

**קבועים**

C.G.S	M.K.S	סימן	הקבוע
$3 \cdot 10^{10}$ cm/sec	$3 \cdot 10^8$ m/sec	C	מהירות האור
$4.8 \cdot 10^{-10}$ e.s.u	$1.6 \cdot 10^{-19}$ c	e	מטען אלקטרון
$9.1 \cdot 10^{-28}$ g	$9.1 \cdot 10^{-31}$ Kg	$m_e$	מסת אלקטרון
$1.67 \cdot 10^{-24}$ g	$1.67 \cdot 10^{-27}$ Kg	$m_n/m_p$	מסת פרוטון/ניטרון
$6.63 \cdot 10^{-27}$ erg·sec	$6.63 \cdot 10^{-34}$ J·sec	h	קבוע פלאנק
$2.18 \cdot 10^{-11}$ erg	$2.18 \cdot 10^{-18}$ J	$R_H$	קבוע רידברג
	$6.02 \cdot 10^{23}$ 1/mole	$N_A$	מס' אבוגדרו
	$8.98 \cdot 10^9$ Nm <sup>2</sup> /c <sup>2</sup>	K	K

**יחידות מימדים**

	J	erg	eV	kcal/mole
1 J =	1	$10^7$	$6.24 \cdot 10^{18}$	$1.44 \cdot 10^{20}$
1 erg =	$10^{-7}$	1	$6.24 \cdot 10^{11}$	$1.44 \cdot 10^{13}$
1 eV =	$1.6 \cdot 10^{-19}$	$1.6 \cdot 10^{-12}$	1	23.06
1 kcal/mole =	$6.95 \cdot 10^{-21}$	$6.95 \cdot 10^{-14}$	$4.34 \cdot 10^{-2}$	1
1 cm <sup>-1</sup> =	$1.99 \cdot 10^{-23}$	$1.99 \cdot 10^{-16}$	$1.24 \cdot 10^{-4}$	$2.86 \cdot 10^{-3}$

$1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 10^{-7} \text{ cm} \parallel 1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m} = 10^{-8} \text{ cm} \parallel 1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m} \parallel 1 \text{ Liter} \cdot \text{atm} = 24.2 \text{ cal} = 101.3 \text{ J} \parallel 1 \text{ cal} = 4.184 \text{ J}$

**אטומים**

**מספר אטומי:** מספר הפרוטונים שמכיל האטום, הוא שווה גם למספר האלקטרונים (באטום ניטרלי). **מספר אטומי=מספר אלקטרונים באטום**  
**מספר מסה:** מספר הפרוטונים+מספר הניטרונים בגרעין האטום.

**איזוטופים:** אטומים בעלי אותו מספר פרוטונים, אך מספר נייטרונים שונה. למשל:  $^{35}_{17}\text{Cl}$ ,  $^{37}_{17}\text{Cl}$ ,  $^{12}_6\text{C}$ ,  $^{13}_6\text{C}$ ,  $^{14}_6\text{C}$

**משקל אטומי:** הממוצע המשוקלל של משקל האיזוטופים השונים, על-פי שכיחותם בטבע.  $A.W \triangleq \sum_{i=1}^N P_i * \mu_i$ , כאשר  $P_i$  הנה השכיחות של האיזוטופ בטבע ו- $\mu_i$  הנו משקלו (N מספר האיזוטופים הקיימים).

**משקל מולקולארי:** סכום המשקלים האטומיים של כל האטומים המרכיבים את המולקולה (M.W).  
**מול:** כמות החומר המכילה מספר אבוגדרו של חלקיקים.

**מתוך ההגדרות נובע:** משקל 1 מול חומר שווה תמיד למשקל האטומי שלו (או המולקולארי, במקרה ומדובר במולקולה) המבוטא בגרמים:

$$n = \frac{\text{weight}}{A.W(\text{or } M.W)} = \frac{\text{number\_of\_atoms}}{N_A}$$

מספר המולים.

**נוסחה אמפירית:** יחס מינימאלי בין האטומים המרכיבים את המולקולות. היחס מתואר במספרים שלמים.

**נוסחה מולקולארי:** מתארת את הרכב האטומים המדויק במולקולה.

**לדוגמא:**  $\text{CH}_2$  בנזן; נוסחה מולקולארי-  $\text{C}_6\text{H}_6$ , נוסחה אמפירית-  $\text{CH}$  ||| **אתילן:** נוסחה מולקולארי-  $\text{C}_2\text{H}_4$ , נוסחה אמפירית-  $\text{CH}_2$   
**פחמן דו-חמצני:** נוסחה מולקולארי-  $\text{CO}_2$ , נוסחה אמפירית-  $\text{CO}_2$ .

**ריאקציה כימית (משוואה כימית)**

**ריאקציה כימית (משוואה כימית):** תגובה של שני אטומים או יותר ליצירת תרכובת אחת (או יותר), תוך שביצירת קשרים קיימים ויצירת קשרים אחרים.

לדוגמא:  $\text{Zn} + \text{S} \rightarrow \text{ZnS}$

משוואה כימית מתארת את חוק שימור החומר והמטען: מספר האטומים או המולים במגיבים ובתוצרים שווה. תמיד - קודם כל יש לאזן את המשוואה.

לדוגמא:  $2\text{Ca} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CaO}$  המספר לאיזון מוסף תמיד **משמאל** למולקולה.

**סטוכיומטריה:** היחס בין היסודות בתרכובת מסוימת, או במשוואה.

**ספקטרום אטומי ומודל בוהר**

$$\lambda = \frac{c}{\nu_{ne}} (m) \quad \text{אורך גל} \quad \text{|||} \quad \nu_{ne} = \frac{c}{\lambda} (\text{sec}^{-1}) \quad \text{תדירות} \quad \text{|||} \quad E_{\text{photon}} = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

|||  $E$  - אנרגיה, h קבוע פלנק |||

מספר הגל  $\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} (1/m)$

**האפקט הפוטו אלקטרי:**  $(E_0) E = E_0 + E_k$  - פונקציית העבודה, אנרגיית הסף הדרושה על מנת לשחרר האלקטרון מהאטום. לפעמים נקראת  $(\Phi)$ .

