

Θεοδ. Μαυρομούστακος  
Ανδρέας Τζάνης  
Γεωργίου Σπυριδίου  
Εμμανουήλ Μικρού

Αντωνίου Κολοκούρη  
Κωνσταντίνου Παπακωνσταντίνου  
Ιωάννη Γεροθανάση  
Ιωάννη Ματσούκα

# Πυρηνικός Μαγνητικός Συντονισμός



Θ. Μαυρομούστακος, Α.  
Τζάνης, Γ. Σπυριδίου,  
Ε. Μικρός, Α. Κολοκούρης, Κ.  
Παπακωνσταντίνου, Ι.  
Γεροθανάσης, Ι. Ματσούκας.  
Εκδόσεις Συμμετρία 2019.  
ISBN 978-960-266-504-6.



## ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ

(**N**UCLEAR **M**MAGNETIC **R**ESONANCE SPECTROSCOPY)

### Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> *Σύζευξη Πυρήνων Spin*

Δρ. Ανδρομάχη Τζάνη  
[atzan@chem.uoa.gr](mailto:atzan@chem.uoa.gr)

13/03/2023

- 01** Σύζευξη spin-spin
- 02** Παράγοντες που επηρεάζουν τη σταθερά σύζευξης
- 03** Χημική Ανταλλαγή
- 04** Μεθοδολογία επίλυσης φασμάτων που περιέχουν σχάσεις
- 05** Ερωτήσεις/Ασκήσεις



# Βασικές Παράμετροι Φασμάτων NMR

**1**

Αριθμός των σημάτων

**2**

Χημική Μετατόπιση  $\delta$  (Chemical Shift)

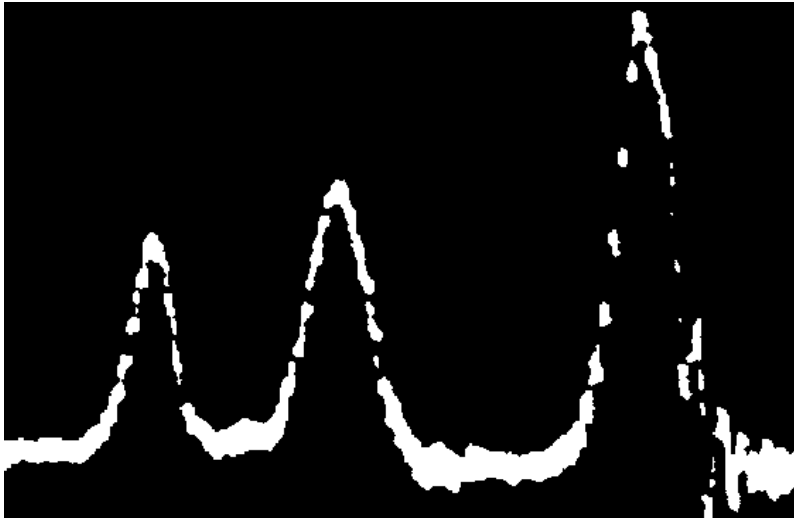
**3**

Επιφάνεια/Ένταση κορυφής  
(Ολοκλήρωση κορυφής)

**4**

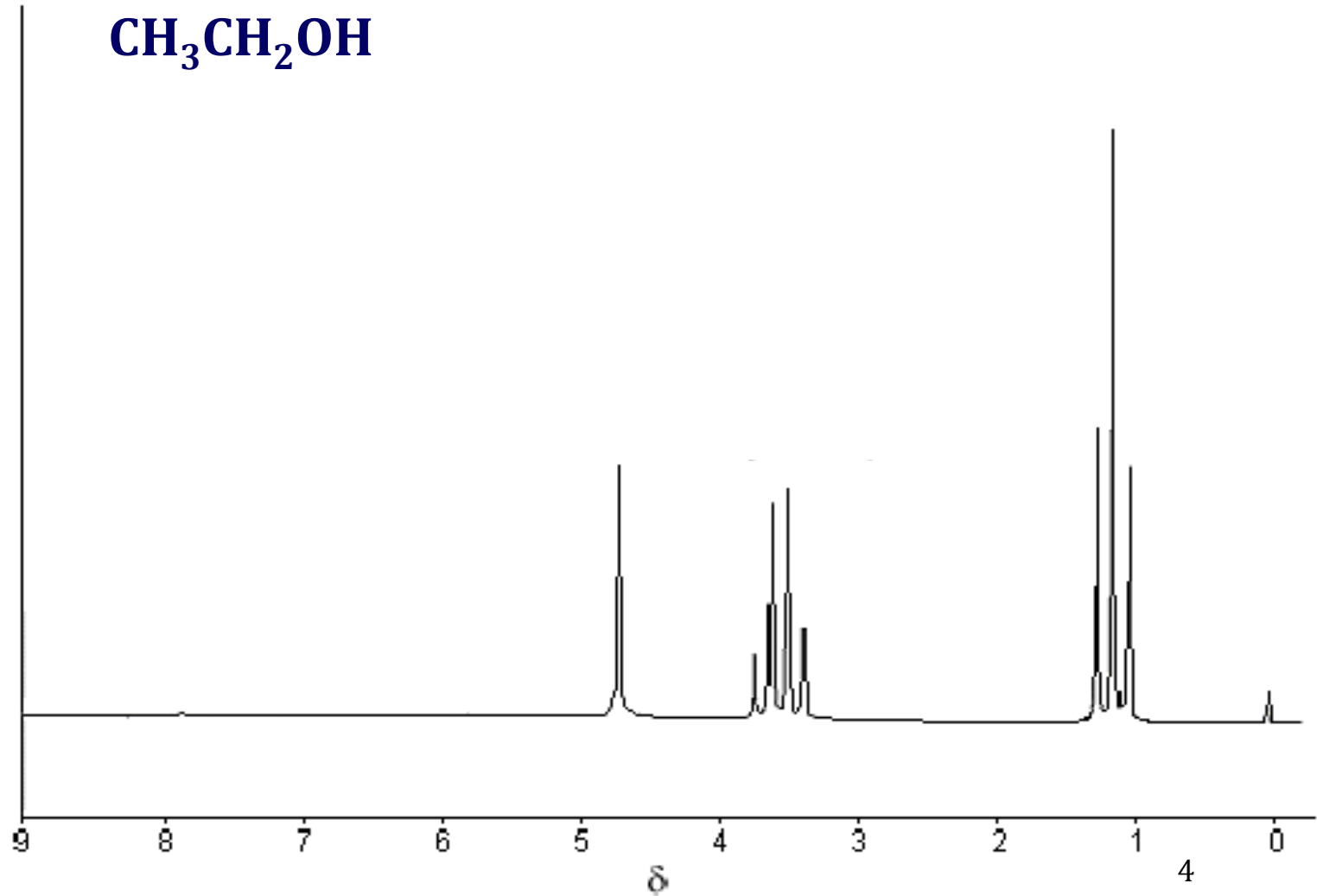
Πολλαπλότητα κορυφής

# Σύζευξη spin-spin / Πολλαπλότητα Κορυφής



Φάσμα  $^1\text{H}$  NMR της αιθανόλης (40 MHz)

(φωτογραφία από παλμογράφο που χρησιμοποιήθηκε ως καταγραφέας).



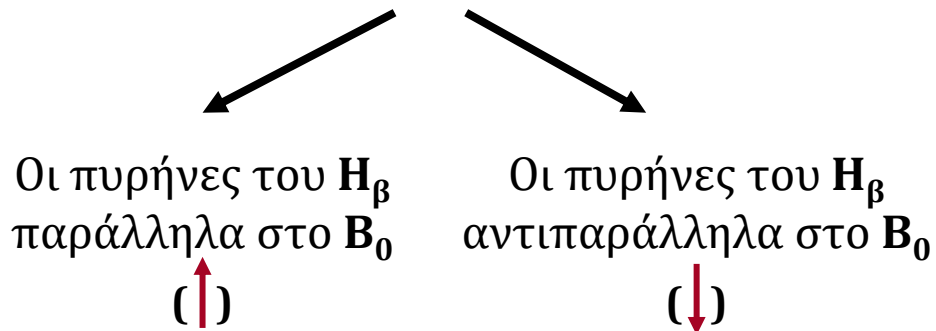
# Σύζευξη spin-spin / Πολλαπλότητα Κορυφής

Η αλληλεπίδραση (σύζευξη) των spin **γειτονικών μαγνητικών** πυρήνων, η οποία μεταδίδεται μέσω των spin των e<sup>-</sup> των δεσμών, ονομάζεται **spin-spin σύζευξη** και εκφράζεται με τη **σταθερά σύζευξης J** (σε Hz).

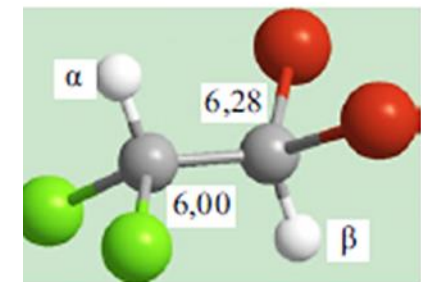
- Οδηγεί σε **πολλαπλότητα** του σήματος (πολλαπλές κορυφές).
- Η **απόσταση** μεταξύ υποκορυφών που συνιστούν μια **πολλαπλή κορυφή**
- Υπολογίζεται το πλήθος των υδρογόνων που συνδέονται στους γειτονικούς άνθρακες.

π.χ. ο **H<sub>α</sub>** βρίσκεται υπό την επίδραση :

- ✓ του **B<sub>0</sub>**
- ✓ ενός **μαγνητικού πεδίου μικρότερου** λόγω γειτνίασης με το **H<sub>β</sub>**



**Διπλή κορυφή**



# Σύζευξη spin-spin / Πολλαπλότητα Κορυφής

1,1,2-τριχλωροαιθάνιο

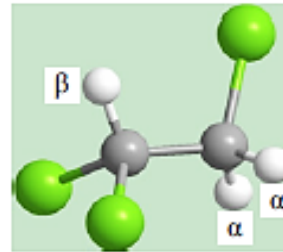


3,88

$H_\alpha$

5,65

$H_\beta$



Τα  $H_\alpha$  βρίσκεται υπό την επίδραση :

- ✓ του  $B_0$
- ✓ ενός μαγνητικού πεδίου μικρότερου λόγω γειτνίασης με το  $H_\beta$

Ο πυρήνας του  $H_\beta$   
παράλληλα στο  $B_0$

(↑)

Ο πυρήνας του  $H_\beta$   
αντιπαράλληλα στο  $B_0$

(↓)

Διπλή κορυφή

Τα  $H_\beta$  βρίσκεται υπό την επίδραση :

- ✓ του  $B_0$
- ✓ ενός μαγνητικού πεδίου μικρότερου λόγω γειτνίασης με τα  $H_\alpha$

(↑)(↑)

