

# כימיה פיסיקאלית 124510



## תוכן העניינים

1	1. החוק השני של התרמודינמיקה
16	2. התיאוריה הקינטית של הגזים
17	3. חום והחוק הראשון של התרמודינמיקה
36	4. טמפרטורה התפשטות תרמית וחוק הגז האידיאלי
41	5. תיאוריות מוקדמות של תורת הקוונטים ומבנה האטום
66	6. תורת הקוונטים

# כימיה פיסיקאלית 124510

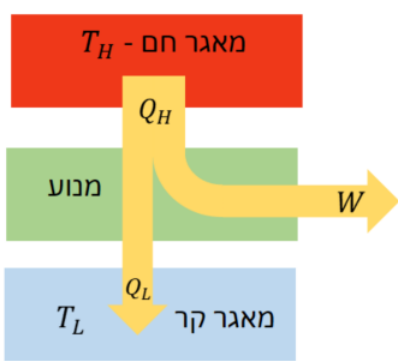
פרק 1 - החוק השני של התרמודינמיקה

תוכן העניינים

1. הקדמה לחוק השני של התרמודינמיקה ומנועי חום ..... 1
2. תהליכים הפיכים ובלתי הפיכים ומנוע קרנו ..... 4
3. מקררים מזגנים ומשאבות חום ..... 7
4. אנטרופיה ..... 9
5. סיכום ..... (ללא ספר)
6. פרשנות סטטיסטית לאנטרופיה והחוק השני ..... 13

## הקדמה לחוק השני של התרמודינמיקה ומנועי חום:

סיכום כללי:

הערות	תיאור	הנוסחה
<p>שימו לב לסימנים! כל הסימנים חיוביים!</p> <p><math>T_H</math> ו-<math>T_L</math> נקראות טמפרטורות העבודה</p>	<p><math>Q_H</math> - כמות החום שיוצאת מהמאגר החם. <math>Q_L</math> - כמות החום שנכנסת אל המאגר הקר. <math>W</math> - העבודה שהמנוע מבצע על הסביבה.</p>	 <p><math>Q_H = W + Q_L</math></p>
		$\eta = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$

שאלות:

**(1) דוגמה - נצילות של מנוע מכונית**

- למנוע של מכונית יש נצילות של 20%. המנוע מפיק  $25\text{kJ}$  של עבודה כל שניה.  
 א. כמה חום דרוש להכניס למנוע כל שניה?  
 ב. כמה חום נפלט מהמנוע כל שניה?

**(2) חישוב נצילות של מנוע חום**

- מנוע חום פולט  $6900\text{J}$  של חום כאשר הוא מבצע עבודה של  $2300\text{J}$ .  
 מה הנצילות של המנוע באחוזים?

**(3) חום שפולטת תחנת כוח**

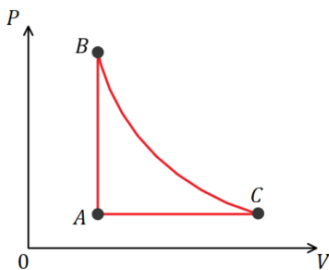
- תחנת כוח מייצרת  $560\text{MW}$  של הספק חשמלי.  
 העריכו את החום שנפלט כל שניה אם הנצילות של התחנה היא 35%.

**(4) מנוע 6 צילינדרים**

- למנוע עם 6 צילינדרים של אוטו יש נצילות של 24%. המנוע מספק 180J של עבודה בכל מחזור עבור כל צילינדר. המנוע עושה 25 מחזורים בשניה.
- מהי העבודה הכוללת שמבצע המנוע בשניה?
  - מהו החום שנוצר משריפת הדלק כל שניה?
  - אם האנרגיה הנוצרת מדלק היא 32MJ לליטר, לכמה זמן מחזיק מיכל דלק מלא המכיל 40 ליטר דלק?

**(5) מנוע הפיך עם גז ארגון**

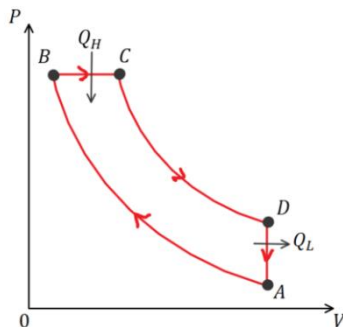
- מנוע הפיך מכיל 1.00mol של גז ארגון, גז מונואטומי כמעט אידיאלי. התהליך שעובר המנוע מתואר באיור כאשר הגז בהתחלה בנקודה A ב-STP. הנקודות B ו-C נמצאות על עקומה איזותרמית בטמפרטורה  $T = 433K$ . התהליך AB הוא תהליך בנפח קבוע והתהליך AC הוא תהליך בלחץ קבוע.



- האם המנוע מבצע את התהליך באיור עם כיוון השעון או נגד השעון?
- מהי הנצילות של המנוע?

**(6) מנוע בנזין אידיאלי**

- אפשר לתאר את הפעולה של מנוע דיזל בקירוב על ידי התהליך המחזורי באיור. אוויר נשאב לצילינדר בפעימת יניקה (לא חלק מהמחזור באיור). האוויר נדחס אדיאבטית, שלב AB. בנקודה B דלק דיזל מוזרק לתוך הצילינדר. הדלק נשרף ישר כי הטמפרטורה מאוד גבוהה. הבעירה היא יחסית איטית ובמהלך החלק הראשון של פעימת העבודה הגז מתפשט כמעט בנפח קבוע, שלב BC. בשלב השני של פעימת העבודה, אחרי שהבעירה מסתיימת, הגז מתפשט אדיאבטית, שלב CD. שלב DA מתאר את פעימת הפליטה.



- הראה שעבור מנוע שעובר את התהליך הנ"ל עם גז אידיאלי הנצילות האידיאלית היא:

$$\eta = 1 - \frac{(V_A/V_C)^{-\gamma} - (V_A/V_B)^{-\gamma}}{\gamma[(V_A/V_C)^{-1} - (V_A/V_B)^{-1}]}$$

- חשב את הנצילות אם הגז הוא דו אטומי,  $V_A/V_B = 16$  ו- $V_A/V_C = 4.5$ .

**תשובות סופיות:**

- (1) א. 125kJ    ב. 100kJ
- (2) 25%
- (3) 1000J
- (4) א. 27000J    ב. 110000J    ג. 3.2hr
- (5) א. עם השעון.    ב. 9%
- (6) א. הוכחה.    ב. 55%

## תהליכים הפיכים ובלתי הפיכים ומנוע קרנו:

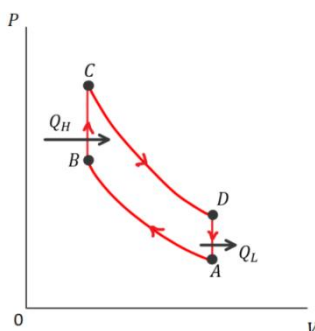
סיכום כללי:

הערות	תיאור	הנוסחה
<p>השטח שסגור בתוך הלולאה שווה לעבודה נטו שנעשית על ידי המנוע. מורכב מתהליכים הפיכים ולכן לא קיים במציאות, ניתן רק לשאוף אליו.</p>	מחזור קרנו	
<p>נקראת גם נצילות אידיאלית או מקסימאלית</p>	נצילות במנוע קרנו	$\eta_{קרנו} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$

שאלות:

### (1) דוגמה - טענה לא הגיונית

יצרן רכב טוען כי במנוע שייצר קצב הכניסה של החום הוא  $9.1 \text{ kJ}$  בטמפרטורה של  $162^\circ\text{C}$  וקצב הפליטה של החום הוא  $4.1 \text{ kJ}$  בטמפרטורה של  $22^\circ\text{C}$ . האם אתם מאמינים ליצרן?



### (2) דוגמה - נצילות של מנוע בעירה

המחזור של מנוע בעירה מתואר באיור. הניחו שחומר העבודה הוא גז אידיאלי.

א. הראו כי הנצילות של המנוע

$$\eta = 1 - \left(\frac{V_A}{V_B}\right)^{1-\gamma}$$

ב. חשבו את הנצילות של המנוע אם יחס

הדחיסה הוא:  $\frac{V_A}{V_B} = 7.0$  והגז הוא דואטומי בדומה ל- $\text{O}_2$  או  $\text{N}_2$ .



**(3) מנוע חום עם חנקן נוזלי**

זה לא הכרחי שהמאגר החם של מנוע חום יהיה יותר חם מהסביבה. חנקן נוזלי זול בערך כמו בקבוק מים והטמפרטורה שלו היא בערך 77K. מה תהיה הנצילות המקסימלית של מנוע הפועל בין הטמפרטורה של חנקן נוזלי לטמפרטורת החדר 293K?

**(4) מנוע 1100W**

מנוע קרנו פועל בטמפרטורות 190°C ו- 25°C. ההספק של המנוע הוא 1100W. כמה חום פולט המנוע כל שניה?

**(5) מטפס הרים**

הניחו שאדם ששוקל 70kg צריך  $4.3 \cdot 10^3 \text{ kcal}$  של אנרגיה בשביל יום אחד של פעילות. העריכו את הגובה המקסימאלי שאותו אדם יכול לטפס על הר עם כמות זו של אנרגיה. כהערכה גסה אפשר להתייחס לאדם כמנוע הפועל בין טמפרטורות הגוף 37°C לטמפרטורת הסביבה 20°C.

**(6) טמפרטורת עבודה בנסיעה**

מכונית מייצרת עבודה בקצב של בערך  $7 \frac{\text{kJ}}{\text{sec}}$  כאשר היא נוסעת במהירות

קבועה של  $25 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$  בכביש אופקי, זוהי עבודה כנגד כוח החיכוך.

המכונית יכולה לנסוע 14km לכל ליטר דלק.

מה הערך המינימלי של  $T_H$  אם  $T_L = 25^\circ\text{C}$  והאנרגיה הזמינה מליטר אחד של

דלק היא:  $3.2 \cdot 10^7 \text{ J}$ ?

**(7) חישובים במחזור קרנו**

מול אחד של גז מונואטומי עובר תהליך של מחזור קרנו,

כאשר  $T_H = 380^\circ\text{C}$  ו-  $T_L = 180^\circ\text{C}$ .

הלחץ ההתחלתי הוא 7.8atm.

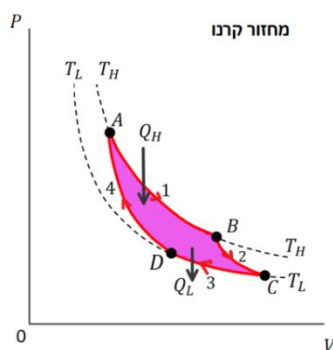
במהלך ההתרחבות האיזותרמית הנפח מוכפל.

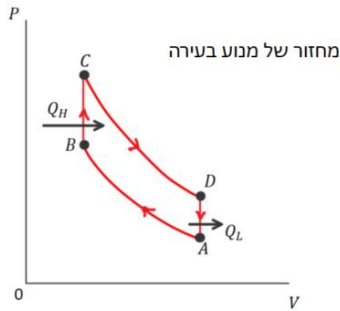
א. מהם הלחץ והנפח בנקודות: A, B, C, D?

ב. מצאו את  $Q$ ,  $W$  ו-  $\Delta E_{\text{int}}$  עבור כל שלב בתהליך.

ג. חשבו את הנצילות של המנוע באמצעות

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H} \text{ ו- } \eta = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$





**(8) יחס דחיסה במנוע בעירה**

במנוע שמתנהג בקירוב כמו המחזור של מנוע בעירה הדלק מוצת בסוף שלב הדחיסה האדיאבטית. טמפרטורת ההצתה של דלק מסוג אוקטן 95 היא  $280^{\circ}\text{C}$  ובהנחה שחומר העבודה הוא גז שמגיע מהאוויר (דו אטומי בטמפרטורה  $25^{\circ}\text{C}$ ) קבעו מהו יחס הדחיסה

המירבי  $\frac{V_A}{V_B}$ .

**תשובות סופיות:**

- (1) לא.
- (2) א. הוכחה. ב. 54%
- (3) 74%
- (4) 5000J
- (5) 1400m
- (6)  $400^{\circ}\text{K}$
- (7) א.  $P_B = 4 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ,  $V_B = 1.4 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$ ,  $P_A = 7.9 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ,  $V_A = 0.69 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$
- ב.  $P_D = 3.2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ,  $V_D = 1.2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$ ,  $P_C = 1.6 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ,  $V_C = 2.4 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$
- ג.  $\Delta E_{\text{int}_{BC}} = -2500 \text{ J}$ ,  $Q_{BC} = 0$ ,  $W_{BC} = 2500 \text{ J}$ ,  $\Delta E_{\text{int}_{AB}} = 0$ ,  $Q_{AB} = W_{AB} = 3800 \text{ J}$
- ד.  $\Delta E_{\text{int}_{DA}} = 2500 \text{ J}$ ,  $Q_{DA} = 0$ ,  $W_{DA} = -2500 \text{ J}$ ,  $\Delta E_{\text{int}_{CD}} = 0$ ,  $Q_{CD} = W_{CD} = -2600 \text{ J}$
- ה.  $\eta = 31\%$
- (8) 7.1

## מקררים מזגנים ומשאבות חום:

סיכום כללי:

הערות	תיאור	הנוסחה
	<p>מקדם היעילות של מקרר או מזגן</p>	$COP = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L}$
	<p>עבור מקרר או מזגן אידיאלי (לא מושלם)</p>	$COP_{ideal} = \frac{T_L}{T_H - T_L}$
<p>תמיד גדול מאחד</p>	<p>מקדם היעילות של משאבת חום</p>	$COP = \frac{Q_H}{W}$

שאלות:

**(1) דוגמה - מכינים קרח**

למקפיא יש מקדם יעילות של 3.6 והוא עובד בהספק של 200W. כמה זמן ייקח למקפיא להקפיא מגש קוביות קרח אם המגש הוכנס למקרר המכיל 400gr מים ב-0°C?

**(2) דוגמה - משאבת חום**

למשאבת חום מקדם יעילות של 3.0 והספק של 1200W.  
 א. כמה חום היא מוסיפה לחדר כל שניה?  
 ב. אם הופכים את פעולת המשאבה בקיץ כך שתשמש כמזגן, מה תצפו שיהיה מקדם היעילות שלה?

**(3) מקדם יעילות של מקרר אידיאלי**  
מקרר אידיאלי מחזיק את הטמפרטורה בתוכו ב- $4^{\circ}\text{C}$  כאשר הטמפרטורה בבית היא  $25^{\circ}\text{C}$ . מהו מקדם היעילות של המקרר?

**(4) מנוע קרנו עובד הפוך**  
למנוע אידיאלי (מנוע קרנו) יש נצילות של 37%. אם היה אפשר להפעיל את המנוע הפוך כך שיעבוד בתור משאבת חום, מה היה מקדם היעילות של המנוע?

**(5) מקרר קרנו אידיאלי מקפיא מים**  
"מקרר קרנו" (מנוע קרנו שעובד הפוך) מוציא חום מתא ההקפאה הנמצא בטמפרטורה של  $-15^{\circ}\text{C}$  ופולט אותו לחדר בטמפרטורה של  $25^{\circ}\text{C}$ .  
א. הראו כי אם מקדם היעילות של מקרר מוגדר לפי:  $\text{COP} = \frac{Q_L}{W}$   
אז מקדם היעילות של מקרר קרנו הוא:  $\text{COP}_{\text{ideal}} = \frac{T_L}{T_H - T_L}$ .  
ב. כמה עבודה מבצע המנוע לשנות  $0.6\text{kg}$  של מים ב- $25^{\circ}\text{C}$  לקרח ב- $-15^{\circ}\text{C}$ ? אם ההספק של המדחס במנוע הוא  $160\text{W}$ , מהו הזמן המינימלי הדרוש להקפיא מים מטמפרטורה של  $25^{\circ}\text{C}$  לקרח ב- $0^{\circ}\text{C}$ ?

**(6) משאבת חום לא אידיאלית**  
משאבת חום פועלת כמזגן ושומרת את הטמפרטורה בתוך הבניין על  $24^{\circ}\text{C}$  כאשר הטמפרטורה בחוץ היא  $40^{\circ}\text{C}$ .  
בשביל לבצע זאת המשאבה שואבת  $3 \cdot 10^7\text{J}$  חום בשעה מתוך הבניין ביעילות של 25% מהיעילות האידיאלית (זו של מקרר קרנו).  
א. מהו מקדם היעילות של המשאבה?  
ב. מהו ההספק של המדחס במשאבה? רשום תשובה בכוח סוס.

### תשובות סופיות:

- (1) בערך 3 דקות.  
(2) א.  $4600\text{J}$  ב. 2  
(3) 13  
(4) 2.7  
(5) א. הוכחה. ב.  $4.4 \cdot 10^4\text{J}$   
(6) א. 4.6 ב. 2.4HP

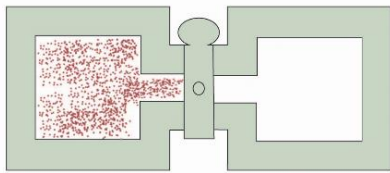
## אנטרופיה:

### סיכום כללי:

הערות	תיאור	הנוסחה
רק בטמפרטורה קבועה ובתהליך הפיך T - בקלווין!	Q - כמות החום שנכנסת למערכת	$\Delta S = \frac{Q}{T}$
	האנטרופיה היא משתנה מצב של המערכת	השינוי באנטרופיה לא תלוי בתהליך

### שאלות:

- (1) **דוגמה - שינוי באנטרופיה כשמערבבים מים**  
מערבבים 5kg מים ב-20°C עם 5kg מים ב-24°C.  
א. מה תהיה הטמפרטורה הסופית של המים המערבבים?  
ב. העריכו את השינוי באנטרופיה של כל המערכת.



- (2) **דוגמה - שינוי באנטרופיה בהתפשטות חופשית**  
גז מתפשט בצורה אדיאבטית וחופשית  
(כפי שמתואר בפרק הקודם בסרטון התפשטות  
חופשית) מנפח  $V_1$  לנפח  $V_2$ .  
א. חשבו את השינוי באנטרופיה של הגז.  
ב. מהו השינוי באנטרופיה של הסביבה?  
ג. הערך את השינוי באנטרופיה עבור  $n = 1.00$  ו- $V_2 = 2.00V_1$ .

- (3) **דוגמה - נחושת חמה נזרקת לתוך אגם**  
גוש נחושת חם בעל מסה של 2.00kg בטמפרטורה של  $T_1 = 840^\circ\text{K}$  נזרק לאגם  
גדול בטמפרטורה של  $T_2 = 280^\circ\text{K}$ .  
הניחו כי האגם מספיק גדול כך שהטמפרטורה שלו לא משתנה באופן מהותי.  
מהו השינוי באנטרופיה של:  
א. הנחושת.  
ב. האגם.  
ג. הכולל.

**(4) דוגמה - קוביית קרח נמסה**

קוביית קרח במסה של  $1.00\text{kg}$  ובטמפרטורה של  $0^{\circ}\text{C}$  נמצאת במגע עם מאגר חום גדול שהטמפרטורה שלו היא מעט מעל  $0^{\circ}\text{C}$ . כתוצאה מכך הקרח נמס מאוד לאט למים. מה השינוי באנטרופיה של:

א. הקרח.  
ב. המאגר.