**מודל האטום של בוהר:** עובד עבור אטומי מימין ודמויי מימן (בעלי אלקטרון אחד) (לדוגמא:  $\text{He}^+$ ,  $\text{Li}^{++}$ )

$$\left( a_0 = \frac{h^2}{4\pi k m e^2} = 0.05292 \text{ nm} \cong 0.5 \text{ \AA} \right) r_n = \frac{n^2}{z} a_0 ; n = 1, 2, 3, \dots, n$$

**רדיוס הרמה ה-n:**

$$E_n = -R_H \frac{Z^2}{n^2}$$

**אנרגיית הרמה ה-n:**

**$R_H$  - קבוע רידברג**

$R_H = 2.18 \cdot 10^{-18} \text{ J} = 2.18 \cdot 10^{-11} \text{ erg} = 109678 \text{ cm}^{-1} = 3.29 \cdot 10^{15} \text{ sec}^{-1} = 13.6 \text{ eV}$

**הפרש אנרגיה בין שתי רמות - משוואת רידברג**

$$\Delta E = h\nu_{ne} = E_f - E_i = R_H z^2 \left( \frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right)$$

תדירות המעבר:  $\nu_{ne} = \frac{|\Delta E|}{h} = \frac{R_H}{h} z^2 \left( \frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right)$   $\parallel \parallel \parallel E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{(mv)^2}{2m} = \frac{p^2}{2m} \parallel \parallel \parallel p = mv \parallel \parallel \parallel$  מספר האטומים בגרעין.  $Z$

אנרגיית יניציאה:  $n_f = \infty \leftarrow E_I = R_H z^2 \left( \frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{\infty^2} \right) = R_H z^2 \frac{1}{n_i^2}$

להשקיע אנרגיה, כלומר האנרגיה חיובית. (אנדותרמי)  $\{v = \text{velocity}\}$

לשחרר אנרגיה, כלומר אנרגיה שלילית (אקסותרמי) (מנקודת המבט שלנו).

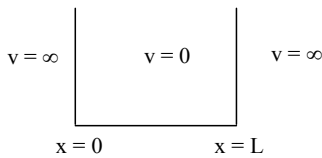
אם אנרגיה קטנה מידי למעבר  $n \rightarrow n+2$  וגדולה מידי למעבר  $n \rightarrow n+1$  אז האטום לא יכול "לבלוע" אנרגיה זו.

סדרות הפליטה השונות, כאשר אלקטרון עובר מרמה מעוערת כלשהי לרמה נמוכה יותר הוא פולט פוטון:

כאשר האלקטרון יורד לרמה  $n=3$  הפוטון הנפלט יקרא מסדרת Paschen,

כאשר האלקטרון יורד לרמה  $n=2$  הפוטון הוא מסדרת Balmer,

כאשר האלקטרון חוזר למצב היסוד  $n=1$  הפוטון יקרא מסדרת Lyman.



**חלקיק בתיבה חד מימדית**

רמות האנרגיה:  $E_n = \frac{h^2 n^2}{8mL^2}$   
 $\Delta E = E_f - E_i = \frac{h^2}{8mL^2} (n_f^2 - n_i^2)$

בתוך התיבה הפוטנציאל הנו 0 (כלומר בתוך התיבה מתקיים  $E_n = E_k$ ) ומחוץ לה הוא אינסוף.

**המבנה האלקטרוני של האטום**

הימצאותו של האלקטרון באורביטל מסוים, מאופיין ע"י סדרה של 4 פרמטרים: מספרים הנובעים מפתרון פונקציית הגל: **n- מספר קוונטי ראשי**, מתאר את הרמה האנרגטית שבה נמצא האלקטרון. מאפיין את הנפח האפקטיבי של האורביטל סביב הגרעין. יכול לקבל ערכים שלמים חיוביים... n=1,2,3... (עבור אטום מימן או דמוי מימן, זהו המספר היחיד שקובע את האנרגיה, כלומר אורביטלים בעלי אותו n הינם שווים אנרגיה מנוונים.)

**l- מספר קוונטי משני**, קובע את התנע הזוויתי של האלקטרון. מתאר את צורת האורביטל במרחב. יכול לקבל ערכים:  $l = 0, 1, 2, 3, \dots, (n-1)$   
**s, p, d, f** סוג האורביטל.  $s(l=0), p(l=1), d(l=2), f(l=3)$ .

עבור אטום רב אלקטרוני גם ערך זה משפיע על האנרגיה, כל האורביטלים בעלי ערכים זהים של n ושל l הינם שווים אנרגיה מנוונים, אלא שכייונם במרחב שונה:  $p_x, p_y, p_z$

**m<sub>l</sub> - מספר קוונטי מגנטי**, נובע מהצורת אפקט מגנטי כתוצאה מתנועת האלקטרון, מתאר את הכיוונית המרחבית של האורביטל האטומי. יכול לקבל ערכים של:  $l, l-1, \dots, 0, \dots, -l$  (בסה"כ  $2l+1$  ערכים אפשריים).

**m<sub>s</sub> - מספר קוונטי של ספין**, מאפיין את סיבוב האלקטרון סביב עצמו. יכול לקבל שני ערכים בלבד:  $m_s = +1/2, -1/2$   
**כללים לאכלוס אלקטרונים:**

- עקרון פאולי: לא יתכנו שני אלקטרונים באותו אטום בעלי אותו סט של מספרים קוונטים זהים. מכאן, שאורביטל המוגדר ע"י n, l, m<sub>l</sub> יכול להכיל לכל היותר שני אלקטרונים בעלי ספינים הפוכים:  $+1/2, -1/2$
- כלל הונד (כלל האוטובוס): כאשר מאכלסים אלקטרונים באורביטלים מנוונים, הם יכנסו קודם כל כבודדים בעלי ספינים מקבילים (אותו מספר ספין), ורק אחר כך מתחילים לזווג אותם.

**המספר המרבי של אלקטרונים ברמה קוונטית ראשית n הוא n<sup>2</sup>**

**סדר מילוי האורביטלים:** כלל n+l: האלקטרונים ימלאו בסדר עולה של הסכום n+l (במילים אחרות בסדר האלכסונים). אם הסכום הזה שווה עבור שני אורביטלים שונים, ממלאים ראשית את האורביטל בעל n נמוך יותר. (מלבד מקרים חריגים !!!)

s- ניתן להכניס 2 אלקטרונים	1s
p- ניתן להכניס 6 אלקטרונים	2s 2p
d- ניתן להכניס 10 אלקטרונים	3s 3p 3d
d- ניתן להכניס 14 אלקטרונים	4s 4p 4d 4f

**תכונות מגנטיות של חומר:**

**פאראמגנטי:** חומר בעל אלקטרונים בלתי מזווגים. נמשך מעט למגנט.

**דיאמגנטי:** חומר שבו כל האלקטרונים מזווגים. לא נמשך למגנט.

**פרומגנטי:** חומר פאראמגנטי אשר בו האלקטרונים הבלתי מזווגים מסודרים בספינים מקבילים. נמשך חזק למגנט.

**קונפיגורציה אלקטרונית של מתכות המעבר:** למתכות המעבר תכונות מיוחדות הנובעות ממילוי קליפות פנימיות. הקונפיגורציה האלקטרונית של השורה

הראשונה של מתכות המעבר ( $Z=21 \rightarrow 30$ ) - כשמוציאים אלקטרונים מאטומים של מתכות המעבר, היינו מצפים שאלקטרונים שהתווספו אחרונים ( $3d$ ) יצאו ראשונים. אבל זה לא כך, אלקטרוני 4s מורחקים לפני אלקטרוני 3d.

