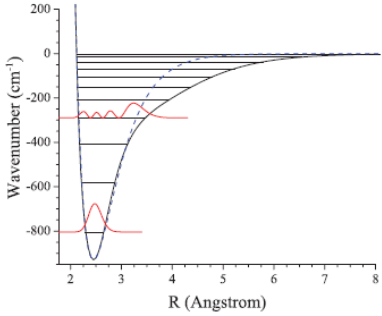


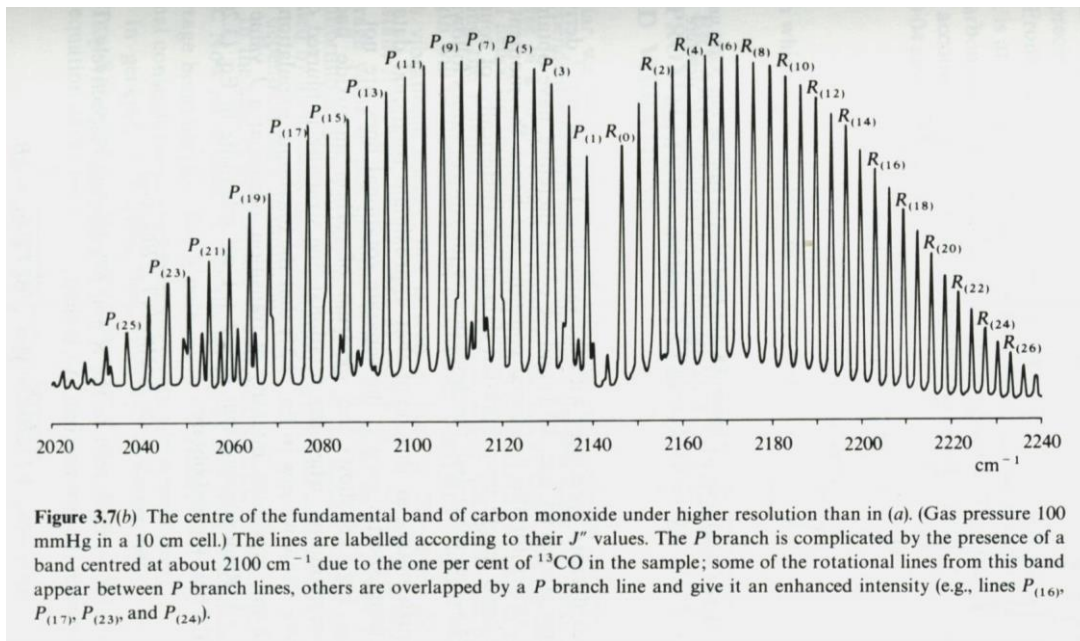
## ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΕΙΑ Ι (ΧΗΜ-048)

### ΜΟΡΙΑΚΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ

#### **Ομάδα ασκήσεων 5 : Δονητική-Περιστροφική φασματοσκοπία IR-Raman**

1. Ποια από τα ακόλουθα μόρια είναι δυνατόν να εμφανίζουν δονητικό φάσμα απορρόφησης;  
 $H_2, N_2, CO_2, NO, OCS, H_2O, N_2O, CH_2=CH_2, CH_4, C_6H_6$
  2. Η θεμελιώδης συχνότητα ταλάντωσης των  $H_2$  και  $D_2$  είναι αντίστοιχα  $4159.5\text{ cm}^{-1}$  και  $2990.3\text{ cm}^{-1}$ .  
Να υπολογισθεί η σταθερά δύναμης του δεσμού στα δύο μόρια υποθέτοντας ότι ισχύει το μοντέλο του μονοδιάστατου αρμονικού ταλαντωτή και ότι το μήκος του δεσμού δεν μεταβάλλεται μεταξύ των δύο ισοτοπομερών.
  3. Στο μόριο του ιωδίου,  $I_2$ , η δονητική συχνότητα ισορροπίας είναι :  $\tilde{\nu}_e = 215\text{ cm}^{-1}$  και η παράμετρος αναρμονικότητας  $x_e = 0.003$ . Να προσδιορισθεί η αναλογία πληθυσμών στις κβαντικές καταστάσεις  $v: 0, 1, 2$  σε θερμοκρασία 80, 300 και 500 K.
  4. Να παρασταθεί γραφικά (Origin) η καμπύλη δυναμικού Morse για το υδρίδιο του ρουβιδίου,  $RbH$ .  
Δίνονται :  $\tilde{\nu}_e = 936.8\text{ cm}^{-1}$ ,  $\tilde{\nu}_e x_e = 14,15\text{ cm}^{-1}$ ,  $R_e = 2,367\text{ \AA}$  (πεδίο τιμών R: 0.5-8  $\text{\AA}$ ).
  5. Η βασική ( $v: 1 \leftarrow 0$ ) και η πρώτη υπερτονική ( $v: 2 \leftarrow 0$ ) από τις μεταπτώσεις στο ταλαντωτικό φάσμα του  $^{14}N^{16}O$  εμφανίζονται σε συχνότητα  $1876.06\text{ cm}^{-1}$  και  $3724.20\text{ cm}^{-1}$  αντίστοιχα. Να υπολογισθούν α) η δονητική συχνότητα ισορροπίας  $\tilde{\nu}_e$ , β) η παράμετρος αναρμονικότητας  $x_e$ , γ) η τιμή της ενέργειας μηδενικού σημείου (zero point energy),  $E_0$  και δ) η σταθερά δεσμού,  $k$ , του μορίου.
  6. α) Να αναλύσετε το διάγραμμα, που παρουσιάζει το δυναμικό του διατομικού  $Be_2$ , εξάγοντας τις σχετικές μοριακές πληροφορίες.  
β) Να προσδιορίσετε την περιστροφική σταθερά  $B_0$  και τη μετατόπιση συχνότητας της πρώτης κορυφής στο περιστροφικό φάσμα (Stokes) Raman.
- 
7. α) Στο διατομικό μόριο  $^{127}I^{19}F$ , η δονητική συχνότητα ισορροπίας είναι :  $\tilde{\nu}_e = 610.258\text{ cm}^{-1}$  και ο όρος αναρμονικότητας  $\tilde{\nu}_e x_e = 3.141\text{ cm}^{-1}$ . Να προσδιορίσετε την ενέργεια διάσπασης ( $D_0$ ) καθώς και τη σταθερά δύναμης,  $k$  του δεσμού IF.  
β) Δίδονται επίσης  $B_e = 0.279711\text{ cm}^{-1}$  και  $a_e = 0.001874\text{ cm}^{-1}$ . Να προσδιορίσετε το μήκος δεσμού στα δονητικά επίπεδα  $v=0, v=1$  και  $v=10$ .  
γ) Να αναγράψετε τις γενικές σχέσεις, που δίνουν τις θέσεις των κορυφών στους κλάδους P και R της υπερτονικής μετάβασης ( $v=0 \rightarrow v=2$ ) και στη συνέχεια να προσδιορίσετε τις τιμές συχνότητας ( $\text{cm}^{-1}$ ) που εμφανίζονται οι κορυφές P( $J = c$ ) και R( $J = d$ ).  
J : το αρχικό περιστροφικό επίπεδο της μετάβασης,  
c, d : ψηφία του αριθμού μητρώου σας, AM = a b c d (π.χ. AM=5072  $\rightarrow$  c=7, d=2).  
δ) Με βάση στοιχεία που δίνονται (ή έχετε προσδιορίσει) στο πρόβλημα, να παραστήσετε γραφικά την καμπύλη του δυναμικού Morse για το IF (άξονας x/Angström, άξονας y/ $\text{cm}^{-1}$ ).

8. Να αναλύσετε πλήρως [ν<sub>0</sub>, B<sub>0</sub>, B<sub>1</sub>, T] το δονητικό-περιστροφικό φάσμα του CO.



9. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται τμήμα του δονητικού ( $\Delta v = +1$ ) περιστροφικού φάσματος απορρόφησης IR του HBr.