**(5) שינוי באנטרופיה של מים שהופכים לאדים**

מהו השינוי באנטרופיה של  $150\text{gr}$  של מים ב- $100^{\circ}\text{C}$  שהופכים לאדים ב- $100^{\circ}\text{C}$ ?

**(6) קופסה מחליקה על משטח עם חיכוך**

קופסה בעלת מסה של  $6.5\text{kg}$  מחליקה על משטח אופקי לא חלק (קיים חיכוך קינטי). חשבו את השינוי באנטרופיה של היקום מתחילת תנועתה של הקופסה במהירות  $5 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$  ועד לעצירתה. הניחו שכל הגופים נמצאים בטמפרטורת החדר  $293\text{K}$ .

**(7) מים מתקררים ממאגר קרח**

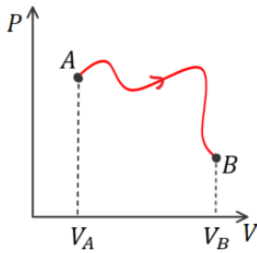
$1.0\text{L}$  של מים ב- $0^{\circ}\text{C}$  נמצאים במגע עם כמות גדולה של קרח ב- $10^{\circ}\text{C}$ . כתוצאה מכך המים קופאים ומתקררים גם ל- $10^{\circ}\text{C}$ . חשבו את השינוי הכולל באנטרופיה.

**(8) מוט ברזל נזרק למים**

מוט ברזל בעל מסה של  $1.8\text{kg}$  ובטמפרטורה של  $43^{\circ}\text{C}$  נזרק למיכל מים המצופה בקלקר. המיכל מכיל  $1.2\text{kg}$  מים בטמפרטורת החדר ( $20^{\circ}\text{C}$ ). מהו השינוי הכולל באנטרופיה?

**(9) גז אידיאלי מתפשט איזותרמית**

גז אידיאלי מתפשט איזותרמית  $T = 350^{\circ}\text{K}$  מנפח  $2.30\text{L}$  ולחץ  $6.9\text{atm}$  ללחץ  $1.0\text{atm}$ . מהו השינוי באנטרופיה של הגז?



**(10) גז אידיאלי עובר תהליך מוזר**

גז אידיאלי המכיל  $n$  מולים עובר את התהליך המתואר באיור. הטמפרטורה בנקודות A ו-B זהה. חשבו את השינוי באנטרופיה של הגז בעקבות התהליך. נתונים:  $V_A$ ,  $nV_B$ .

**(11) שני גזים מתערבבים**

1.00mol של גז חנקן ו-1.00mol של גז חמצן נמצאים בתאים נפרדים, זהים בגודלם, באותה הטמפרטורה ומבודדים מהסביבה. מחברים בין התאים והגזים (האידיאליים) מתערבבים. מהו השינוי באנטרופיה של:

- כל המערכת?
- של הסביבה?
- חזור על סעיף א' אם התא של אחד הגזים גדול פי שניים מהתא של השני.

**(12) קיבול חום מולרי משתנה**

קיבול החום המולרי של אשלגן בטמפרטורות נמוכות משתנה עם הטמפרטורה לפי  $C_V = \alpha T + \beta T^3$  כאשר  $\alpha = 2.08 \frac{\text{mJ}}{\text{mol} \cdot \text{K}^2}$  ו-  $\beta = 2.57 \frac{\text{mJ}}{\text{mol} \cdot \text{K}^4}$ . מצאו את השינוי באנטרופיה של 0.25mol של אשלגן כאשר הטמפרטורה שלו יורדת מ-4.0K ל-2.0K בתהליך בנפח קבוע.

## תשובות סופיות:

$$(1) \quad \text{א. } 22^\circ\text{C} \quad \text{ב. } 1 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$(2) \quad \text{א. } \Delta S = nR \ln \frac{V_2}{V_1} \quad \text{ב. } \Delta S = 0 \quad \text{ג. } 5.76 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$(3) \quad \text{א. } -857 \frac{\text{J}}{\text{K}} \quad \text{ב. } 1560 \frac{\text{J}}{\text{K}} \quad \text{ג. } 703 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$(4) \quad \text{א. } -1220 \frac{\text{J}}{\text{K}} \quad \text{ב. } 1220 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$(5) \quad 910 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$(6) \quad 0.28 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$(7) \quad 48 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$(8) \quad 2.2 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$(9) \quad 8.8 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$(10) \quad nR \ln \frac{V_B}{V_A}$$

$$(11) \quad \text{א. } 5.8 \frac{\text{J}}{\text{K}} \quad \text{ב. } 0 \quad \text{ג. } 13 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

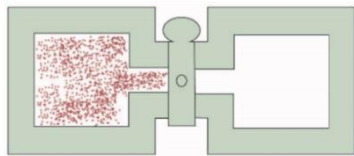
$$(12) \quad -11 \frac{\text{mJ}}{\text{K}}$$

## פרשנות סטטיסטית לאנטרופיה והחוק השני:

### סיכום כללי:

הערות	תיאור	הנוסחה
	k - קבוע בולצמן Ω - פונקציית המצבים המיקרוסקופיים	$S = k \ln \Omega$

### שאלות:



- (1) **דוגמה - התפשטות חופשית גישה סטטיסטית**  
 השתמשו במשוואה של בולצמן לאנטרופיה וחשבו את השינוי באנטרופיה במקרה של התפשטות חופשית של מול אחד של גז אידיאלי מנפח  $V$  לנפח  $2V$ .  
 הניחו ש-Ω אומרת את מספר המיקומים האפשריים של כל המולוקולות. השוו לחישוב שנעשה בדוגמה הקודמת של התפשטות חופשית באמצעות הנוסחה של קלאוזיוס.

### (2) אנטרופיה להטלת 4 מטבעות

השתמשו בפונקציית המצבים Ω וחשבו מה האנטרופיה בכל אחד מהמצבים המיקרוסקופיים שתוארו בדוגמה של הטלת 4 מטבעות.

מספר המצבים המיקרוסקופיים	המצבים המיקרוסקופיים המתאימים (H-ראש, T-זנב)	המצב המיקרוסקופי
1	HHHH	4 ראש
4	THHH, HTHH, HHTH, HHHT	3 ראש, 1 זנב
6	TTHH, THTH, HTTH, THHT, HTHT, HHTT	2 ראש, 2 זנב
4	HTTT, THTT, TTHT, TTTH	1 ראש, 3 זנב
1	TTTT	4 זנב

### (3) הטלת 5 מטבעות

- דני לקח 5 מטבעות והטיל אותם בצורה אקראית על השולחן.  
 א. רשמו טבלה ובה את מספר המצבים המיקרוסקופיים המתאימים לכל מצב מקרו.  
 ב. מהי ההסתברות שבהטלה יצאו 3 מטבעות ראש ו-2 זנב?  
 ג. מהי ההסתברות שכל המטבעות יפלו על זנב?  
 ד. מהי ההסתברות שבהטלה יפלו לפחות 3 מטבעות על זנב?

**(4) שינוי באנטרופיה בסידור 10 מטבעות**

על שולחן ישנם 10 מטבעות כאשר 9 מתוכם נמצאים עם הראש כלפי מעלה ואחד עם הזנב כלפי מעלה. הופכים 3 מטבעות שהיו עם הראש כלפי מעלה. מה השינוי באנטרופיה של המערכת? השווה לשינוי באנטרופיה של מערכת תרמודינמית מאחד הדוגמאות הקודמות. ניתן לחשב את פונקציית המצבים גם באמצעות מקדמי הבינום של ניוטון:  $\frac{n!}{k!(n-k)!}$  כאשר  $n$  הוא מספר המטבעות ו- $k$  מספר המטבעות עם הזנב (או הראש) כלפי מעלה.

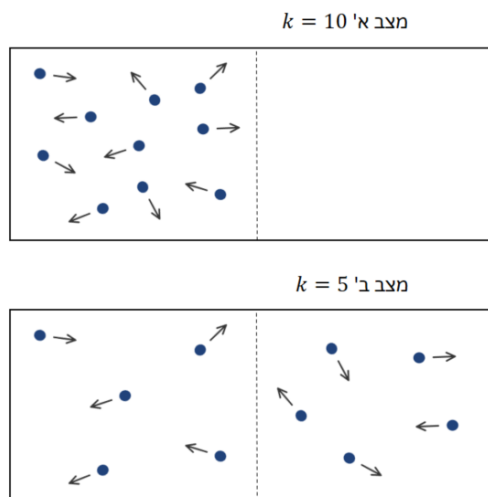
**(5) גז עם 10 אטומים בתיבה**

נניח שישנה מערכת דמויית גז המכילה  $n = 10$  אטומים במהירויות זהות. ה"גז" נמצא בתוך תיבה. נסמן את מספר האטומים הנמצאים בחציה השמאלית של התיבה ב- $k$ . מספר האפשרויות לסדר את האטומים כך ש- $k$  אטומים יהיו

$$\frac{n!}{k!(n-k)!} \cdot$$

נניח כי כל ערך של  $k$  מסמל מצב מיקרוסקופי של המערכת. במצב א' שבאיור כל 10 האטומים בצד שמאל של התיבה ( $k = 10$ ) ובמצב ב' שבאיור 5 בחצי הימני ו-5 בשמאלי ( $k = 5$ ).

- א. מהו השינוי באנטרופיה במעבר בין מצב א' למצב ב'? האם התהליך יכול להתרחש בצורה ספונטנית?
- ב. מהו השינוי באנטרופיה במעבר בין מצב ב' למצב א'? האם התהליך יכול להתרחש בצורה ספונטנית?



**תשובות סופיות:**

Rln(2) (1)

(2)

המצב המיקרוסקופי	אנטרופיה
4 ראש	0
3 ראש, 1 זנב	$1.91 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$
2 ראש, 2 זנב	$2.47 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$
1 ראש, 3 זנב	$1.91 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$
4 זנב	0

א. (3)

מזב מקרוסקופי	המצבים המיקרוסקופיים	פונקציית המצבים $\Omega$
5-H, 0-T	HHHHH	1
4-H, 1-T	HHHHT, HHHHT, HHTHH, HTHHH, THHHH	5
3-H, 2-T	HHHTT, HHTHT, HTHHT, THHHT, HHTTH, HTTTH, THTHH, TTHHH, HTHTH, THHTH	10
2-H, 3-T	כמו 3-H, 2-T רק להחליף H ב-T	10
1-H, 4-T	כמו 4-H, 1-T רק להחליף H ב-T	5
0-H, 5-T	כמו 5-H, 0-T רק להחליף H ב-T	1

ד. 50%

ג. 3.125%

ב. 31.25%

$4.2 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$  (4)

א.  $7.63 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$ , ב.  $-7.63 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$ , לא. (5)

# כימיה פיסיקאלית 124510

פרק 2 - התיאוריה הקינטית של הגזים

תוכן העניינים

1. הסברים ותרגול.....16

## הסברים ותרגול:

### שאלות:

- (1) **דוגמה-אנרגיה של מולקולה**  
 מהי האנרגיה הקינטית הממוצעת של מולקולה של גז אידיאלי בטמפרטורת החדר (בערך  $20^{\circ}\text{C}$ )?
- (2) **מהירות של מולקולה באוויר**  
 מצא את גודל ה- $v_{\text{rms}}$  של מולקולת חמצן  $\text{O}_2$  ושל מולקולת חנקן  $\text{N}_2$  באוויר, בטמפרטורת החדר  $20^{\circ}\text{C}$ .
- (3) **דוגמה-שינוי בנפח ובטמפרטורה**  
 גז המקיים את חוקי הגז האידיאלי נמצא במיכל סגור שיכול לשנות את נפחו.  
 א. מה יהיה השינוי  $v_{\text{rms}}$  של מולקולה בגז אם מכפילים את נפח המיכל כאשר מחזיקים את הלחץ והטמפרטורה קבועים.  
 ב. פי כמה צריכה להשתנות הטמפרטורה של הגז בשביל שה- $v_{\text{rms}}$  תגדל פי 2?
- (4) **דוגמה-מיכל הליום ממלא בלונים**  
 משתמשים במיכל הליום על מנת לנפח בלונים.  
 עם כל בלון שמנפחים מספר המולים של הגז במיכל קטנים.  
 האם מהירות המולקולות תגדל, תקטן או לא תשתנה?

### תשובות סופיות:

$$E_k = 6.07 \cdot 10^{-21} \text{ J} \quad (1)$$

$$v_{\text{rms O}_2} \approx 478 \frac{\text{m}}{\text{sec}}, v_{\text{rms N}_2} \approx 513 \frac{\text{m}}{\text{sec}} \quad (2)$$

$$\text{א. } v_{\text{rms}} \text{ לא ישתנה. ב. פי 4.} \quad (3)$$

$$v_{\text{rms}} \text{ לא ישתנה, } P \text{ יקטן.} \quad (4)$$

# כימיה פיסיקאלית 124510

פרק 3 - חום והחוק הראשון של התרמודינמיקה

תוכן העניינים

17	1. חום טמפרטורה ואנרגיה פנימית.....
18	2. קיבול חום ושיטת הקלורימטריה.....
20	3. חום כמוס.....
22	4. החוק הראשון וניתוח תהליכים פשוטים.....
27	5. קיבול חום של גזים ועקרון החלוקה השווה.....
28	6. הקשר בין לחץ ונפח בהתפשטות אדיאבטית.....
31	7. הולכה הסעה וקרינה.....
34	8. סיכום.....

## חום טמפרטורה ואנרגיה פנימית:

סיכום כללי:

הערות	תיאור	הנוסחה
האנרגיה הפנימית של הגז תלויה רק בטמפרטורה	אנרגיה פנימית של גז אידיאלי מונואטומי n - מספר המולים $R = 8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$ T - טמפרטורה בקלווין	$E_{\text{int}} = \frac{3}{2} nRT$
תלויה רק בטמפרטורה	עבור גז אידיאלי דו-אטומי	$E_{\text{int}} = \frac{5}{2} nRT$

שאלות:

(1) דוגמה - שורפים קלוריות

לאיזה גובה צריך לטפס אדם שמסתו 60 ק"ג בשביל לשרוף 100Cal (100kilocal)?

תשובות סופיות:

700m (1)

## קיבול חום ושיטת הקלורימטריה:

סיכום כללי:

הערות	תיאור	הנוסחה
	c - קיבול חום סגולי ליחידת מסה	$Q = mc\Delta T$

שאלות:

- דוגמה - מחממים ספל מים**

ספל מים שוקל 200 גרם ועשוי מזכוכית. כמה חום דרוש בשביל לחמם את הספל מטמפרטורת החדר ( $20^{\circ}\text{C}$ ) ל- $80^{\circ}\text{C}$  אם:  
 א. הספל ריק ממים.  
 ב. הספל מכיל 200 גרם מים (הנמצאים גם בטמפרטורת החדר בהתחלה).
- דוגמה - הקפה מתקרר**

מוזגים 200 סמ"ק קפה בטמפרטורה של  $90^{\circ}\text{C}$  לכוס זכוכית בעלת מסה של 150 גרם הנמצאת בטמפרטורה של  $20^{\circ}\text{C}$ . מה תהיה טמפרטורת הקפה בכוס במצב שיווי משקל? הנח כי המערכת מבודדת בקירוב.
- דוגמה - מציאת קיבול חום באמצעות קלורימטר**

נרצה למצוא את קיבול החום של תרכובת מתכות חדשה. מחממים 100 גרם מהתרכובת ל- $500^{\circ}\text{C}$  ומעבירים אותה במהירות לתוך קלורימטר. הקלורימטר מורכב ממיכל אלומיניום בעל מסה של 0.200kg המכיל 0.500kg מים בטמפרטורה של  $22.4^{\circ}\text{C}$ . הטמפרטורה הסופית הנמדדת על ידי המדחום היא  $40.8^{\circ}\text{C}$ . מהו קיבול החום הסגולי של התרכובת? ניתן להזניח את החום שהולך למדחום והחום שיוצא מהבידוד.
- תרגיל וניסוי - קומקום מחמם מים**

קומקום חשמלי פועל בהספק של 1850 וואט. כמה זמן ייקח לקומקום לחמם חצי ליטר של מים מטמפרטורה של  $22.2^{\circ}\text{C}$  ל- $100^{\circ}\text{C}$ ?

- (5) **תרגיל וניסוי - קומקום מחמם מים - הפעם עם הקומקום**  
 המשך של התרגיל הראשון, גם הפעם נחמם חצי ליטר מים באותו הקומקום (1850W) אבל הפעם לא נחמם את הקומקום לפני הניסוי ונחשב שוב, כמה זמן ייקח לחמם את המים?  
 טמפרטורת החדר היא  $21.9^{\circ}\text{C}$  מסת הקומקום היא 754 גרם ונניח כי הוא עשוי נירוסטה וקיבול החום של נירוסטה הוא:  $0.500 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$ .

### תשובות סופיות:

- (1) א.  $10^4 \text{J}$       ב.  $6 \cdot 10^4 \text{J}$   
 (2)  $81^{\circ}\text{C}$   
 (3)  $911 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{C}}$   
 (4) 90sec  
 (5) 100sec

## חום כמוס:

### סיכום כללי:

הערות	תיאור	הנוסחה
$L_F$ - חום כמוס להתכה (מעבר ממוצק לנוזל או להיפך) $L_V$ - חום כמוס לרתיחה (מעבר מנוזל לגז או להיפך)	$L$ - החום הכמוס	$Q = m \cdot L$

### שאלות:

#### (1) דוגמה - קרח במים

מכניסים קוביית קרח בטמפרטורה של  $-15^{\circ}\text{C}$  ומסה של 300 גרם לתוך מיכל מים המכיל 1.5kg מים בטמפרטורה של  $20^{\circ}\text{C}$ .  
מה תהיה הטמפרטורה הסופית של התערובת?

#### (2) דוגמה - מציאת חום כמוס של כספית

לוקחים 1kg כספית הנמצאת במצב מוצק ובטמפרטורת ההתכה שלה,  $-39^{\circ}\text{C}$ . מניחים את הכספית בתוך קלורימטר המורכב ממיכל אלומיניום במסה של 0.40kg ומכיל 0.47kg מים בטמפרטורה של  $20^{\circ}\text{C}$ . הכספית מותכת והטמפרטורה הסופית של התערובת היא  $12^{\circ}\text{C}$ . מהו החום הכמוס הסגולי הדרוש להתכת כספית?  
קיבול החום הסגולי של כספית במצב הנוזלי הוא:  $c = 140 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}}$ .

#### (3) תרגיל וניסוי - מתי יגמרו המים בסיר

מחממים 400ml מים על הגז בסיר נירוסטה שמשקלו 177 גרם. מודדים את טמפרטורת המים פעם אחת ורואים שהיא  $60.0^{\circ}\text{C}$ . 16.68 שניות לאחר מכן הטמפרטורה היא  $63.3^{\circ}\text{C}$ .  
א. מהו קצב מעבר החום למים?  
מחממים את המים עד לנקודת הרתיחה  $100^{\circ}\text{C}$ .  
ב. כמה זמן ייקח לכל המים בסיר להפוך לאדים?

**(4) רוכב אופניים**

רוכב אופניים שותה 7 ליטר מים במהלך רכיבה של 3 שעות.  
 נניח כי בקירוב כל האנרגיה של הרוכב הולכת לאידוי המים דרך זיעה.  
 כמה אנרגיה בקילו-קלוריות השתמש הרוכב בנסיעה?  
 (מכיוון שהיעילות של הגוף היא בערך 20% ההערכה שכל האנרגיה הולכת לחום היא לא רחוקה).