הסבר: כשיש מצב בו יש לרמה 3d אפשרות להשלים חצי קליפה או קליפה מלאה היא

לוקחת אלקטרון מרמה 4s (ואז היא עוקפת את רמה 4s ברמת האנרגיה שלה).

כל הזמן נשארים 2 אלקטרונים ב 4s, חוץ מאשר ב Cr ו-Cu.

Cr - הרמות 3d ו-4s מאוד קרובות באנרגיה, ויש ירידה באנרגיה הכללית כאשר אלקטרון אחד מהזוג 4s<sup>2</sup> עובר לאורביטל 3d, ומבטל את הדחייה

הבין האלקטרונית. מבנה אלקטרוני של Cr -  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^5 4s^1$  - Cr

Cu - המעבר של אלקטרון מ-4s ל-3d אינו פותר את בעיית הדחייה הבין אלקטרונית אבל המטען הגרעיני Z גדול בהרבה, כך ש-3d נמשכת

מתחת ל-4s.

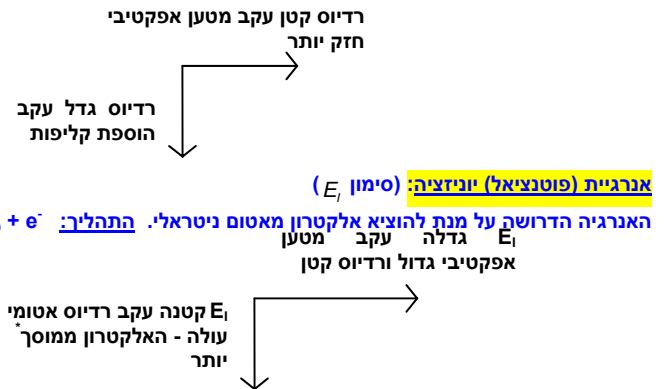
	n	l	ml
2s	2	0	0
3d	3	2	-2,-1,0,1,2
3p	3	1	-1,0,1
5d	5	2	-2,-1,0,1,2
6f	6	3	-3,-2,-1,0,1,2,3

**נתונים פיזיקאים והמערכה המחזורית**

**רדיוס אטומי:** רדיוס היון השלילי < רדיוס האטום < רדיוס היון החיובי (רדיוס האטום < רדיוס יון חד ערכי ( $X^+$ ) < רדיוס יון דו ערכי ( $X^{++}$ ))

**הערות לנושא:**

- במקרה שלכל האטומים/יונים יש את אותה קונפיגורציה מה שיקבע לנו את גודל הרדיוס הוא המטען האפקטיבי כלומר: Z גדול יותר אז הרדיוס יהיה קטן יותר. ואם Z קטן יותר הרדיוס יהיה גדול יותר. (כמו כן עבור אנרגיית יוניזציה)
- חשוב לעשות את הקונפיגורציה של האטומים בקביעת האנרגיות ולזכור שקליפה מלאה יציבה יותר מקליפה לא מלא



**הקשר הכימי**

**הקשר היוני:** קשר אשר בו אלקטרונים מאטום אחד עוברים לקליפת הערכיות (הקליפה החיצונית) של האטום השני, כך שכל אחד מגיע למצב של קליפה מלאה. לדוגמה:  $Na \bullet + Cl \rightarrow [Na]^+ [Cl]^-$

הקשר נוצר בין אטום בעל אנרגיית יון נמוכה (מתכת אלקלית או מתכת אלקלית עפרורית) לבין אטום בעל אפניויות אלקטרונית גבוהה (למשל הלוגן). הקשר יוצר אם בסה"כ התהליך נפלטת אנרגיה:

$$\begin{aligned}
 & 1) M \rightarrow M^+ + e^- \quad \Delta E = E_I > 0 \quad \text{יון M} \\
 & 2) X^+ + e^- \rightarrow X^- \quad \Delta E = E_A < 0 \quad \text{X מקבל אלקטרון} \\
 & 3) M^+ + X^- \rightarrow [M^+][X^-] \quad \Delta E = \frac{kq_1 q_2}{r} \quad \text{משיכה אלקטרוסטטית בין מטענים מנוגדים} \\
 & M^+ + X^- \rightarrow [M^+][X^-] \quad \Delta E = E_I + E_A + \frac{kq_1 q_2}{r} \quad \text{בסה"כ} \\
 & \frac{kq_1 q_2}{r} = \frac{14.4 \frac{evA}{e} (\text{number of positive charges on } M^+) (\text{number of negative charges on } X^-)}{\left( \begin{matrix} \text{רדיוס } \{ \text{\AA} - \text{ב} \} \\ \text{רדיוס } M^+ \text{ של } + \text{ יוני} \end{matrix} \right)} \quad \text{ובאלקטרון וולט:}
 \end{aligned}$$

יש להקפיד שהתוצר  $[M^+][X^-]$  יהיה מאוזן מבחינה חשמלית:  $Na^+ Cl^-$ . **קשר קוולנטי:** קשר שבו האלקטרונים משותפים במידה שווה ע"י שני אטומים, בכדי להשלים את קליפת הערכיות של שניהם. למשל:  $F_2$ .

את זוג האלקטרוני הקשר מסמנים ב-  $F-F$ . **אלקטרו שיליות:** מבטאת את היכולת של האטום למשוך כלפיו אלקטרונים המשתתפים בקשר כימי. סקלת המספרים 0-4. היסוד F הוגדר כ- 4. גודל זה אינו מדיד והוא נגזר מחישובים מתמטיים. ככל שהאלקטרו שיליות גבוה יותר כך גם האלקטרון רוצה יותר למשוך אליו את האלקטרוני הקשר. **האלקטרו שיליות עולה עם ההתקדמות ימינה בטבלה המחזורית, ויורדת לאורך הטורים.** כאשר ההפרש באלקטרו שיליות גדול מ- 1.7 יוצר קשר יוני. **מומנט דיפול (μ):** זהו גודל מדיד (יחידות: Debay), המודד את מידת קוטביות (פולריות) הקשר הנובע מכך שאחד האטומים יותר אלקטרו שלילי, כלומר, אלקטרוני הקשר יהיו מוסטים לכיוונו.

$$\mu = \delta \cdot d \quad \begin{matrix} \delta- & \delta+ \\ x & \rightleftharpoons y \end{matrix}$$

d - המרחק בין האטומים.  
δ - עודף המטען של אטום אחד ביחס לשני (המטען המועבר)

מומנט הדיפול הוא גודל וקטורי ובכל מולקולה ניתן לחשב את גודל מומנט הדיפול הכולל כסכום וקטורי של המומנטים של הקשרים היחידים. מומנט הדיפול של זוג מטענים ( $e^-$ ,  $e^+$ ) שהמרחק ביניהם הוא 1Å הוא:  $\{1[D] = 10^{-18} [esu \cdot cm]\} 4.8D = 4.8 \cdot 10^{-18} \{esu \cdot cm\} = 1.610^{-29} \{c \cdot m\}$

**קשר קוולנטי קוטבי:** קשר קוולנטי בין אטומים שיש הבדל באלקטרו שיליות שלהם, כך שאלקטרוני הקשר מוסטים לעבר האטום האלקטרו שלילי יותר. **מולקולה קוטבית (פולארית):** מולקולה בה השקול הכולל של מומנט דיפול שונה מאפס.