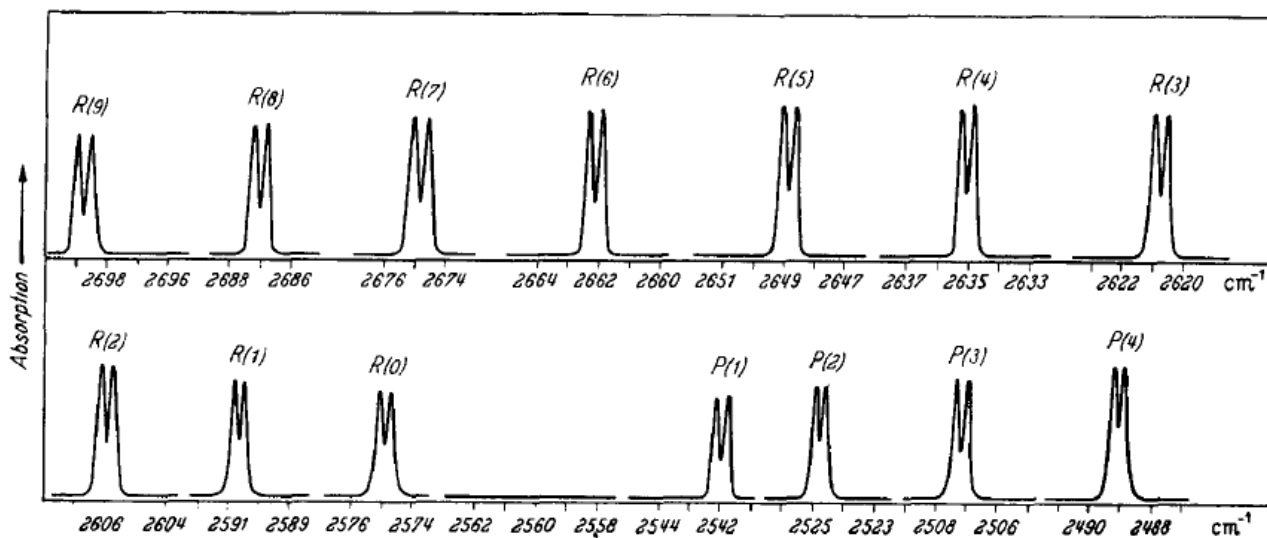


Fig. 1. Part of the fundamental band of hydrogen bromide, showing the isotopic splitting.

α) Να ερμηνεύσετε τη μορφή του φάσματος με βάση κατάλληλο ενεργειακό διάγραμμα.

β) Να προσδιορίσετε τις τιμές των σταθερών περιστροφής  $B(v)$  και  $B(v+1)$  και το αντίστοιχο μήκος δεσμού.

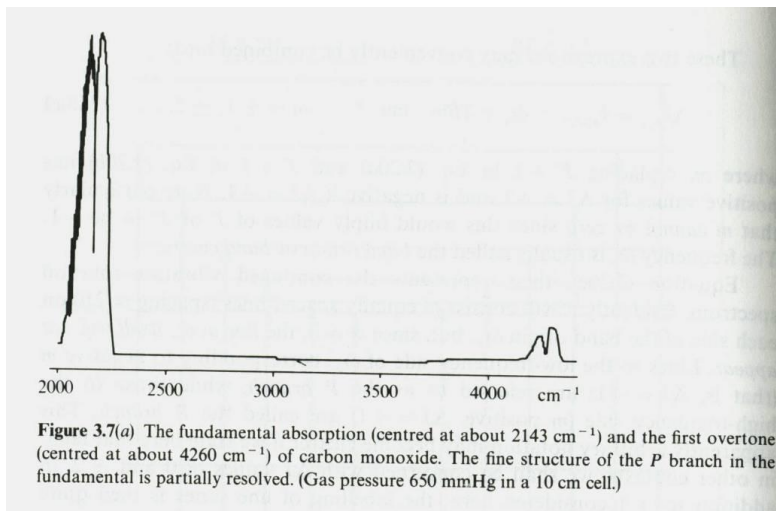
Υπόδειξη: Να κάνετε τα κατάλληλα διαγράμματα με βάση τη μέθοδο των συνδυασμένων διαφορών. Θα πρέπει να αποδείξετε τη σχέση που θα χρησιμοποιήσετε.

γ) Να προσδιορίσετε τις τιμές  $B_e$  και  $a_e$ .

δ) Να προσδιορίσετε από τα φασματικά δεδομένα την αναλογία ισωτόπων Br.

ε) Να αναπαραστήσετε (απορρόφηση ως προς συχνότητα σε  $\text{cm}^{-1}$ ) τον κλάδο P (P(1) ως P(10)) για το DBr σε θερμοκρασία 500 K.