**(5) ברזל בקלורימטר**

מחממים חתיכה של 300 גרם ברזל ל-180 מעלות צלזיוס ושמים אותה בקלורימטר העשוי ממיכל אלומיניום בעל מסה של 90 גרם שמכיל 285 גרם גליצרין ב-12 מעלות צלזיוס. הטמפרטורה הסופית של התערובת היא 38 מעלות צלזיוס. הערך מהו קיבול החום הסגולי של גליצרין.

**תשובות סופיות:**

**(1)**  $2^{\circ}\text{C}$

**(2)**  $11 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

**(3)** א.  $300 \frac{\text{J}}{\text{sec}}$  . ב. בערך 40 דקות.

**(4)** 4500kcal

**(5)**  $2.3 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{C}^{\circ}}$

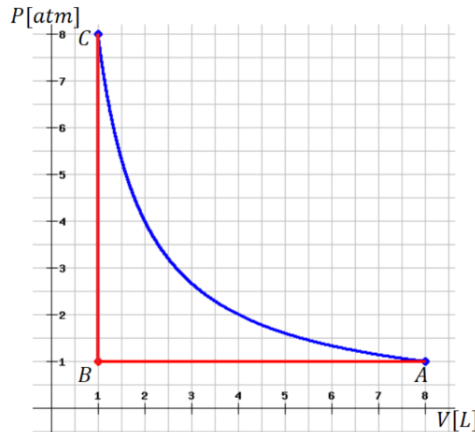
## החוק הראשון וניתוח תהליכים פשוטים:

### סיכום כללי:

הערות	תיאור	הנוסחה
<p>חום היא אנרגיה שעוברת רק בגלל הפרשי טמפרטורות. עבודה היא אנרגיה שעוברת מכל סיבה אחרת.</p> <p>אם המערכת מבצעת עבודה אז <math>W</math> יהיה חיובי ואם מתבצעת עבודה על המערכת אז <math>W</math> יהיה שלילי.</p> <p>אם חום נכנס למערכת אז <math>Q</math> חיובי ואם חום יוצא מהמערכת אז <math>Q</math> שלילי.</p>	החוק הראשון	$\Delta E_{int} = Q - W$
<p>כולל אנרגיה קינטית ופוטנציאלית של כל המערכת כגוף אחד (או של מרכז המסה שלה).</p> <p>בדרכ מתייחס למערכות מכניות כמו גופים קשיחים (אבן שנזרקת לדוגמה).</p>	חוק ראשון נוסחה מורחבת	$\Delta U + \Delta E_k + \Delta E_{int} = Q - W$
<p>מתרחש כאשר המערכת צמודה למאגר חום גדול והתהליך הוא קוויזיסטטי (מאוד איטי).</p>	$T = \text{const}$ $Q = W, \Delta E_{int} = 0$	תהליך איזותרמי - טמפרטורה קבועה
<p>מתרחש אם המערכת מבודדת או אם התהליך מהיר והחום לא מספיק לעבור.</p>	$\Delta E_{int} = W$	תהליך אדיאבטי - $Q = 0$
		תהליך איזוברי (לחץ קבוע) ואיזוכורי (נפח קבוע)
<p>חיובי כאשר הנפח גדל ושלילי כאשר הנפח קטן</p> <p>הנוסחה נכונה לגזים, נוזלים ולמוצקים</p>	<p><math>W</math> - עבודה שמבצעת המערכת על הסביבה</p> <p><math>P</math> - לחץ <math>V</math> - נפח</p>	$W = \int P dV$
<p>אי אפשר לצייר התפשטות חופשית בדיאגרמת P-V מכיוון שמשתני המצב לא מוגדרים במהלך ההתפשטות.</p>	תהליך שבו גז מתפשט במרחב בצורה אדיאבטית ומבלי לעשות עבודה.	התפשטות חופשית - (free expansion)

**שאלות:**

- (1) **דוגמה - חוק ראשון**  
מוסיפים למערכת של חום ועושים על המערכת עבודה של 1000J.  
מה השינוי באנרגיה הפנימית של המערכת?
- (2) **דוגמה - אנרגיה קינטית לחום**  
קליע במסה של 3.0 גרם חודר לתוך עץ במהירות של 300 מטר לשנייה.  
כמה חום נוסף למערכת קליע ועץ?
- (3) **דוגמה - חישוב חום בתהליך איזוברי ואיזוכורי**  
גז אידיאלי מתחיל מהמצב המתואר בנקודה A בגרף.  
דוחסים את הגז בתהליך איזוברי עד לנקודה B ולאחר מכן מחממים את הגז בתהליך איזוכורי עד לנקודה C.  
הגרף המחבר בין A ל-C הוא גרף איזותרמי.  
א. מהי העבודה הכוללת שנעשתה בכל התהליך A עד C?  
ב. מהו החום שנוסף לגז בכל התהליך?

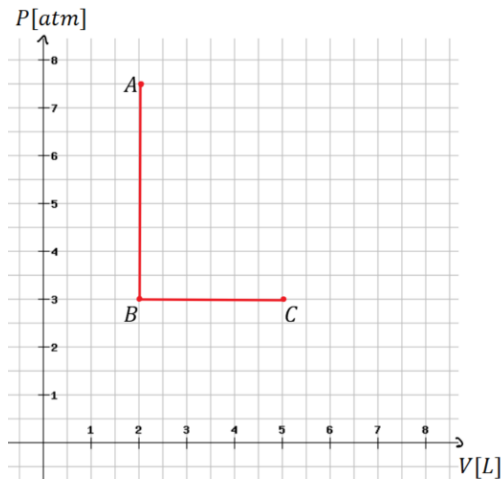


- (4) **דוגמה - עבודה של גז במנוע**  
במנוע 0.4 מול של גז אידיאלי מונואטומי מתרחבים במהירות ובצורה אדיאבטית כנגד הבוכנה. בתהליך, הטמפרטורה של הגז יורדת מ-1100K ל-400K.  
כמה עבודה ביצע הגז?
- (5) **מכונת בולמת**  
מכונת בולמת במשקל 1300 ק"ג נוסעת במהירות 80 קמ"ש.  
כמה חום נוצר במהלך הבלימה עד לעצירה מוחלטת?  
רשמו את התשובה בגאול ובקילו קלוריות.

**(6) תהליך נפח קבוע ולחץ קבוע**

גז אידיאלי עובר תהליך המורכב משני שלבים. בשלב הראשון, בגרף, AB, מאפשרים לחום לצאת מהגז תוך שמירה על נפח קבוע. כתוצאה מכך הלחץ של הגז יורד מ-7.5atm ל-3atm. בשלב השני, BC הגז מתרחב בלחץ קבוע מנפח 2.0L לנפח 5.0L ובכך חוזר לטמפרטורה שהייתה לו בתחילת כל התהליך. חשבו את :

- העבודה הכוללת שנעשתה על ידי הגז בתהליך.
- השינוי באנרגיה הפנימית של הגז.
- כמות החום הכוללת שיצאה או נכנסה לגז.



**(7) גז מתפשט איזותרמית**

1.50 מולים של גז אידיאלי בנפח  $2.50\text{m}^3$  ובטמפרטורה  $280^\circ\text{K}$  מתפשטים איזותרמית עד לנפח  $5.00\text{m}^3$ .  
 א. מהי העבודה שעושה הגז?  
 ב. מהו השינוי באנרגיה הפנימית של הגז?  
 ג. מהו החום שנוסף לגז?

**(8) גז מתפשט אדיאבטית**

שניים וחצי מולים של גז אידיאלי מונואטומי מתפשטים אדיאבטית ומבצעים  $1.3 \cdot 10^4$  J של עבודה בתהליך. מהו השינוי בטמפרטורה של הגז במהלך ההתפשטות?

**9) גז בתהליך ריבועי\***

גז אידיאלי עובר תהליך כפי שמתואר באיור, התהליך מתחיל במצב A ועושה סיבוב שלם עם השעון עד לחזרה למצב A.

בתהליך אחר שבו הגז עבר מהנקודה D לנקודה C בלחץ קבוע ידוע

$$\text{כי: } W_{D \rightarrow C} = 38 \text{ J}$$

בתהליך שלישי שהתרחש מהנקודה B לנקודה D ידוע כי:  $Q_{B \rightarrow D} = -85 \text{ J}$

ו-  $W_{B \rightarrow D} = -55 \text{ J}$  (סוג התהליך לא ידוע).

כמו כן ידוע כי:  $E_B - E_A = 15 \text{ J}$  ו-  $P_A = 2.2 P_D$ .

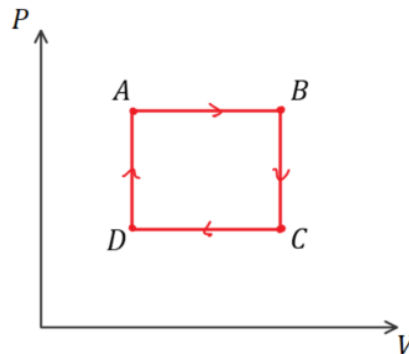
כל התהליכים התרכשו על אותו הגז.

א. תאר במילים כל שלב בתהליך הראשי, מהו סוג התהליך, האם נעשתה עבודה, האם האנרגיה הפנימית גדלה או קטנה, האם נכנס או יצא חום מהמערכת?

ב. מהי העבודה הכוללת שנעשתה על ידי הגז?

ג. מהי הנצילות של התהליך?

נצילות היא העבודה הכוללת שנעשתה חלקי החום שהושקע (כלומר נכנס לגז), כפול 100%.



### תשובות סופיות:

- (1) 2500J
- (2) 135J
- (3) א. -710J    ב. 710J
- (4) 3500J
- (5)  $Q = 3.2 \cdot 10^5 \text{ J} = 77 \text{ kcal}$
- (6) א. 910J    ב. 0    ג. 910J
- (7) א. 2420J    ב. 0    ג. 2420J
- (8)  $-0.042^\circ\text{K}$
- (9) א.  $A \rightarrow B$  - תהליך בלחץ קבוע, הגז עושה עבודה על הסביבה, האנרגיה הפנימית גדלה, נכנס חום למערכת.
- $B \rightarrow C$  - תהליך בנפח קבוע, לא נעשית עבודה, האנרגיה הפנימית קטנה, חום יוצא מהמערכת.
- $C \rightarrow D$  - תהליך בלחץ קבוע, נעשית עבודה על הגז, האנרגיה הפנימית קטנה, חום יוצא מהמערכת.
- $D \rightarrow A$  - תהליך בנפח קבוע, לא נעשית עבודה, האנרגיה הפנימית גדלה, חום נכנס למערכת. ב. 46J    ג. 40%

## קיבול חום של גזים ועקרון החלוקה השווה:

סיכום כללי:

הערות	תיאור	הנוסחה
	$-Q_P/Q_V$ - כמות החום שעוברת בתהליך בנפח/לחץ קבוע. $C_P/C_V$ - קיבול חום בנפח/לחץ קבוע (למול)	$Q_V = nC_V\Delta T$ $Q_P = nC_P\Delta T$
	$m_{mol}$ - מסה מולרית. $C_P/C_V$ - קיבול חום בנפח/לחץ קבוע (ליחידת מסה)	$C_V = m_{mol}c_V$ $C_P = m_{mol}c_P$
	ההפרש בין קיבול החום בלחץ קבוע לקיבול החום בנפח קבוע תמיד שווה לקבוע R	$C_P - C_V = R$

שאלות:

### (1) אנשים מחממים אולם קולנוע

אולם קולנוע מכיל 1800 מקומות ישיבה. נפח האולם הוא:  $2.0 \cdot 10^4 \text{ m}^3$ . בערב הבכורה של הסרט "תרגיל חם" האולם היה מלא ומערכת האוורור התקלקלה. בכמה מעלות תעלה הטמפרטורה במשך השעתיים של הקרנת הסרט אם אדם ממוצע פולט חום בקצב של 70 וואט. הנח שהאוויר הוא גז אידיאלי דואטומי וטמפרטורת החדר היא בערך  $20^\circ\text{C}$ .

### (2) לחץ לינארי בטמפרטורה\*

גז אידיאלי דו אטומי מכיל 3.00 מולים בלחץ של 1.00 atm ובטמפרטורה של  $430^\circ\text{K}$ . הגז עובר תהליך שבו הלחץ שלו גדל לינארית עם הטמפרטורה. הטמפרטורה הסופית היא  $680^\circ\text{K}$  והלחץ הסופי הוא 1.80 atm. הנח שבכל התהליך יש 5 דרגות חופש פעילות.

א. מהו השינוי באנרגיה הפנימית של הגז?  
 ב. מהי העבודה שנעשתה על ידי הגז?  
 ג. החום שנוסף לגז?

תשובות סופיות:

(1)  $53^\circ\text{C}$

(2) א. 15600J    ב. -1720J    ג. 13900J

## הקשר בין לחץ ונפח בהתפשטות אדיאבטית:

סיכום כללי:

הערות	תיאור	הנוסחה
	הקשר בין לחץ ונפח בתהליך אדיאבטי קוויזיסטטי	$P \cdot V^\gamma = \text{const}$

שאלות:

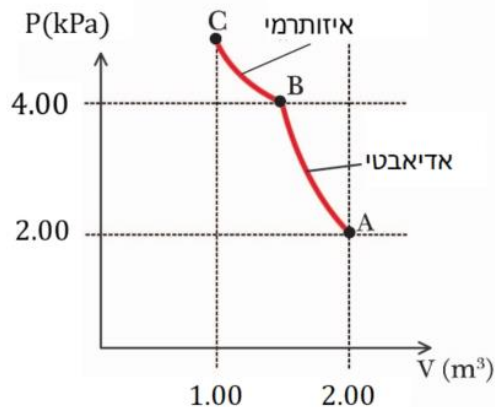
### 1) דוגמה - מכווצים גז אדיאבטית ואיזותרמית

גז אידיאלי מונואטומי עובר תהליך כפי שמתואר בגרף. התהליך מתחיל מהמצב A והגז עובר כיווץ אדיאבטי עד למצב B ומשם הוא מכווץ איזותרמית עד לנקודה C.

נתון:  $P_A = 2.00 \text{ kPa}$ ,  $V_A = 2.00 \text{ m}^3$ ,  $P_B = 4.00 \text{ kPa}$ ,  $V_C = 1.00 \text{ m}^3$ .  
 $P_C$  ו- $V_B$  אינם ידועים.

א. מצא את  $V_B$ .

ב. מהי העבודה הכוללת שנעשתה על הגז בתהליך?



### 2) לחץ וטמפרטורה בהתפשטות אדיאבטית

1.00 mol של גז מונואטומי אידיאלי בלחץ של 1.00 atm ובטמפרטורה של  $20^\circ\text{C}$  מתפשט אדיאבטית לנפח הגדול פי 2.25 מנפחו בהתחלה. מהם הלחץ והטמפרטורה הסופיים של הגז?

### 3) גז דו-אטומי מתפשט אדיאבטית

גז דו-אטומי מתפשט אדיאבטית.

הטמפרטורה בהתחלה היא  $15^\circ\text{C}$  והטמפרטורה בסוף היא  $-25^\circ\text{C}$ .

הנפח בהתחלה הוא:  $0.036 \text{ m}^3$ .

מהו נפח הגז בסוף התהליך?

**(4) גז עובר תהליך בשלושה שלבים**

1.00mol של גז אידיאלי מונואטומי שנמצא בלחץ 1.00atm עובר את התהליך הבא:

שלב 1 - הגז מתפשט אדיאבטית מ-  $T_A = 578^\circ\text{K}$  עד ל-  $T_B = 388^\circ\text{K}$ .

שלב 2 - הגז נדחס בלחץ קבוע עד שהטמפרטורה שלו מגיעה ל-  $T_C$ .

שלב 3 - הגז חוזר לטמפרטורה והלחץ הראשוניים שלו בתהליך של נפח קבוע.

א. שרטטו את התהליך בדיאגרמת  $P - V$ .

ב. מהו  $T_C$ ?

ג. חשבו את השינוי באנרגיה הפנימית, את העבודה שביצע הגז ואת החום

שנוסף לגז בכל שלב בנפרד ובתהליך כולו.

**(5) צבר אוויר עולה בגובה \*\***

צבר אוויר הוא אוסף של מולקולות בעלי משתני מצב אחידים (לחץ וטמפ'). כשצבר אוויר עולה בגובה הוא משנה את הלחץ שלו בהתאם ללחץ של האוויר

$$\text{מסביבו, ולפי הנוסחה: } \frac{dP}{dy} = -\rho g$$

כאשר  $\rho$  הוא צפיפות המסה של הצבר והוא תלוי בגובה.

במהלך התנועה כלפי מעלה, הנפח גדל, ומכיוון שאוויר הוא מוליך חום גרוע אפשר להניח שההתפשטות היא אדיאבטית.

א. הראה שעבור גז אידיאלי שעובר תהליך אדיאבטי:  $P^{1-\gamma}T^\gamma = \text{const}$

ב. הראה כי הקשר בין הלחץ לטמפרטורה של הצבר נתון לפי

$$\text{הנוסחה: } (1 - \gamma)(-\rho g) + \gamma \frac{P}{T} \frac{dT}{dy} = 0$$

ג. הראה כי התלות של הטמפרטורה בגובה היא:  $\frac{dT}{dy} = \frac{1-\gamma}{\gamma} \frac{mg}{k}$

כאשר  $m$  היא מסה ממוצעת של מולקולה ו- $k$  הוא קבוע בולצמן.

ד. בהינתן שאוויר הוא גז דו אטומי עם מסה ממוצעת של  $29u$ ,

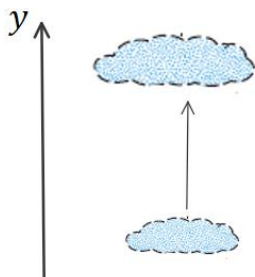
$$\text{הראה ש- } \frac{dT}{dy} = -9.8^\circ\text{C/k}$$

ה. בקליפורניה ישנם רוחות שמגיעות מההרים של מדבר סירה בנבדה.

גובה ההרים הוא כ-4000m. הרוחות מגיעות לעמק המוות שגובהו -100m,

ביחס לפני הים. אם טמפרטורת הרוח היא  $5^\circ\text{C}$  בהרים של נוודה מה תהיה

הטמפרטורה של הרוח בעמק?