**אחוז האופי היוני:** בקשר יוני מעבר האלקטרון מלא, ומומנט הדיפול הוא:  $\mu = 4.8 \cdot 10^{-10} (esu) \cdot d (cm)$

כאשר הקשר הוא בין קשר יוני טהור לבין קשר קוולנטי טהור, מגדירים את אחוז האופי היוני:

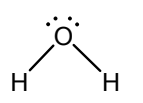
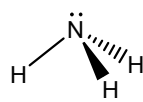
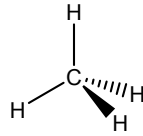
$$\% \text{ האופי היוני} = \frac{\text{מומנט הדיפול המדוד} (esu \cdot cm)}{d (cm) \cdot 4.8 \cdot 10^{-10} (esu)}$$

לשים לב ליחידות בזמן הצבת הנתונים בנוסחה!!!

**נוסחת לואיס:** ציור האלקטרונים הקוולנטיים (החיצוניים, אלקטרוני הערכיות) המשתתפים בקישור + האלקטרונים הקוולנטיים שלא משתתפים בקישור, ומהווים זוגות גלמודים (lone pair). הציור נעשה בדרך"כ על בסיס **גלל האוקטט** - השאיפה של כל אטום למלא את הקליפה החיצונית ב- 8 אלקטרונים. כלל זה אינו תקף מהשורה השלישית (במערכת המחזורית) ומטה, ולגבי יוצאים מן הכלל המשורה השנייה. **קשר קווארדינטיבי:** קשר הנוצר כאשר אטום אחד תורם 2 אלקטרונים לשותף למשל:  $NH_4^+$

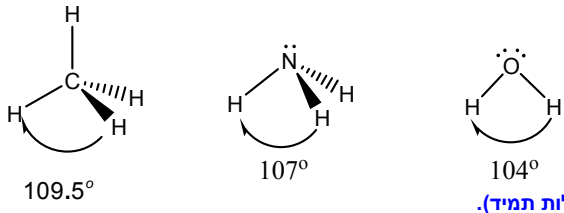
**זוגות:** כאשר קיימים מספר מבנים בשטית לואים המתאימים לאותה מולקולה, למשל:  $CO_3^{2-}$ .  
**המבנה המרחבי של מולקולות והיברידיזציות (הכלאות) - כללים**

1. צייר את נוסחת לואיס.
  2. קבע מהו מספר הכיוונים במרחב סביב האטום המרכזי. כל קשר כימי (יחיד, כפול או משולש) תופס כיוון אחד. זוג אלקטרונים בודד תופס גם הוא כיוון אחד.
  3. קבע את ההיברידיזציה (הכלאה, ערבוב אורביטלים) ואת המבנה המרחבי של המולקולה לפי מס' הכוונים במרחב.
    - **2 כיוונים** במרחב - הכלאת  $sp$  ← גיאומטריה קווית.
    - **3 כיוונים** במרחב - הכלאת  $sp^2$  ← גיאומטריה משורית.
    - **4 כיוונים** במרחב - הכלאת  $sp^3$  ← גיאומטריה טטרהדרלית.
- קבעו מבנה מרחבי סופי של המולקולה לפי הכיוונים שבהם יש קשרים (ולא זוגות בודדים).  
 לדוגמה: עבור מולקולה בעלת 4 כיוונים במרחב - הכלאת  $sp^3$  ← הגיאומטריה נקבעת עפ"י מס' אלקטרונים לא קושרים:



**קביעת הזנית בין האטומים:**

סדר הדחייה בין זוגות אלקטרונים: קושר-קושר > לא קושר-קושר > לא קושר-לא קושר, ולכן נוצר מצב שבו זוג אלקטרונים לא קושרים "תופסים" יותר נפח מאלקטרונים הנמצאים בקשר. למשל במקרה של מולקולות בעלות אטום מרכזי בהיברידיזציה  $sp^3$ .



ב-  $sp^2$  מקבלים משולש מישורי וב-  $sp^1$  מקבלים קווי (בזווית של 180 מעלות תמיד).

**קשרי ס (סיגמה), פאי (פאי):**

- קשר יחיד – קשר ס יחיד.
- קשר כפול – קשר דו יחיד + קשר ס יחיד.
- קשר משולש – קשר דו כפול + קשר ס יחיד.

**גזים**

**עקרון אבוגדרו:** בתנאי לחץ וטמפרטורה שווים, נפחים שווים של גזים מכילים אותו מספר מולים (מולקולות).

$$PV=nRT$$

**משוואת המצב של הגזים האידיאליים:**

P - לחץ (1 atm = 760 mm Hg)  
 V - נפח (1 liter = 1000 cm<sup>3</sup>)  
 n - מספר מולים.  
 R - קבוע הגזים.  
 T - טמפרטורה, במעלות קלווין (0°C = 273K).

$$R = 0.082 \frac{\text{liter} \times \text{atm}}{\text{mole} \times \text{K}} = 82.1 \frac{\text{cm}^3 \times \text{atm}}{\text{mole} \times \text{K}} = 8.31 \times 10^7 \frac{\text{erg}}{\text{mole} \times \text{K}} = 1.98 \frac{\text{cal}}{\text{mole} \times \text{K}} = 8.314 \frac{\text{joule}}{\text{mole} \times \text{K}} = 62.33 \frac{\text{liter} \times \text{mmHg}}{\text{mole} \times \text{K}}$$

**צורות למשוואת הגזים:**

$$n = \frac{PV}{RT} \parallel \rho = \frac{nRT}{V} \parallel PV = \frac{W}{M} RT \parallel PM = \rho RT \left\{ \rho = \frac{W}{V} \right\} \cdot$$

צפיפות החומר

תנאי S.T.P: T = 0°C, P = 1 atm, n = 1 mole

בתנאי S.T.P, נפח של 1 מול של גז כלשהו יהיה 22.4 ליטר!

