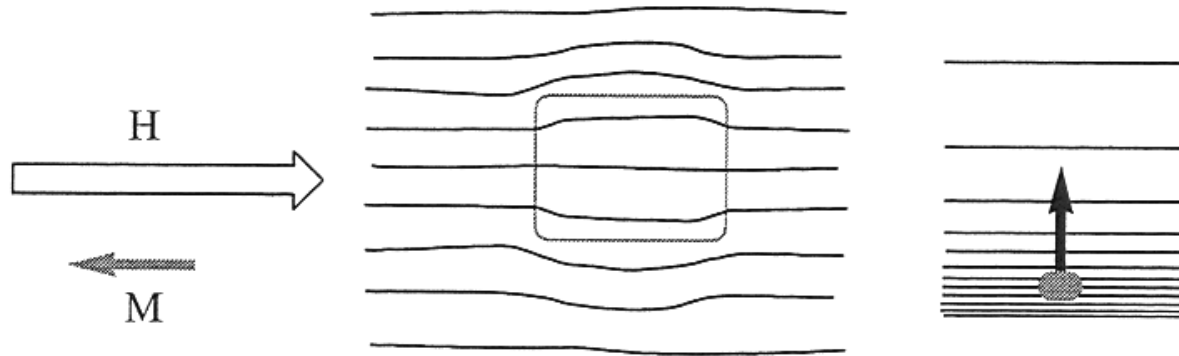
παραμαγνητικό  
υλικό



(C)

διαμαγνητικό  
υλικό

## Διαμαγνητισμός

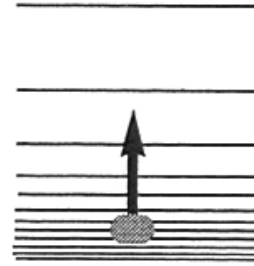


Είναι ιδιότητα όλης της ύλης και προκύπτει από την αλληλεπίδραση των ζευγών (συζευγμένων) ηλεκτρονίων με το εξωτερικό πεδίο  $H_0$  δημιουργώντας ένα αντίστροφο πεδίο ως προς το  $H_0$  (η μαγνήτιση  $M$  είναι αρνητική).

Η μαγνητική ροή είναι “μικρότερη” μέσα σε ένα διαμαγνητικό υλικό σε σχέση με το κενό. Τα διαμαγνητικά υλικά απωθούνται όταν βρίσκονται σε ένα ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο προς την περιοχή που το πεδίο είναι ασθενέστερο.

## Διαμαγνητισμός

$$M = -\frac{\delta E}{\delta H_0}$$



Όταν η μαγνήτιση  $M$  είναι αρνητική (όταν δηλαδή έχουμε διαμαγνητικό υλικό) το  $\delta E/\delta H$  είναι θετικό, δηλαδή η ενέργεια του συστήματος ( $E$ ) αυξάνεται όταν αυξάνεται το πεδίο  $H_0$ . Η μετακίνηση του υλικού σε ασθενέστερο πεδίο  $H_0$  μειώνει την ενέργεια  $E$ . Το ότι το σύστημα πηγαίνει σε μια κατάσταση μικρότερης ενέργειας σημαίνει ότι γίνεται σταθερότερο.

# Διαμαγνητισμός

$$\chi_{\text{obs}} = \chi_{\text{para}} + \chi_{\text{dia}}$$

(μοριακή μαγνητική επιδεκτικότητα  $\chi_m$ )

Οι παραμαγνητικές ουσίες περιέχουν και συζευγμένα ηλεκτρόνια (π.χ. τα ηλεκτρόνια εσωτερικών στοιβάδων ενός παραμαγνητικού μεταλλικού ιόντος) που πρέπει να λάβουμε υπόψιν μας όταν διορθώνουμε τις πειραματικά μετρούμενες τιμές της μαγνητικής επιδεκτικότητας. Οι διαμαγνητικές επιδεκτικότητες των ατόμων στα μόρια είναι προσθετικές (μέσα σε λογικά πλαίσια) και οι  $\chi_{\text{dia}}$  υπολογίζονται προσθέτοντας τις ατομικές επιδεκτικότητες που ονομάζονται Pascal's Constants.

$$\chi_{\text{dia}} = \sum \chi_A + \sum \chi_B$$

A = άτομα

B = δεσμοί (συνήθως π-δεσμοί)



# Διαμαγνητισμός

$$\chi_{\text{obs}} = \chi_{\text{para}} + \chi_{\text{dia}}$$

(μοριακή μαγνητική επιδεκτικότητα  $\chi_m$ )

Για τις παραμαγνητικές ενώσεις μικρού μοριακού βάρους θα μπορούσαμε να υπολογίσουμε κατά προσέγγιση τη  $\chi_{\text{dia}}$  με τη σχέση  $\chi_{\text{dia}} = \alpha \times MB \times 10^{-6} \text{ cm}^3\text{mol}^{-1}$ .  $\alpha = 0.4$  ή  $0.5$ .

Σε αυτές τις περιπτώσεις η  $\chi_{\text{dia}}$  είναι μικρή και σχεδόν αμελητέα σε χαμηλές θερμοκρασίες.