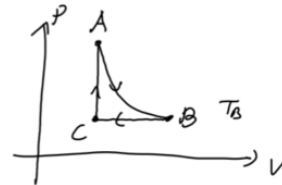
**תשובות סופיות:**

(1) א.  $1.32 \cdot \text{m}^3$  ב.  $3.4 \cdot 10^3 \text{ J}$

(2)  $P = 0.258 \text{ atm}$ ,  $T = -103^\circ \text{C}$

(3)  $0.052 \text{ m}^3$

(4) א. ב.  $214^\circ \text{K}$



ג. שלב AB:  $Q = 0$ ,  $\Delta E_{\text{int}} = -2370 \text{ J}$ ,  $W = 2370 \text{ J}$

שלב BC:  $Q = -2170 \text{ J}$ ,  $\Delta E_{\text{int}} = -2170 \text{ J}$ ,  $W = -1450 \text{ J}$

שלב CA:  $Q = 3030 \text{ J} = \Delta E_{\text{int}}$ ,  $W = 0$

כל התהליך:  $Q = 920 \text{ J}$ ,  $\Delta E_{\text{int}} = 0$ ,  $W = 920 \text{ J}$

(5) א. הוכחה. ב. הוכחה. ג. הוכחה. ד. הוכחה. ה.  $35^\circ \text{C}$

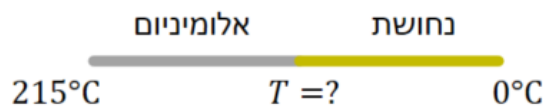
## הולכה הסעה וקרינה:

### סיכום כללי:

הערות	תיאור	הנוסחה
<p>אם אחד מהמשתנים אינו קבוע אז עוברים לנוסחה דיפרנציאלית</p> $\frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx}$ <p>המינוס בנוסחה אומר שקצב הולכת החום הוא בכיוון הפוך לגרדיאנט הטמפרטורה (כלומר קצב הולכת החום הוא מהטמפרטורה הגבוהה לנמוכה)</p>	<p><math>-\frac{\Delta Q}{\Delta t}</math> - קצב הולכת חום</p> <p><math>k</math> - מוליכות תרמית - תלוי בסוג החומר, מופיע בטבלה.</p> <p><math>A</math> - שטח חתך.</p> <p><math>l</math> - אורך.</p>	$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = kA \frac{(T_1 - T_2)}{l}$
<p><math>R</math> גבוה אומר מבודד טוב. לשים לב ש-<math>R</math> תלוי גם באורך של החומר ולא רק בסוג.</p>	<p>R- value</p>	$R = \frac{l}{k}$
<p>שימו לב שהקצב תלוי בטמפרטורה ברביעית. <math>\epsilon</math> - תכונה של פני הגוף שקורן בגופים שחורים (לדוגמה פחם) , <math>\epsilon \approx 1</math> , במתכות מבריקות <math>\epsilon \approx 0</math></p>	<p>משוואת סטפן בולצמן - קצב החום הנפלט מגוף ע"י קרינה.</p> $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$ <p>קבוע סטפן בולצמן.</p> <p><math>T</math> - הטמפרטורה של הגוף הפולט.</p> <p><math>\epsilon</math> - קירון (אמיסיביות) <math>0 &lt; \epsilon &lt; 1</math></p>	$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \epsilon \sigma A T^4$
<p>האמיסיביות זהה לקליטה ופליטה. הקצב של קליטה קשור לטמפרטורה של הסביבה ברביעית.</p>	<p>קצב קליטה של קרינה. <math>T_2</math> - הטמפרטורה של הסביבה.</p>	$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \epsilon \sigma A T_2^4$
	<p>הנטו של קצב פליטת הקרינה (פליטה פחות קליטה) <math>T_1</math> - הטמפרטורה של הגוף הפולט. <math>T_2</math> - הטמפרטורה של הסביבה.</p>	$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \epsilon \sigma A (T_1^4 - T_2^4)$
<p>הקבוע הסולרי <math>1350 \frac{W}{m^2 \cdot s}</math></p> <p>האטמוספירה יכולה לספוג עד 70% מהקרינה.</p> <p>ביום בהיר הקבוע בערך <math>1000 \frac{W}{m^2 \cdot s}</math></p>	<p>כמות החום שסופג גוף כתוצאה מקרינת השמש ביום בהיר</p>	$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \left(1000 \frac{W}{m^2 \cdot s}\right) \epsilon A \cos \theta$

## שאלות:

- (1) **דוגמה - איבוד חום דרך חלונות בבית**  
 מקור רציני לאיבוד החום בבית הוא דרך החלונות.  
 חשבו את קצב איבוד החום דרך חלון זכוכית בגודל  $1.5\text{m} \times 1.0\text{m}$  ועובי  $2.8\text{mm}$  אם הטמפרטורה בצד הפנימי של החלון היא  $18^\circ\text{C}$  ובצד החיצוני היא  $17^\circ\text{C}$ .
- (2) **דוגמה - קירור באמצעות קרינה**  
 אדם יושב בחדר לובש בגד ים בלבד.  
 הקירות של החדר נמצאים בטמפרטורה של  $15^\circ\text{C}$ .  
 הערך את כמות החום שהאדם מאבד כתוצאה מקרינה.  
 הנח שטמפרטורת העור היא בערך  $34^\circ\text{C}$  ו- $\varepsilon = 0.70$ .  
 שטח הפנים של האדם שבמגע עם האוויר הוא:  $-1.5\text{m}^2$ .
- (3) **דוגמה - הערך את הרדיוס של הכוכב ביטלגוס**  
 כוכב הענק ביטלגוס פולט קרינה בקצב שהוא פי  $10^4$  גדול מהקצב של השמש שלנו.  
 הטמפרטורה על פני הכוכב ביטלגוס היא בערך חצי מזו של השמש.  
 הערך את הרדיוס של הכוכב אם  $\varepsilon = 1$  עבור השמש וביטלגוס ורדיוס השמש הוא:  $R_s = 7 \cdot 10^8\text{m}$ . הנוסחה לשטח פני כדור היא:  $4\pi R^2$ .
- (4) **מוט נחושת עם טמפרטורות שונות בקצוות**  
 מוט נחושת באורך של  $42\text{c. m}$  וקוטר  $2.6\text{c. m}$  מוחזק בצד אחד בטמפרטורה של  $320^\circ\text{C}$  ובצידו השני המוט טבול במים בטמפרטורה של  $20^\circ\text{C}$ .  
 חשבו את קצב מעבר החום במוט.
- (5) **מוט נחושת מחובר למוט אלומיניום**  
 מוט נחושת מחובר בקצה למוט אלומיניום, שני המוטות בעלי אותו שטח חתך ואותו האורך. הקצה השני של האלומיניום נמצא בתוך תנור בטמפרטורה קבועה של  $215^\circ\text{C}$  והקצה השני של הנחושת נמצא בתוך קרח בטמפרטורה קבועה של  $0^\circ\text{C}$ .  
 חשבו את הטמפרטורה בנקודת החיבור של המוטות.



**(6) קרח נמס בצידנית**

צידנית בגודל  $20\text{c. m} \times 30\text{c. m} \times 50\text{c. m}$  עשויה מקלקר. הקירות של הצידנית הן בעובי  $1.5\text{c. m}$ . ממלאים את הצידנית בקרח ב- $0^{\circ}\text{C}$ . כמה זמן ייקח לקרח להתמוסס אם הצידנית נמצאת בחדר בו הטמפרטורה היא  $32^{\circ}\text{C}$ ?

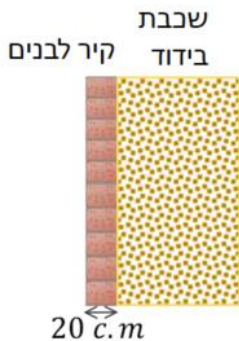
המוליכות התרמית של קלקר היא:  $0.033 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{k}}$  והצפיפות של קרח

היא:  $9.17 \cdot 10^2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ .

**(7) קרח נמס בשמש**

כמה זמן לוקח לשמש להמיס קוביית קרח ביום בהיר אם הקרח נמצא בטמפרטורה של  $0^{\circ}\text{C}$  וצורתו היא משטח ישר בגודל  $1.0\text{m}^2$  ובעובי  $1.0\text{c. m}$ . הנח שהזווית של הקרניים עם האנך למשטח היא  $30^{\circ}$  והאמסיביות של הקרח היא  $0.050$ .

**(8) איבוד חום דרך קיר עם שכבת בידוד**



בידוד של קיר מורכב משכבה של לבנים ברוחב של  $20\text{c. m}$  שצמודה לשכבת בידוד נוספת בעלת:  $\text{value} = 3 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{C}^{\circ}}{\text{J}} \cdot R$ . מהו קצב החום המועבר אם השטח של הקיר הוא  $15\text{m}^2$  והפרש הטמפרטורות הוא  $30^{\circ}\text{C}$ .

**תשובות סופיות:**

(1)  $450 \frac{\text{J}}{\text{sec}}$

(2)  $120 \frac{\text{J}}{\text{sec}}$

(3)  $2.8 \cdot 10^{11} \text{m}$

(4)  $140 \frac{\text{J}}{\text{sec}}$

(5)  $74^{\circ}\text{C}$

(6) בערך 58 שעות.

(7) בערך 20 שעות.

(8)  $140 \frac{\text{J}}{\text{sec}}$

## סיכום:

### טבלאות:

קיבול חום סגולי (Specific Heats) (ב 1 atm ו-20°C אלא אם מצוין אחרת)		
Substance	Specific Heat, c	
	kcal/kg · C° (= cal/g · C°)	J/kg · C°
Aluminum	0.22	900
Alcohol(ryhyl)	0.58	2400
Copper	0.093	390
Glass	0.20	840
Iron or steel	0.11	450
Lead	0.031	130
Marble	0.21	860
Mercury	0.033	140
Silver	0.056	230
Wood	0.4	1700
Water		
Ice (-5°C)	0.50	2100
Liquid (15°C)	1.00	4186
Steam (110°C)	0.48	2010
Human body (average)	0.83	3470
Protein	0.4	1700

חום כמס (בלחץ של 1 atm)						
Substance	Melting Point (°C)	Heat of Fusion		Boiling Point (°C)	Heat of Vaporization	
		kcal/kg <sup>+</sup>	kJ/kg		kcal/kg <sup>+</sup>	kJ/kg
Oxygen	-218.8	3.3	14	-183	51	210
Nitrogen	-210.0	6.1	26	-195.8	48	200
Ethyl alcohol	-114	25	104	78	204	850
Ammonia	-117	8.0	33	-33.4	33	137
Water	0	79.7	333	100	539	2260
Lead	327	5.9	25	1750	208	870
Silver	961	21	88	2193	558	2300
Iron	1808	69.1	289	3023	1520	6340
Tungsten	3410	44	184	5900	1150	4800

קיבול חום של גזים ב 15°C						
Gas	Specific heats (kcal/kg · K)		Molar specific heats (cal/mol · K)		$C_V - C_P$ (cal/mol · K)	$\gamma = \frac{C_P}{C_V}$
	$c_V$	$c_P$	$C_V$	$C_P$		
Monoatomic						
He	0.75	1.15	2.98	4.97	1.99	1.67
Ne	0.148	0.246	2.98	4.97	1.99	1.67
Diatomic						
$N_2$	0.177	0.248	4.96	6.95	1.99	1.40
$O_2$	0.155	0.218	5.04	7.03	2.00	1.40
Triatomic						
$CO_2$	0.153	0.199	6.80	8.82	2.03	1.30
$H_2O$ (100°C)	0.350	0.482	6.20	8.20	2.00	1.32

מוליכויות תרמיות		
Substance	Thermal Conductivity, k	
	kcal (s.m.C°)	J (s.m.C°)
Silver	$10 \times 10^{-2}$	420
Copper	$9.2 \times 10^{-2}$	380
Aluminum	$5.0 \times 10^{-2}$	200
Steel	$1.1 \times 10^{-2}$	40
Ice	$5 \times 10^{-4}$	2
Glass	$2.0 \times 10^{-4}$	0.84
Brick	$2.0 \times 10^{-4}$	0.84
Concrete	$2.0 \times 10^{-4}$	0.84
Water	$1.4 \times 10^{-4}$	0.56
Human tissue	$0.5 \times 10^{-4}$	0.2
Wood	$0.3 \times 10^{-4}$	0.1
Fiberglass	$0.12 \times 10^{-4}$	0.048
Cork	$0.1 \times 10^{-4}$	0.042
Wood	$0.1 \times 10^{-4}$	0.040
Goose down	$0.06 \times 10^{-4}$	0.025
Polyurethane	$0.06 \times 10^{-4}$	0.024
Air	$0.055 \times 10^{-4}$	0.023

# כימיה פיסיקאלית 124510

פרק 4 - סמפרטורה התפשטות תרמית וחוק הגז האידיאלי

תוכן העניינים

1. הרצאות ותרגילים ..... 36

## הרצאות ותרגילים:

### שאלות:

#### (1) דוגמה-טמפרטורה שווה

- א. גוף נמצא בטמפרטורה של  $37^{\circ}\text{C}$ .  
 מה הטמפרטורה של הגוף בפרנהייט?  
 ב. מודדים את הטמפרטורה של גוף פעם אחת בצלזיוס ופעם אחת בפרנהייט ומקבלים שכמות הערך הנמדד זהה (כלומר אותו מספר בצלזיוס ובפרנהייט).  
 מהי טמפרטורת הגוף?

#### (2) דוגמה-גשר ברזל

- מוטות הברזל שתומכות בגשר הן באורך של 80 מטר כאשר הטמפרטורה היא 20 מעלות צלזיוס.  
 אם הטמפרטורות בסביבה בו מציבים את הגשר נעות בין  $10^{\circ}\text{C}$  ל- $50^{\circ}\text{C}$  מה האורך המקסימאלי והמינימלי של המוטות?

#### (3) דוגמה-טבעת על מוט

- הקוטר של מוט ברזל הנמצא ב- $20^{\circ}\text{C}$  הוא 5.50cm.  
 רוצים להלביש טבעת, העשויה ברזל גם כן, על המוט.  
 קוטר הפנימי של הטבעת ב- $20^{\circ}\text{C}$  הוא 5.48cm.  
 לאיזה טמפרטורה צריך לחמם את הטבעת אם נרצה שקוטר הפנימי יהיה ב-0.005cm גדול מזה של המוט?

#### (4) דוגמה-מיכל מים

- מיכל בצורה של גליל ברדיוס 20cm ובגובה 60cm עשוי מזכוכית רגילה.  
 ממלאים את המיכל במים בבוקר כאשר הטמפרטורה היא  $15^{\circ}\text{C}$  (ניתן להניח שזו טמפי המיכל והמים).  
 כמה מים ישפכו עד השעה 14:00 בה הטמפי היא  $40^{\circ}\text{C}$ ?  
 הזנח איבוד מים הנגרם מאידוי.

#### (5) דוגמה-בלון הליום

- א. מהי המסה האטומית של אטום הליום (He) בעל שני פרוטונים ושני נויטרונים?  
 ב. חשב את המסה המולקולרית של הליום?  
 ג. כמה מולים יש בבלון המכיל 50 גרם הליום?  
 ד. כמה אטומים של הליום יש בבלון?

**6) דוגמה-ערבוב הליום עם מימן**

ערבבו 50 מול של מימן עם 30 מול של הליום 4.  
 מהי מסת החומר לאחר הערבוב?

**7) דוגמה-בקבוק מים**

בקבוק מים מכיל 2 ליטר מים. הנח שצפיפות המים היא:  $1\text{k} \frac{\text{g}}{\text{L}}$ .

- חשב את המסה המולקולרית של מים ( $\text{H}_2\text{O}$ ).
- כמה מולים של מים יש בבקבוק?
- הצליחו לפרק כל מולקולה בבקבוק לשני אטומים של מימן ואטום של חמצן.
- כמה מולים של מימן וכמה מולים של חמצן יש בבקבוק?

**8) דוגמה-חנקן דו חמצני**

- חנקן דו חמצני ( $\text{NO}_2$ ) מורכב מאטום חנקן ושני אטומי חמצן.  
 רוצים להכין 50 מול של חנקן דו חמצני ע"י ערבוב של מיכל המכיל חמצן ( $\text{O}_2$ ) בלבד ומיכל המכיל חנקן בלבד.
- כמה מולים צריכים להיות בכל מיכל לפני הערבוב?
  - כמה מולים היו צריכים להיות במיכל החמצן אם חמצן היה גז חד אטומי (כלומר כל חלקיק בגז היה מורכב מאטום יחיד של חמצן)?
  - מהי מסת החמצן ומהי מסת החנקן לפני הערבוב?

**9) דוגמה-מחממים גז במיכל סגור**

גז מוחזק במיכל ברזל סגור בלחץ של 1atm ובטמפ' של  $25^\circ\text{C}$ .  
 מחממים את המיכל לטמפ' של  $100^\circ\text{C}$ .  
 מה יהיה הלחץ של הגז במיכל?

**10) דוגמה-נפח של מול ב-STP**

מצא מהו הנפח של מול אחד של גז כלשהו ב-STP?

**11) מנפחים בלון**

- מנפחים בלון בגז הליום עד אשר הוא מגיע לנפח של 2L ב-STP.
- מהו מספר המולים של הליום שהוכנסו לבלון?
  - מהי מסת הגז שהוכנסה לבלון?
  - מהי התשובה לסעיף א' אם הטמפרטורה היא טמפרטורת החדר (בערך  $27^\circ\text{C}$ ).

**(12) לחץ בצמיג**

מנפחים צמיג לפני נסיעה ללחץ של  $32 \text{ psi}$  ( $1 \text{ psi} \approx 6,895 \text{ Pa}$ ) ביום בו הטמפרטורה היא  $27^\circ \text{C}$ . לאחר נסיעה ארוכה טמפרטורת הצמיג עולה כתוצאה מחיכוך עם הכביש ל- $60^\circ \text{C}$ . מה יהיה הלחץ החדש בצמיג ב- $\text{psi}$ ? (שים לב שהלחץ הנמדד בצמיג הוא ביחס ללחץ אטמוספרי).

**(13) דוגמה-מולקולות בנשימה**

הערך כמה מולקולות ישנם בנשימה אחת אם בערך נפח האוויר בנשימה הוא ליטר אחד.

**(14) סרט מדידה**

סרט מדידה עשוי מברזל, הסרט כויל בטמפרטורה של  $15^\circ \text{C}$ . מודדים עם הסרט ביום בו הטמפרטורה היא  $35^\circ \text{C}$ .  
 א. האם המדידה שיראה הסרט נמוכה או גבוהה מהאורך האמיתי?  
 ב. חשב את אחוז הטעות במדידה של הסרט.

**(15) צוללן מנפח ריאות**

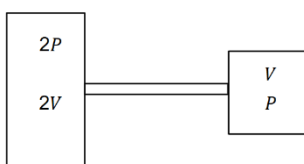
צוללן מנפח את הריאות לנפח מקסימלי של  $5 \text{ L}$  כאשר הוא  $7$  מטר מתחת לפני המים. מה יהיה נפח הריאות של הצוללן אם יעלה לפני המים ויחזיק את נשימתו עצורה? הערה: לחץ בתוך מים גדל ב- $9.8 \text{ Pa}$  לכל מילימטר גובה (או עומק) מתחת לפני המים.

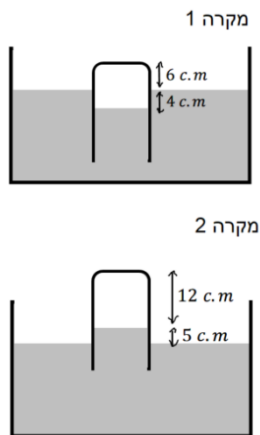
**(16) מתי למלא דלק**

הצפיפות של דלק ב- $0^\circ \text{C}$  היא:  $0.68 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ .  
 א. מה הצפיפות של דלק ביום חם בו הטמפרטורה היא  $40^\circ \text{C}$ ?  
 ב. מה אחוז השינוי בצפיפות?  
 ג. אם מחיר הדלק נקבע לפי ליטרים (כלומר לפי הנפח) מתי עדיף למלא דלק ביום קר או חם?