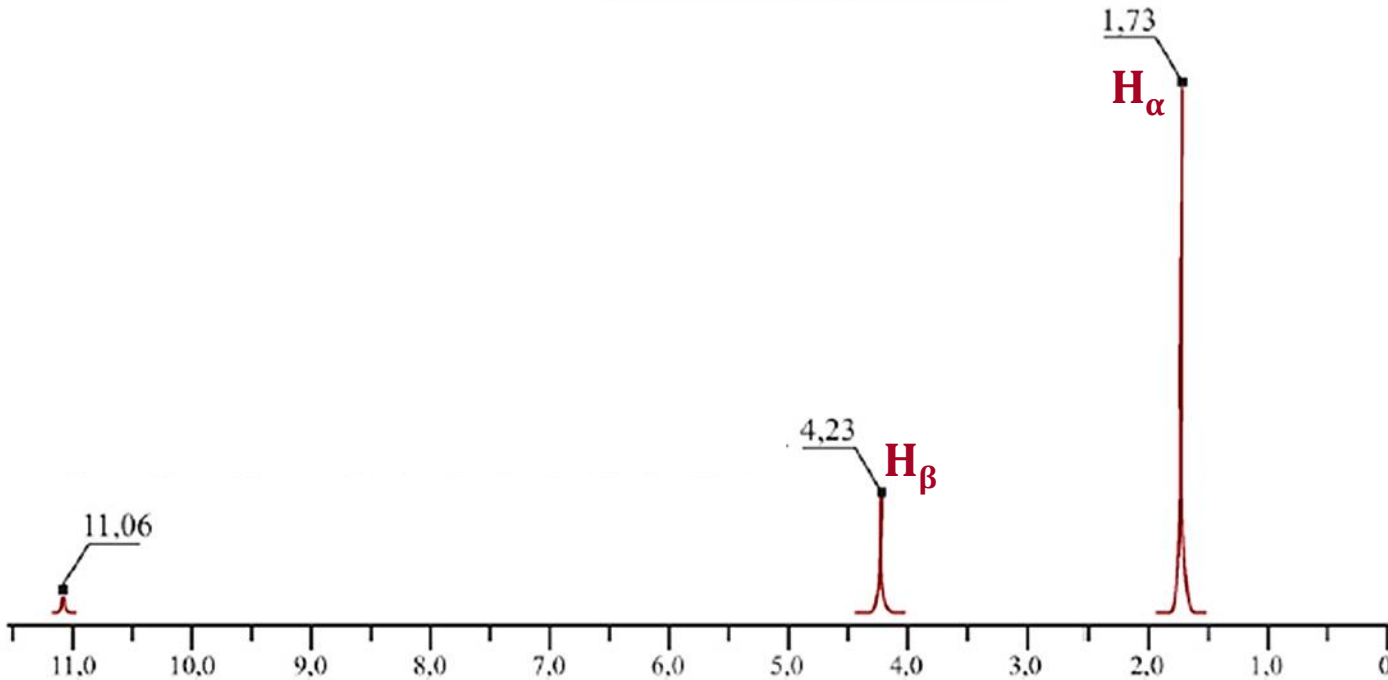
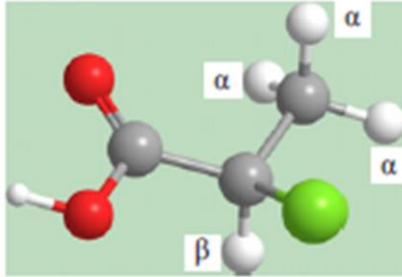
(↑)(↓)

(↓)(↓)

Τριπλή κορυφή

# Σύζευξη spin-spin / Πολλαπλότητα Κορυφής

2-χλωροπροπανικό οξύ  
 $\text{CH}_3\text{CHCl}_2\text{COOH}$



Τα  $\text{H}_\alpha$  βρίσκεται υπό την επίδραση :

- ✓ του  $\text{B}_0$
- ✓ ενός μαγνητικού πεδίου μικρότερου λόγω γειτνίασης με το  $\text{H}_\beta$

Ο πυρήνας του  $\text{H}_\beta$   
παράλληλα στο  $\text{B}_0$

(↑)

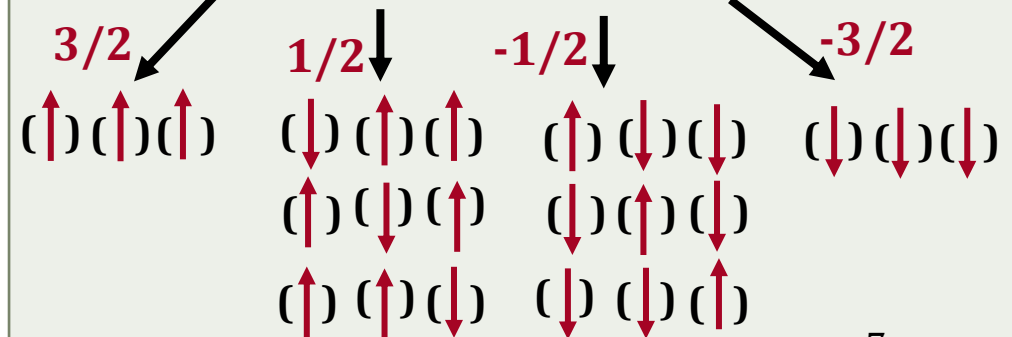
Ο πυρήνας του  $\text{H}_\beta$   
αντιπαράλληλα στο  $\text{B}_0$

(↓)

Διπλή κορυφή

Τα  $\text{H}_\beta$  βρίσκεται υπό την επίδραση :

- ✓ του  $\text{B}_0$
- ✓ ενός μαγνητικού πεδίου μικρότερου λόγω γειτνίασης με τα  $\text{H}_\alpha$



Τετραπλή κορυφή

# Σύζευξη spin-spin / Πολλαπλότητα Κορυφής

➤ Οι εντάσεις των κορυφών μπορούν να προσδιοριστούν με το τρίγωνο Pascal.

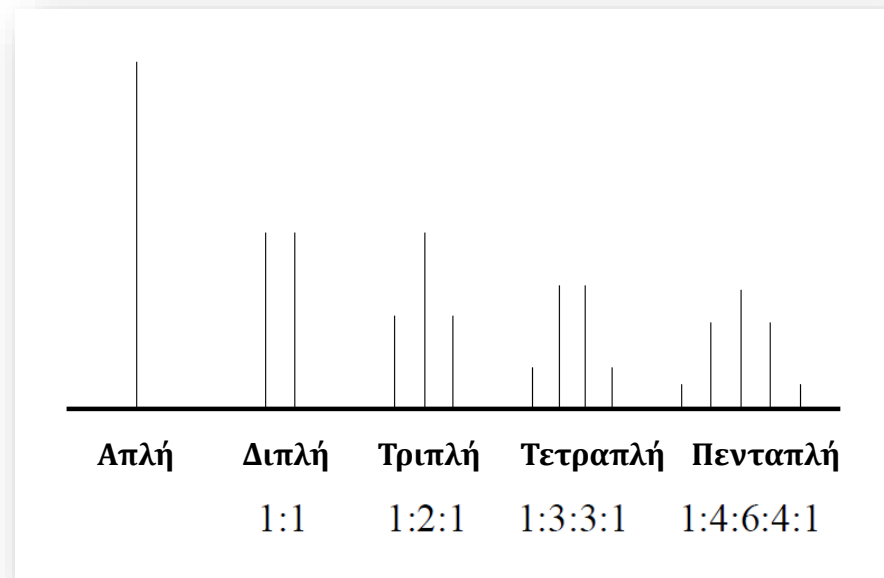
Για το πρωτόνιο όπου  $I = +1/2$  ισχύει ο κανόνας:  
**Πολλαπλότητα κορυφής =  $n + 1$**

$n$	Ένταση Κορυφών	Πολλαπλότητα
0	1	1
1	1:1	2
2	1:2:1	3
3	1:3:3:1	4
4	1:4:6:4:1	5
5	1:5:10:10:5:1	6
6	1:6:15:20:15:6:1	7



Pascal Blaise  
(1623 - 1662)

Διπλή	1	1	$(\alpha + \beta)^1 = 1 \cdot \alpha + 1 \cdot \beta$				
Τριπλή	1	2	1	$(\alpha + \beta)^2 = 1 \cdot \alpha^2 + 2 \cdot \alpha\beta + 1 \cdot \beta^2$			
Τετραπλή	1	3	3	1	$(\alpha + \beta)^3 = 1 \cdot \alpha^3 + 3 \cdot \alpha^2\beta + 3 \cdot \alpha\beta^2 + 1 \cdot \beta^3$		
Πενταπλή	1	4	6	4	1		
Εξαπλή	1	5	10	10	5	1	
Επταπλή	1	6	15	20	15	6	1



## 1<sup>η</sup> Τάξης φάσματα

- Η ίδιου ατόμου C είναι ισοδύναμα &
- Η απόσταση των 2 απορροφήσεων είναι τόση ώστε να μην υπάρχει αλληλοεπικάλυψη



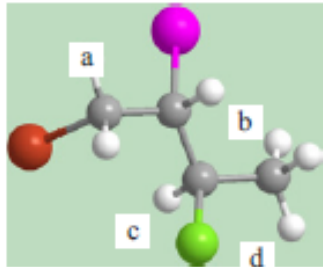
# Σύζευξη spin-spin / Πολλαπλότητα Κορυφής

Όταν δεν ισχύει ο κανόνας «n+1» εφαρμόζεται η **μέθοδος της διακλάδωσης**

➤ Τα H του ίδιου άνθρακα δεν είναι ισοδύναμα:

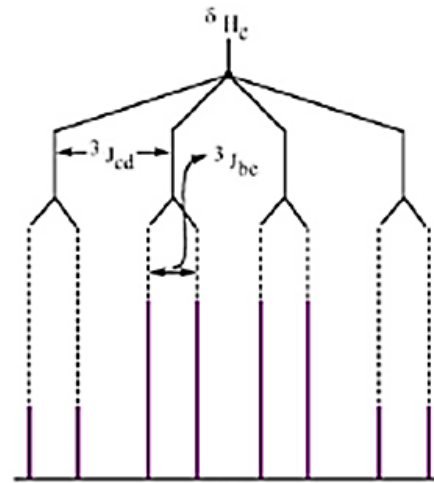
Είτε λόγω περιορισμένης περιστροφής της ομάδας είτε λόγω ύπαρξης ασύμμετρου άνθρακα

$$\text{Για } I = 1/2: L = (n_a+1)(n_b+1)\dots = \prod (n_i+1)$$

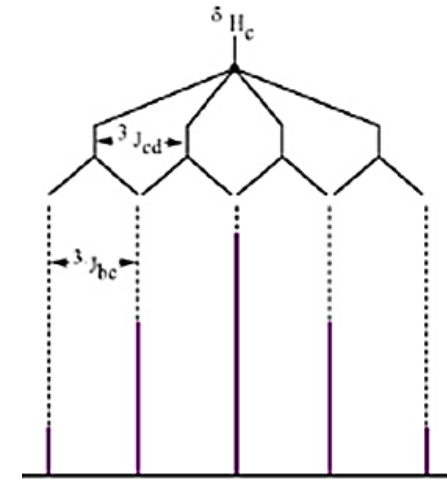


$$L = (n_a+1)(n_b+1)\dots = \prod (n_i+1)$$

$$L = (1+1)(3+1) = 8 \text{ φασματικές κορυφές}$$



Τετραπλή κορυφή επί διπλή κορυφή  
για  $J_{bc} \neq J_{cd}$



Πενταπλή κορυφή για  $J_{bc} = J_{cd}$

$$\text{Για } I \neq 1/2: L = (2n_a I_a + 1)(2n_b I_b + 1)\dots = \prod (2n_i I_i + 1)$$

# Παράγοντες που επηρεάζουν τη σταθερά σύζευξης

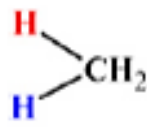
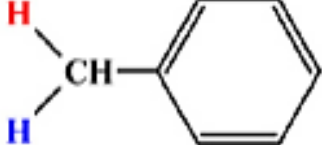
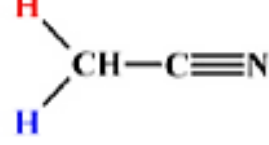
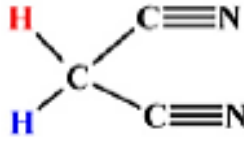
- Αριθμός δεσμών μεταξύ των δύο H
- Ηλεκτραρνητικότητα γειτονικών ομάδων
- Διαμόρφωση μορίου

## ❖ Δίδυμη σύζευξη (*geminal*)

Τα 2H μη ισοδύναμα που βρίσκονται στον ίδιο άνθρακα και απέχουν μόνο 2 δεσμούς (<sup>2</sup>J). Το μέγεθος της τιμής του J (0-20 Hz) εξαρτάται από τη γωνία H-C-H (105-125°).