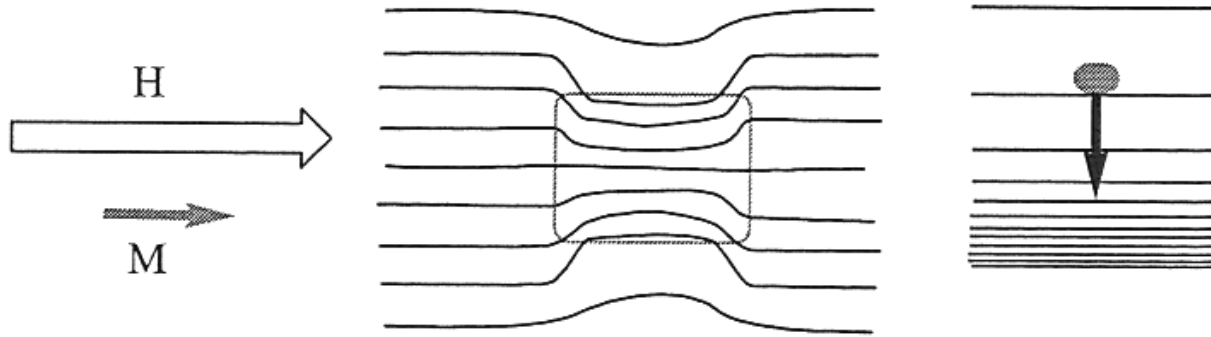
Αυτό δεν ισχύει για ενώσεις μεγάλου μοριακού βάρους που περιέχουν μερικά παραμαγνητικά κέντρα. Σε μια μεταλλοπρωτεΐνη με  $MB = 50.000$  η  $\chi_{\text{dia}}$  υπολογίζεται κατά προσέγγιση  $2.5 \times 10^{-2} \text{ cm}^3\text{mol}^{-1}$ . Εάν περιέχει ένα υψηλού spin Fe(III) τότε η  $\chi_{\text{para}}$  θα είναι περίπου  $1.5 \times 10^{-2} \text{ cm}^3\text{mol}^{-1}$  στη θερμοκρασία δωματίου.

# Pascal's Constants

**Table 1.1.** Diamagnetic Susceptibilities and Constitutive Corrections  
(in  $10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ g atom}^{-1}$  or  $10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$ )<sup>a</sup>

<b>Atoms</b>				<b>Transition metal cations</b>			
H	-2.9	As(III)	-20.9	*Ti <sup>3+</sup>	-9	*Fe <sup>2+</sup>	-13
C	-6.0	As(V)	-43.0	Ti <sup>4+</sup>	-5	*Fe <sup>3+</sup>	-10
N (ring)	-4.6	F	-6.3	*V <sup>2+</sup>	-15	*Co <sup>2+</sup>	-12
N (open chain)	-5.6	Cl	-20.1	*V <sup>3+</sup>	-10	*Co <sup>3+</sup>	-10
N (imide)	-2.1	Br	-30.6	*V <sup>4+</sup>	-7	*Ni <sup>2+</sup>	-10
O (ether or alcohol)	-4.6	I	-44.6	V <sup>5+</sup>	-1	Cu <sup>+</sup>	-12
O (carbonyl)	-1.7	S	-15.0	*Cr <sup>2+</sup>	-15	*Cu <sup>2+</sup>	-11
P	-26.3	Se	-23.0	*Cr <sup>3+</sup>	-11	*Mo <sup>2+</sup>	-31
<b>Constitutive corrections</b>				*Mn <sup>2+</sup>	-14	*Mo <sup>3+</sup>	-23
C=C	5.5	C=N	0.8	*Mn <sup>3+</sup>	-10	*Mo <sup>4+</sup>	-12
C≡C	0.8	N=N	1.8	*Mn <sup>4+</sup>	-8	*Rare earth <sup>3+</sup>	-20
C in aromatic ring	-0.25	N=O	1.7	<b>Anions</b>			
C=N	8.1	C-Cl	3.1	O <sup>2-</sup>	-12.0	CN <sup>-</sup>	-13.0
<b>Cations</b>				S <sup>2-</sup>	-30	NO <sup>2-</sup>	-10.0
Li <sup>+</sup>	-1.0	Ca <sup>2+</sup>	-10.4	F <sup>-</sup>	-9.1	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-18.9
Na <sup>+</sup>	-6.8	Sr <sup>2+</sup>	-19.0	Cl <sup>-</sup>	-23.4	NCS <sup>-</sup>	-31.0
K <sup>+</sup>	-14.9	Ba <sup>2+</sup>	-26.5	Br <sup>-</sup>	-34.6	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	-28
Rb <sup>+</sup>	-22.5	Zn <sup>2+</sup>	-15.0	Γ <sup>-</sup>	-50.6	ClO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-32.0
Cs <sup>+</sup>	-35.0	Cd <sup>2+</sup>	-24	OH <sup>-</sup>	-12.0	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-40.1
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-13.3	Hg <sup>2+</sup>	-40	<b>Some usual ligands</b>			
Mg <sup>2+</sup>	-5.0			H <sub>2</sub> O	-13		
				NH <sub>3</sub>	-18		
				CO	-10		
				CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup>	-30		
				C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> <sup>2-</sup> oxalato	-25		
				C <sub>2</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub> ethylenediamine	-46		
				C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> <sup>-</sup> cyclopentadienyl	-65		
				C <sub>5</sub> H <sub>7</sub> O <sub>2</sub> <sup>-</sup> acetylacetonato	-52		
				C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> N pyridine	-49		
				C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> N <sub>2</sub> pyrazine	-50		
				C <sub>10</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub> bipyridine	-105		
				C <sub>16</sub> H <sub>14</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub> <sup>2-</sup>			
				ethylenebis(salicylaminato)	-182		
				C <sub>12</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub> o-phenanthroline	-128		

## Παραμαγνητισμός



Όταν η μαγνήτιση  $M$  είναι θετική (όταν δηλαδή έχουμε παραμαγνητικό υλικό) το  $\delta E/\delta H$  είναι αρνητικό, δηλαδή η ενέργεια του συστήματος ( $E$ ) μειώνεται όταν αυξάνεται το πεδίο  $H_0$ . Η μετακίνηση του υλικού σε ισχυρότερο πεδίο  $H_0$  μειώνει την ενέργεια  $E$ . Το ότι το σύστημα πηγαίνει σε μια κατάσταση μικρότερης ενέργειας σημαίνει ότι γίνεται σταθερότερο.