**(17) שני מיכלים מחוברים בצינור**

שני מיכלים מלאים בגזים שונים ונמצאים באותה הטמפרטורה. נפח מיכל אחד הוא  $V$  והלחץ בו  $P$  ונפח המיכל השני הוא  $2V$  והלחץ בו  $2P$ . מחברים את המיכלים בצינור בעל נפח זניח. בעת הערבוב כל מולקולה ממיכל אחד מתרכבת עם מולקולה ממיכל 2 ונוצרת מולקולה אחת חדשה (לא כל המולקולות במיכל 2 מתרכבות). מה הלחץ במיכלים לאחר החיבור בהנחה כי הטמפרטורה לא משתנה? (הבא תשובתך באמצעות  $P$ ).



**18) צינורית במיכל כספית**

מיכל גדול מאוד מכיל כספית ונמצא בחדר לחץ בו לחץ האוויר אינו ידוע. טובלים במיכל צינורית זכוכית דקה הסגורה בחלקה העליון. כאשר מחזיקים את הקצה העליון של הצינורית בגובה 6 ס"מ מעל פני הכספית במיכל, גובה הכספית בצינורית הוא 4 ס"מ מתחת לפני הכספית במיכל. כאשר מחזיקים את הקצה העליון של הצינורית בגובה 17 ס"מ מעל פני הכספית במיכל, גובה הכספית בצינורית הוא 5 ס"מ מעל לפני הכספית במיכל. הנח שגובה פני הכספית במיכל קבוע.

א. מהו לחץ האוויר בחדר?

ב. באיזה גובה צריך להחזיק את קצה הצינורית מעל המיכל כך שפני הכספית בצינורית יהיו בגובה הכספית של המיכל?

## תשובות סופיות:

- (1) א.  $98.6^{\circ}\text{F}$  ב.  $-40^{\circ}\text{C}$
- (2)  $l_{\max} = 80.0288_{\text{m}}$  ,  $l_{\min} = 79.9712_{\text{m}}$
- (3)  $T = 400^{\circ}\text{C}$
- (4)  $V = 0.3563 \cdot \text{c.m}^3$  מים שנשפכו.
- (5) א.  $m_a \approx 4_u$  ב.  $M = 4_{\text{gr}}$  ג.  $12.5_{\text{mol}}$  ד.  $7.53 \cdot 10^{24}$  אטומים
- (6)  $170_{\text{gr}}$
- (7) א.  $18_u$  ב.  $11_{\text{mol}}$  ג.  $111_{\text{mol}}$  חמצן ,  $222_{\text{mol}}$  מימן
- (8) א.  $50_{\text{mol}}$  חמצן ,  $50_{\text{mol}}$  חנקן ב.  $100_{\text{mol}}$  חמצן ג.  $0.7_{\text{kg}}$  חנקן ,  $1.6_{\text{kg}}$  חמצן
- (9)  $\approx 1.25_{\text{atm}}$
- (10)  $\approx 22.4_{\text{L}}$
- (11) א.  $0.0892_{\text{mol}}$  ב.  $0.359_{\text{gr}}$  ג.  $0.0812_{\text{mol}}$
- (12)  $\approx 37_{\text{psi}}$
- (13)  $\approx 2.45 \cdot 10^{22}$
- (14) א. נמוכה ב.  $0.024\%$
- (15)  $\approx 8.42_{\text{L}}$
- (16) א.  $0.655 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  ב.  $\approx 3.68\%$  ג. ביום קר
- (17) א.  $\frac{4}{3}p$
- (18) א.  $0.656_{\text{atm}}$  ב.  $10.8_{\text{c.m}}$

# כימיה פיסיקאלית 124510

פרק 5 - תיאוריות מוקדמות של תורת הקוונטים ומבנה האטום

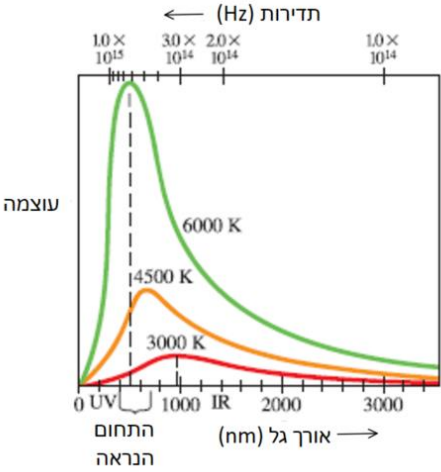
תוכן העניינים

- 41 ..... 1. תיאוריות מוקדמות של תורת הקוונטים ומבנה האטום
- 44 ..... 2. התיאוריה הפוטנית של האור והאפקט הפוטואלקטרי
- 48 ..... 3. אנרגיה מסה ותנע של פוטון
- 49 ..... 4. אפקט קומפטון
- 51 ..... 5. אינטראקציות של פוטונים ויצירת זוגות
- 53 ..... 6. דואליות גל חלקיק והאופי הגלי של החומר
- (ללא ספר) ..... 7. סיכום ביניים התורה הפוטונית והשלכות
- 55 ..... 8. מודלים מוקדמים של האטום
- 56 ..... 9. מודל האטום של בוהר
- (ללא ספר) ..... 10. סיכום חלק שני מודלים מוקדמים ומודל בוהר
- 60 ..... 11. בעיית שני הגופים ומסה מצומצמת
- 61 ..... 12. שאלות ותרגילים נוספים

## תיאוריות מוקדמות של תורת הקוונטים ומבנה האטום:

### סיכום כללי:

ההנחה הקוונטית של פלאנק וקרינת גוף שחור.

		<p>גרף של קרינת גוף שחור כתלות באורך הגל ובטמפרטורות שונות</p>
<p><math>\lambda_p</math> - אורך הגל בשיא T - הטמפרטורה בקלווין</p>	$\lambda_p T = 2.90 \cdot 10^{-3} m \cdot K$	<p>חוק וויין - Wien law</p>
<p>קבוע בולצמן <math>k = 1.38 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}</math> קבוע פלאנק <math>h = 6.626 \cdot 10^{-34} J \cdot s</math></p>	$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2 \lambda^{-5}}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$	<p>נוסחת פלאנק לקרינת גוף שחור</p>
<p><u>ההנחה הקוונטית של פלאנק</u></p>	$E_{min} = hf$	<p>אנרגיה מינימלית של מטען בתנועה הרמונית באטום</p>
<p><b>המספר הקוונטי</b> <math>n = 1, 2, 3, \dots</math></p>	$E = nhf$	<p>אנרגיית המטען חייבת להיות כפולה שלמה של הערך המינימלי</p>

## שאלות:

(1) **דוגמה - טמפרטורת השמש**  
 הראו באמצעות חוק וויין כי הטמפרטורה על פני השמש היא באמת 6,000K אם ידוע שאורך הגל של האור הנראה הוא בערך 500nm.

(2) **דוגמה - טמפרטורת כוכב**  
 טלסקופ גדול בחלל מזהה כוכב חדש. הקרינה שפולט הכוכב נקלטת בטלסקופ כאשר השיא של הקרינה הוא באורך גל של 90nm. מהי הטמפרטורה על פני הכוכב?

(3) **טמפרטורה של מתכת**  
 מה הטמפרטורה של מתכת בשלב הריתוך אם שיא פליטת האור שלה באורך גל של 460nm.

(4) **הפרש אנרגיות של מולקולה רוטטת**  
 מולקולת HCl רוטטת בתדירות של  $8.1 \cdot 10^{13}$  Hz. חשבו את ההפרש בין שני ערכים צמודים של האנרגיות האפשריות לפי ההנחה הקוונטית של פלאנק לערכי האנרגיה באוסילציות. תנו תשובה בג'אול ובאלקטרון וולט.

(5) **חוק וויין וקבוע פלאנק מנוסחת הקרינה**  

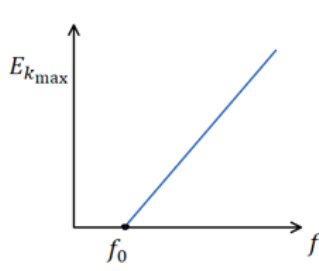
$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2 \lambda^{-5}}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$
 נוסחת פלאנק לקרינת גוף שחור היא:  
 א. \* הראו, ללא שימוש בחוק וויין, כי קבוע  $\lambda_p T =$  לעזרתכם פתרון המשוואה:  $5e^{-x} = 5 - x$  :  $x = 4.966$ .  
 ב. השתמשו בחוק וויין וחשבו את קבוע פלאנק.  
 ג. \*\* הראו כי הקרינה הנפלטת מגוף שחור פרופורציונית לטמפרטורה ברביעית - חוק סטפן - בולצמן.  
 הדרכה: בשביל לחשב את הקרינה הכוללת הנפלטת יש לעשות אינטגרציה על כל אורכי הגל, אין צורך לפתור את האינטגרל עד הסוף.

**תשובות סופיות:**

- (1) הוכחה.
- (2) .32,000K
- (3) .6,300K
- (4)  $.5.4 \cdot 10^{-20} \text{ J}$  , 0.34eU
- (5) הוכחה.

## התיאוריה הפוטנטית של האור והאפקט הפוטואלקטרי:

סיכום כללי:

$f$ - תדירות האור	$E = hf$	אנרגיה של פוטון יחיד
		<u>הניסוי הפוטואלקטרי</u>
$W_0$ - פונקציית העבודה של המתכת	$hf_0 = W_0$	תדירות סף
	$E_k = hf - W_0$	אנרגיה קינטית מקסימאלית של האלקטרונים
	$eV_0 = E_k$	מתח עצירה
<p><u>לפי התורה הגלית-אלקטרומגנטית</u></p> <p>1. עוצמת האור קשורה לגודל השדה הגדלת העוצמה תגדיל את האנרגיה הקינטית של האלקטרונים.</p> <p>2. התדירות לא משפיעה על האנרגיה של האלקטרונים.</p>	<p><u>לפי התורה הפוטונית</u></p> <p>1. עוצמת האור קשורה למספר הפוטונים ולא לאנרגיה של כל אחד מהם. הגדלת העוצמה תגדיל את מספר האלק' הנפלטים אבל לא את האנרגיה הקינטית שלהם.</p> <p>2. האנרגיה של הפוטון תלויה בתדירות.</p> <p>3. רק פוטון אחד נותן את כל האנרגיה שלו ולכן קיימת תדירות סף.</p>	השוואה לתורה הגלית

## שאלות:

- (1) **דוגמה - חישוב אנרגיית פוטון באור כחול**  
 חשבו את האנרגיה של פוטון באור כחול:  $\lambda = 450\text{nm}$  באוויר (או וואקום).
- (2) **דוגמה - הערכה של מספר פוטונים מנורה**  
 נסו להעריך כמה פוטונים פולטת נורה בהספק  $100\text{W}$  כל שניה. הניחו שהנצילות של הנורה היא בערך  $3\%$  (כלומר רק  $3\%$  מהאנרגיה המושקעת בנורה כל שניה מנוצלת להפקה של אור). האור שיוצא מנורה לבנה הוא בכל אורכי הגל, ניתן לקחת לצורך ההערכה את אורך הגל באמצע הספקטרום של האור הנראה:  $\lambda \approx 500\text{nm}$ .
- (3) **דוגמה - חישוב אנרגיה של אלקטרונים נפלטים**  
 מהי האנרגיה הקינטית המקסימאלית ומהי המהירות המקסימאלית של אלקטרונים הנפלטים מחומר שפונקציית העבודה שלו היא:  $W_0 = 2.8\text{eV}$  אם אורך הגל של האור הפוגע במשטח הוא:  
 א.  $\lambda = 400\text{nm}$   
 ב.  $\lambda = 600\text{nm}$
- (4) **עקיפה של קרינת גמא**  
 לפוטון בקרינת גמא יש אנרגיה של  $380\text{keV}$ .  
 א. מהו אורך הגל של הקרינה?  
 ב. האם לדעתך הקרינה עושה עקיפה דרך פתחים טיפוסיים שאנחנו נתקלים ביום יום כמו פתח של דלת?
- (5) **איזו מתכת לא תפלוט אלקטרונים**  
 פונקציות העבודה של סודיום, צסיום, נחושת וברזל הן:  $2.1, 2.3, 4.5$  ו- $4.7$  אלקטרון וולט בהתאמה. אלו מהמתכות לא תפלוט אלקטרונים כאשר פוגע בה אור מהתחום הנראה?
- (6) **פונקציית עבודה ומתח עצירה**  
 בניסוי של האפקט הפוטואלקטרי נצפה כי לא זורם זרם כאשר אורך גל של האור הוא מעל ל- $540\text{nm}$ .  
 א. מהי פונקציית העבודה של המתכת?  
 ב. מהו מתח העצירה הדרושה אם מקרינים באור באורך גל של  $450\text{nm}$ ?

**7 ניסוי פוטואלקטרי**

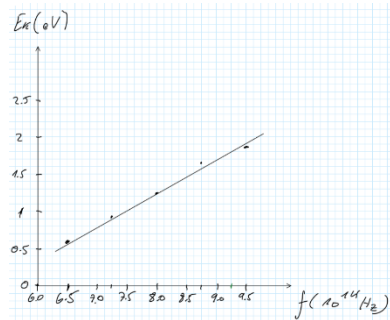
בניסוי פוטואלקטרי הקרינו אור בתדירויות שונות ומדדו את מתח העצירה. התוצאות של הניסוי מוצגות בטבלה הבאה:

$f(10^{14}\text{Hz})$	V(V)
6.50	0.6
7.25	0.91
8.00	1.23
8.75	1.54
9.50	1.85

- א. מצאו את האנרגיה הקינטית של האלקטרונים בפליטה ושרטטו גרף של אנרגיה זו כתלות בתדירות. השתמשו בנייר משבצות ורשמו נתונים בצורה מדויקת.
- ב. חשבו מתוך הגרף את קבוע פלאנק.
- ג. חשבו את פונקציית העבודה ותדירות הסף של המתכת.

**תשובות סופיות:**

- (1)  $2.8\text{eV}$
- (2)  $8 \cdot 10^{18}$  פוטונים.
- (3) א.  $3.2 \cdot 10^2 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$  ב. לא תהיה פליטה של אלקטרונים.
- (4) א.  $3.3 \cdot 10^{-3} \text{nm}$  ב. לא.
- (5) נחשת וברזל.
- (6) א.  $2.3\text{eV}$  ב.  $0.46\text{V}$
- (7) א. ב. הוכחה.



$E_k = \text{eV}$
0.6eV
0.91eV
1.23eV
1.54eV
1.85eV

ג.  $W_0 = 2.42\text{eV}$ ,  $f = 5.84 \cdot 10^{14} \text{Hz}$

## אנרגיה מסה ותנע של פוטון:

סיכום כללי:

אנרגיה של פוטון יחיד	$E = hf$	$f$ -תדירות האור
תנע של פוטון	$p = \frac{E}{c} = h \frac{f}{c} = \frac{h}{\lambda}$	
מסת מנוחה של פוטון	$m = 0$	

שאלות:

- (1) דוגמה - כוח שמפעילה נורה על נייר שחור  
 בדוגמה "הערכה של מספר הפוטונים מנורה" חישבנו את מספר הפוטונים שיוצאים מנורה של 100W כל שניה (בערך  $10^{19}$ ). נניח כי כל הפוטונים האלו פוגעים בנייר שחור (ולא מוחזרים) חשבו את:  
 א. התנע של פוטון יחיד.  
 ב. הכוח שמפועל על הנייר.

- (2) דוגמה - יעילות של תהליך פוטוסינתזי  
 בתהליך פוטוסינתזי פיגמנטים בצמח כמו כלורופיל סופגים אור שמש ובאמצעותו הופכים פחמן דו חמצני ( $CO_2$ ) לפחמימות (וחמצן שנפלט).  
 בשביל להפוך מולקולה אחת של  $CO_2$  לפחממה הצמח משתמש ב-9 פוטונים. כלורופיל סופג אור בעיקר באורך גל של 670nm. אם ידוע שהאנרגיה המשתחררת בפירוק פחממה היא:  $4.9 \frac{eV}{molecule}$ , מה היעילות (או נצילות) של התהליך הפוטוסינתזי?

תשובות סופיות:

- (1) א.  $1.3 \cdot 10^{-27} \frac{kg \cdot m}{sec}$  ב.  $10^{-8} N$   
 (2) 29%

## אפקט קומפטון:

### סיכום כללי:

$\lambda$ - אורך הגל של הקרן הפוגעת $\lambda'$ - אורך הגל של הקרן המפוזרת $\theta$ - זווית ביחס לכיוון הקרן הפוגעת $\frac{h}{m_e c}$ - אורך גל של האלקטרון החופשי	$\lambda' = \lambda + \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$	הסחת קומפטון
--	--	--------------

### שאלות:

#### (1) דוגמה - פיזור בכמה זוויות

קרני X באורך גל 0.162nm מפוזרות מסרט פחמן דק. מה יהיו אורכי הגל של הקרניים המפוזרות בזוויות?

- א.  $0^\circ$ .
- ב.  $90^\circ$ .
- ג.  $180^\circ$ .

#### (2) הסחה יחסית מקסימאלית

בפיזור קומפטון, מצאו את זווית הפיזור עבורה ההסחה (שינוי באורך הגל) היא מקסימאלית. מהי ההסחה היחסית המקסימאלית  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$  עבור פוטון באורך גל:  $\lambda = 500\text{nm}$  מהתחום הנראה ועבור פוטון באורך גל:  $\lambda = 0.1\text{nm}$  מתחום קרינת X.

#### (3) פיזור רב פעמי

קרני גמא שנוצרות קרוב למרכז השמש עוברות הרבה פיזורים בזוויות קטנות עד שהן מאבדות מספיק אנרגיה והופכות לקרניים בתחום הנראה. הניחו שלפוטון בקרן גמא יש אנרגיה של 1.0MeV והפוטון עובר סדרה של התנגשויות בזוויות של  $0.5^\circ$  בכל התנגשות. כמה התנגשויות צריך הפוטון לעבור בשביל שאורך הגל שלו ישתנה ל- 555nm.

**תשובות סופיות:**

- (1) א.  $0.162\text{nm}$  . ב.  $0.164\text{nm}$  . ג.  $0.167$  .
- (2) א.  $\theta = \pi$  . ב.  $0.00097\%$  . ג.  $4.9\%$  .
- (3)  $6 \cdot 10^9$  התנגשויות.

## אינטראקציות של פוטונים ויצירת זוגות:

### סיכום כללי:

תנאים ביצירת זוגות:

1. חייב להיווצר זוג בשביל שיתקיים שימור מטען
2. אנרגיית הפוטון שווה לאנרגיית הזוג, יש להוסיף אנרגיית מנוחה יחסותית לכל חלקיק  $mc^2$ .
3. בשביל ליצור זוג חייבת להיות אינטראקציה עם גוף נוסף (בד"כ גרעין) כדי שיהיה שימור תנע.
4. התהליך יכול גם לקרות הפוך ונקרא אינהלציה. לדוגמה פוזיטרון פוגש אלקטרון, הם נכחדים ויוצרים פוטון.