Οφείλετε σε:

- Περιορισμένη περιστροφή
- Ασύμμετρος άνθρακας δίπλα στην εξεταζόμενη ομάδα -CH<sub>2</sub>-

μόριο				
J	-12,4	-14,5	-16,2	-20,3

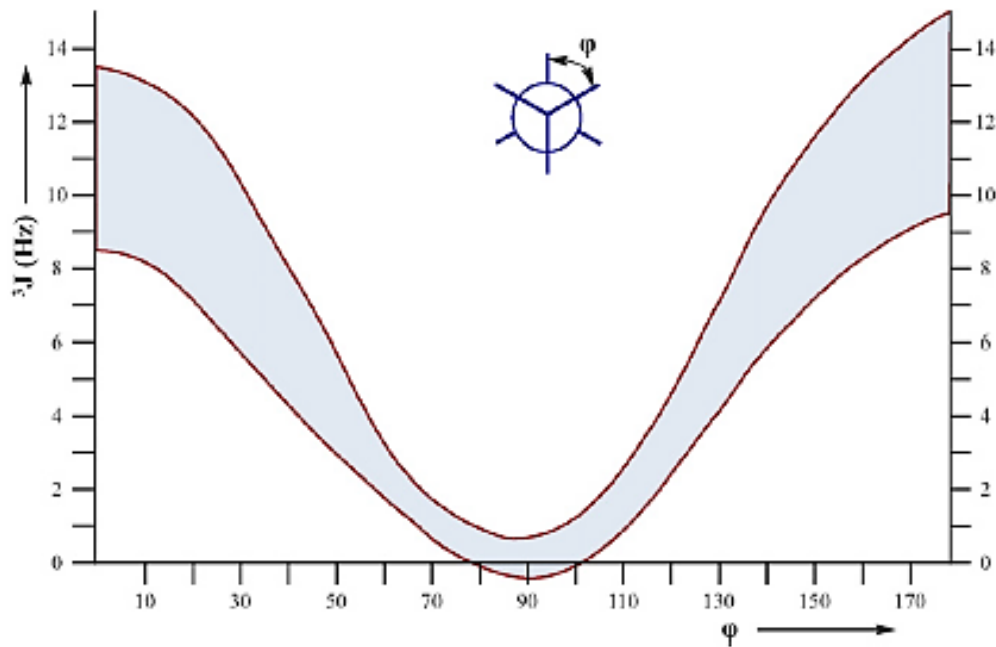
Εξάρτηση και από τον αριθμό των π συνδεδεμένων δεσμών στην εξεταζόμενη ομάδα.

# Παράγοντες που επηρεάζουν τη σταθερά σύζευξης

- Αριθμός δεσμών μεταξύ των δύο H
- Ηλεκτραρνητικότητα γειτονικών ομάδων
- Διαμόρφωση μορίου

## ❖ Γειτονική σύζευξη (vicinal: vic)

Τα 2H μη ισοδύναμα που βρίσκονται σε 2 γειτονικά άτομα άνθρακα και απέχουν μόνο 3 δεσμούς ( $^3J$ ). Το μέγεθος της τιμής του J εξαρτάται από τη diedρη γωνία  $\varphi$ .

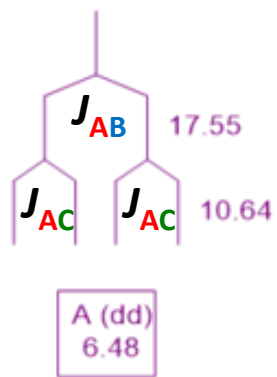
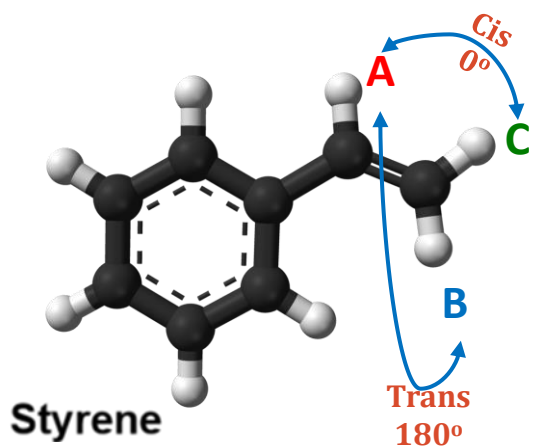


Karplus Martin  
(1930 - )

$$J(\varphi) = \Gamma(\cos 2\varphi) + B(\cos \varphi) + A$$

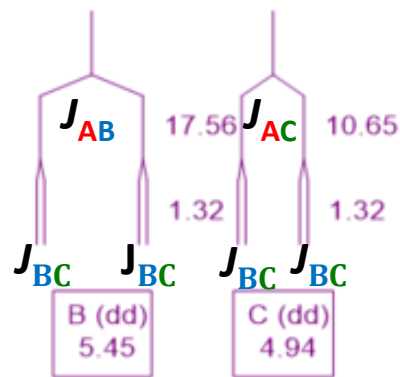
διαμορφώσεις	gauche—	anti—
J	2–4 Hz	5–12 Hz

# Παράδειγμα 1



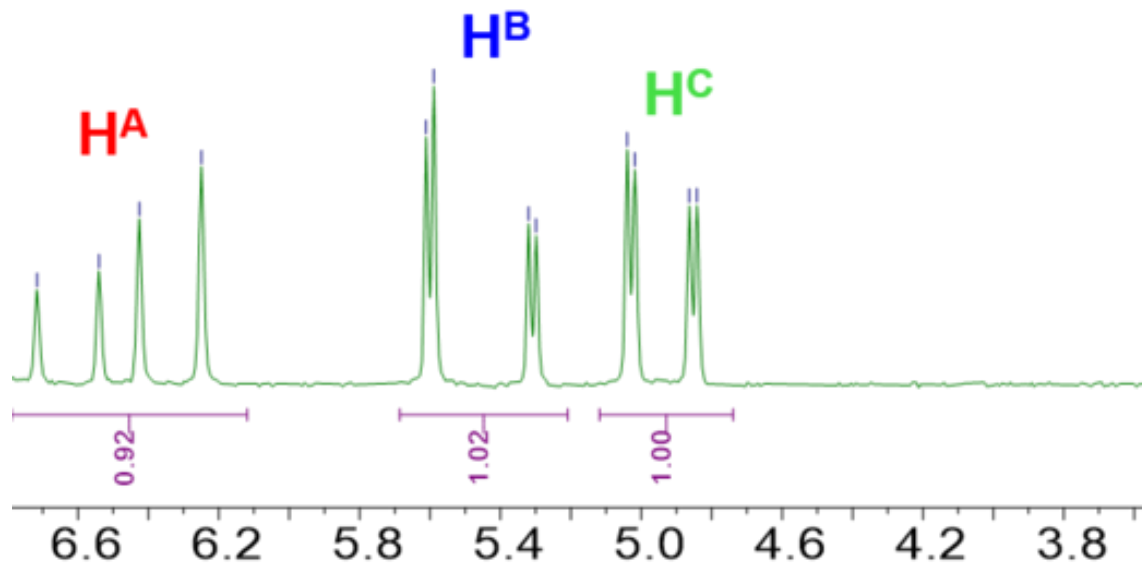
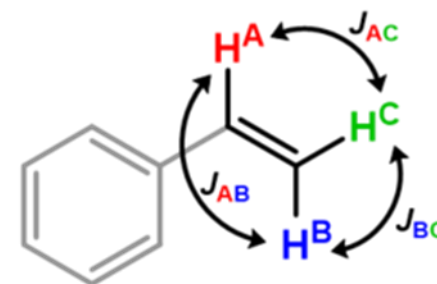
$$J_{AB} = 17 \text{ Hz}$$

$$J_{AC} = 11 \text{ Hz}$$

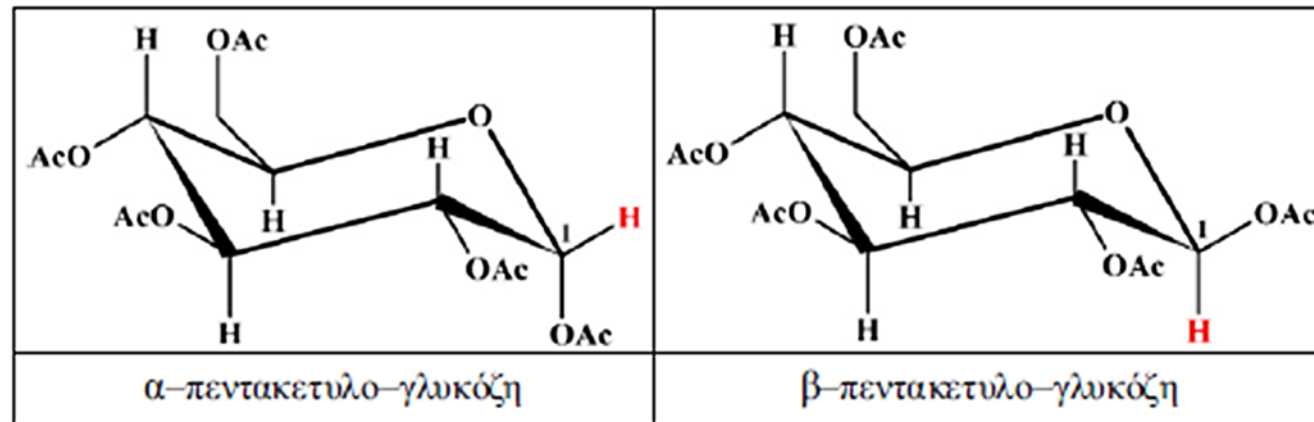


$$J_{AB} = 17 \text{ Hz}$$

$$J_{BC} = 1,4 \text{ Hz}$$



## Παράδειγμα 2



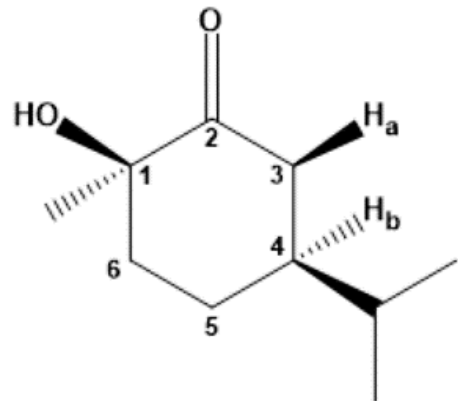
$$J = 3.2 \text{ Hz}$$

*Gauche* θέση

$$J = 8 \text{ Hz}$$

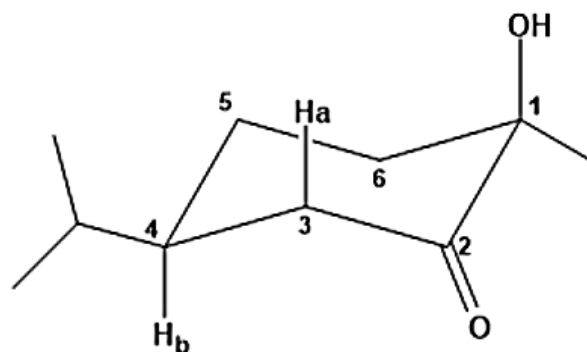
*Anti* θέση

# Παράδειγμα 3

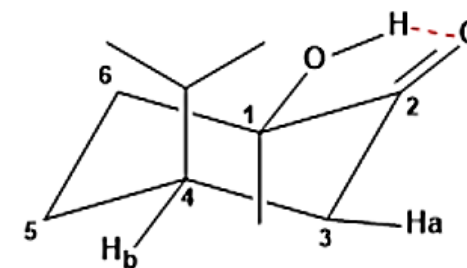


$J_{ab} = 11 \text{ Hz}$     Διάλυση σε μεθανόλη

$J_{ab} = 3.0 \text{ Hz}$     Διάλυση σε βενζόλιο



$J_{ab} = 11 \text{ Hz}$   
Διάλυση σε μεθανόλη



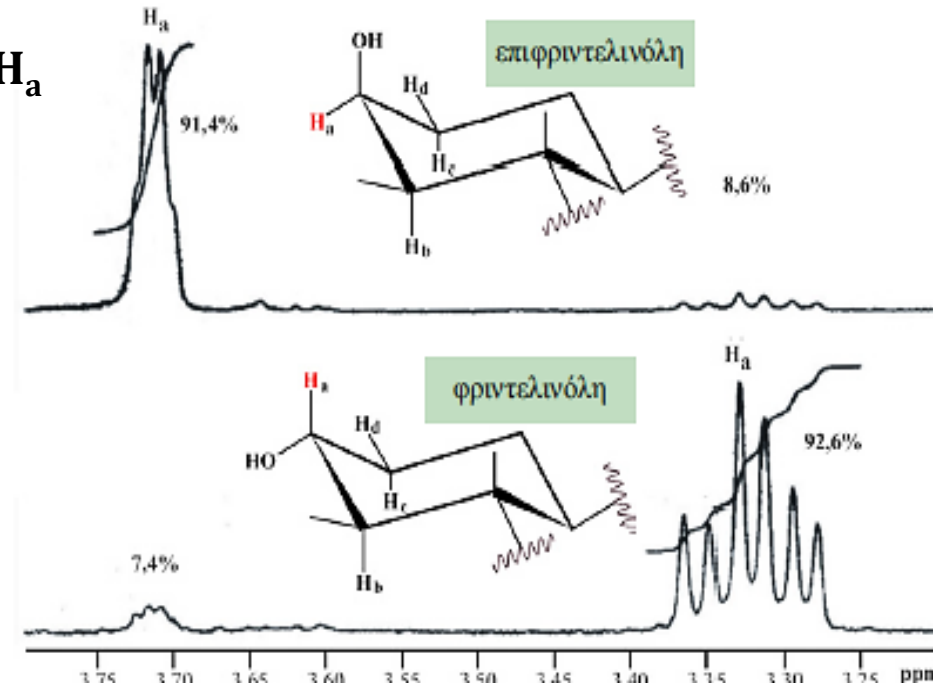
$J_{ab} = 3.0 \text{ Hz}$   
Διάλυση σε βενζόλιο

# Παράδειγμα 4



Από τα φύλλα του φυτού «Azima tetracantha» εξάγεται η φριντελίνη.