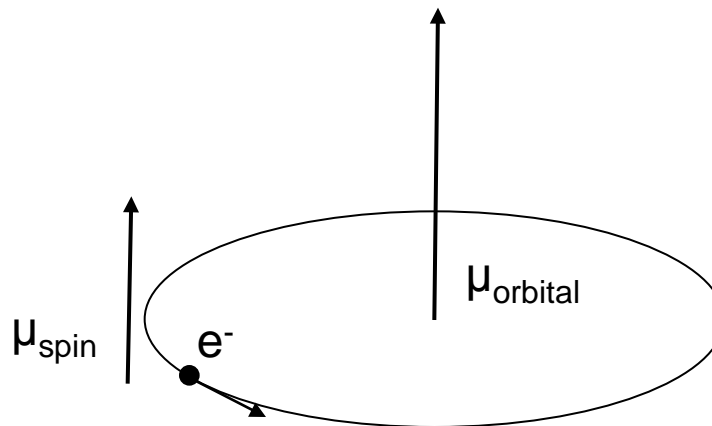
$$M = -\frac{\delta E}{\delta H_0}$$

# Προέλευση της μαγνήτισης

Αλληλεπίδραση εξωτερικού πεδίου με τις γωνιακές στροφορμές

συνεισφορά ροπής λόγω spin (spin contribution)

συνεισφορά ροπής λόγω της τροχιακής κινήσεως (orbital contribution)



$$\mu_{\text{orbital}} = g_l \times \mu_B \times l$$

$$\mu_{\text{total}} = \mu_{\text{orbital}} + \mu_{\text{spin}}$$

$$\mu_{\text{spin}} = g_s \times \mu_B \times m_s \approx \mu_B$$

# Spin

Γωνιακή ορμή (στροφορμή) λόγω spin (spin angular momentum),  $s$

$$m_s = +s, +s-1, +s-2, \dots, -s$$

Για ένα ηλεκτρόνιο,  $s = 1/2$

$$m_s = +1/2, -1/2$$

$m_s =$  κβαντικός αριθμός του spin



Το διάνυσμα  $s$  είναι κβαντισμένο στο χώρο (space quantised), και έχει δύο προσανατολισμούς ως προς τον άξονα της κβάντωσης ( $z$ ) [axis of quantisation ( $z$ )]

Εάν έχουμε περισσότερα από ένα ηλεκτρόνια

$$S = \sum_i s_i$$

## Orbital contribution

Ορμή λόγω της τροχιακής κινήσεως (orbital angular momentum),  $l$

$l = 0$  (s orbital), 1 (p orbital), 2 (d orbital), 3 (f orbital)

$m_l = +l, +l-1, +l-2, \dots, -l$

$m_l =$  μαγνητικός κβαντικός αριθμός

Ο  $m_l$  ορίζει την προβολή του ανύσματος  $l$  πάνω στον άξονα της κβάντωσης (z).

## Πολλαπλότητα του spin

Αριθμός ασύζευκτων ηλεκτρονίων	$S = \sum_i s_i$	$M_S$	$(2S+1)$	
0	0	0	1	spin singlet
1	$\frac{1}{2}$	$\pm\frac{1}{2}$	2	spin doublet
2	1	0, $\pm 1$	3	spin triplet
3	$\frac{3}{2}$	$\pm\frac{1}{2}, \pm\frac{3}{2}$	4	spin quartet
4	2	0, $\pm 1, \pm 2$	5	spin quintet
5	$\frac{5}{2}$	$\pm\frac{1}{2}, \pm\frac{3}{2}, \pm\frac{5}{2}$	6	spin sextet
etc.				

Κάθε ηλεκτρονική κατάσταση με ολική γωνιακή ορμή λόγω spin  $S$  έχει  $2S+1$  διαβαθμίσεις (καταστάσεις) με κβαντικούς αριθμούς spin  $m_S$

Ο αριθμός των  $M_S$  καταστάσεων για κάθε  $S$  είναι  $2S+1$  και ονομάζεται πολλαπλότητα του spin (spin multiplicity)

$$m_S = S, (S-1), (S-2), \dots, -S$$

Οι ενεργειακές αυτές καταστάσεις είναι εκφυλισμένες απουσία μαγνητικού πεδίου, ή είναι συζευγμένες εξαιτίας της σύζευξης spin-τροχιάς (spin orbit coupling), αργότερα...

## Πολλαπλότητα του spin

Η ιδιοπεριστροφή του ηλεκτρονίου ( $s=1/2$ ) παράγει ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο σχετίζεται με μια μαγνητική ροπή  $\mu_e$ . Έτσι, μπορούμε να πούμε ότι το ηλεκτρόνιο συμπεριφέρεται ως ένας μικροσκοπικός μαγνήτης. Το ίδιο συμβαίνει όταν έχουμε ένα σύστημα του οποίου το συνολικό spin είναι  $S$ , θα έχει δηλαδή μια μαγνητική ροπή  $\mu_s$ .