### שאלות:

- (1) דוגמה - אנרגיה מינימלית ליצירת זוגות  
מצאו מהי האנרגיה המינימלית (ב-eV) ליצירת זוג אלקטרון פוזיטרון?  
מה אורך הגל של הפוטון במקרה זה?
- (2) חישוב אנרגיה קינטית ביצירת זוג  
חשבו כמה אנרגיה קינטית כוללת תהיה ביצירת זוג של אלקטרון פוזיטרון מתוך פוטון בעל אנרגיה של: 2.8MeV.
- (3) אורך גל מקסימאלי ליצירת זוג  
מהו אורך הגל המקסימאלי של פוטון היכול לייצר זוג של פרוטון ואנטי פרוטון (כל אחד במסה של:  $1.67 \cdot 10^{-27}$  kg).
- (4) אלקטרון ופוזיטרון מייצרים שני פוטונים  
אלקטרון ופוזיטרון נעים אחד כלפי השני במהירות:  $10^5 \frac{m}{sec}$  כל אחד. הם מתנגשים, נעלמים ויוצרים שני פוטונים שנעים בכיוונים מנוגדים. מהן האנרגיה והתנע של כל פוטון?

**תשובות סופיות:**

**(1)**  $1.02\text{MeV}$  ו-  $1.2\text{pm}$ .

**(2)**  $1.78\text{MeV}$ .

**(3)**  $6.63 \cdot 10^{-16}\text{m}$ .

**(4)**  $E = 0.51\text{MeV}$  ,  $p = 0.51 \frac{\text{MeV}}{c}$ .

## דואליות גל חלקיק והאופי הגלי של החומר:

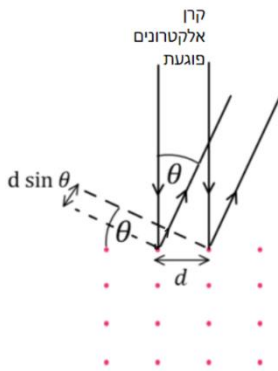
### סיכום כללי:

$p = mv$	או	לא יחסותי	$\lambda = \frac{h}{p}$	אורך גל דה ברולי של חלקיק
$p = m\gamma v$		יחסותי		

### שאלות:

**(1) דוגמה - אורך גל של כדורסל**  
חשבו את אורך גל דה ברולי של כדורסל השוקל חצי קילוגרם ונזרק במהירות של 10 מטר לשנייה.

**(2) דוגמה - אורך גל של אלקטרון ב-100 וולט**  
חשבו את אורך הגל של אלקטרון המואץ תחת הפרש פוטנציאלים של 100V.



**(3) דוגמה - עקיפה של אלקטרונים**  
מקרינים קרן אלקטרונים בניצב למשטח של חומר מוצק. האטומים בחומר מסודרים בצורת סריג ריבועי כאשר המרווח בין האטומים לא ידוע ומסומן ב- $d$ , ראו איור. מצאו את המרחק  $d$  אם האנרגיה הקינטית של האלקטרונים היא:  $E_k = 80\text{eV}$  והזווית בה מתרחשת התאבכות בונה בפעם הראשונה היא  $22^\circ$ . הניחו שהאנרגיה של האלקטרונים נמוכה וכי האלקטרונים עושים אינטראקציה רק עם השכבה החיצונית של החומר.

**(4) כמה מתח לאורך גל**  
באיזה מתח צריך להאיץ אלקטרון כך שהוא יגיע לאורך גל של 0.6nm.

**(5) אנרגיה ותנע מאורך גל**  
לאלקטרון אורך גל דה ברולי של:  $\lambda = 3.2 \cdot 10^{-10}\text{m}$ .  
א. מהו התנע שלו?  
ב. מהי מהירותו? האם היא יחסותית? רמת דיוק של 1% בגאמה.  
ג. איזה מתח נדרש כדי להאיץ אותו למהירות כזו?

**(6) רזולוציה של מיקרוסקופ אלקטרוני**

מהו הגבול התיאורטי של הרזולוציה של מיקרוסקופ אלקטרוני שבו האלקטרונים מואצים במתח של  $80\text{keV}$ . יש להשתמש בנוסחאות יחסותיות.

**(7) אנרגיה יחסותית**

אלקטרון בשפופרת טלויזיה (של פעם) מואץ במתח של  $33\text{keV}$ .

א. האם האנרגיה של האלקטרון יחסותית? לפי רמת דיוק של אחוז אחד בגמא.

ב. חשבו את אורך הגל של האלקטרון. האם צריך לדאוג מתופעות עקיפה?

גודל פתח השפופרת הוא  $5\text{cm}$ .

**תשובות סופיות:**

**(1)**  $1.3 \cdot 10^{-34}\text{ m}$

**(2)**  $1.2 \cdot 10^{-10}\text{ m}$

**(3)**  $3\text{ A}$

**(4)**  $4.17\text{ V}$

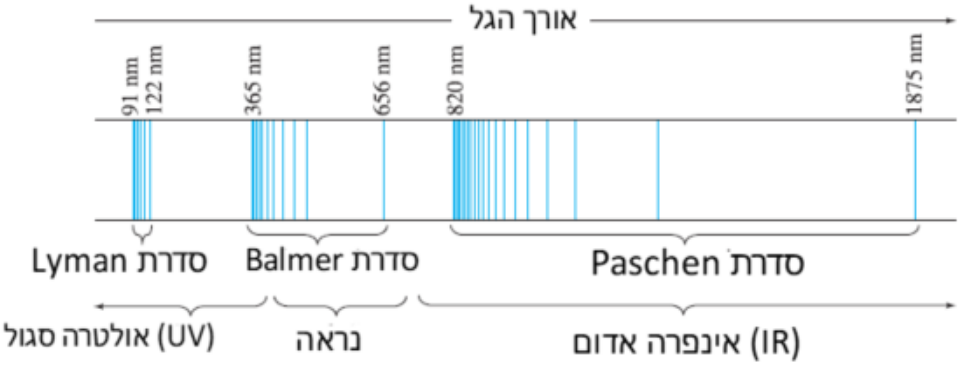
**(5)** א.  $2.1 \cdot 10^{-24}\text{ kg} \cdot \text{sec}$ . ב.  $2.3 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$ , לא יחסותי. ג.  $15\text{ V}$ .

**(6)**  $4.2 \cdot 10^{-12}\text{ m}$

**(7)** א. כן. ב.  $6.6 \cdot 10^{-12}\text{ m}$ , אין צורך.

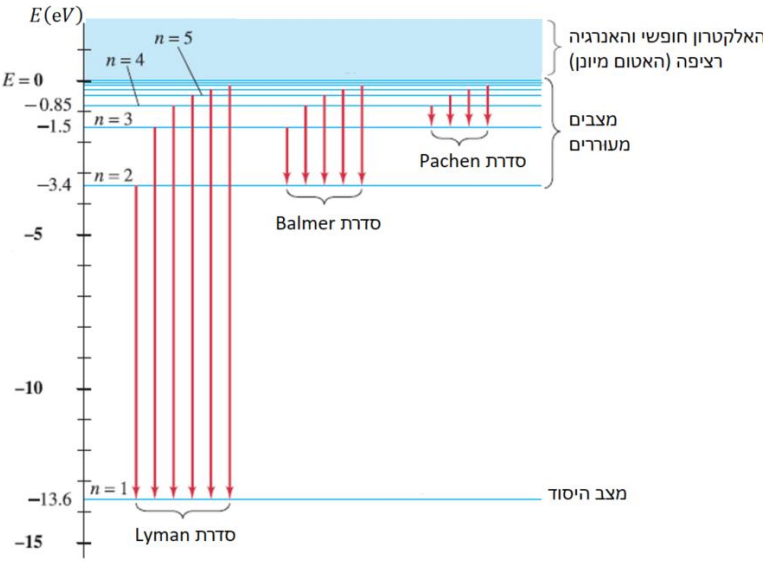
## מודלים מוקדמים של האטום:

### סיכום כללי:

קבוע Rydberg $\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	נוסחה לאורכי הגל הנפלטים מאטום המימן
 <p>The diagram shows the hydrogen emission spectrum with three series of spectral lines. The Lyman series (91 nm, 122 nm) is in the UV region. The Balmer series (365 nm, 656 nm) is in the visible region. The Paschen series (820 nm, 1875 nm) is in the IR region. The x-axis is labeled 'אורך הגל' (wavelength).</p>		
1. מדוע הקרינה שנפלטת היא באורכי גל מסוימים בלבד. 2. אם האלקטרון בתאוצה כל הזמן הוא צריך לאבד אנרגיה כל הזמן ולקרוס לגרעין. אטומים לא היו צריכים להיות יציבים.		בעיות במודל הפלנטארי של ראתפורד

## מודל האטום של בוהר:

### סיכום כללי:

<p>1. האלקטרונים יכולים לנוע רק במסלולים / רדיוסים ספציפיים מסביב לגרעין. המסלולים נקראים <b>אורביטלים</b>.</p> <p>2. האלקטרונים לא מאבדים אנרגיה בתנועה המעגלית (למרות שהם בתאוצה). בגלל שהאלקטרון לא מאבד אנרגיה במצבים <b>stationary states</b> אלו הם נקראים <b>מצבים יציבים</b></p>		הנחות המודל
	$hf = E_U - E_L$	אנרגיית הפוטון שווה להפרש האנרגיות בין שני מצבים
$n=1,2,3\dots$	$L = mvr_n = \frac{nh}{2\pi}$	הנחה על התנע הזוויתי
<p><math>Z</math> - מספר הפרוטונים</p> $r_1 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi e^2 m_e} \approx 0.529 \cdot 10^{-10}$	$r_n = \frac{n^2}{Z} r_1$	הרדיוסים האפשריים
	$E = -\frac{Z^2 \cdot 13.6eV}{n^2}$	האנרגיה של האלקטרון הנמצא במסלול ה- $n$
		טבלה של רמות האנרגיה באטום המימן

## שאלות:

- (1) **דוגמה - אורך הגל של הקו הראשון של Paschen**  
 השתמשו בטבלה שהוצגה בסרטון "קווי הספקטרום ממודל בוהר" ומצאו את אורך הגל של קו הספקטרום הראשון בסדרת Paschen. באיזה תחום של אורכי גל נמצא קו זה? (IR, UV או אור נראה).
- (2) **דוגמה - אורך גל מקסימלי בבליעה**  
 גז מימן נמצא בשפופרת בלחץ נמוך ובטמפרטורת החדר (האלקטרונים במצב היסוד). מקרינים את הגז בקרינה עם ספקטרום רציף של אורכי גל. מהו אורך הגל הכי גבוה בספקטרום הבליעה ומהו אורך הגל אחריו? השתמשו בטבלה של רמות האנרגיה באטום המימן.
- (3) **דוגמה - אנרגיית ינון של יון הליום**  
 $He^+$  הוא יון של הליום המכיל שני פרוטונים ואלקטרון אחד. השתמשו במודל בוהר וחשבו את אנרגיית היינון של  $He^+$ , כלומר, כמה אנרגיה דרושה בשביל לנתק גם את האלקטרון היחיד שנשאר. מהו אורך הגל המקסימאלי של פוטון הגורם ליינון? הניחו שהאלקטרון במצב היסוד.
- (4) **דוגמה - אנרגיה של אטומים בטמפרטורת חדר**  
 לפי התיאוריה הקינטית (תיאוריה בתרמודינמיקה), האנרגיה הקינטית הממוצעת של אטום בגז (אידיאלי) היא:  $\bar{E}_k = \frac{3}{2}kT$  כאשר  $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$ . הוא קבוע בולצמן ו-T היא הטמפרטורה בקלווין. הסבירו מדוע בטמפרטורת החדר כמעט כל האטומים צריכים להיות במצב היסוד. (טמפרטורת החדר היא בערך 20 מעלות צלזיוס והטמפרטורה בקלווין שווה לטמפרטורה בצלזיוס פלוס 273).
- (5) **השוואה בין מעברים**  
 נתונים שלושה מעברים בין רמות אנרגיה של אטום המימן לפי מודל בוהר כאשר n הוא המצב ההתחלתי ו-n' הוא המצב הסופי.  
 I.  $n = 1 \quad n' = 3$   
 II.  $n = 6 \quad n' = 2$   
 III.  $n = 4 \quad n' = 5$   
 א. קבעו אילו מן המעברים הם בליעה ואילו פליטה.  
 ב. באיזה מעבר מעורב הפוטון הכי אנרגטי?

- (6) **יינון אטום מעורר**  
 כמה אנרגיה דרושה על מנת ליינן אטום מימן מעורר הנמצא במצב אנרגיה החמישי?  
 החמישי?
- (7) **אורך גל של הקו השני**  
 מצאו את אורך הגל של הקו השני בסדרת בלמר.
- (8) **מימן בולע פוטון של הליום מיונן**  
 בשמש ישנם יונים של הליום -  $He^+$ . יון של ההליום פולט פוטון במעבר מרמה 5 לרמה 2. האם אטום מימן הנמצא בשמש יוכל לבלוע את הפוטון בלי לבצע יינון? אם כן בין איזה רמות אנרגיה תתבצע הבליעה?
- (9) **אנרגיית יינון של ליתיום פלוס שתיים**  
 חשבו את אנרגיית היינון (ממצב הייסוד) של אטום ליתיום החסר שני אלקטרונים  $Li^{2+}$  בעל  $Z = 3$  לפי מודל בוהר.
- (10) **אנרגיה קינטית של אלקטרון במצב יסוד**  
 מהי האנרגיה הפוטנציאלית והקינטית של אלקטרון במצב היסוד של אטום המימן?
- (11) **האם אטום המימן יחסותי**  
 השתמשו בתוצאה של התרגיל הקודם "אנרגיה קינטית של אלקטרון במצב ייסוד" ובדקו האם יש צורך להשתמש בנוסחאות יחסותיות במודל בוהר.
- (12) **רדיוס אטום מעורר**  
 אטום מימן מעורר יכול להיות תיאורטי בקוטר של 0.10mm. באיזה רמת אנרגיה נמצא אטום זה? ומהי האנרגיה של מצב זה?
- (13) **אנרגיה ותנז**  
 מצאו את התנע הזוויתי של אלקטרון באטום המימן אם האנרגיה שלו היא  $-1.5eV$ .
- (14) **אלקטרונים פוגעים בגז מימן**  
 קרן אלקטרונים בעלי אנרגיה של  $12.1eV$  פוגעת בגז מימן הנמצא בטמפרטורת החדר (רוב האטומים במצב היסוד). מהו ספקטרום הפליטה שנצפה לראות מן הגז בעקבות פגיעת הקרן?

### תשובות סופיות:

- (1) 300nm בתחום העל סגול (UV).
- (2)  $\lambda_{\max} = 122\text{nm}$ ,  $\lambda_2 = 103\text{nm}$ .
- (3) 22.8nm.
- (4) ראה סרטון.
- (5) א. בליעה: I, פליטה: II, בליעה: III. ב. מעבר I.
- (6) 0.544eV.
- (7) 490nm.
- (8) לא יוכל לקלוט.
- (9) 122.4eV.
- (10)  $K = 13.6\text{eV}$ ,  $U = -27.2\text{eV}$ .
- (11) אין צורך.
- (12) ברמה ה-972, האנרגיה היא:  $-1.4 \cdot 10^{-1}\text{eV}$ .
- (13)  $3.17 \cdot 10^{-34}\text{kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{sec}}$ .
- (14) אורכי הגל הנצפים הם: 103nm, 656nm, 122nm.

## בעיית שני הגופים ומסה מצומצמת

רקע

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

$$\vec{r}_{rel} = \vec{r}_1 - \vec{r}_2$$

$$\vec{r}_{c.m.} = \frac{m_1 \vec{r}_1 - m_2 \vec{r}_2}{m_1 + m_2}$$

שאלות

### (1) אטום פוזיטרונים

אטום פוזיטרונים הוא אטום המורכב מאלקטרון וגרעין שבו יש פוזיטרון. פוזיטרון הוא אנטי חלקיק של האלקטרון, כלומר מסתו זהה למסת האלקטרון ומטענו  $+e$ .

מהי האנרגיה של פוטון הנפלט במעבר מרמה  $n=3$  לרמה  $n=1$ ?

תשובות סופיות

(1) 6eV

## שאלות ותרגילים נוספים:

### שאלות:

- (1) **טמפרטורה של כוכב**  
איזה כוכב נמצא בטמפרטורה גבוהה יותר, כוכב הנראה כחול, אדום או צהוב?
- (2) **גופים שחורים בחושך**  
אם קרינה נפלטת מכל גוף, למה אנחנו לא רואים אותם בחושך?
- (3) **צבע אור של נורה**  
האם האור של נורה בטמפרטורה של 3000K יראה לבן כמו האור של השמש הנמצאת ב-6000K?
- (4) **חדר חושך**  
למה בחדרי חושך מאירים בנורה אדומה כשמפתחים תמונה של שחור לבן? האם ניתן להשתמש באור אדום גם בפיתוח של תמונה בצבע?
- (5) **תדירות סף מעדיפה תיאוריה פוטונית**  
הסבירו למה העובדה שיש תדירות סף באפקט הפוטואלקטרי מסתדרת עם התורה הפוטונית ולא עם התורה הגלית של האור?
- (6) **אנרגיה של אינפרה אדום לעומת על סגול**  
א. האם לפוטון יחיד של קרן בתחום העל סגול יש תמיד יותר אנרגיה מפוטון יחיד של קרן בתחום האינפרה אדום?  
ב. האם לקרן בתחום העל סגול יש תמיד יותר אנרגיה מקרן בתחום האינפרה אדום?
- (7) **האם נפלטים יותר אלקטרונים באורך גל נמוך**  
מקרינים מתכת באמצעות אור באורך גל מסוים ומודדים את האנרגיה של האלקטרונים הנפלטים. מחליפים את הקרן האור לקרן אחרת, באותה העוצמה אך עם אורך גל גדול יותר. בהנחה שבשני המקרים נפלטים אלקטרונים מן המתכת:  
א. האם מספר האלקטרונים הנפלט גדל / קטן או נשאר ללא שינוי?  
ב. האם האנרגיה של האלקטרונים גדלה / קטנה או נשאר ללא שינוי?

- (8) **אורך גל של פוטון בפיזור**  
 האם אורך הגל של פוטון בקרינת X המפוזר מאלקטרון גדל / קטן או לא משתנה?
- (9) **הבדל בין הפוטואלקטרי לקומפטון**  
 באפקט קומפטון הפגיעה של הפוטון יכולה לגרום ליציאה של אלקטרון מהמתכת, במקרה כזה מה ההבדל בינו לאפקט הפוטואלקטרי?
- (10) **איך העוצמה יורדת עם המרחק לפי כל מודל**  
 נניח כי ישנו מקור אור נקודתי, כיצד צריכה לרדת העוצמה של האור כתלות במרחק מהמקור לפי המודל הפוטוני וכיצד לפי המודל הגלי.  
 האם ניתן להבחין בין המודלים בדרך זו?
- (11) **מהם ההבדלים בין פוטון לאלקטרון**  
 ציינו את כל ההבדלים בין פוטון לאלקטרון.
- (12) **האם יש חמצן על כוכב**  
 כיצד ניתן לדעת האם יש חמצן על פני השמש או על כוכבים בכלל?
- (13) **נכונות הנוסחה של אנרגיית הפוטון**  
 השתמשו בשימור תנע והראו כי לפוטון הנפלט מאטום המימן יש קצת פחות אנרגיה מאשר החישוב שבנוסחה:  $hf = E_U - E_L$ .
- (14) **ספקטרום בליעה ופליטה בטמפרטורות שונות**  
 נניח שניקח את ספקטרום הפליטה של גז מימן הנמצא בטמפרטורה מאוד גבוהה כך שחלק מהאטומים נמצאים במצב מעורר ונעביר אותו דרך גז מימן הנמצא בטמפרטורה החדר (האטומים לא מעוררים) כך שתתבצע בליעה.  
 האם קווי הבליעה יהיו זהים לקווי הפליטה?
- (15) **אנרגיה מקסימלית להתנגשות אלסטית**  
 מהי האנרגיה המקסימלית עבורה יתנגשו שני אטומי מימן הנמצאים במצב היסוד להתנגשות אלסטית?