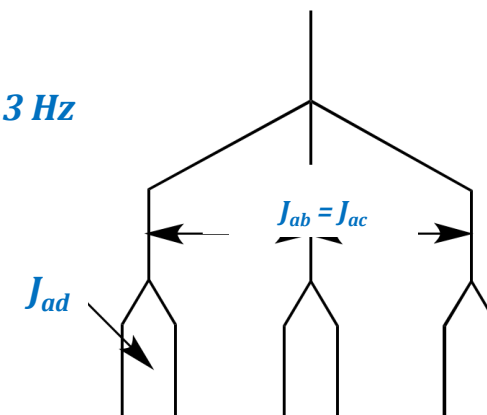
- Το ισημερινό πρωτόνιο  $H_a$  σχάζεται από τα:
- αξονικά  $H_b$  και  $H_c$
  - Ισημερινό  $H_d$
- Μικρά  $J = 2-3$  Hz**  
γωνίες  $\sim 60^\circ$



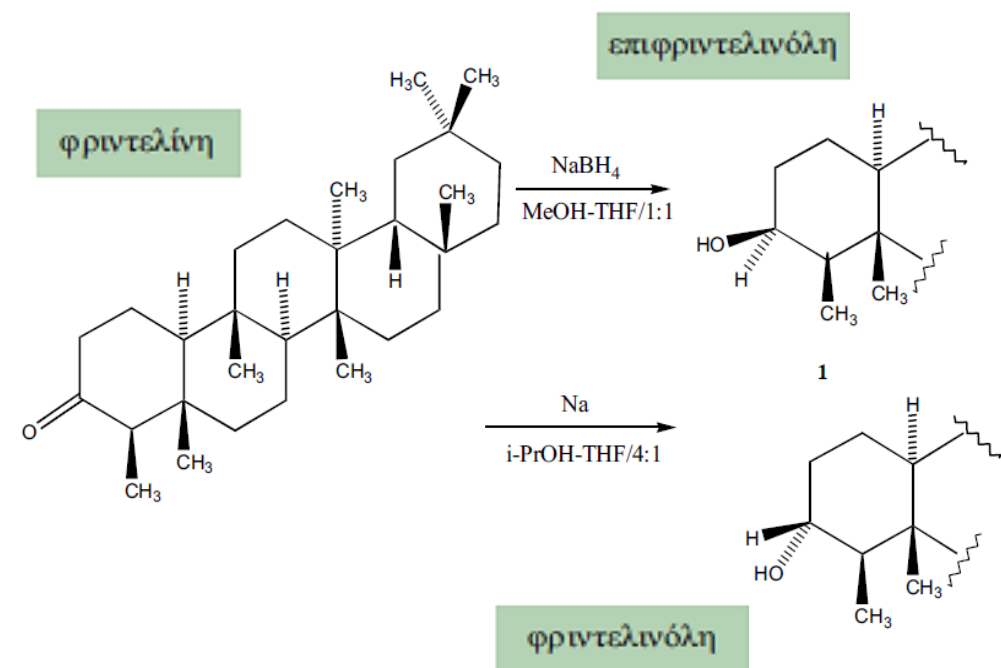
- Το **αξονικό** πρωτόνιο  $H_a$  σχάζεται από τα:
- trans πρωτόνια  $H_b$  και  $H_c$   **$J = 10.3$  Hz**
  - Ισημερινό  $H_d \rightarrow$  οδηγεί σε σχάση κάθε γραμμής της 3πλής κορυφής  **$J = 4.8$  Hz**

$$J_{ab} = J_{ac} = 10.3 \text{ Hz}$$

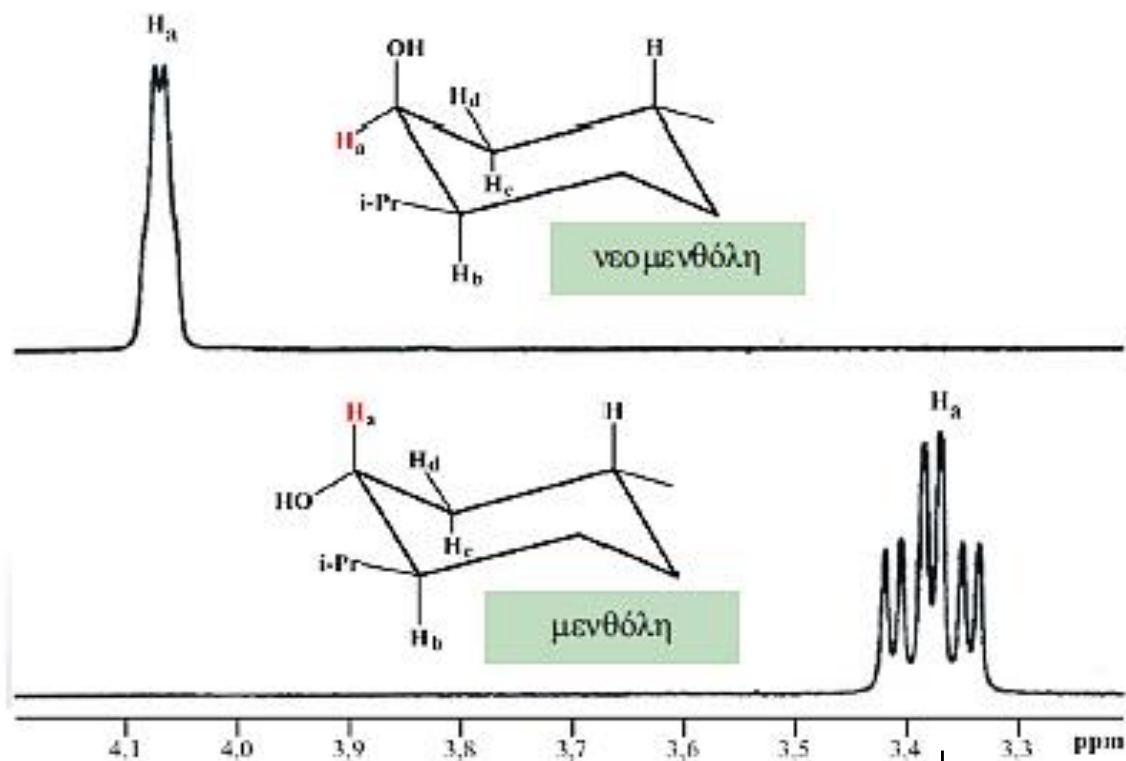
$$J_{ad} = 4.8 \text{ Hz}$$



Διπλή επί τριπλής κορυφή<sup>15</sup>

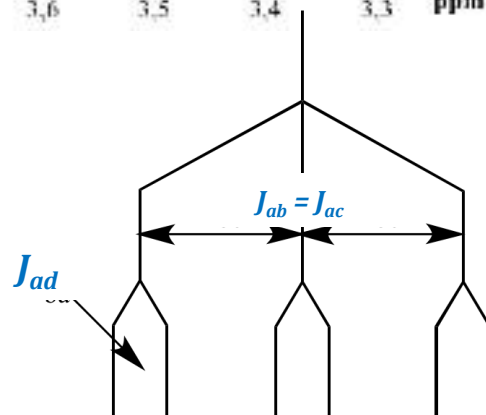


## Παράδειγμα 5



Η μενθόλη βρίσκεται στα αιθέρια έλαια της πιπεράδους μέντας.

Το ισημερινό πρωτόνιο συντονίζεται σε υψηλότερη τιμή ppm συγκριτικά με το αξονικό πρωτόνιο

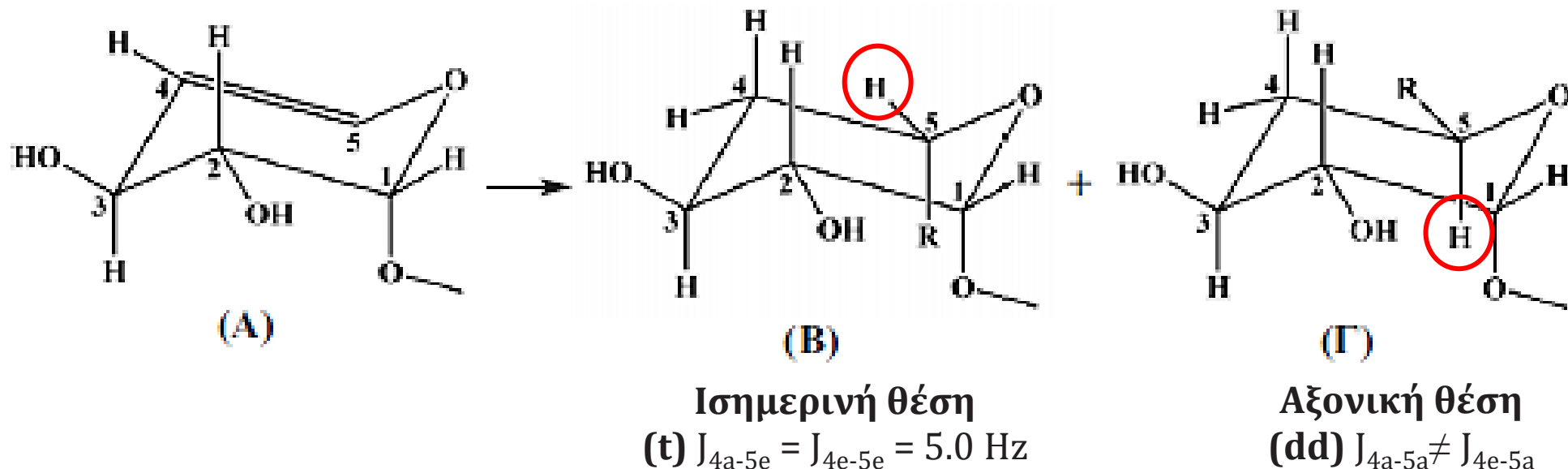




# Άσκηση 1

Η καταλυτική υδρογόνωση της ένωσης (Α) μπορεί να δώσει τα προϊόντα (Β) και (Γ). Το πρωτόνιο στη θέση (5) μπορεί να καταλάβει **ισημερινή** ή **αξονική** θέση. Στο φάσμα  $^1\text{H}$  NMR, η κορυφή η οποία αντιστοιχεί στο H-5 αποτελείται από **μια τριπλή κορυφή 1<sup>ου</sup> βαθμού**. Το πρωτόνιο είναι αξονικό ή ισημερινό;

$$\begin{aligned} \text{Δίνεται ότι: } J_{4a-5e} &= J_{4e-5e} = 5.0 \text{ Hz} \\ J_{4a-5a} &> J_{4e-5a} \end{aligned}$$



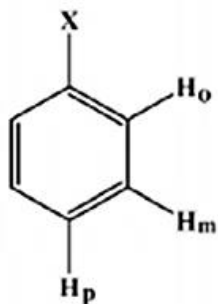
# Σύζευξη μεγάλης εμβέλειας (long range couplings)