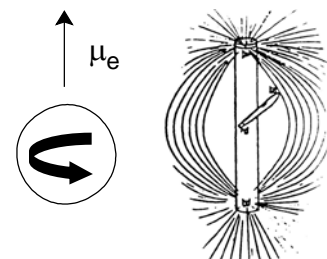
Με την εφαρμογή ενός εξωτερικού πεδίου  $H_0$  παράλληλο με τον άξονα  $z$  η αλληλεπίδραση του  $\mu_s$  με το  $H_0$  περιγράφεται από τη spin-χαμιλτωνιανή (spin Hamiltonian)  $H$ :

$$H = g\beta H_0 \hat{S}_z$$

$g$  = ο παράγοντας  $g$

$\beta = \mu_B$  = η μαγνητόνη του Bohr

$S_z$  = το spin στην κατεύθυνση του  $z$

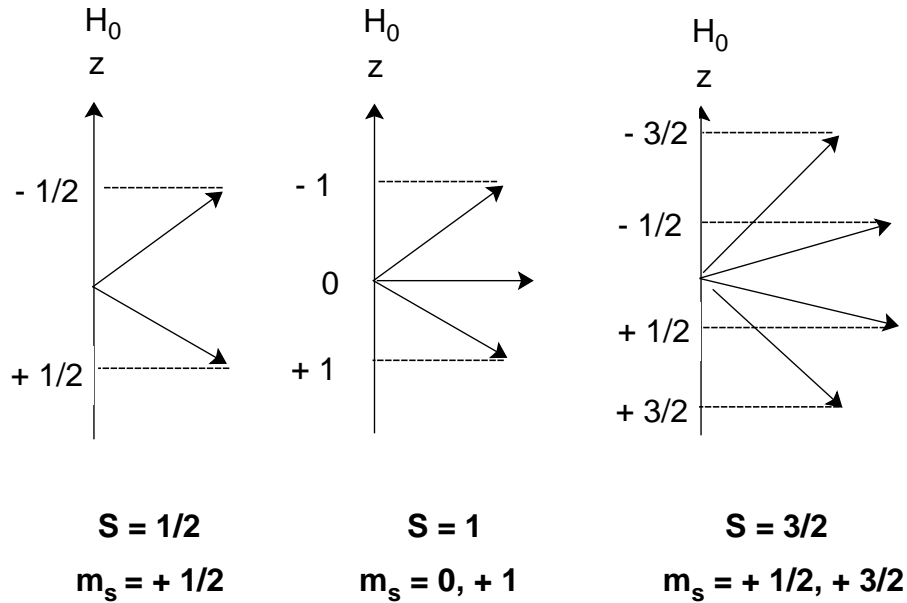


Οι τιμές  $m_s$  ενός spin  $S$  απεικονίζουν τους επιτρεπτούς κβαντισμένους προσανατολισμούς (στο χώρο) του ανύσματος της μαγνητικής ροπής του spin,  $\mu_s$ .

Ο αριθμός αυτών των προσανατολισμών είναι ίσος με τον αριθμό των  $M_s$  καταστάσεων για κάθε  $S$  και ισούται με  $(2S+1)$  = [πολλαπλότητα του spin (spin multiplicity)]



## Διαχωρισμός των $m_s$ - Zeeman effect



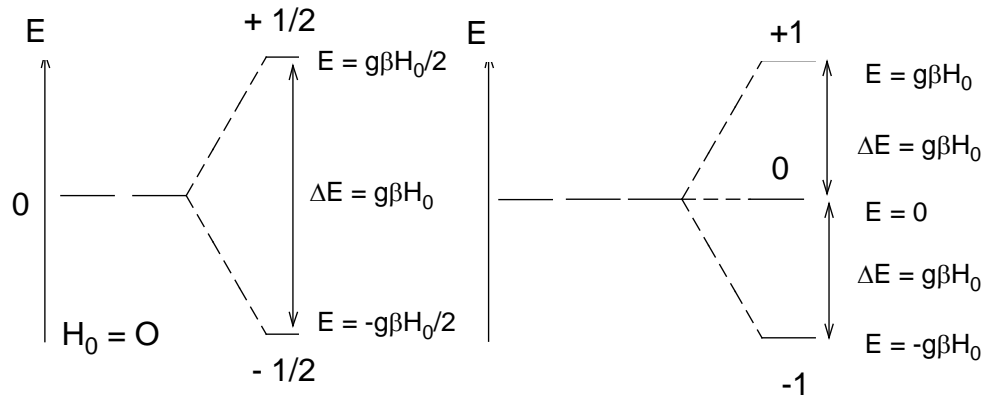
Οι διαφορετικοί προσανατολισμοί των  $m_s$  θα έχουν διαφορετικές ενέργειες  $E(m_s)$ :