**לחץ חלקי:** הלחץ שהגז היה נמצא בו אילו הוא היה לבדו בכלי.

**חוק הלחצים החלקיים של דלתון:** הלחץ הכללי בכלי הוא סכום הלחצים החלקיים של כל הגזים הנמצאים בכלי.

$$P_{tot.} = P_1 + P_2 + P_3 + \dots = \sum_i n_i \frac{RT}{V} = \sum_i P_i$$

החלק שכל גז תורם לתערובת נקרא **שבר לחצים = שבר מולים**.

$$\frac{P_i}{P_{tot.}} = \frac{n_i}{n_{tot.}} = X_i$$

או בצורה אחרת:  $P_{חלקי} = \frac{n_{חלקי}}{n_{tot}} \cdot P_{tot}$

**גזים לא אידיאליים - משוואת ואן דר וולס:**

$$\left( P + \frac{n^2 a}{V^2} \right) (V - nb) = nRT$$

a - קבוע הפרופורציה המביע את הסטייה מאידיאליות (עוצמת כוחות המשיכה בין המולקולות).

b - נפח אפקטיבי של מול חומר (קשור למימדי המולקולה).

bc - הנפח התפוס ע"י המולקולות עצמן, נקרא **הנפח האסור**.

**התורה הקינטית של הגזים:**  
**חוק גרהם:** בטמפרטורה ובלחץ קבועים, מהירויות הדיפוזיה של גזים שונים משתנות ביחס הפוך לשרש הריבועי של הצפיפויות או המשקלים

$$\frac{V_1}{V_2} = \sqrt{\frac{d_2}{d_1}} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} \quad \text{המולקולאריים:}$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \quad (p, T \text{ const.}) \quad \leftarrow \text{לשני גזים באותם תנאי לחץ וטמפרטורה אנרגיה קינטית שווה:}$$

$$E_k = \frac{1}{2} M V^2 = \frac{3}{2} R T \quad \text{האנרגיה הקינטית של מול אחד של גזים:}$$

$$E_k = \frac{1}{2} m V^2 = \frac{3}{2} K_B T \quad \text{האנרגיה הקינטית של מולקולה אחת של גז:}$$

$$K_B = \frac{R}{N_A} \quad \text{קבוע בולצמן - קבוע הגזים למולקולה.}$$

M - משקל מולקולרי **ביחידות:**  $\frac{Kg}{mole}$ . m - משקל של מולקולה אחת.

$$\bar{V} \left[ \frac{m}{sec} \right] = \sqrt{\frac{3R [J/mol \cdot K] T [^\circ K]}{M [Kg/mol]}} = \sqrt{\frac{3K_B T}{m}} \quad \text{המהירות הממוצעת:}$$

**נוזלים, מוצקים ודיאגרמות פאזות**

**משוואת קלאוזיוס-קלפירון:**

בנוזל מתקיים שווה-משקל (ש"מ) בין המולקולות הנמצאות בתוך הנוזל לבין מולקולות בעלות אנרגיה קינטית מספיק גבוהה, אשר בורחות מהנוזל. **נקודת הרתיחה הנורמלית** - הטמפרטורה בה מתקיים ש"מ בין הנוזל לאדי, בלחץ של 1 אטמוספירה. באופן כללי - נקודת הרתיחה היא הטמפרטורה בה לחץ האדים מעל הנוזל שווה ללחץ החיצוני. ככל שהטמפ' עולה, עולה שבר המולקולות בעלות אנרגיה קינטית מספיק גבוהה כדי לברוח מהנוזל, ולכן עולה גם לחץ האדים.

$$\ln(p) = -\frac{\Delta H_v}{RT} + C \quad \text{התלות בין לחץ האדים לבין הטמפ' נתונה ע"י המשוואה הבאה:}$$

Hv - חום האידוי - האנרגיה הדרושה כדי לנדף מול אחד של נוזל.  
 R - קבוע הגזים -  $R = 8.314 \text{ J/mole} \cdot ^\circ K = 1.98 \text{ cal/mole} \cdot ^\circ K$

C - קבוע האופייני לכל נוזל.

ניתן לבטל את הקבוע C ע"י החסרת שתי משוואות עבור שתי נקודות לחץ וטמפרטורה.

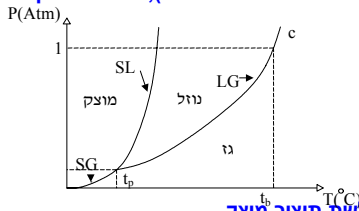
$$\ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = \frac{\Delta H_v}{R} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

באותה צורה ניתן להתייחס למעברי פאזה אחרים: מוצק  $\leftarrow$  נוזל, מוצק  $\leftarrow$  גז. השינוי יהיה בערכו של  $\Delta H$ , כשכל פעם יתייחס למעבר אחר. לדוגמא:

$\Delta H_m$  - עבור התכה - מעבר פאזה מוצק  $\leftarrow$  נוזל.

$\Delta H_s$  - עבור המראה (סובלימציה) מעבר פאזה מוצק  $\leftarrow$  גז.

**דיאגרמת פאזות:** דיאגרמה המתארת את היחסים ההדדיים ואת תנאי ש"מ בין הצורות השונות (הפאזות של חומר כלשהו), כוללות בלחץ ובטמפרטורה.



$t_p$  - הנקודה המשולשת - 3 פאזות נמצאות בשיווי משקל.

קו L-G: עקומת לחץ האדים של נוזל (ש"מ נוזל עם אדי).

קו S-L: עקומת נקודת ההיתוך (ש"מ מוצק עם נוזל).

קו S-G: עקומת לחץ האדים של מוצק (ש"מ מוצק עם אדי).

c - הנקודה הקריטית - מעליה החומר קיים רק במצב גז.

$t_b$  - נקודת הרתיחה הנורמלית - טמפרטורת המעבר בין נוזל לגז ב-1 אטמ'.

נאמר כי המוצק צפוף מהנוזל בנקודה המשולשת אם העלאת הלחץ בטמפרטורה של הנקודה המשולשת תיצור מוצק.

**מוצקים:**

מוצקים מובדלים מנוזלים וגזים בזה שיש להם נפח וצורה מוגדרים. למוצק יש קשיחות ויחידת מבנה.

**מבנה גבישי** - הערכות גיאומטריות מוגדרת האופיינית לחומר. הערכות זו חוזרת על עצמה במחזוריות קבועה בשלושה מימדים, תוך יצירת חומר בעל סדר ארוך טווח.

**מוצקים אמורפים** - מוצקים שאין להם סדר קבוע (זכוכית, אספלט).

**תא היחידה** - היחידה הקטנה ביותר החוזרת על עצמה בגביש ובעלת סימטריה אופיינית בשלושה צירים a, b, c. יחידות אלה החוזרות על עצמן יוצרות את הסריג הגבישי.