Συζεύξεις

Υποκατεστημένα  
βενζόλια

Αλληλική σύζευξη

ομοαλληλική σύζευξη

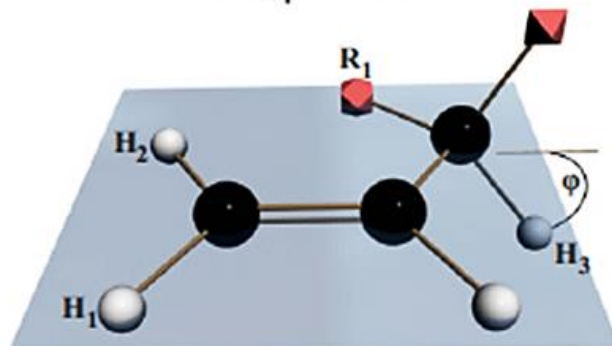


X=ενεργός πυρήνας

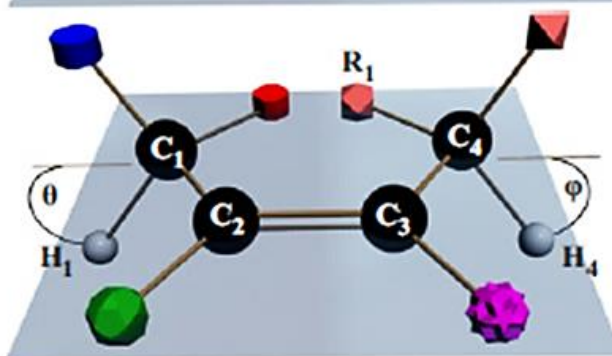
$$^3J_{H_o-X} = 6-10 \text{ Hz}$$

$$^4J_{H_m-X} = 1-3 \text{ Hz}$$

$$^5J_{H_p-X} = 0-1 \text{ Hz}$$



Όταν  
 $\phi = 0^\circ$  ή  $180^\circ$ ,  $^4J = 0$   
 $\phi = 90^\circ$   $^4J$  = μέγιστη αρνητική τιμή  
 $0^\circ < \phi < 90^\circ$  ή  $90^\circ < \phi < 180^\circ$  τιμή  
 μεταξύ 0 και μέγιστης  
 Η  $J_{H1-H3}$  ονομάζεται transoid (td)  
 και η  $J_{H2-H3}$  ονομάζεται cisoid (cd).



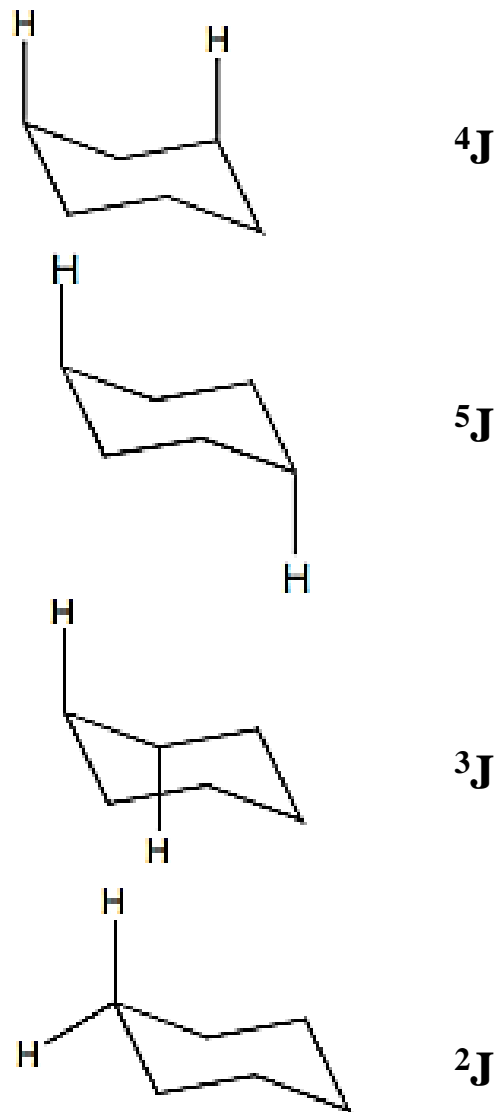
$^5J_{H1-H4}$  ονομάζεται ομοαλληλική  
 σύζευξη

## ❖ Σύζευξη μεγάλης εμβέλειας

- Αλληλεπίδραση H που απέχουν 4 ή 5 δεσμούς  
**(0.1-3Hz)**
- Συχνά στα **π συστήματα**
- Λιγότερο συχνά σε κορεσμένα συστήματα  
όπως δεσμοί C-H και C-C με καθορισμένη  
διάταξη

## Άσκηση 2

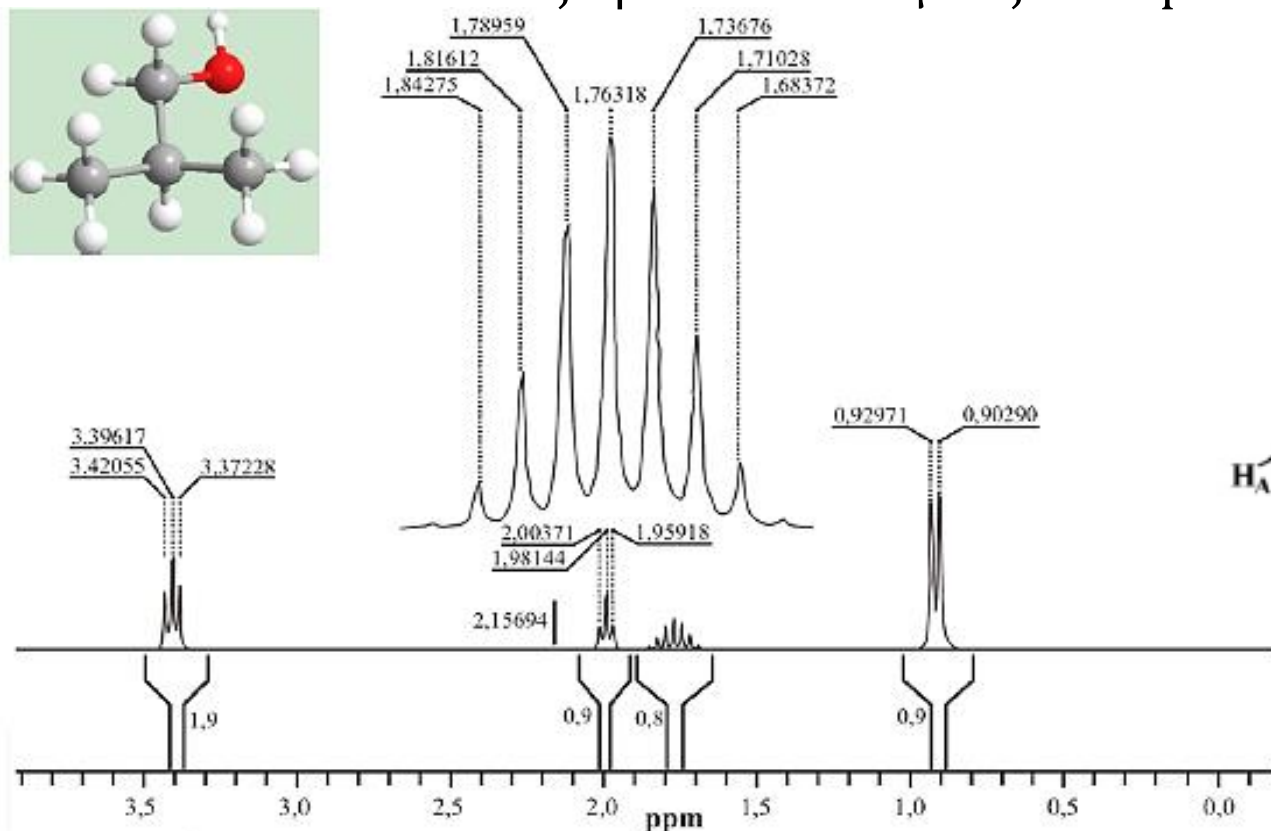
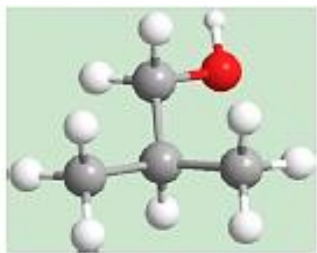
Να ονοματίσετε τις συζεύξεις μεταξύ των πρωτονίων που παριστάνονται παρακάτω.



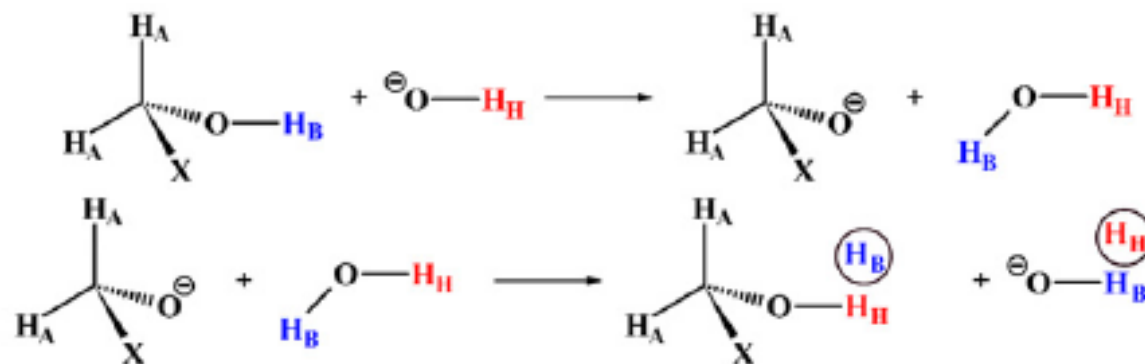
# Χημική Ανταλλαγή

Το σήμα συντονισμού για το **-OH** της αλκοόλης είναι μία **απλή, ευρεία κορυφή** όταν υπάρχουν προσμίξεις στο διάλυμά της αλλά είναι μία **τριπλή κορυφή** όταν βρίσκεται σε **απόλυτα καθαρή** μορφή.

Το πρωτόνιο του -OH λόγω της **βραχύτατης παραμονής** του στο μόριο της αλκοόλης αδυνατεί να «δει» τους προσανατολισμούς των spin των γειτονικών πρωτονίων!

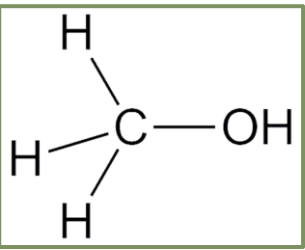


Σχήμα 3.4.1.  $^1\text{H}$  NMR φάσμα ισοβουτυλικής αλκοόλης απαλλαγμένης από όξινες ή βασικές προσμίξεις.