$$E(m_s) = m_s g \beta H_0$$

$g$  = ο παράγοντας  $g$

$\beta = \mu_B = \eta$  μαγνητόνη του Bohr

## Διαχωρισμός των $m_s$ - Zeeman effect



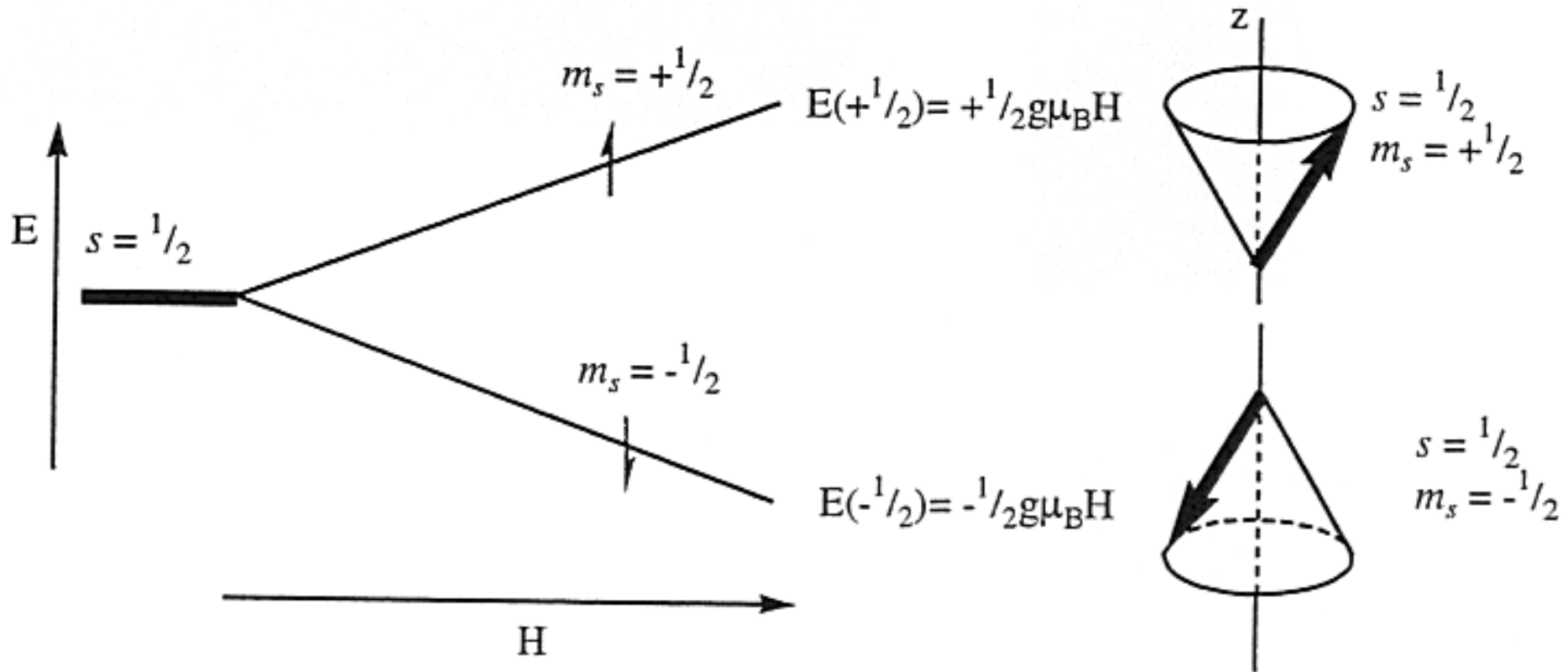
$$E(m_s) = m_s g \beta H_0$$

$E(m_s)$  είναι η μεταβολή της ενέργειας μιας  $m_s$  κατάστασης που προκαλείται με την εφαρμογή του εξωτερικού πεδίου  $H_0$ . Σε πεδίο  $H_0 = 0$  όλες οι  $m_s$  καταστάσεις θα είναι ενεργειακά εκφυλισμένες. Το ενεργειακό αυτό επίπεδο το ορίζουμε ως μηδέν.

Καθώς οι  $m_s$  έχουν διαφορετικές ενέργειες  $E(m_s)$  δεν θα είναι το ίδιο κατειλημμένες. Η χαμηλότερη σε ενέργεια θα είναι περισσότερο κατειλημμένη αλλά οι διαφορές ενέργειας  $\Delta E$  είναι πολύ μικρές (στο επίπεδο των μικροκυμάτων GHz, EPR) κάτω από το  $H_0$  το οποίο συνήθως εφαρμόζουμε και η διαφορά στους πληθυσμούς (populations) των  $m_s = +1/2$  και  $m_s = -1/2$  θα είναι πολύ μικρή.

Παρόλα αυτά, αυτή η διαφορά των πληθυσμών / καταλήψεων των  $m_s$  καταστάσεων είναι κρίσιμη / υπεύθυνη για την ύπαρξη της μαγνήτησης  $M$  που μετρούμε στη μαγνητοχημεία.