**נתייחס ל-3 דוגמאות של תאי יחידה:**



1. **SC - קובי פשוט** (ראה עמוד 8 להערות בנושא)

8 אטומים יוצרים את תא היחידה, אבל כאשר הוא חוזר על עצמו במבנה הסריג כל אטום מתחלק בין 8 תאי יחידה, כך שתרומת כל אטום לתא היחידה הוא  $1/8$ . לקובייה 8 נקודות כאלה, כך שבסה"כ מספר האטומים בתא היחידה יהיה:  $8 * 1/8 = 1$



2. **BCC - קובי ממורכז גוף**

מספר האטומים בתא היחידה יהיה 2. 1 כמו במקרה של קובי פשוט, ועוד אחד מהאטום המרכזי השייך רק לתא הזה.  $8 * 1/8 + 1 = 2$



3. **FCC - קובי ממורכז פאה**

מספר האטומים בתא היחידה יהיה 4. כל אטום במרכז פאה מחולק בין שני תאים:  $8 * 1/8 + 6 * 1/2 = 4$

$$X [gr] \Rightarrow 1 [cm^3]$$

$$\rho = X \left[ \frac{gr}{cm^3} \right] \quad \text{הערה חשובה: כאשר נתונה צפיפות} \quad (X - \text{מספר נתון בתרגיל}) \quad \text{נעבוד כך:} \quad [gr] \Rightarrow a^3 [cm^3] \quad (\text{משקל יחידת תא})$$

$$n = \frac{\text{weight (משקל תא יחידה)}}{A.W. (or M.W)} = \frac{\text{number\_of\_atoms}}{N_A} \quad \text{משקל תא יחידה - נחשב בעזרת נוסחת המולים:}$$

**טבלת מיון המוצקים:**

מתכתי	מולקולרי	אטומי	יוני	היחידות המרכיבות
יונים חיוביים בים של אלקטרונים	מולקולות	אטומים	יונים	
משיכה אלקטרו סטטית $M^+e^-$	ואן-דר-ואלס דיפול-דיפול	קוולנטים - אלקטרונים משותפים	משיכה אלקטרו סטטית $M^+X^-$	כוחות הקישור
קשים/רכים מוליכים חשמל, בעלי ברק מתכתי	רכים, נק' היתוך נמוכה, מבדדים	קשים מאוד, נק' היתוך גבוהה, לא מוליכים	קשים, נק' היתוך גבוהה, מוליכים בתמיסה	תכונות
Na, Cu, Fe	H <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub>	יהלום, קוורץ; SiO <sub>2</sub>	KNO <sub>3</sub> , NaCl	דוגמאות

**תרמודינאמיקה**

התרמודינאמיקה דנה בקשר שבין הצורות השונות של האנרגיה (כימית, חשמלית).  
**החוק הראשון של התרמודינאמיקה:**

**חוק שימור האנרגיה:**  $\Delta E = Q + W$  **מעבר יחידות:**  $1 \{liter \cdot atm.\} = 101 \{J\}$

E - אנרגיה פנימית: אנרגיה של תנועות ויברציה של אטומים, אנרגיה קינטית של מולקולות ואנרגיה פוטנציאלית האגורה בקשרים כימיים.  
 Q - חום: החום הנקלט או הנפלט ע"י המערכת (Q>0 - החום נקלט ע"י המערכת מהסביבה).  
 W - עבודה: עבודה מוגדרת ככוח שמופעל לאורך דרך (W>0 - העבודה מתבצעת על המערכת ע"י הסביבה).

עבודת נפח (התפשטות נפחית) **בלחץ קבוע:**  $W = -P\Delta V$  ;;;  $\Delta V = V_2 - V_1$

H - אנטלפיה: האנרגיה הכוללת של המערכת:  $H = E + PV$

$\Delta H$  - השינוי באנטלפיה:  $\Delta H = \Delta E + \Delta(PV)$

בלחץ קבוע, השינוי באנטלפיה:  $\Delta H = \Delta E + P(\Delta V)$  **{ בלחץ קבוע בלבד!!! -מתקיים:  $\Delta H = Q$  }**

C - קיבול חום: כמות החום הדרושה כדי להעלות את הטמפרטורה של 1 מול חומר ב- 1°C.

**תוספת:**  
 $V_{נפח} = \frac{M_w}{\rho} [cm^3]$

Cp - קיבול חום בלחץ קבוע:  $C_p = \frac{dQ_p}{dT} = \frac{\Delta H}{\Delta T}$

Cv - קיבול חום בנפח קבוע:  $C_v = \frac{dQ_v}{dT} = \frac{\Delta E}{\Delta T}$

חום סגולי: כמות החום הדרושה כדי להעלות את הטמפרטורה של 1 גר' חומר ב- 1°C.  
 מצב סטנדרטי (עבור חומר טהור): 1. לחץ של 1 אטמ'. 2. מצב הצבירה בו נמצא החומר ב- 1 אטמ' בטמפרטורה הנידונה במקרה הספציפי (לכל חומר).

עבור תערובת גזים המצב הסטנדרטי הוא כאשר הלחץ החלקי של כל אחד ממרכיבי התערובת הוא 1 אטמ'.  
 תכונות של מצב סטנדרטי מסומנים ב- °C, °S, °K, °F.

אנטלפיה היוצרות (חום היוצרות): האנטלפיה הנקלטת ומשתחררת כתוצאה מהיוצרות מול אחד של חומר מהיסודות במצבם הסטנדרטי.  
 חום היוצרות של יסוד מוגדר כאפס.

חוק הס: אנטלפיה היוצרות בלחץ קבוע אינה תלויה בדרך או במספר השלבים:  
 $\Delta H_{tot} = \Delta H_f$  (תוצרים) -  $\Delta H_f$  (מגיבים)

תגובה אקסו תרמית - תגובה שבה נפלטת אנרגיה לסביבה,  $\Delta H < 0$ .  
 תגובה אנדו תרמית - תגובה שבה נקלטת אנרגיה מהסביבה,  $\Delta H > 0$ .

**שיווי משקל כימי**

עבור ריאקציה בשווי משקל:  $aA + bB \rightleftharpoons cC + dD$  **חישוב ריכוז:**  $[ריכוז] = \frac{n}{V}$

קבוע שווי משקל לפי ריכוזים:  $K_c = \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b}$  **:: [X] - ריכוז המרכיב X ביחידות M=mol/liter, molar**

עבור הריאקציה ההפוכה:  $K_c' = \frac{[A]^a [B]^b}{[C]^c [D]^d} = \frac{1}{K_c}$  **אחוז פירוק:**  $\% \text{ הפירוק} = \frac{[השינוי בריכוז]}{[ריכוז מקורי]} \cdot 100$

קבוע שווי משקל לפי לחצים (עבור אותה ריאקציה):  $K_p = \frac{(P_c)^c (P_d)^d}{(P_a)^a (P_b)^b}$

Px - הלחץ החלקי של המרכיב X.