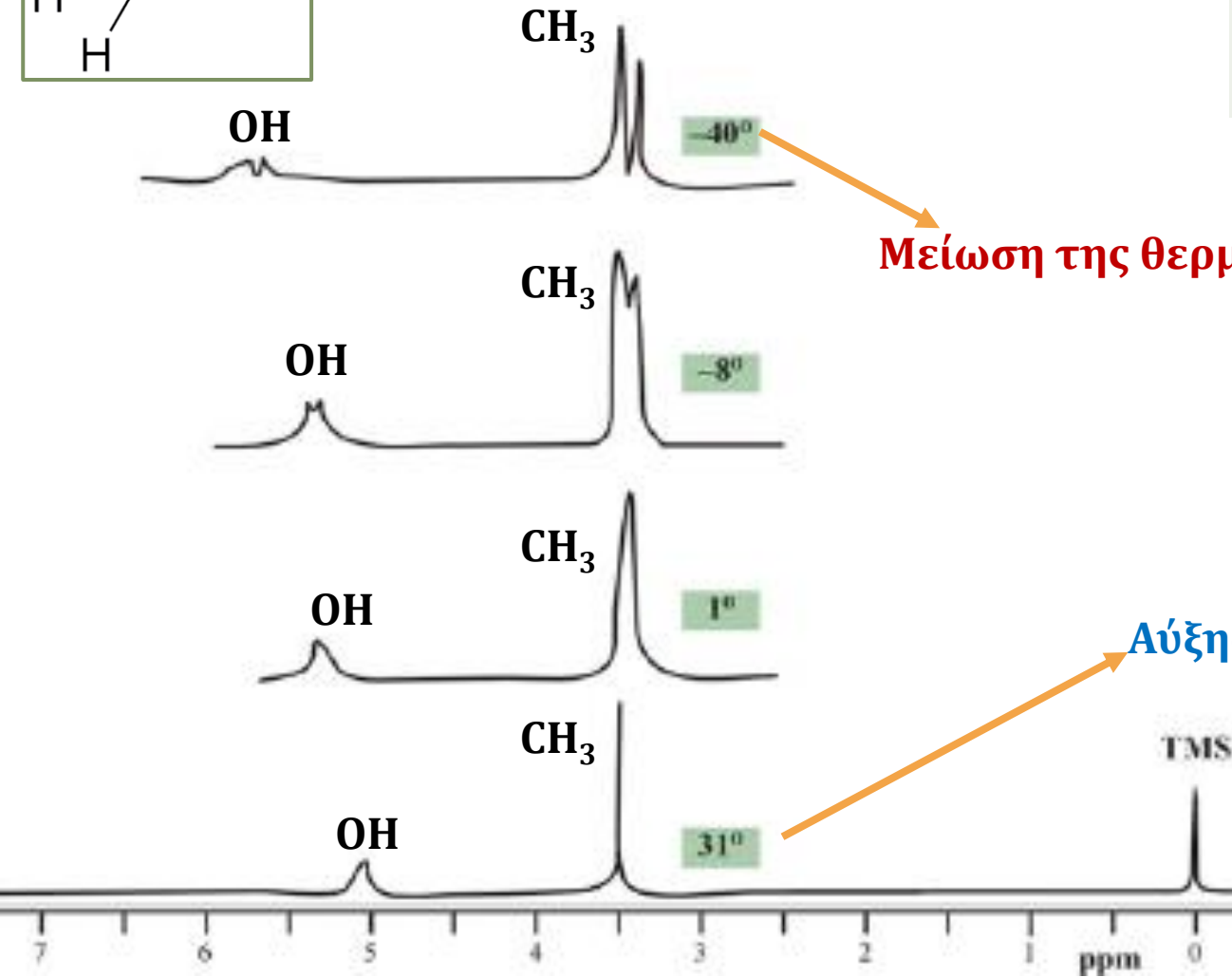
Σε βασικό περιβάλλον το πρωτόνιο του **-OH** επανέρχεται στην προηγούμενη κατάσταση με spin  $\uparrow$  ή  $\downarrow$

Ταχεία εναλλαγή spin  $\rightarrow$  καμία σύζευξη με γειτονικά πρωτόνια!



# Χημική Ανταλλαγή

Η ταχύτητα της χημικής ανταλλαγής εξαρτάται από την θερμοκρασία.



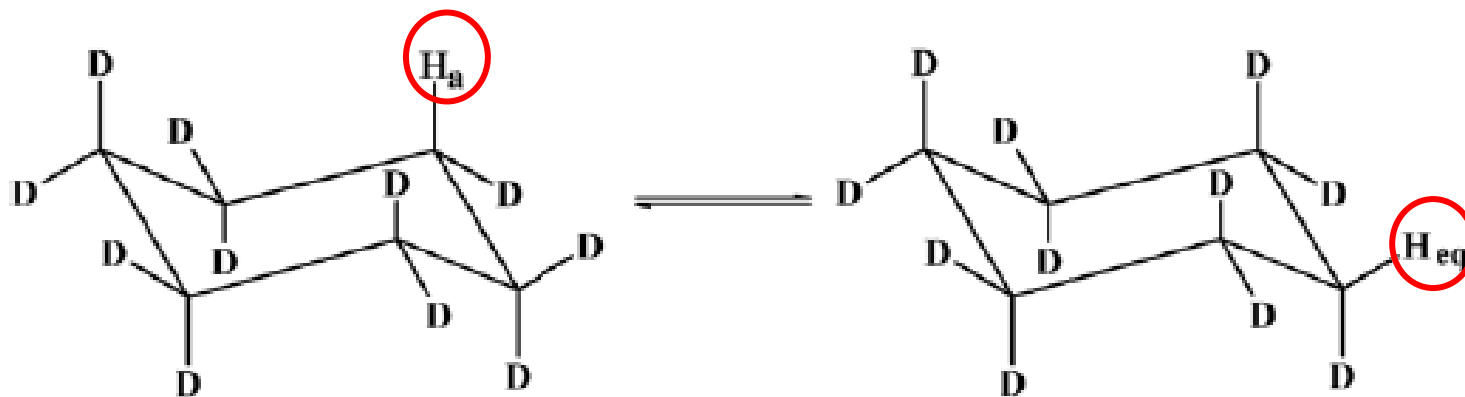
Μείωση της θερμοκρασίας  $\rightarrow$  μείωση ταχύτητας ανταλλαγής  $\rightarrow$  Σύζευξη spin

Αύξηση θερμοκρασίας  $\rightarrow$  αύξηση ταχύτητας ανταλλαγής  $\rightarrow$  Αποσύζευξη spin

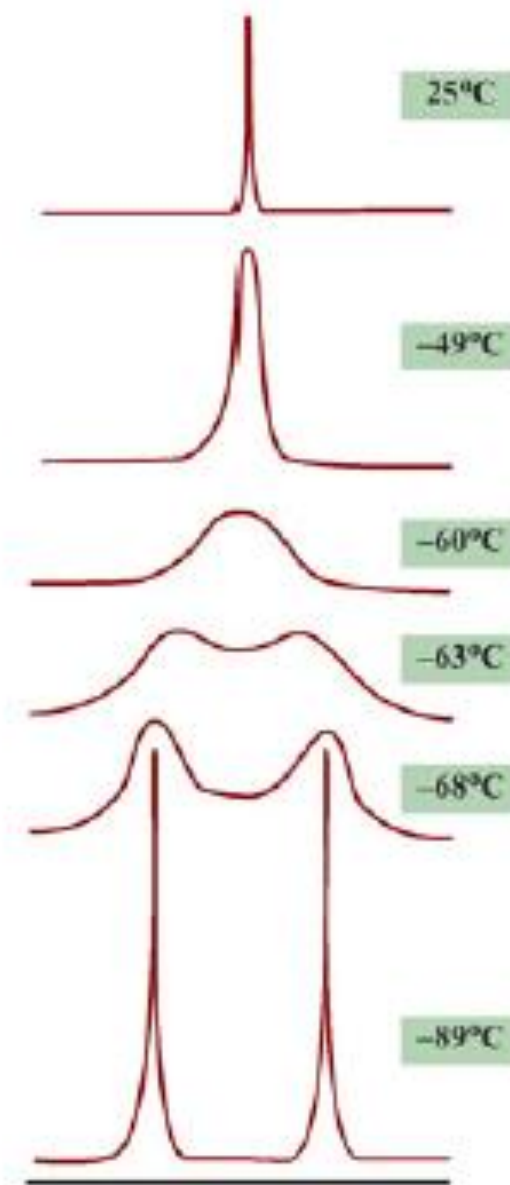
Φάσμα  $^1\text{H}$  NMR καθαρής μεθανόλης σε διάφορες θερμοκρασίες ( $J_{\text{CH}_3\text{-OH}} = 5.2 \text{ Hz}$ )

Ανταλλαγή συμβαίνει και σε ενώσεις που διαθέτουν  $-\text{NH}_2$ .

## Άσκηση 3

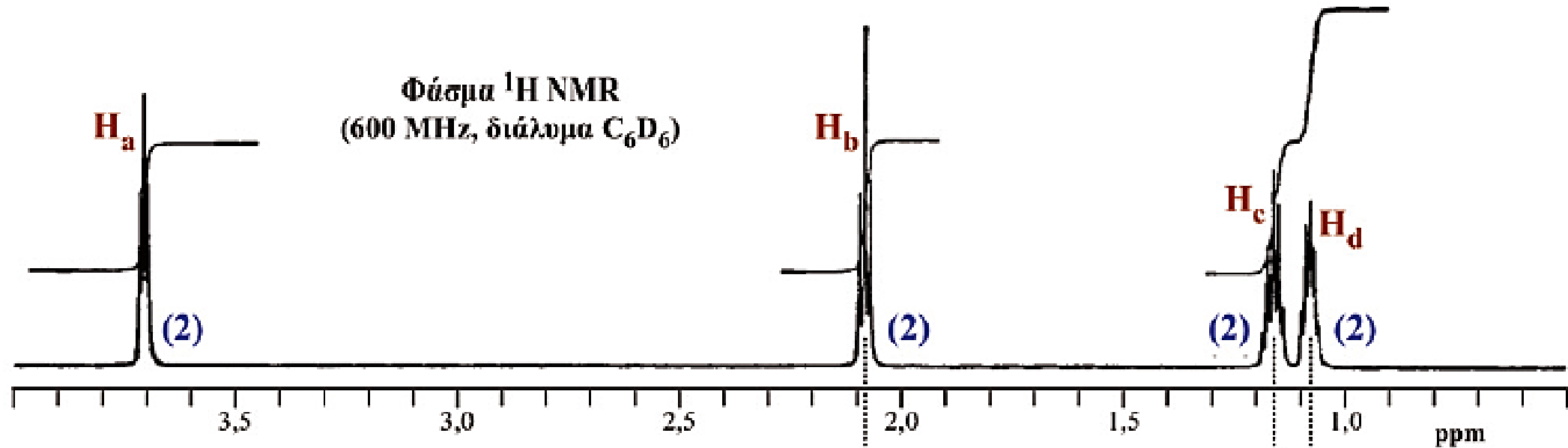


Σχήμα 4.1.2. Διαμορφωμερή του  $d,l$ -κυκλοεξανίου.



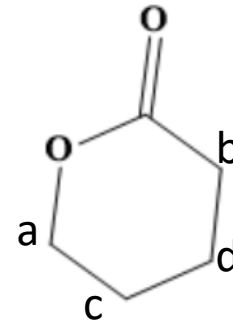
# Μεθοδολογία επίλυσης φασμάτων που περιέχουν σχέσεις

Δίνεται η ένωση με μοριακό τύπο  $C_5H_8O_2$  και το φάσμα της. Ποιος είναι ο συντακτικός της τύπος;



$$F = \frac{2m+2-(n-r-s)}{2} \quad F = 2$$

- Ακορεστότητα
- Αριθμός σημάτων
- Θέση σημάτων
- Ολοκλήρωση σημάτων
- Πολλαπλότητα σημάτων



## Άσκηση 4

Ένωση με μοριακό τύπο  $C_2H_4O$  εμφανίζει **2 σήματα** στο φάσμα πρωτονίου NMR. Το ένα σήμα είναι **διπλή κορυφή** στα **2.1 ppm** και το άλλο **τετραπλή κορυφή** στα **9.7 ppm**.  
Προσδιορίστε τον συντακτικό τύπο της ένωσης

- ✓ Ακορεστότητα
- ✓ Αριθμός σημάτων
- ✓ Θέση σημάτων
- ✓ Ολοκλήρωση σημάτων
- ✓ Πολλαπλότητα σημάτων