## Διαχωρισμός των $m_s$ - Zeeman effect

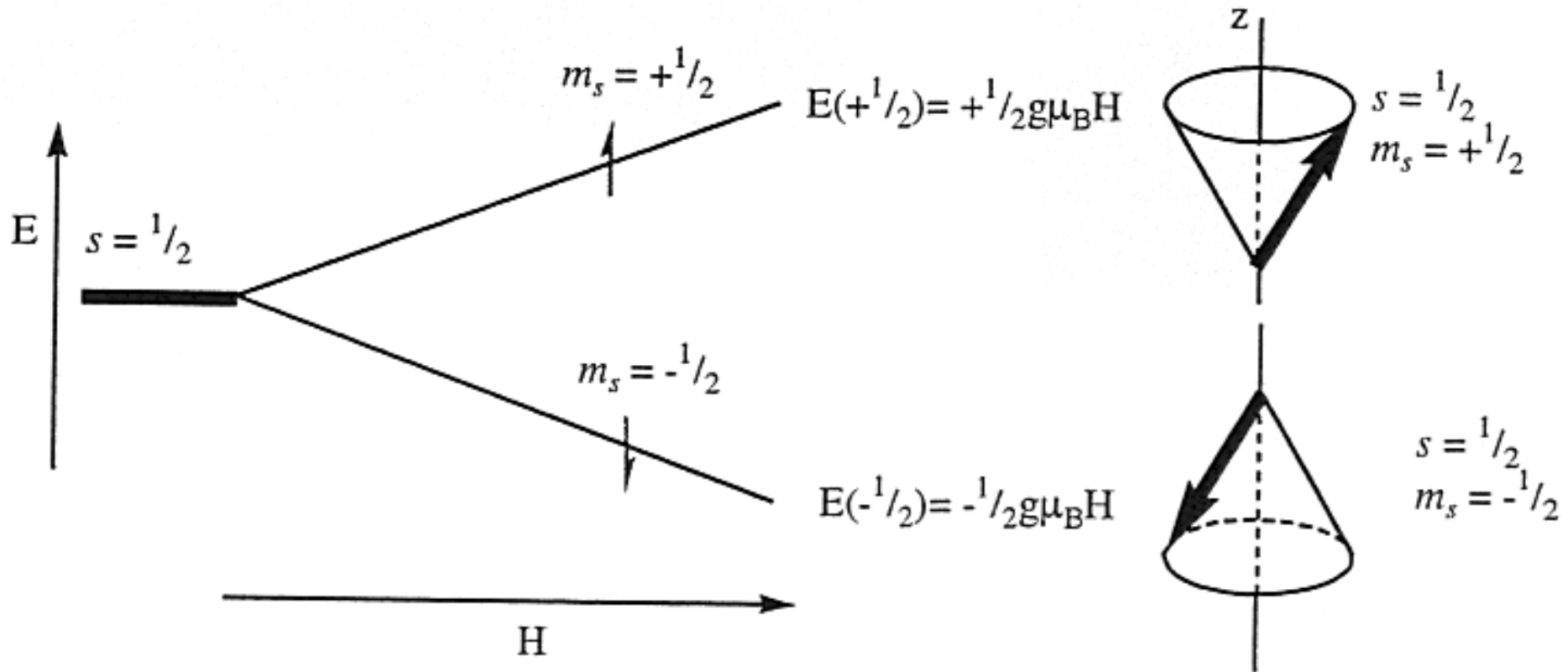


Ο διαχωρισμός των  $m_s$  σε  $2S+1$  καταστάσεις ονομάζεται διαχωρισμός Zeeman (Zeeman splitting).

$$E(m_s) = m_s g \beta H_0$$

Πρώτης τάξεως Zeeman αλληλεπίδραση (first order Zeeman effect). Ο διαχωρισμός είναι ανάλογος του πεδίου (the splitting is proportional to  $H_0$ ).