10. α) Με βάση το εικονιζόμενο φάσμα απορρόφησης IR του CO να προσδιορίσετε τα μεγέθη εκείνα που επιτρέπουν τη γραφική αναπαράσταση του δυναμικού Morse για τη θεμελιώδη ηλεκτρονική κατάσταση του CO.
- β) Στη συνέχεια να δείξετε γραφικά την εξάρτηση του δυναμικού από τη διαπυρηνική απόσταση για το CO και να σημειώσετε στο διάγραμμα τα δονητικά επίπεδα με  $v=1, 2, \dots, 10$ .
- γ) Ποιά είναι η ενέργεια διάσπασης του δεσμού;
- δ) Να προσδιορίσετε τη θερμοκρασία του αερίου (στο βαθμό που αυτό είναι εφικτό από το φάσμα χαμηλής ανάλυσης που έχετε).



11. Έστω  $\nu=5 \times AM \times 10^{11} \text{ Hz}$  ( $AM$ =αριθμός μητρώου σας) η συχνότητα της διεγείρουσας σε μέτρηση του δονητικού φάσματος Raman του CO. Να δείξετε διαγραμματικά το πλήρες (χαμηλής ανάλυσης) δονητικό φάσμα Raman (Προσοχή: άξονας  $x$  σε  $\lambda(\text{nm})$ ) που προκύπτει σημειώνοντας τις ταινίες Rayleigh, Stokes Raman και Anti-Stokes Raman.
12. Για το  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ , δίδονται:  $B_e = 1.9314 \text{ cm}^{-1}$ , και  $a_e = 0.01748 \text{ cm}^{-1}$ .
- α) Να αναγράψετε τη γενική σχέση, που δίνει τις θέσεις των κορυφών στον κλάδο Q του δονητικο-περιστροφικού φάσματος (Stokes) Raman.
- β) Να παραστήσετε γραφικά (ένταση συναρτήσει συχνότητας σε  $\text{cm}^{-1}$ ) τον κλάδο Q του δονητικού-περιστροφικού φάσματος Raman του CO, για τιμές  $J$  από 0 ως 20.  
Να θεωρήσετε ότι ένταση της σκεδαζόμενης είναι ανάλογη μόνο του σχετικού πληθυσμού σε κάθε στάθμη  $J$ .  
Δίδονται επίσης  $\lambda_{\text{laser}} = 514 \text{ nm}$ ,  $T=400 \text{ K}$ .
- γ) Να αναφέρετε σε ποια περιοχή συχνοτήτων αναμένετε να εμφανίζεται ο ίδιος κλάδος που αντιστοιχεί στο  $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$ .
13. Έστω  $\nu=6 \times 10^{14} \text{ Hz}$  η συχνότητα της διεγείρουσας σε πείραμα Raman και  $\nu_{\text{vib}}=AM(\text{cm}^{-1})$  η θεμελιώδης συχνότητα ταλάντωσης διατομικού (όπου  $AM$ , ο αριθμός μητρώου σας). Να δείξετε διαγραμματικά (origin) το συνολικό όρο της πόλωσης,  $p$ , που προκύπτει από την αλληλεπίδραση του ΗΠ του φωτός με την πολωσιμότητα ( $\alpha'E$ ) και να αποδείξετε ότι εμπεριέχει συνεισφορά από όρους που αντιστοιχούν στη σκέδαση Rayleigh και τη σκέδαση Raman (Stokes, Anti-Stokes).  
(Μία προσέγγιση είναι να αναλύσετε τη συνολική πόλωση κατά Fourier – υπάρχει τέτοια ρουτίνα στο origin).
14. Θεωρώντας ότι οι πληθυσμοί των δονητικών επιπέδων προσδιορίζονται από την κατανομή Boltzmann, να προσδιορίσετε τη θερμοκρασία του δείγματος  $\text{CCl}_4$ , με βάση το δονητικό φάσμα Raman, που συζητήθηκε στο μάθημα (βλέπε διαφάνειες μαθήματος).