**(16) כמה פוטונים נכנסים לעין מנורה**

נורה של 40W פולטת בערך 3% מהאנרגיה המושקעת בה כאור נראה באורך גל ממוצע של 550nm. האור נפלט בצורה אחידה לכל הכיוונים. העריכו כמה פוטונים פוגעים בעין של אדם הנמצא במרחק 10m מהנורה בכל שניה. קוטר האישון הוא 4.0mm.

**(17) כמה פוטונים מגיעים מהשמש**

עוצמת האור המגיע מן השמש היא:  $I = 1350 \frac{W}{m^2}$ . חשבו כמה פוטונים למטר מרובע לשנייה יש פוגעים בפני כדור הארץ מן השמש? קחו אורך גל ממוצע של 550nm.

**(18) כוח של קרן לייזר**

קרן לייזר באורך גל של:  $\lambda = 633nm$  פוגעת בחיישן כוח. החיישן מודד כוח של:  $F = 3.0nN$ . כמה פוטונים פוגעים בחיישן כל שניה אם נניח שהפוטונים אינם מוחזרים?

**(19) חלקיקי אלפא מתקרבים לגרעין**

בחלק מהניסויים של רתפורד הוא השתמש בחלקיקי אלפא בעלי מטען  $+2e$  עם אנרגיה של 3.6MeV. כמה קרוב יכלו החלקיקים להגיע למרכז גרעין של כסף המכיל מטען של  $+47e$ . התעלמו מהרתע של הגרעין.

**(20) פוטנציאל עצירה בניסוי פוטואלקטרי**

בניסוי פוטואלקטרי מקרינים מתכת באור באורך גל 440nm ומודדים כי פוטנציאל העצירה הוא 1.2V. מה יהיה פוטנציאל העצירה אם יחליפו את האור לאורך גל של 550nm.

**(21) שינוי תדירות בפוטואלקטרי**

בניסוי פוטואלקטרי פוטונים באנרגיה של 9.0eV פוגעים במתכת ומתח העצירה הנמדד הוא 5.0V.

א. מה תהיה האנרגיה המקסימאלית של האלקטרונים הנפלטים אם תדירות הפוטונים תקטן לחצי מהתדירות המקורית?

ב. חזרו על סעיף א אם התדירות תקטן לשליש מהתדירות המקורית.

**(22) מודל בוהר לשמש וכדור הארץ**

נסו ליישם את המודל של בוהר לכדור הארץ והשמש.

א. מהם הרדיוסים ורמות האנרגיה? יש להשתמש ב:

$$G = 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{sec}^2 \text{kg}}, M_E = 5.97 \cdot 10^{24} \text{kg}, M_S = 2 \cdot 10^{30} \text{kg}$$

ב. חשבו את רמת האנרגיה שבה נמצא כדור הארץ אם המרחק מהשמש

$$\text{הוא: } r = 1.50 \cdot 10^{11} \text{m}$$

ג. \* הראו כי ההבדל בין רמות האנרגיה זניח עבור מודל זה וניתן להתייחס לאנרגיה כרציפה.

**(23) כוח על פנס**

פנס קטן עובד בהספק של 5W כאשר כ-3% מנוצל לאור נראה. העריכו את הכוח המופעל על הפנס אם האור יוצא בכיוון אחד.

**(24) זמן ואורך פלאנק**

נסתכל על שלושה קבועים בסיסיים בטבע קבוע הגרביטציה:

$$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{sec}}, G = 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{sec}^2}$$

$$\text{ומהירות האור: } c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$$

- א. מצאו קומבינציה מתמטית של הקבועים האלו שתהיה ביחידות של זמן. זמן זה נקרא זמן פלאנק  $t_p$  והוא נחשב לזמן המוקדם ביותר מרגע תחילת הייקום שבו ניתן להפעיל את חוקי הפיזיקה כפי שאנחנו מבינים כיום. חשבו את זמן זה.
- ב. מצאו קומבינציה מתמטית של הקבועים האלו שתהיה ביחידות של אורך. אורך זה נקרא אורך פלאנק  $\lambda_p$  והוא נחשב לאורך הקטן ביותר שבו ניתן להפעיל את חוקי הפיזיקה כפי שאנחנו מבינים כיום. חשבו את אורך זה.

## תשובות סופיות:

- (1) כחול.
- (2) כי הקרינה הנפלטת היא לא בתחום הנראה.
- (3) לא, הוא יראה יותר צהוב אדום.
- (4) כי סרט שחור לבן לא מגיב לאור אדום, לא ניתן להשתמש באור אדום לפיתוח תמונה צבעונית.
- (5) לפי התורה הגלית האנרגיה של האור קשורה לעוצמת האור ולפי התורה הפוטונית לתדירות.
- (6) א. כן. ב. לא.
- (7) א. ללא שינוי. ב. קטנה.
- (8) גדל.
- (9) באפקט קומפטון הפוטון מפוזר באנרגיה יותר נמוכה לעומת הפוטואלקטרי שם תמיד כל הפוטון נבלע וכל האנרגיה שלו הולכת לאלקטרון.
- (10) לפי אחד חלקי המרחק בריבוע בשניהם ואי אפשר להבחין ביניהם.
- (11) משותף: תנע - לשניהם יש, דואליות גל חלקיק לשניהם (לשניהם יש אורך גל). שונה: פוטון נע רק במהירות האור, לפוטון אין מסת מנוחה, לפוטון אין מטען חשמלי.
- (12) לפי ספקטרום הפליטה.
- (13) ראה סרטון.
- (14) לא.
- (15) 10.2eV
- (16)  $10^{10}$
- (17)  $3.7 \cdot 10^{21}$  פוטונים.
- (18)  $2.9 \cdot 10^8$  פוטונים לשנייה.
- (19)  $3.76 \cdot 10^{-14}$  m
- (20) 0.64V
- (21) א. 0.5eV. ב. לא תהיה פליטת אלקטרונים.
- (22) א.  $r_n = 2.34 \cdot 10^{-138} \cdot n^2$ ,  $E_n = -1.68 \cdot 10^{182} \cdot \frac{1}{n^2}$ . ב.  $n = 2.53 \cdot 10^{74}$ .
- ג. ראה סרטון.
- (23)  $5 \cdot 10^{-10}$  N
- (24) א.  $t_p = \sqrt{\frac{Gh}{c^5}} = 1.35 \cdot 10^{-43}$  sec. ב.  $\lambda_p = \sqrt{\frac{Gh}{c^3}} = 4.05 \cdot 10^{-35}$  m

# כימיה פיסיקאלית 124510

פרק 6 - תורת הקוונטים

תוכן העניינים

1. הרצאות ותרגולים ..... 66

## פונקציית הגל של החומר:

### סיכום כללי:

- $|\psi(x)|$  היא פונקציית הגל של החומר.
- $|\psi(x)|^2$  היא צפיפות ההסתברות למצא חלקיק בנקודה מסוימת.
- ההסתברות שחלקיק נמצא בין  $x_1$  ל- $x_2$  היא:  $\int_{x_1}^{x_2} |\psi(x)|^2 dx$ .
- נרמול:  $\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(x)|^2 dx = 1$ .
- כאשר מתבצעת מדידה של החלקיק פונקציית הגל קורסת.
- מיקום ממוצע:  $\langle x \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} x |\psi(x)|^2 dx$
- המיקום בעל ההסתברות הגבוה ביותר הוא נקודת המקסימום של פונקציית ההסתברות  $|\psi(x)|^2$  (ניתן למצא אותו על ידי נגזרת).
- שונות:  $\sigma^2 = \langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2$  כאשר  $\langle x^2 \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 |\psi(x)|^2 dx$

### שאלות:

- (1) דוגמה – חישוב ההסתברות לדעיכה אקספוננציאלית  
פונקציית הגל של חלקיק היא  $4e^{-8x}$  עבור  $x > 0$  ואפס עבור  $x < 0$ .  
מה הסיכוי למצא את החלקיק ב- $x > 0.03$ .

(2) דוגמה – מצאו את המקדם

$$\psi(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ A \sin(20\pi x) & 0 \leq x \leq 0.05 \\ 0 & x > 0.05 \end{cases}$$

נתונה פונקציית הגל הבאה של חלקיק:  $0 \leq x \leq 0.05$

מצאו את הקבוע  $A$ .

**3) דוגמה – מצאו משתנים**

נתונה פונקציית גל מנורמלת לחלקיק בעל מסה  $M$ :  $\psi(x) = Ae^{-\alpha(x-x_0)^2}$ . מצאו את:

א.  $A$ .ב.  $\langle x \rangle$ .

ג. המיקום המסתבר ביותר.

ד.  $\langle x^2 \rangle$ .ה.  $\Delta x$ .

לעזרתכם:  $\int_0^\infty e^{-bx^2} dx = \sqrt{\frac{\pi}{4b}}$ ;  $\int_0^\infty x^2 e^{-bx^2} dx = \sqrt{\frac{\pi}{16b^3}}$

**תשובות סופיות:**

(1) 38%

(2)  $A = 2\sqrt{10}$

(3) א.  $A = \left(\frac{2\alpha}{\pi}\right)^{\frac{1}{4}}$

ג.  $x_0$ .ב.  $x_0$ .

ה.  $\left(\frac{\pi}{8192\alpha^3}\right)^{\frac{1}{8}}$

ד.  $\left(\frac{\pi}{8192\alpha^3}\right)^{\frac{1}{4}} + x_0^2$

## עקרון אי הוודאות של הייזנברג:

### סיכום כללי:

הערות		
1. אי אפשר למדוד במדויק את המיקום והתנע באותו ציר בו זמנית. 2. אותה נוסחה לכל ציר בנפרד. 3. אין בעיה למדוד במדויק את התנע ב-X והמיקום ב-Y בו זמנית.	$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$ $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.055 \cdot 10^{-34} J \cdot S$	אי ודאות מיקום תנע
1. ככל שמוודדים את הזמן בדיוק גבוה יותר כך הדיוק במדידת האנרגיה קטן. 2. האנרגיה נשמרת עד כדי אי הוודאות, הגופים יכולים להיות באנרגיות האסורות קלאסית.	$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$	אי ודאות זמן אנרגיה
	$\Delta L_z \Delta \theta \geq \frac{\hbar}{2}$	אי ודאות במדידת הזווית והתנע הזוויתי

### שאלות:

(1) דוגמה – מדידת מיקום  
 אלקטרון נע במהירות:  $2.10 \cdot 10^6 \frac{m}{sec}$  שנמדדה בדיוק של 0.12%.  
 מה הדיוק המקסימאלי שניתן להשיג במדידה סימולטנית של המיקום?

(2) דוגמה – אי וודאות של טניס  
 מה היא אי הוודאות במדידת המיקום של כדור טניס בעל מסה של 150 גרם הנזרק במהירות:  $35 \pm 2 \frac{m}{sec}$ ?

(3) אי ודאות במיקום נויטרון שנע  
 נויטרון נע במהירות:  $(6.650 \pm 0.023) \cdot 10^5 \frac{m}{sec}$ .  
 באיזו רמת דיוק ניתן לדעת את המיקום שלו?  $m_p = 1.67 \cdot 10^{-27} kg$

(4) אנרגיה במצב מעורר  
 אלקטרון נשאר במצב מעורר באטום בערך  $10^{-8} sec$ .  
 מה אי הוודאות באנרגיה של המצב באלקטרון וולט?

**(5) אי ודאות יחסית בפליטת פוטון**

זמן החיים של אטום במצב מעורר הוא בערך  $10^{-9}$  sec. האטום יורד מהמצב המעורר ופולט פוטון באורך גל של 400nm, מצאו את אי הודאות היחסית באנרגיית הפוטון  $\frac{\Delta E}{E}$  ובאורך הגל  $\frac{\Delta \lambda}{\lambda}$ .

**(6) אי ודאות בשל קליע באקדח**

קליע בעל מסה של 5gr נורה מאקדח במהירות אופקית של  $180 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$ .

- א. מהו אורך הגל של הקליע?  
 ב. מהי אי הודאות המינימלית במדידת המיקום של הקליע?  
 ג. מהי אי הודאות המינימלית בתנע בכיוון האנכי של הקליע אם רדיוס הקנה הוא 0.60cm?

**(7) אי ודאות במסת נויטרון**

לנויטרון חופשי:  $m = 1.67 \cdot 10^{-27}$  kg יש זמן חיים של 886sec. מה אי הודאות במדידת המסה של הנויטרון (בק"ג)?

**(8) אלקטרון יורד מצב באטום המימן**

אלקטרון נמצא במצב המעורר הראשון ( $=2n$ ) של אטום המימן בממוצע  $10^{-8}$  sec לפני שהוא יורד למצב הייסוד ( $=1n$ ).  
 א. העריכו את אי הודאות באנרגיית האלקטרון במצב  $=2n$ .  
 ב. מהי אי הודאות היחסית באנרגיית הפוטון הנפלט?  
 ג. מהו אורך הגל ורוחב הפס של קו הספקטרום הנצפה מתהליך זה?

**תשובות סופיות:**

$$\Delta X \text{ min} = 2.3 \cdot 10^{-6} \text{ m} \quad (1)$$

$$1.8 \cdot 10^{-34} \text{ m} \quad (2)$$

$$1.37 \cdot 10^{-11} \text{ m} \quad (3)$$

$$3 \cdot 10^{-8} \text{ eV} \quad (4)$$

$$\frac{\Delta E}{E} = 4 \cdot 10^{-5} \% , \quad \left| \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right| = 4 \cdot 10^{-5} \% \quad (5)$$

$$7.4 \cdot 10^{-34} \text{ m} \quad \text{א.} \quad 10^{-32} \text{ m} \quad \text{ב.} \quad 10^{-32} \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{sec}} \quad \text{ג.} \quad (6)$$

$$10^{-51} \text{ kg} \quad (7)$$

$$3 \cdot 10^{-8} \text{ eV} \quad \text{א.} \quad 3 \cdot 10^{-9} \quad \text{ב.} \quad \lambda = 122 \text{ nm} , \quad |\Delta \lambda| \approx 4 \cdot 10^{-7} \text{ nm} \quad \text{ג.} \quad (8)$$

## משוואת שרדינגר:

### סיכום כללי:

משוואת שרדינגר עם תלות בזמן במימד אחד:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(x, t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x, t)}{\partial x^2} + U(x, t)\Psi(x, t)$$

תנאים נוספים:

1. פסי מנורמלת.
2. פסי יכולה להיות פונקציה מורכבת.
3. פסי רציפה.
4. הגזרת של פסי רציפה למעט נקודות בהן הפוטנציאל מתבדר.

בתלת מימד:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(x, y, z, t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(x, y, z, t) + U(x, t)\Psi(x, y, z, t)$$

משוואת שרדינגר ללא תלות בזמן במימד אחד:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \psi}{dx^2} + U(x)\psi = E\psi$$

כאשר:  $\Psi(x, t) = \psi(x)e^{-\frac{iEt}{\hbar}}$

- התרגילים של נושא זה מופעים בנושאים הבאים.

## חלקיק חופשי ובור פוטנציאל:

### סיכום כללי:

חלקיק חופשי – חלקיק שנע ללא השפעת כוחות:  $U(x) = 0$ .  
 פונקציית הגל של חלקיק חופשי:  $\psi(x) = A \sin(kx)$ .  
 חבילת גלים:  $\psi(x) = \sum_n A_n \sin(k_n x) + B_n \cos(k_n x)$ .

בור פוטנציאל אינסופי:

פונקציית הגל של המצב ה- $n$ :  $\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin\left(\frac{\pi n}{l} x\right)$

האנרגיה של המצב ה- $n$ :  $E_n = \frac{h^2}{8ml^2} n^2, n = 1, 2, 3, \dots$

- לפי תורת הקוונטים קיימת אפשרות שהחלקיק יהיה במקום שבו האנרגיה הכוללת קטנה מהאנרגיה הפוטנציאלית, מצב שאינו אפשרי לפי המכניקה הקלאסית. באזור האסור פונקציית הגל דועכת אקספוננציאלית.

עקרונות לציור פונקציית גל:

- ציירו את פונקציית הפוטנציאל ואת אנרגיית החלקיק.
- עבור המצב ה- $n$  ציירו גל עם  $n-1$  נקודות צומת (לא כולל הקצוות).
- ככל שהאנרגיה הקינטית גדולה יותר כך האמפליטודה ואורך הגל קטנים יותר (ולהיפך).
- פונקציית הגל הולכת לאפס במיקום בו הפוטנציאל הולך לאינסוף.
- פונקציית הגל דועכת אקספוננציאלית במקומות האסורים קלאסית. ככל שההפרש בין האנרגיה הפוטנציאלית לאנרגיה הכללית גדול יותר כך הדעיכה מהירה יותר.

מיקום ממוצע:  $\langle x \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} x |\psi(x)|^2 dx$

המיקום בעל ההסתברות הגבוהה ביותר הוא נקודת המקסימום של פונקציית ההסתברות  $|\psi(x)|^2$  (ניתן למצוא אותו על ידי נגזרת).

## שאלות:

- (1) **דוגמה – אלקטרון חופשי עם אנרגיה ידועה**  
 אלקטרון עם אנרגיה  $E = 3.7\text{eV}$  נע באופן חופשי במרחב.  
 א. מהו אורך הגל של האלקטרון?  
 ב. רשמו את פונקציית הגל של האלקטרון.  
 אין צורך לנרמל את הפונקציה והניחו כי הפאזה היא אפס.
- (2) **דוגמה – אלקטרון באמצע הקופסה**  
 אלקטרון נמצא במצב היסוד בתוך קופסה קשיחה באורך  $l$ .  
 מצאו את ההסתברות שהאלקטרון נמצא במרחק  $\frac{l}{8}$  ממרכז הקופסה (מימין או משמאל למרכז).
- (3) **דוגמה – מיקום ממוצע ומסתבר במצב המעורער הראשון**  
 מצאו את המיקום הממוצע והמיקום המסתבר ביותר עבור חלקיק הנמצא במצב המעורער הראשון בתוך קופסה קשיחה באורך:  $2.00 \cdot 10^{-10}\text{m}$ .
- (4) **דוגמה – חיידק בקופסה**  
 חיידק קטן בעל מסה של  $10^{-13}\text{kg}$  מוגבל לזוז בין שני קירות קשיחים במרחק  $0.1\text{mm}$  אחד מן השני.  
 א. האריכו את המהירות המינימאלית של החיידק.  
 ב. אם מהירות החיידק היא בערך  $10^{-6}\frac{\text{m}}{\text{sec}}$ , מהו המספר הקוונטי של המצב בו נמצא החיידק?
- (5) **דוגמה – חלקיק בבור סופי**  
 חלקיק בעל מסה  $M$  נמצא בבור פוטנציאל הנתון לפי הפונקציה הבאה:

$$U(x) = \begin{cases} \infty & x < 0 \\ 0 & 0 \leq x \leq L \\ U_0 & L < x \end{cases}$$

אנרגיית החלקיק  $E$  נתונה וקטנה מ- $U_0$ .