## Διαχωρισμός των $m_s$ - Zeeman effect

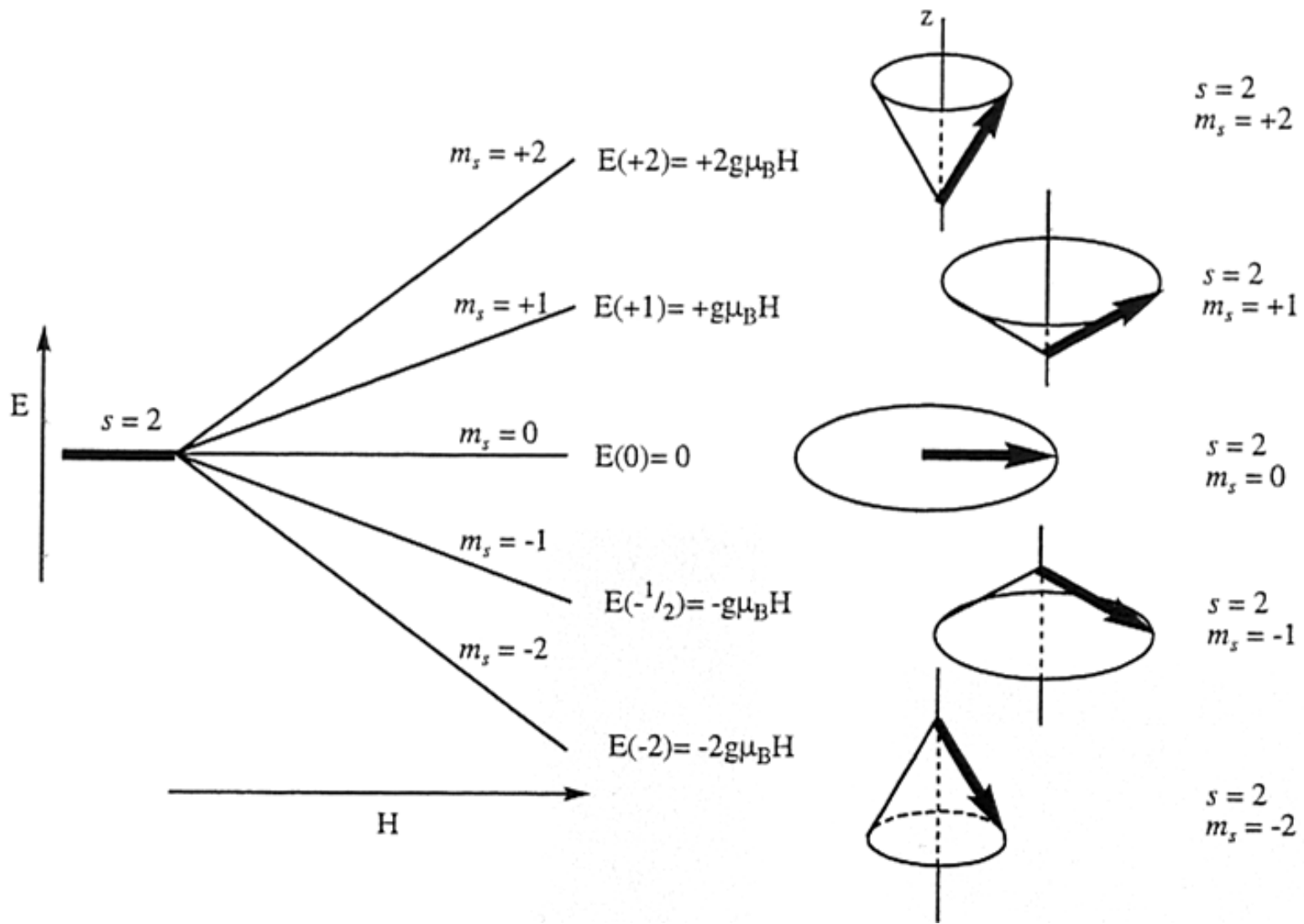


Ο διαχωρισμός των  $m_s$  σε  $2S+1$  καταστάσεις ονομάζεται διαχωρισμός Zeeman (Zeeman splitting).

$$E(m_s) = m_s g \beta H_0$$

Πρώτης τάξεως Zeeman αλληλεπίδραση (first order Zeeman effect). Ο διαχωρισμός είναι ανάλογος του πεδίου (the splitting is proportional to  $H_0$ ).

## Διαχωρισμός των $m_s$ : $S = 2$



## Μαγνήτιση (M) και μαγνητική επιδεκτικότητα ( $\chi_m$ )

$S = 1/2$ , χωρίς ορμή λόγω της τροχιακής κινήσεως

$$E(m_s) = m_s g \beta H_0$$

Κλασική μηχανική: όταν μια ουσία αλληλεπιδρά με ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, η μαγνήτισή της σχετίζεται με την ενέργεια με τη σχέση:

$$M = -\frac{\delta E}{\delta H_0}$$

Κβαντική μηχανική: ένα μόριο το οποίο βρίσκεται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο έχει ένα φάσμα ενεργειών  $E_n$  ( $n=1,2,\dots$ ). Για κάθε στάθμη ενέργειας ορίζουμε μια μικροσκοπική μαγνήτιση  $\mu_n$  η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$\mu_n = -\frac{\delta E}{\delta H_0} = -m_s g \beta$$

$\mu_n$  είναι η συνεισφορά της μαγνητικής ροπής (μαγνήτισης) στον άξονα  $z$  (παράλληλος με το  $H_0$ ) ενός μορίου που βρίσκεται στην κατάσταση  $m_s$ .  $E_n$  είναι η ενέργεια της καταστάσεως  $m_s$ .

## Μαγνήτιση (M) και μαγνητική επιδεκτικότητα ( $\chi_m$ )

$S = 1/2$ , χωρίς ορμή λόγω της τροχιακής κινήσεως

Για να υπολογίσουμε την ολική μαγνήτιση  $M$  (Μαγνήτιση ή μαγνητική ροπή) του δείγματος, πρέπει να αθροίσουμε όλες τις  $\mu_n$  για κάθε δυνατή  $m_s$ . Οι καταστάσεις  $m_s$  ακολουθούν την κατανομή κατά Boltzmann. Εάν  $P_n$  είναι το κλάσμα των μορίων που βρίσκονται στην κατάσταση  $n$  (η οποία θα είναι η  $+1/2$  ή  $-1/2$  αφού μιλάμε για ένα ηλεκτρόνιο με  $S = 1/2$ ) τότε θα έχουμε:

$$P_n = \frac{N_n}{N_t} = \frac{\exp(-E_n/kT)}{\sum_n \exp(-E_n/kT)}$$

ο συνολικός αριθμός μορίων

$$M = N \sum_{m_s} \mu_n P_n = N \sum_{m_s} \frac{\mu_n N_n}{N_t} \quad N = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

$$M = N \frac{\sum_{m_s} \mu_n \exp(-E_n/kT)}{\sum_{m_s} \exp(-E_n/kT)}$$

## Μαγνήτιση (M) και μαγνητική επιδεκτικότητα ( $\chi_m$ )

$S = 1/2$ , χωρίς ορμή λόγω της τροχιακής κινήσεως

$$M = N \frac{\sum_{m_s} \mu_n \exp(-E_n/kT)}{\sum_{m_s} \exp(-E_n/kT)}$$

$$\mu_n = -\frac{\delta E}{\delta H_0} = -m_s g \beta$$

$$E(m_s) = m_s g \beta H_0$$



## Μαγνήτιση (M) και μαγνητική επιδεκτικότητα ( $\chi_m$ )

$S = 1/2$ , χωρίς ορμή λόγω της τροχιακής κινήσεως

$$M = N \frac{\sum_{m_s} \mu_n \exp(-E_n/kT)}{\sum_{m_s} \exp(-E_n/kT)}$$

$$\mu_n = -\frac{\delta E}{\delta H_0} = -m_s g \beta$$

$$E(m_s) = m_s g \beta H_0$$

$$M = N \left[ \frac{\frac{g\beta}{2} \exp\left(\frac{g\beta H_0}{2kT}\right) - \frac{g\beta}{2} \exp\left(\frac{-g\beta H_0}{2kT}\right)}{\exp\left(\frac{g\beta H_0}{2kT}\right) + \exp\left(\frac{-g\beta H_0}{2kT}\right)} \right]$$

$$M = \frac{N\beta g}{2} \left[ \frac{\exp\left(\frac{g\beta H_0}{2kT}\right) - \exp\left(\frac{-g\beta H_0}{2kT}\right)}{\exp\left(\frac{g\beta H_0}{2kT}\right) + \exp\left(\frac{-g\beta H_0}{2kT}\right)} \right]$$