15. Atkins ΦΧ : A11Γ.1 - A11Γ.8, Π11Γ.2, Π11Γ.4, Π11Γ.5, Π11Γ.7, Π11Γ.8, Π11Γ.10, Π11Γ.12, Π11Γ.15, Π11Γ.18.  
Atkins ΦΧ-2014 : A 12.17α,β, 12.18 α, β, 12.19 α, β, 12.23 α, β και Π 12.9, 12.11, 12.12.  
Atkins ΦΧ II : A 18,18, 18.23, 18.25, 18.27, 18.28 και Π 18.7, 18.12.
16. Το δονητικό-περιστροφικό φάσμα Raman του O<sub>2</sub> δίνεται στις διαφάνειες του μαθήματος.  
α) Να προσδιορίσετε τη θεμελιώδη συχνότητα δόνησης.  
β) Λαμβάνοντας υπόψη το spin του πυρήνα του οξυγόνου και την ηλεκτρονιακή κυματοσυνάρτηση της θεμελιώδους κατάστασης του O<sub>2</sub>, να αιτιολογήσετε γιατί στο φάσμα παρατηρούνται μεταβάσεις που αντιστοιχούν μόνο σε περιττές τιμές του J (σε αντίθεση με το CO<sub>2</sub>).  
γ) Από το φάσμα να προσδιορίσετε την τιμή της σταθεράς περιστροφής B που αντιστοιχεί στο δονητικό επίπεδο v=0 και v=1.

**TABLE 19.3 VALUES OF MOLECULAR CONSTANTS FOR SELECTED DIATOMIC MOLECULES**

	$\tilde{\nu}$ (cm <sup>-1</sup> )	$\nu$ (s <sup>-1</sup> )	$x_e$ (pm)	$k$ (N m <sup>-1</sup> )	$B$ (cm <sup>-1</sup> )	$D_0$ (kJ mol <sup>-1</sup> )	$D_0$ (J molecule <sup>-1</sup> )
H <sub>2</sub>	4401	$1.32 \times 10^{14}$	74.14	575	60.853	436	$7.24 \times 10^{-19}$
D <sub>2</sub>	3115	$9.33 \times 10^{13}$	74.15	577	30.444	443	$7.36 \times 10^{-19}$
<sup>1</sup> H <sup>81</sup> Br	2649	$7.94 \times 10^{13}$	141.4	412	8.4649	366	$6.08 \times 10^{-19}$
<sup>1</sup> H <sup>35</sup> Cl	2991	$8.97 \times 10^{13}$	127.5	516	10.5934	432	$7.17 \times 10^{-19}$
<sup>1</sup> H <sup>19</sup> F	4138	$1.24 \times 10^{14}$	91.68	966	20.9557	570	$9.46 \times 10^{-19}$
<sup>1</sup> H <sup>127</sup> I	2309	$6.92 \times 10^{13}$	160.92	314	6.4264	298	$4.95 \times 10^{-19}$
<sup>35</sup> Cl <sub>2</sub>	559.7	$1.68 \times 10^{13}$	198.8	323	0.2440	243	$4.03 \times 10^{-19}$
<sup>79</sup> Br <sub>2</sub>	325.3	$9.75 \times 10^{12}$	228.1	246	0.082107	194	$3.22 \times 10^{-19}$
<sup>19</sup> F <sub>2</sub>	916.6	$2.75 \times 10^{13}$	141.2	470	0.89019	159	$2.64 \times 10^{-19}$
<sup>127</sup> I <sub>2</sub>	214.5	$6.43 \times 10^{12}$	266.6	172	0.03737	152	$2.52 \times 10^{-19}$
<sup>14</sup> N <sub>2</sub>	2359	$7.07 \times 10^{13}$	109.8	2295	1.99824	945	$1.57 \times 10^{-18}$
<sup>16</sup> O <sub>2</sub>	1580.	$4.74 \times 10^{13}$	120.8	1177	1.44563	498	$8.27 \times 10^{-19}$
<sup>12</sup> C <sup>16</sup> O	2170.	$2.56 \times 10^{13}$	112.8	1902	1.9313	1076	$1.79 \times 10^{-18}$

Source: Lide, D. R., Ed., *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 83rd Edition. CRC Press, Boca Raton, FL, 2003.

© 2010 Pearson Education, Inc.