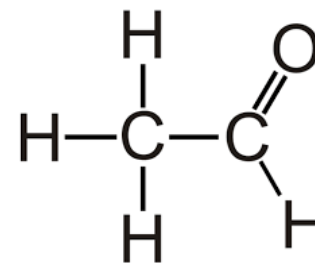
Βαθμός Ακορεστότητας =  $F = \sum \{\text{πολλαπλοι δεσμοι} + \text{δακτύλιοι}\} =$

$$F = \frac{2m+2 - (n - r - s)}{2}$$

$$F = \frac{2 \times 2 + 2 - (4 - 0 - 0)}{2} = 1$$



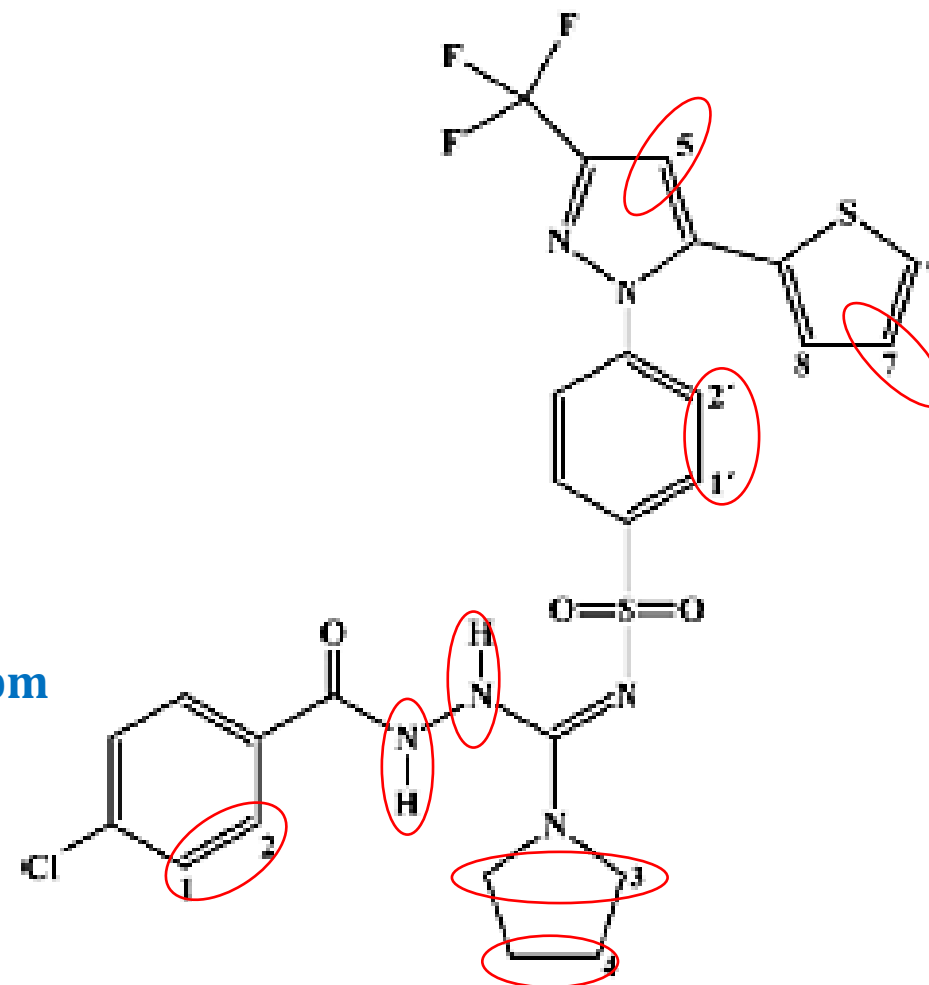
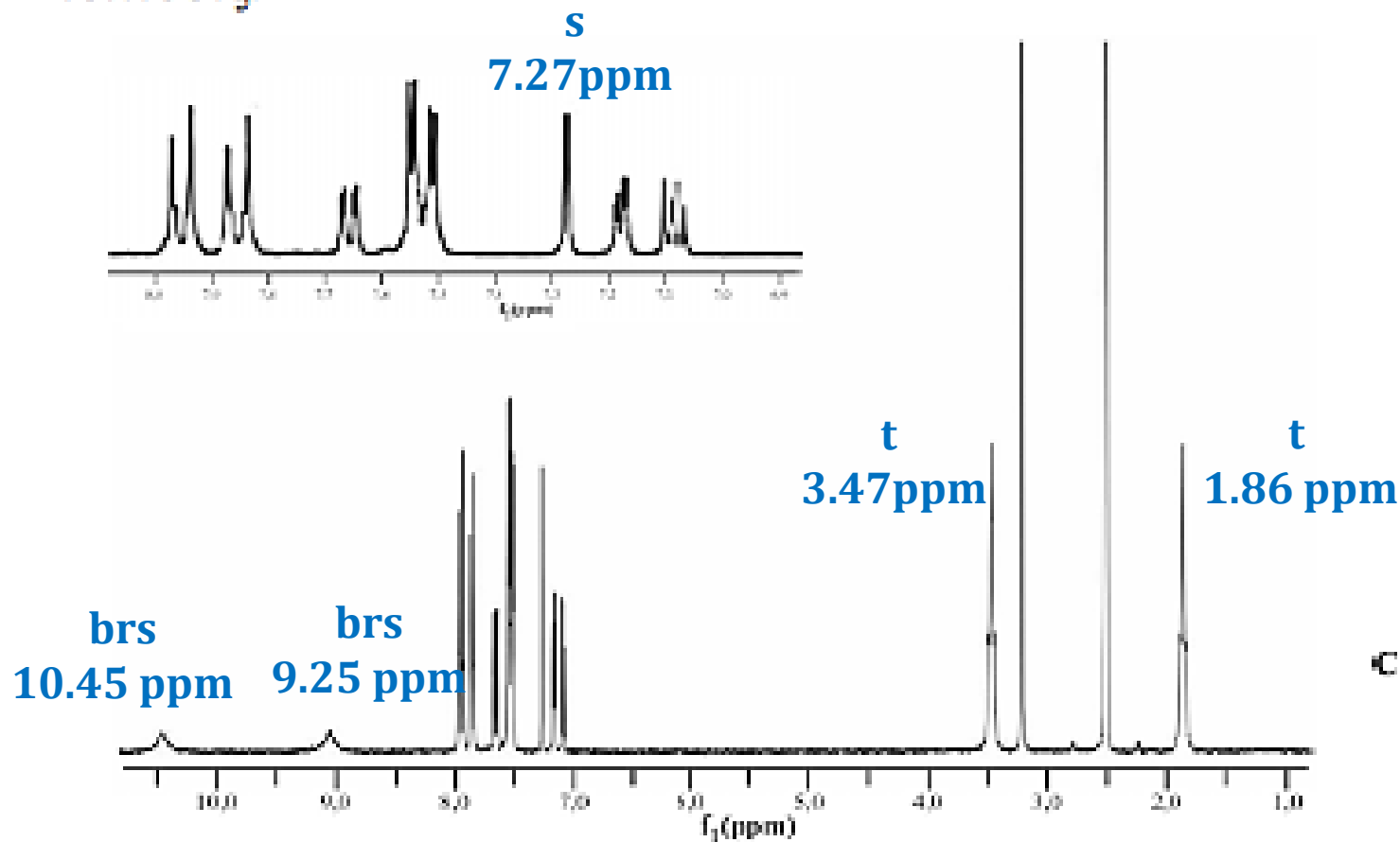
1 διπλός δεσμός





## Παράδειγμα 6

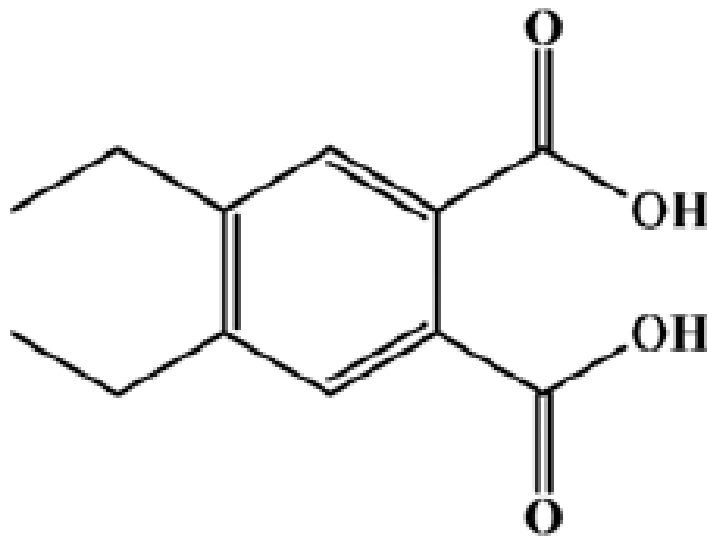
Να ταυτοποιήσετε το ακόλουθο μόριο με βάση τις πολλαπλότητες των κορυφών και τις χημικές του μετατοπίσεις.



Ο συντονισμός της τριπλής κορυφής στα 1,86 ppm οφείλεται στα τέσσερα υδρογόνα (4) (t, 4H) και αυτός της τριπλής κορυφής στα 3,47 ppm οφείλεται στα τέσσερα υδρογόνα (3) (t, 4H). Αυτά συντονίζονται σε χαμηλότερο πεδίο γιατί γειτνιάζουν με το ηλεκτραρνητικό άζωτο. Οι κορυφές στα  $\approx 2,5$  ppm και  $\approx 3,3$  ppm οφείλονται στο δευτεριωμένο DMSO και το νερό το οποίο περιέχει αντίστοιχα. Η απλή κορυφή στα 7,27 (s, 1H) οφείλεται στο υδρογόνο (5). Είναι απλή κορυφή γιατί το υδρογόνο δεν συζευγνύεται με άλλα γειτονικά υδρογόνα. Οι ευρείες κορυφές στα 9,05 ppm και 10,45 ppm αντιστοιχούν στα υδρογόνα CONH και CONH<sub>2</sub> αντίστοιχα. Το CONH<sub>2</sub> γειτνιάζει με περισσότερα ηλεκτραρνητικά άζωτα και επομένως θα συντονίζεται σε χαμηλότερο πεδίο. Τα τέσσερα πρωτόνια 1',2' λόγω συντονισμού επηρεάζονται από ισχυρούς ηλεκτρονιοδέκτες σε ορθο-θέση και θα συντονίζονται σε χαμηλό πεδίο στα 7,91 ppm (dd, 4H). Αντίστοιχα τα τέσσερα πρωτόνια (1,2) θα συντονίζονται στα 7,53 ppm (dd, 4H) αφού επηρεάζονται λόγω συντονισμού από ασθενέστερους ηλεκτρονιοδέκτες. Το υδρογόνο (7) λόγω συντονισμού αποκτά αρνητικό φορτίο και θα συντονίζεται στα 7,09 ppm (dd, 1H). Το υδρογόνο (6) το οποίο είναι πλησιέστερα στο ηλεκτραρνητικό θείο θα συντονίζεται στα 7,66 ppm (dd, 4H) και αυτό το οποίο θα συντονίζεται στα 7,18 ppm θα είναι το (8) (dd, 1H).