## Μαγνήτιση (M) και μαγνητική επιδεκτικότητα ( $\chi_m$ )

$S = \frac{1}{2}$ , χωρίς ορμή λόγω της τροχιακής κινήσεως

$$\frac{g\beta H_0}{kT} \ll 1 \Rightarrow \exp\left(\frac{\pm g\beta H_0}{2kT}\right) \approx \left(1 \pm \frac{g\beta H_0}{2kT}\right)$$

$$M = \frac{N\beta g}{2} \left[ \frac{\exp\left(\frac{g\beta H_0}{2kT}\right) - \exp\left(\frac{-g\beta H_0}{2kT}\right)}{\exp\left(\frac{g\beta H_0}{2kT}\right) + \exp\left(\frac{-g\beta H_0}{2kT}\right)} \right]$$

$$M = \frac{N\beta g}{2} \left[ \frac{\left(1 + \frac{g\beta H_0}{2kT}\right) - \left(1 - \frac{g\beta H_0}{2kT}\right)}{\left(1 + \frac{g\beta H_0}{2kT}\right) + \left(1 - \frac{g\beta H_0}{2kT}\right)} \right] = \frac{N\beta g}{2} \left[ \frac{2 \frac{g\beta H_0}{2kT}}{2} \right] = \frac{Ng\beta^2 H_0}{4kT}$$

## Μαγνήτιση (M) και μαγνητική επιδεκτικότητα ( $\chi_m$ )

$S = 1/2$ , χωρίς ορμή λόγω της τροχιακής κινήσεως

$$\frac{g\beta H_0}{kT} \ll 1 \Rightarrow \exp\left(\frac{\pm g\beta H_0}{2kT}\right) \approx \left(1 \pm \frac{g\beta H_0}{2kT}\right)$$

Όταν  $H_0 \approx 25$  kG,  $\Delta E \approx 2.3$  cm<sup>-1</sup>, η οποία είναι σχετικά μικρή αν τη συγκρίνουμε με τη θερμική ενέργεια ( $kT$ ) η οποία στους  $\sim 300$  K είναι  $\sim 200$  cm<sup>-1</sup>. Αυτό σημαίνει ότι οι  $m_s = \pm 1/2$  καταστάσεις είναι σχεδόν το ίδιο κατειλημμένες (η  $-1/2$  έχει ελαφρώς μεγαλύτερο πληθυσμό από την  $+1/2$ ). Η  $M$  και η  $\chi_m$  ( $= M/H_0$ ) θα προσδιορισθούν από αυτές τις δύο  $M_s$  καταστάσεις και τους σχετικούς πληθυσμούς τους.

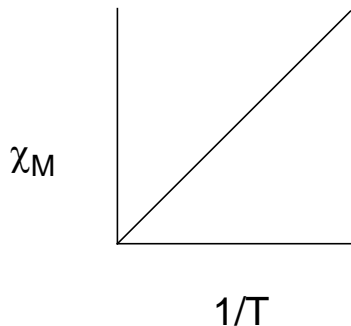
$$M = \frac{Ng\beta H_0}{4kT}$$

$$\chi_m = \frac{M}{H_0} = \frac{Ng\beta^2}{4kT}$$

Νόμος Curie για  $S = 1/2$

$$\chi_m = \frac{C}{T}$$

$C =$  σταθερά



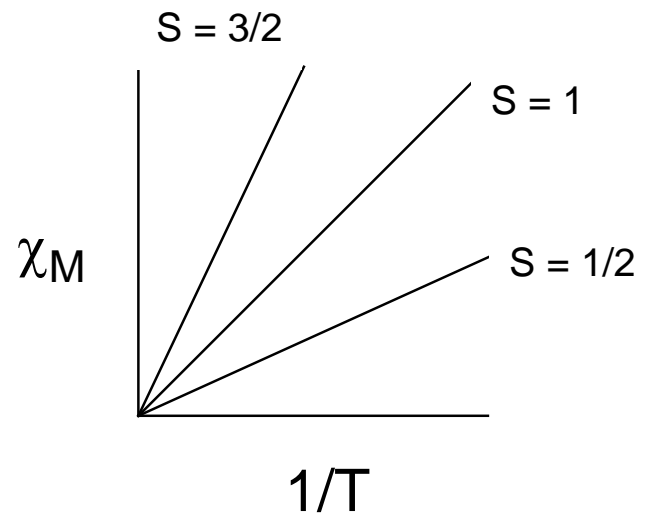
## Μαγνήτιση (M) και μαγνητική επιδεκτικότητα ( $\chi_m$ )

$$\chi_M = \frac{Ng\beta^2}{3kT} S(S+1) \quad \text{Νόμος Curie για } S$$

$$\text{για } S = \frac{1}{2} \quad \chi_M = \frac{Ng\beta^2}{4kT}$$

$$S = 1 \quad \chi_M = \frac{2Ng\beta^2}{3kT}$$

$$S = \frac{3}{2} \quad \chi_M = \frac{5Ng\beta^2}{4kT}$$



## Μαγνήτιση (M) και μαγνητική επιδεκτικότητα ( $\chi_m$ )

$S = 1/2$ , χωρίς ορμή λόγω της τροχιακής κινήσεως

$$\chi_M = \frac{C}{(T - \theta)} \quad \text{Νόμος Curie-Weiss}$$

$\theta =$  σταθερά Curie-Weiss

$\theta > 0$  για σιδηρομαγνητικά  
 $\theta < 0$  για αντισιδηρομαγνητικά