**Επίλυση άσκησης** (από τη 2<sup>η</sup> πρόοδο του μαθήματος (τύπου take home) κατά το ακαδ. έτος 2014-15).

α) Στο διατομικό μόριο  $^{107}\text{Ag}^1\text{H}$ , η δονητική συχνότητα ισορροπίας είναι :  $\tilde{\nu}_e = 1663.6 \text{ cm}^{-1}$  και ο όρος αναρμονικότητας  $\tilde{\nu}_e x_e = 87 \text{ cm}^{-1}$ . Να προσδιορίσετε την ενέργεια διάσπασης ( $D_0$ ) καθώς και τη σταθερά δύναμης,  $k$  του δεσμού  $\text{AgH}$ .

$$x_e = \frac{\tilde{\nu}_e}{4D_e (\text{cm}^{-1})} \Rightarrow D_e (\text{cm}^{-1}) = \frac{\tilde{\nu}_e}{4x_e} = \frac{(\tilde{\nu}_e)^2}{4\tilde{\nu}_e x_e} = \frac{(1663.6 \text{ cm}^{-1})^2}{4 \cdot 87 \text{ cm}^{-1}} \Rightarrow D_e = 7952.8 \text{ cm}^{-1} \quad (7952.7729)$$

$$D_0 = D_e - \frac{\tilde{\nu}_e}{2} + \frac{\tilde{\nu}_e x_e}{4} \Rightarrow D_0 = 7142.7 \text{ cm}^{-1} \quad (7142.723)$$

Στην περίπτωση του αρμονικού ταλαντωτή ισχύει :

$$\tilde{\nu}_o = \frac{1}{2\pi c} \sqrt{\frac{k}{\mu}} \Rightarrow k = (2\pi c \tilde{\nu}_o)^2 \mu \quad (\text{με τις μονάδες των μεγεθών στο SI}) \quad \text{ή}$$

$$\tilde{\nu}_o (\text{cm}^{-1}) \cong 130 \sqrt{\frac{k(N/m)}{\mu(\text{amu})}} \Rightarrow k(N/m) = (\tilde{\nu}_o / 130)^2 \mu(\text{amu})$$

Για τον υπολογισμό της σταθεράς δύναμης του δεσμού στην περίπτωση του αναρμονικού ταλαντωτή θεωρούμε ως  $\tilde{\nu}_o$  τη θεμελιώδη συχνότητα ταλάντωσης, δηλ.  $\tilde{\nu}_o = \tilde{\nu}_e - 2\tilde{\nu}_e x_e$ .

Επομένως για το  $^{107}\text{Ag}^1\text{H}$  έχουμε :  $\tilde{\nu}_o = \tilde{\nu}_e - 2\tilde{\nu}_e x_e = 1489.6 \text{ cm}^{-1}$  και  $\mu = \mu_{\text{Ag}} \mu_{\text{H}} / (\mu_{\text{Ag}} + \mu_{\text{H}}) = (107/108) \text{amu} = 0.99074074 \dots \text{amu}$ .

Εξ αυτών προκύπτει ότι :  $k = 129.6 \text{ N/m}$

β) Δίδονται επίσης  $B_e = 6.265 \text{ cm}^{-1}$  και  $\alpha_e = 0.203 \text{ cm}^{-1}$ . Να προσδιορίσετε το μήκος δεσμού στα δονητικά επίπεδα  $v=0$ ,  $v=1$  και  $v=5$ . (Να θεωρήσετε μηδενική φυγόκεντρη παραμόρφωση).

Λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση ταλαντωτικής και περιστροφικής κίνησης στον ελαστικό στροφέα (και αγνοώντας τη φυγόκεντρη παραμόρφωση) η έκφραση για την περιστροφική σταθερά σε κάθε ταλαντωτικό επίπεδο,  $v$ , είναι :

$$B_v = \left[ B_e - \alpha_e \left( v + \frac{1}{2} \right) \right]$$

Το μήκος δεσμού στη θέση ισορροπίας για κάθε ταλαντωτικό επίπεδο υπολογίζεται από τη σχέση :

$$B_v = \frac{\hbar^2}{2I_v} = \frac{\hbar^2}{2\mu r_v^2} \Rightarrow r_v = \frac{\hbar}{\sqrt{2\mu B_v}} \quad \text{ή} \quad r_v = \sqrt{\frac{16,8576}{\mu(\text{amu}) B_v (\text{cm}^{-1})}} \text{ \AA}$$

Κατά συνέπεια προκύπτει :

Για  $v = 0$ ,  $B_0 = 6.1635 \text{ cm}^{-1}$  και  $r_0 = 1.66156 \text{ Angstrom}$

Για  $v = 1$ ,  $B_1 = 5.9605 \text{ cm}^{-1}$  και  $r_1 = 1.68960 \text{ Angstrom}$

Για  $v = 5$ ,  $B_5 = 5.1485 \text{ cm}^{-1}$  και  $r_5 = 1.81793 \text{ Angstrom}$

Για  $v = 2$ ,  $B_2 = 5.7575 \text{ cm}^{-1}$  (για το ερώτημα γ)

γ) Να αναγράψετε τις γενικές σχέσεις, που δίνουν τις θέσεις των κορυφών στους κλάδους P και R της υπερτονικής μετάβασης ( $v=0 \rightarrow v=2$ ) και στη συνέχεια να προσδιορίσετε τις τιμές συχνότητας ( $\text{cm}^{-1}$ ) που εμφανίζονται οι κορυφές P( $J = c$ ) και R( $J = d$ ).