מעבר בין קבועי שווי המשקל:  $K_C = K_p (RT)^{-\Delta n}$ ,  $K_p = K_C (RT)^{\Delta n}$

$\Delta n$  - ההפרש בין מקדם המולים של תוצרים למקדם המולים של מגיבים (סוכמים את כל המקדמים בכל צד).  $\Delta n = ((c+d) - (a+b))$

עקרון לה - שטלייה: מערכת בשווי משקל שמופעלת עליה הפרעה חיצונית תפעל בכיוון הקטנת ההפרעה ושאפיה לחזור למצב של שווי משקל.  
 השפעת גורמים חיצוניים על שווי המשקל:

א. השפעת הלחץ החיצוני: בטמפרטורה קבועה, הגדלת הלחץ מקטינה את נפח המערכת והמערכת תזוז לכיוון הגדלת הנפח כדי להקטין את השינוי. במערכות גזיות השינוי בנפח מתבטא ב-  $\Delta n$ .

שינויים בלחץ ובנפח יכולים להשפיע על הרכב המערכת בשווי משקל, אך לא ישנו את ערכו של K.

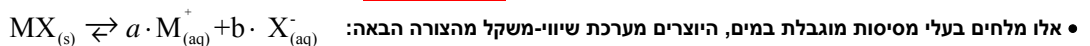
הגדלת הלחץ על המערכת תגרום לה לפעול בכיוון של הקטנת הנפח - כדי שהלחץ יקטן. (הכיוון נקבע על ידי  $\Delta n$ )

ב. השפעת הטמפרטורה: עם העלאת הטמפרטורה, הריאקציה תלך בכיוון תרמי (הכיוון הבולע חום). שינוי בטמפרטורה גורם לשינוי בערכו של K.

$Q > k$  - הריאקציה הולכת לכיוון מגיבים.  $Q < k$  - הריאקציה הולכת לכיוון התוצרים.

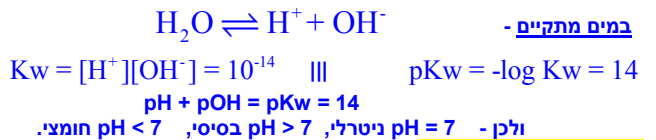
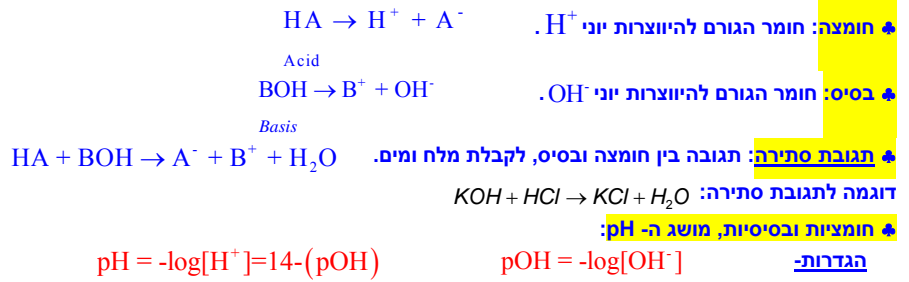
ג. השפעת גורמים כימיים: אם המערכת בשווי משקל, ואחד ממרכיבי המערכת מגיב בצורה בלתי הפיכה, לדוגמא: יוצא מן המערכת, המערכת תגיב בכיוון של יצירת אותו מרכיב. שינוי בהרכב לא משפיע על ערכו של K.

**מלחים קשי תמס**



- **מכפלת המסיסות מוגדרת כך:**  $K_{sp} = [M^+]^a [X^-]^b$ , והיא למעשה ערך גבולי: השוויון מתקיים בתמיסה רוויה, שבה לא ניתן להמיס יותר את המלח MX, ואילו בתמיסה בלתי רוויה מתקיים:  $[M^+]^a [X^-]^b < K_{sp}$ . לעולם לא ייתכן מצב שבו:  $[M^+]^a [X^-]^b > K_{sp}$ .
- **המסיסות (S) מוגדרת:** כמות החומר (מלח) שאפשר להמיס בתמיסה נתונה. (כמות שאפשר להמיס לגפח מסיים) **הערה:** המלח שישקע ראשון הוא המלח בעל הקבוע מסיסות ( $K_{sp}$ ) הקטן יותר.

**חומצות ובסיסים**



**חומצות ובסיסים חלשים**

כשמדובר בחומצה חלשה או בבסיס חלש, תגובת הפירוק אינה מלאה ונוצר מצב של שיווי-משקל. קבועי שיווי המשקל נקראים  $K_a$  (עבור חומצה) או  $K_b$  (עבור בסיס).



**עבור חומצה ובסיס חלשים צמודים מתקיים:**

$K_a \cdot K_b = K_w = 10^{-14}$        $pK_a + pK_b = pK_w = 14$

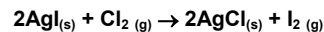
- **חומצות חזקות (פירוק מלא):**  $HNO_3, H_2SO_4, HF, HCl, HBr, HI$  ||| **חומצות חלשות:**  $HAC$
- **בסיסים חזקים (פירוק מלא):**  $KOH, NaOH$  ||| **בסיסים חלשים:**  $NH_4OH$

**הערות חשובות:**

- שריפה- כלומר  $X + O_2 \rightarrow Y$  (X- מגיבים, Y - תוצרים) { שריפה מושלמת:  $X + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$  }
- לא לשכוח לאזן משוואות!! ולשים לב ליחידות!!!!!!
- ככל שהאנרגיה הפוטנציאלית נמוכה יותר הגורם יהיה יציב יותר.

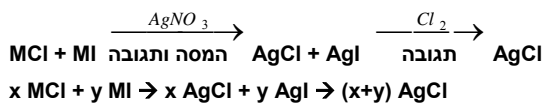
**דוגמאות:**

**תרגיל:** נתונה תערובת של מלח כלוריד, MCl, ומלח יודיד, MI, בעלות קטיון חד ערכי זהה  $M^+$ . משקל התערובת היבשה הינו 2.083 גר'. ממיסים את התערובת בתמיסה מימית ומשקעים AgCl ו- AgI באמצעות תמיסת  $AgNO_3$ . לאחר הפרדה וייבוש המשקע, נמצא שמשקלו 3.781 גר'. מביאים את המשקע למגע עם גז כלור. הגז ממיר את מלח היודיד למלח כלוריד בתהליך הבא:



בסיום התהליך נמצא שמשקל המוצק, AgCl טהור, הינו 2.866 גר'.