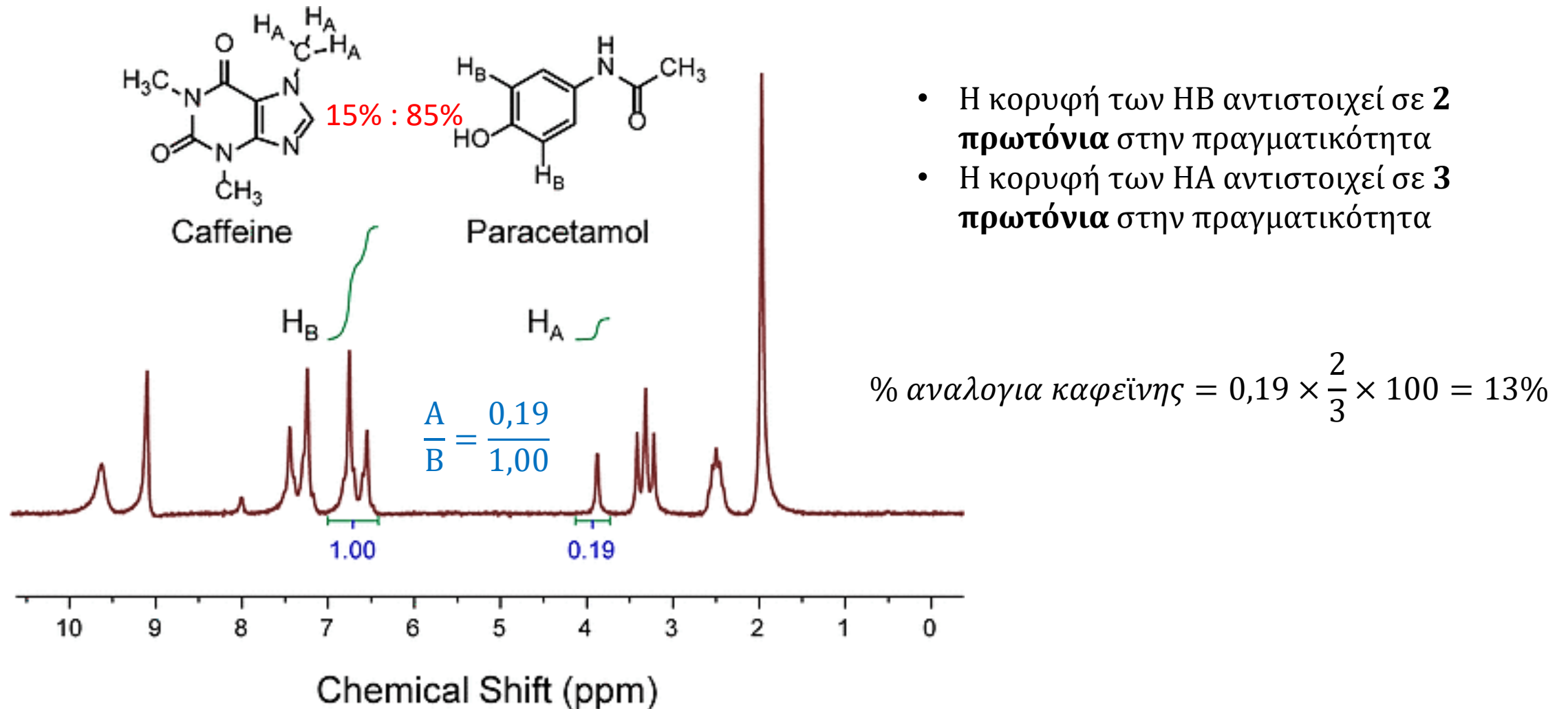
## Άσκηση 5

Μια αρωματική ένωση με μοριακό τύπο  $C_{12}H_{14}O_4$  είναι τετραυδροϋποκατεστημένη με 2 όμοιους υποκατάστατες να είναι σε **-όρθο υποκατάσταση** μεταξύ τους. Στην μη αρωματική περιοχή εμφανίζεται μια **τριπλή κορυφή** και μια **τετραπλή κορυφή**. Προσδιορίστε την ένωση.



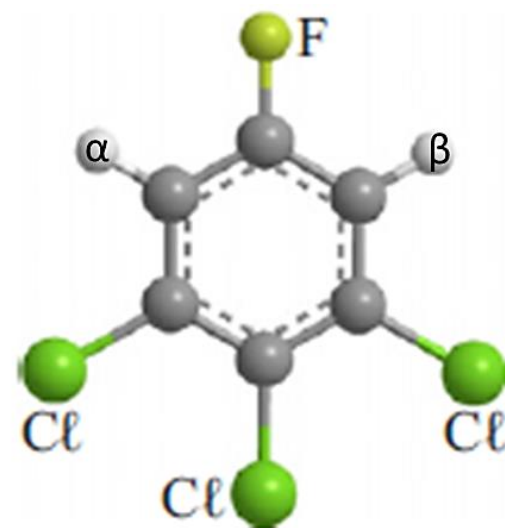
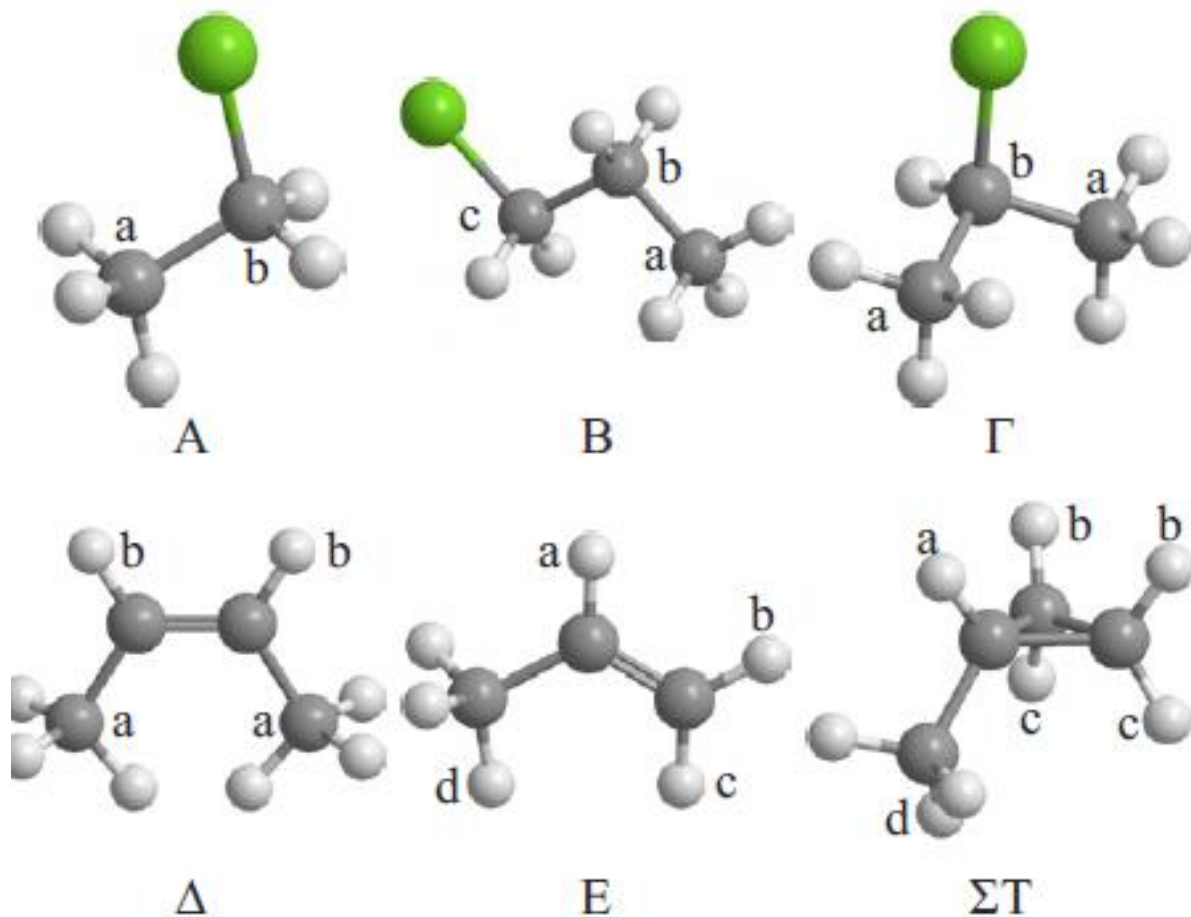
# Ποσοτικοποίηση ένωσης με χρήση NMR

Ποσοτικοποίηση καφεΐνης και παρακεταμόλης σε μίγμα αυτών



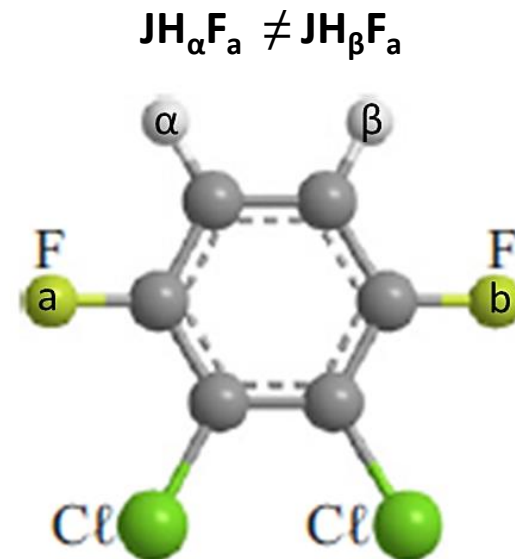
# Χημική και Μαγνητική Ισοδυναμία

Μαγνητικά ισοδύναμοι είναι δύο πυρήνες α και β, όταν **είναι χημικά ισοδύναμοι**, δηλαδή  $\nu_\alpha = \nu_\beta$ , και παρουσιάζουν **ίδια σταθερά σύζευξης με όλους τους άλλους μαγνητικούς πυρήνες** στο μόριο.  $J_{\alpha\gamma} = J_{\beta\gamma}$ .



A: 1-φθορο-3,4,5-τριχλωρο-βενζόλιο

Χημικά & Μαγνητικά ισοδύναμα



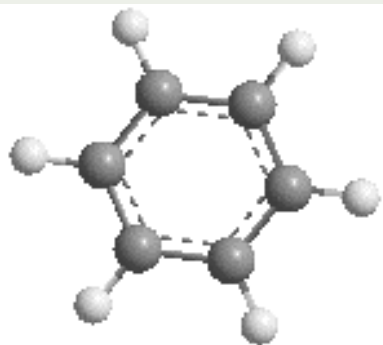
B: 1,4-διφθορο-2,3-διχλωρο-βενζόλιο

Χημικά ισοδύναμα  
Μαγνητικά μη ισοδύναμα

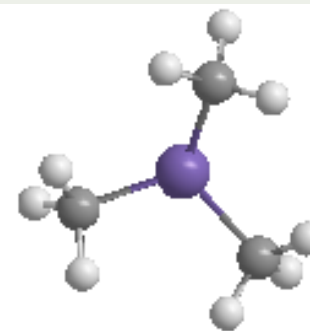
$$J_{\alpha F_a} \neq J_{\beta F_a}$$

# Χημική και Μαγνητική Ισοδυναμία

Αν όλοι οι πυρήνες είναι χημικά ισοδύναμοι σε ένα μόριο, είναι και μαγνητικά ισοδύναμοι

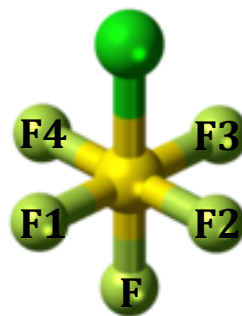
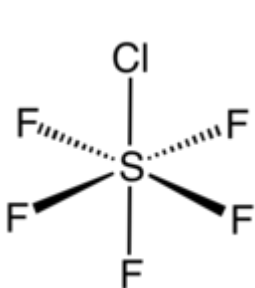


Βενζόλιο



Τριμεθυλοσιλάνιο  
(TMS)

Δεν είναι απαραίτητο όλοι οι πυρήνες να συζευγνύονται ισοδύναμα μεταξύ τους για να είναι μαγνητικά ισοδύναμοι



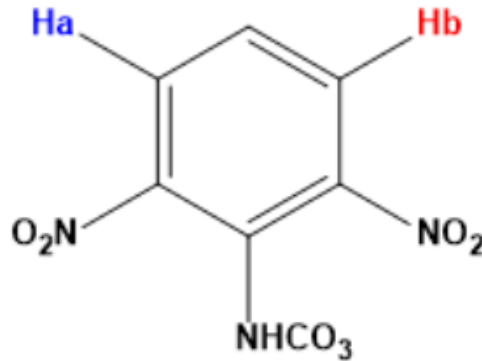
$$J_{F1-F3} = J_{F2-F4} \text{ (trans)}$$

$$J_{F1-F2} = J_{F2-F3} = J_{F3-F4} = J_{F4-F1} \text{ (cis)}$$

$$J_{F1-F} = J_{F2-F} = J_{F3-F} = J_{F4-F}$$

## Άσκηση 6

Δίνεται η παρακάτω χημική ένωση: Μπορείτε να δικαιολογήσετε γιατί η χημική μετατόπιση των  $H_a$  και  $H_b$  δεν είναι η ίδια;



Λόγω του υδρογονικού δεσμού μεταξύ  $-NHCH_3$  και  $-NO_2$  οπότε τα  $H_a$  και  $H_b$  αποκτούν μαγνητική ανισοδυναμία.

**Μαγνητικά ισοδύναμοι** είναι δύο πυρήνες  $\alpha$  και  $\beta$ , όταν είναι χημικά ισοδύναμοι, δηλαδή  $\nu_\alpha = \nu_\beta$ , και παρουσιάζουν ίδια σταθερά σύζευξης με όλους τους άλλους μαγνητικούς πυρήνες στο μόριο.  $J_{\alpha\gamma} = J_{\beta\gamma}$ .

# Βιβλιογραφία

**«Πυρηνικός Μαγνητικός Συντονισμός» Θ. Μαυρομούστακος, Α. Τζάκος, Γ. Σπυρούλιας, Ε. Μικρός, Α. Κολοκούρης, Κ. Παπακωνσταντίνου, Ι. Γεροθανάσης, Ι. Ματσούκας. Εκδόσεις Συμμετρία 2019. ISBN 978-960-266-504-6.**