J : το αρχικό περιστροφικό επίπεδο της μετάβασης,

c, d : ψηφία του αριθμού μητρώου σας, AM = a b c d (π.χ. AM=5072  $\rightarrow$  c=7, d=2).

Για τον κλάδο P ισχύει:  $\Delta E_{v=0 \rightarrow 2, J \rightarrow J-1} = E_{2, J-1} - E_{0, J}$

$$\tilde{V}_{v=0 \rightarrow 2, P}(J) = 2\tilde{V}_e - 6x_e \tilde{V}_e - (B_2 + B_0)J + (B_2 - B_0)J^2 \quad \text{ή}$$

$$\tilde{V}_{v=0 \rightarrow 2, P}(J) = 2\tilde{V}_e - 6x_e \tilde{V}_e + B_2 J(J-1) - B_0 J(J+1)$$

Για τον κλάδο R:  $\Delta E_{v=0 \rightarrow 2, J \rightarrow J+1} = E_{2, J+1} - E_{0, J}$

$$\tilde{V}_{v=0 \rightarrow 2, R}(J) = 2\tilde{V}_e - 6x_e \tilde{V}_e + (B_2 + B_0)(J+1) + (B_2 - B_0)(J+1)^2 \quad \text{ή}$$

$$\tilde{V}_{v=0 \rightarrow 2, R}(J) = 2\tilde{V}_e - 6x_e \tilde{V}_e + B_2(J+1)(J+2) - B_0 J(J+1)$$

Έστω  $J=7$  ( $\rightarrow J=6$ ) για τον κλάδο P. Με αντικατάσταση των αριθμ. τιμών προκύπτει :  $2701.86 \text{ cm}^{-1}$ .

Έστω  $J=2$  ( $\rightarrow J=3$ ) για τον κλάδο R. Με αντικατάσταση των αριθμ. τιμών προκύπτει :  $2837.31 \text{ cm}^{-1}$ .

δ) Με βάση στοιχεία που δίνονται (ή έχετε προσδιορίσει) στο πρόβλημα, να παραστήσετε γραφικά την καμπύλη του δυναμικού Morse για το AgH (άξονας x/Angstrom, άξονας y/  $\text{cm}^{-1}$ , να παραθέσετε τη συνάρτηση που χρησιμοποιήσατε).

Η καμπύλη του δυναμικού Morse περιγράφεται από τη σχέση :

$V(r) = D_e \left(1 - e^{-\beta(r-r_0)}\right)^2$  όπου  $r_0$  είναι το μήκος του δεσμού στη θέση ισορροπίας και  $r$  (μεταβλητή) το μήκος του δεσμού κατά την ταλάντωση.

Η ποσότητα  $D_e$  έχει ήδη προσδιοριστεί ενώ η ποσότητα  $\beta$  υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\tilde{V}_e = \frac{\beta}{2\pi c} \sqrt{\frac{2D_e}{\mu}} \Rightarrow \beta = 2\pi c \tilde{V}_e \sqrt{\frac{\mu}{2D_e}} \quad \text{και κατόπιν κατάλληλης μετατροπής μονάδων προκύπτει } \beta = 2.26/\text{Angstrom}.$$

Μέσω του λογισμικού Origin ή excel είναι εφικτό να υπολογιστούν οι τιμές  $V(r)$  και να γίνει η γραφική παράσταση. Ενδεικτικά σημειώνονται και τα κβαντικά ενεργειακά επίπεδα του ταλαντωτή όπως υπολογίστηκαν από τη σχέση .

$$E_v(\text{cm}^{-1}) = \tilde{V}_e \left[ v + \frac{1}{2} \right] - \tilde{V}_e x_e \left[ v + \frac{1}{2} \right]^2$$