א. מהו האחוז המשקלי של אניון היודיד בתערובת המקורית? ||| ב. זהה את הקטיון,  $M^+$ , על-פי משקלו המולקולארי. **פתרון:** התהליכים שמתרחשים:



x – מספר מולים של MCl  
y – מספר מולים של MI

א. האחוז המשקלי של אניון היודיד בתערובת המקורית: נתון שהמשקל של תערובת AgCl + AgI הינו 3.781 גר':

$x \text{ mol} \cdot M_w. (AgCl) + y \text{ mol} \cdot M_w. (AgI) = 3.781 \text{ gr}$   
 $(1) x \text{ mol} (107.868 + 35.453) \text{ gr/mol} + y \text{ mol} (107.868 + 126.9045) \text{ gr/mol} = 3.781 \text{ gr}$   
 $\downarrow \quad \quad \downarrow \quad \quad \downarrow \quad \quad \downarrow$   
 $Aw(Ag) \quad Aw(Cl) \quad Aw(Ag) \quad Aw(I)$

נתון שמשקל המוצק AgCl הטהור הינו 2.866 גר':

$(x \text{ mol} + y \text{ mol}) \cdot M_w. (AgCl) = 2.866 \text{ gr}$   
 $(2) (x + y) (107.868 + 35.453) = 2.866 \text{ gr}$

ממשוואות (1) ו- (2) מוצאים כי:  $x = 0.01 \text{ mol}$ ,  $y = 0.01 \text{ mol}$   
 האחוז המשקלי של אניון היודיד

$0.01 \text{ mol} \cdot 126.9045 \text{ gr/mol}_{(I \text{ של היודיד})} = 1.269$       משקל היודיד:

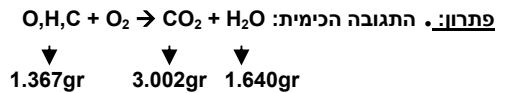
$\frac{1.269}{2.083} \cdot 100 = 60.92\%$

אחוז משקלי:

ב. זיהוי הקטיון  $M^+$ : מספר מול כלוריד 0.01 מול, מכאן:

$2.083 \text{ gr} = 0.01 \text{ mol} (M + 35.453) \text{ gr/mol} + 0.01 \text{ mol} (M + 126.9045) \text{ gr/mol}$   
 $\downarrow \quad \quad \downarrow$   
 $Aw_{(Cl)} \quad Aw_{(I)}$

תרגיל: 1.367 גר' של דוגמת חומר אורגני נשרפה ע"י זרם של אויר. התוצרים שהתקבלו הם:  $\text{CO}_2$  (3.002 gr) ו-  $\text{H}_2\text{O}$  (1.640 gr). החומר מכיל את היסודות חמצן, מימן, פחמן. מהי נוסחתו האמפירית?



נחשב כמה מולים תוצרים התקבלו

$$n(\text{CO}_2) = \frac{3.002\text{gr}}{44\text{gr/mole}} = 0.068\text{mole}$$

$$n(\text{H}_2\text{O}) = \frac{1.640\text{gr}}{18\text{gr/mole}} = 0.091\text{mole}$$

כל הפחמן שבמולקולה  $\text{CO}_2$  מקורו בפחמן שבחומר האורגני ולכן מס' מולי הפחמן בתרכובת:

$$n(\text{C}) = n(\text{CO}_2) = 0.068\text{ mol}$$

כל המימן שבמולקולה  $\text{H}_2\text{O}$ , מקורו בחומר האורגני ולכן מס' מולי המימן בתרכובת:

$$n(\text{H}) = 2 \cdot n(\text{H}_2\text{O}) = 0.182\text{ mol}$$

על מנת למצא את מס' מולי החמצן, נחשב את משקל הפחמן והמימן בתרכובת ונחסיר מהמשקל ההתחלתי:  $1.367 - (0.068 \cdot 12.011) - (0.182 \cdot 1) = 0.368\text{gr}$

$$n(\text{O}) = \frac{0.368\text{gr}}{16\text{gr/mole}} = 0.023\text{mole}$$

מכאן:

$$\text{C} : \text{H} : \text{O} = 0.068 : 0.182 : 0.023$$

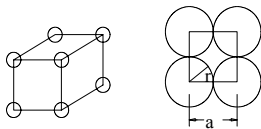
מחלקים במספר המולים הקטן ביותר (0.023) ומקבלים את הנוסחה האמפירית:  $[\text{C}_3\text{H}_8\text{O}]$

☒ חשב את אחוז הנפח שתופס החלל שבין הכדורים בתא יחידה של האריזות הבאות:  
 1 - SC, קוביה פשוטה. 2 - FCC, קוביה ממורכזת פאה. 3 - BCC, קוביה ממורכזת גוף.  
תשובה:

**נפח תפוס - נפח תא יחידה = נפח חללים**

**תא יחידה קובי פשוט מורכב מכדורים זהים בעלי רדיוס r ובעלי אורך צלע a.**

**בצורת אריזה זו המרחק בין 2 מרכזי כדורים צמודים הוא a והרדיוס של כל כדור הוא  $\frac{a}{2}$ .**



$$\text{נפח כדור הוא: } V = \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{a}{2}\right)^3 = \frac{\pi a^3}{6}$$

$$\text{מספר הכדורים בכל תא יחידה: } 8 \times \frac{1}{8} = 1$$

$$\text{נפח תא יחידה} = \text{נפח קוביה} = a^3$$

נפח החללים: נפח קוביה פחות נפח כדור אחד.

$$\text{נפח חללים} = a^3 - \frac{\pi a^3}{6} = a^3 \left(1 - \frac{\pi}{6}\right)$$

$$\% \text{ חללים} = \frac{a^3 \left(1 - \frac{\pi}{6}\right)}{a^3} \times 100 = 47.6\%$$

**קוביה ממורכזת גוף (bcc)**

$$8 \times \frac{1}{8} + 1 = 2$$

מספר הכדורים בתא היחידה

$$a^3$$

נפח תא יחידה:

נפח התפוס על ידי 2 כדורים:

$$2 \left( \frac{4}{3} \pi r^3 \right)$$

$$\sqrt{(a\sqrt{2})^2 + a^2} = a\sqrt{3}$$

אורך האלכסון הראשי:

$$a\sqrt{3} = r + 2r + r = 4r \Rightarrow r = \frac{\sqrt{3}}{4} a$$

$$\text{נפח חללים: } a^3 - 2 \cdot \frac{4}{3} \pi r^3 = a^3 - 2 \cdot \frac{4}{3} \pi \left(\frac{\sqrt{3}}{4} a\right)^3$$

$$\frac{a^3 - 2 \cdot \frac{4}{3} \pi \left(\frac{\sqrt{3}}{4} a\right)^3}{a^3} \times 100 = 31.98\%$$

אחוז החללים:

**קוביה ממורכזת פאה (fcc)**

$$8 \times \frac{1}{8} + 6 \times \frac{1}{2} = 4$$

מספר הכדורים בתא היחידה

$$4 \left( \frac{4}{3} \pi r^3 \right)$$

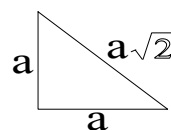
הנפח התפוס על ידי 4 כדורים:

$$a^3$$

נפח תא יחידה:

$$r = \frac{\sqrt{2}}{4} a \leftarrow a\sqrt{2} = 4r$$

אורך האלכסון הראשי של הפאה:



$$\text{אחוז הנפח החופשי: } \frac{a^3 - 4 \left( \frac{4}{3} \pi \left( \frac{a\sqrt{2}}{4} \right)^3 \right)}{a^3} \times 100 = 25.95\%$$