- א. מצאו את פונקציית הגל בכל המרחב ללא מציאת המקדמים הקבועים של הפונקציה בכל תחום.  
 ב. השתמשו בתנאי השפה (פונקציית הגל רציפה והנגזרת רציפה) בשביל למצא משוואה ממנה ניתן לחשב את הערכים האפשריים של האנרגיה. הראו כי מתקיים הקשר:

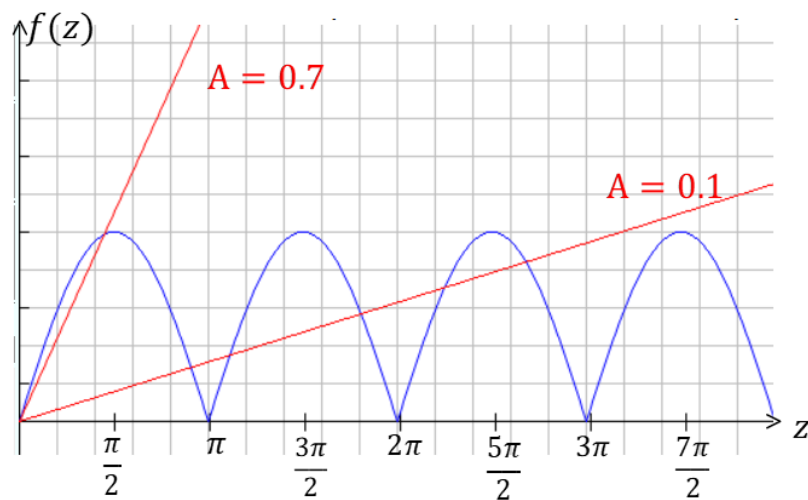
$$\alpha = \sqrt{\frac{2m(U_0 - E)}{\hbar^2}} \quad \text{ו-} \quad k = \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}} \quad \text{כאשר} \quad \tan(kL) = -\frac{k}{\alpha}$$

ג. מצאו מהו תחום הערכים האפשריים של  $kL$  והראו כי :

$$|\sin(kL)| = \frac{\hbar k}{\sqrt{2mU_0}}$$

ד. כתבו את המשוואה של סעיף ג' באמצעות המשתנים :  $z = kL$

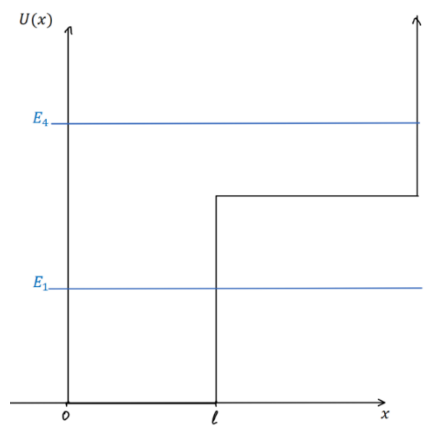
ו-  $A = \frac{\hbar}{L\sqrt{2mU_0}}$  כעת ניתן לפתור את הבעיה באמצעות פתרון גרפי. הפתרונות הן נקודות החיתוך של הפונקציות משני צידי המשוואה. סמנו את נקודות הפתרון בגרף הבא עבור :  $A = 0.1$  ו-  $A = 0.7$ . הקפידו על תחום ההגדרה של סעיף ג'.



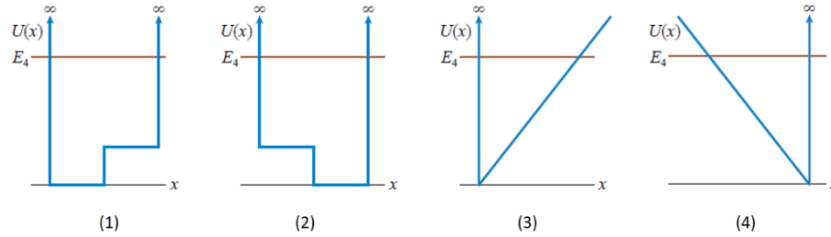
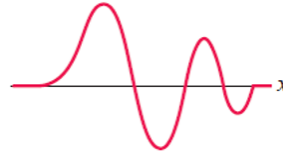
ה. מהו התנאי על  $A$  עבורו אין פתרון למשוואה?  
מה המשמעות הפיזיקאלית של מצב זה?

**6) דוגמה – בור אינסופי עם מדרגה**

באיור נתונה פונקציית פוטנציאל של בור פוטנציאל אינסופי עם מדרגת פוטנציאל. ציירו את פונקציית הגל עבור האנרגיות  $E_1$  ו-  $E_4$  באיור.



**(7) דוגמה – התאימו פוטנציאל לפונקציית הגל**  
איזה מהגרפים הבאים מתאר את הפוטנציאל של פונקציית הגל הבאה:



**תשובות סופיות:**

א.  $6.38 \cdot 10^{-10} \text{ m}$       ב.  $\psi(x) = A \sin(9.84 \cdot 10^{-9} \text{ m}^{-1} \cdot x)$       (1)

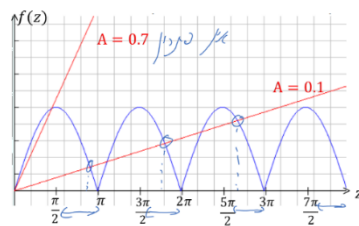
47.5%      (2)

ממוצע:  $\langle x \rangle = \frac{l}{2}$ , מסתבר:  $\frac{l}{4}$ ,  $\frac{3l}{4}$       (3)

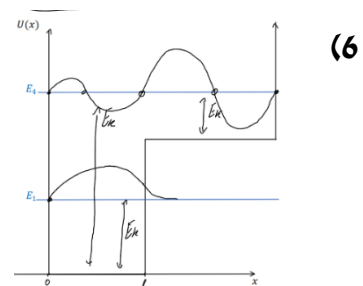
א.  $3 \cdot 10^{-17} \frac{\text{m}}{\text{sec}}$       ב.  $3 \cdot 10^{-10}$       (4)

א.  $\alpha = \frac{\sqrt{2m(U_0 - E)}}{\hbar}$  -  $k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}$  : כאשר  $\psi(x) = \begin{cases} Ae^{ikx} + Be^{-ikx} & x < 0 \\ Ce^{-\alpha x} & 0 < x < L \end{cases}$       (5)

ב. הוכחה.      ג.  $\frac{\pi}{2} + \pi n < KL < \pi + \pi n \quad n = 0, 1, 2, \dots$



ד.  $|\sin(z)| = Az$       ה.



4 (7)

## מנהור (tunneling):

### סיכום כללי:

ההסתברות שהחלקיק יעבור את המחסום.  $-l$ אורך המחסום  $T \ll 1$ רק עבור	$T \approx 16 \frac{E}{U_0} \left(1 - \frac{E}{U_0}\right) e^{-2\alpha l}$ $\alpha = \frac{\sqrt{2m(U_0 - E)}}{\hbar}$	<b>מקדם ההעברה</b>
	$R = 1 - T$	<b>מקדם החזרה</b>

### שאלות:

#### (1) דוגמה – אלקטרון חודר מחסום

אלקטרון חופשי בעל אנרגיה של 40eV נע במרחב ונתקל במחסום פוטנציאל בעל אנרגיה של 60eV. מה ההסתברות שהאלקטרון יעבור את המחסום אם עובי המחסום הוא:

א. 1.0nm  
 ב. 0.1nm

#### (2) נתונים של אלקטרון חופשי

פונקציית הגל של אלקטרון חופשי היא:  $\psi(x) = A \sin(\pi \cdot 10^{10} x)$  כאשר  $x$  במטרים. מצאו את:

א. אורך הגל והתנע של האלקטרון.  
 ב. מהירות האלקטרון.  
 ג. אנרגיית האלקטרון.

#### (3) מהירות מינימלית בבור אינסופי

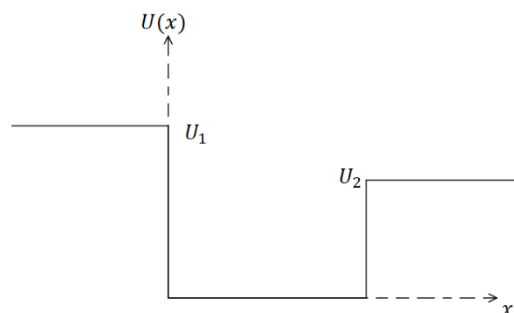
מהי המהירות המינימלית של אלקטרון הנמצא בבור פוטנציאל אינסופי ברוחב 0.30nm?

(4) **אי ודאות במצב היסוד\***  
 חלקיק נמצא במצב היסוד בתוך בור פוטנציאל אינסופי.  
 הראו כי יחס אי הודאות מתקיים עבור מצב זה. עבור  $\Delta x$  ניתן לקחת את רוחב הבור (או יותר מדויק רוחב הבור חלקי  $4\pi$ ). התנע של החלקיק אמנם ידוע מתוך האנרגיה אבל הכיוון שלו אינו ידוע, התנע יכול להיות חיובי או שלילי ולכן אי הודאות בתנע היא  $2p$ .

(5) **הסתברות למצא אלקטרון בבור**  
 אלקטרון נמצא בקופסה סגורה וקשיחה ברוחב  $1.00\text{nm}$ .  
 מה ההסתברות למצא את האלקטרון במרחק  $0.10\text{nm}$  ממרכז הקופסה, מכל צד, עבור המצב:  
 א.  $n = 1$   
 ב.  $n = 4$   
 ג.  $n = 20$   
 ד. השוו למקרה הקלאסי.

(6) **בור אינסופי מוזז**  
 מצאו את פונקציות הגל עבור בור פוטנציאל אינסופי ברוחב  $l$  הנמצא מ- $x = -\frac{l}{2}$  ועד  $x = \frac{l}{2}$  (במקום מ-0 עד  $l$ ). האם רמות האנרגיה משתנות?

(7) **בור סופי עם קירות שונים**  
 חלקיק נמצא תחת הפוטנציאל הנתון באיור.  
 שרטטו את פונקציית הגל עבור שלושת המצבים הבאים:  
 א. החלקיק במצב המעורר הראשון ו- $E < U_2$ .  
 ב.  $U_2 < E < U_1$ .  
 ג.  $U_1 < E$ .



**(8) זרם פרוטונים עובר מחסום**

זרם של  $1.2\text{mA}$  המכיל פרוטונים באנרגיה  $1.8\text{MeV}$  נתקל במחסום פוטנציאל בגובה  $2.0\text{MeV}$  וברוחב  $5.0 \cdot 10^{-14}\text{m}$ . מהו הזרם המועבר?

**תשובות סופיות:**

(1) א.  $4.86 \cdot 10^{-18}\%$  ב.  $3.67\%$

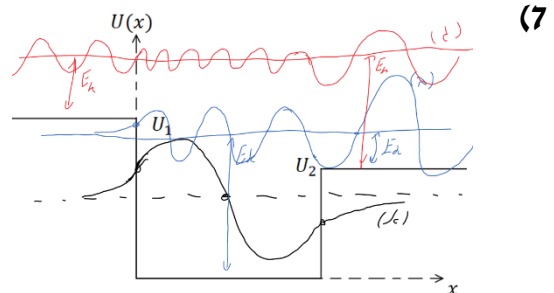
(2) א.  $\lambda = 2 \cdot 10^{-10}\text{m}$ ,  $p = 3.3 \cdot 10^{-24}\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{sec}}$  ג.  $3.64 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$  ד.  $38\text{eV}$

(3)  $1.2 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$

(4) הוכחה.

(5) א.  $0.387$  ב.  $0.153$  ג.  $0.2$  ד.  $0.2$

(6)  $\sqrt{\frac{2}{l}} \sin\left(\frac{\pi nx}{l} + \frac{\pi n}{2}\right)$ , לא משתנות.



(8)  $96\text{nA}$

## אוסילטור הרמוני:

### סיכום כללי:

$$\psi_1(x) = (\pi b^2)^{-\frac{1}{4}} e^{-\frac{x^2}{2b^2}}$$

$$\psi_2(x) = (\pi b^2)^{-\frac{1}{4}} \frac{x}{b} e^{-\frac{x^2}{2b^2}}$$

$$\psi_3(x) = 8\sqrt{3}(\pi b^2)^{-\frac{1}{4}} \left(1 - \frac{2x^2}{b^2}\right) e^{-\frac{x^2}{2b^2}} \quad \text{פונקציות הגל:}$$

$$b = \sqrt{\frac{\hbar}{m\omega}}$$

$$\cancel{n=1,2,3,\dots} \quad \text{רמות האנרגיה: } E_n = \left(n - \frac{1}{2}\right) \hbar\omega \quad \text{כאשר } n=1,2,3,\dots$$

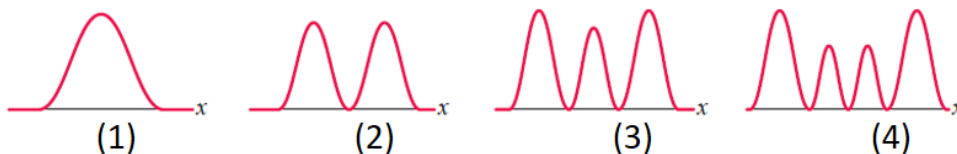
$$(n=0,1,2,\dots \text{ כאשר } E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) \hbar\omega \text{ או})$$

פתרון כללי ל

### שאלות:

- (1) דוגמה – אלקטרון בתנודה הרמונית פולט פוטון  
אלקטרון הנמצא באוסילטור הרמוני קוונטי פולט פוטון באורך גל של 400nm  
כאשר הוא יורד רמת אנרגיה אחת.  
א. האם ניתן לדעת באיזה רמת אנרגיה היה האלקטרון?  
ב. מהו "קבוע הקפיץ"?

- (2) דוגמה – איזה פונקציית הסתברות מתאימה  
איזו פונקציית הסתברות מתאימה לחלקיק הנמצא תחת פוטנציאל של  
אוסילטור קוונטי עם אנרגיה:  $E = \frac{7}{2} \hbar\omega$ ?



### תשובות סופיות:

- (1) א. לא. ב.  $0.02 \frac{N}{m}$
- (2) 4.

## תרגילים נוספים:

### שאלות:

- (1) פונקציית חומר מול פונקציות גל אחרות השוו בין פונקציית הגל של החומר  $\psi$  לבין:  
 א. פונקציית הגל של מיתר.  
 ב. פונקציית גל של גל אלקטרומגנטי.
- (2) מודל בוהר וקוונטים מה ההבדל בין המודל האטומי של בוהר למכניקת הקוונטים? רמז: עיקרון אי הוודאות.
- (3) האם אפשר לאזן מחט האם אפשר לאזן מחט כך שהיא תעמוד על החוד שלה באופן מוחלט?
- (4) ניוטון וקוונטים באיזה אופן התורה של ניוטון שונה מתורת הקוונטים?
- (5) מיקום מדויק האם עקרון אי הוודאות מגביל את הדיוק שבו ניתן למדוד את המיקום של גוף?
- (6) למי יש יותר סיכוי לעבור מחסום אטום מימן ואטום הליום בעלי אנרגיה זהה מתקרבים למחסום פוטנציאל ברוחב סופי עם אנרגיה פוטנציאלית גבוהה מהאנרגיה שלהם. למי סיכוי גדול יותר לעבור את המחסום?
- (7) חיים של בוזון  $Z^0$  בוזונים הם שם לקבוצת חלקיקים נשאי כוח (עם ספין שלם). הבוזון  $Z^0$  קשור ל"כוח החלש" (כוח שפועל בתוך הגרעין) ודועך מאוד מהר. האנרגיה הממוצעת שלו היא  $91.9 \text{ GeV}$  והרוחב במדידת האנרגיה הוא  $2.5 \text{ GeV}$ . מהו זמן החיים המוערך של הבוזון  $Z^0$ ?

**(8) כדור מקפץ**

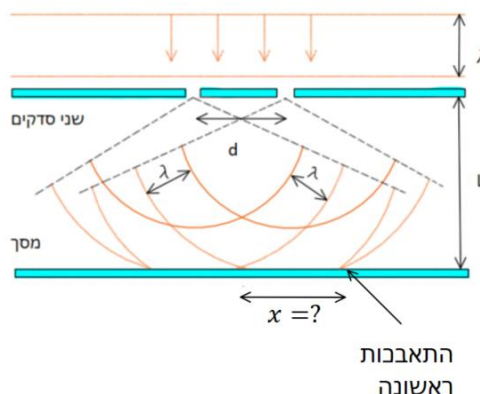
כדור קטן במסה  $10^{-6} \text{kg}$  משוחרר ממנוחה בגובה  $2 \text{m}$  מעל הרצפה. הכדור פוגע ברצפה וקופץ חזרה. לאחר כל פגיעה ברצפה הכדור מגיע חזרה ל-60% מהגובה הקודם בגלל איבוד אנרגיה בהתנגשות עם הרצפה. כמה פעמים צריך הכדור לפגוע ברצפה עד שאי הודאות במהירות שלו תהיה משמעותית (כלומר בסדר גודל של המהירות עצמה). הניחו שאי הודאות במדידת המיקום היא בסדר גודל של הגובה הנמדד.

**(9) פונקציית גל נתונה**

נתונה פונקציית הגל הבאה:  $\psi(x) = b^{-\frac{1}{2}} \left| \frac{x}{b} \right|^{\frac{1}{2}} e^{-(x/b)^2/2}$ , כאשר  $nmb = 0.5$ .  
 א. בדקו כי פונקציית הגל מנורמלת.  
 ב. מהו המיקום המסתבר ביותר בו נמצא החלקיק בתחום  $x > 0$ ?  
 ג. מה ההסתברות למצא את החלקיק בין  $x = 0$  ל- $x = 0.50 \text{nm}$ ?

**(10) נויטרונים בניסוי שני סדקים**

עורכים את ניסוי שני הסדקים עם נויטרונים בעלי אנרגיה של  $0.0040 \text{eV}$ . המרחק בין הסדקים הוא  $d = 0.70 \text{mm}$  והמרחק למסך הוא  $L = 1.0 \text{m}$ . מהו המרחק מהמרכז בו תופיע ההתאבכות הראשונה?  $m_p = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{kg}$ .





### תשובות סופיות:

- (1) א. חומר: פונקציה סקלרית, מתארת הסתברות וללא תווך.  
מיתר: פונקציה סקלרית, מתארת תנודה, דרוש תווך.
- ב. א"מ: פונקציה וקטורית, מתארת הסתברות ואת האמפליטודה של השדה החשמלי והמגנטי, ללא תווך.
- (2) ראו סרטון.
- (3) לא.
- (4) בתורה של ניוטון ניתן לחשב את המיקום והתנע באופן מדויק בו זמנית, כתוצאה מכך ניתן תיאורטית לצפות בדיוק את ההתנהגות של מערכת בעתיד. לפי תורת הקוונטים יש אי ודואות במדידות ולכן ניתן לצפות רק הסתברויות להתנהגות המערכת בעתיד.
- (5) לא.
- (6) מימן.
- (7)  $1.3 \cdot 10^{-25} \text{ sec}$
- (8) .70
- (9) א. הוכחה. ב.  $0.35 \text{ nm}$ . ג.  $63\%$ .
- (10)  $6.5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$