# אלקטרוניקה פיזיקלית 044124

# סמסטר אביב 2018

# מועד ב'

**הנחיות**

1. משך הבחינה - שלוש שעות.

2. בבחינה 4 שאלות. בידקו כי ברשותכם 4 עמודים כולל עמוד זה.

3. ניתן להשתמש בחומר עזר מכל סוג שהוא פרט לציוד תקשורת אלקטרוני (מחשב, טאבלט, טלפון וכו').

5. יש להגיש את מחברת הבחינה בלבד.

6. כיתבו בכתב יד ברור.

7. תשובות לא מנומקות לא תתקבלנה.

8. אנא ודאו שרשמתם את מספר תעודת הזהות על מחברת הבחינה.

## שאלה מספר 1 (35 נקודות):

נתון חומר מונו-אטומי בעל מבנה שריגי מהסוג body-centered tetragonal. תא היחידה שלו נתון על ידי הוקטורים הפרימיטיביים:

$$\vec{a}_1 = a x, \vec{a}_2 = a y, \vec{a}_3 = c\hat{z}$$

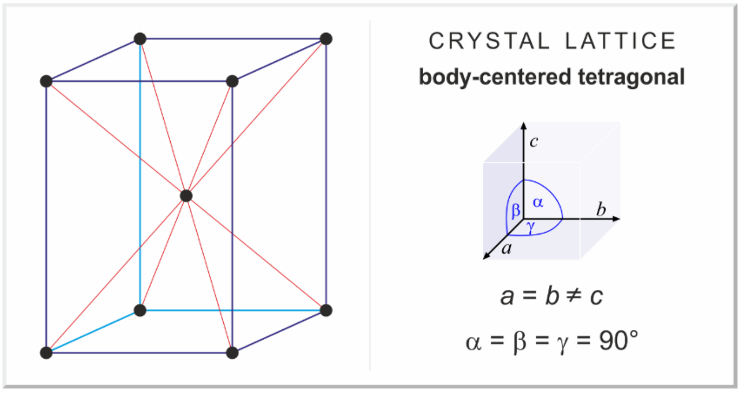
כמו כן, נתונים וקטורי הבסיס עבור הבסיס של השריג:

$$\vec{d}_1 = 0x, \vec{d}_2 = \frac{a}{2}x + \frac{a}{2}y + \frac{c}{2}\hat{z}$$

קבוע השריג הינו $a = 4.2[Angstrom]$ ורדיוסו של כל אטום $r = a/2$.

א. (4 נק') - ציירו את מבנה השריג.

תא היחידה של השריג הנ"ל נראה כך:




ב. (5 נק') - מצאו את נפח תא היחידה הפרימיטיבי. כמה אטומים מכיל תא היחידה?

נפח תא היחידה יהיה פשוט $V = a^2 c$. הנפח מתקבל ישירות מפני שכל וקטורי השריג הפרימיטיבים מאונכים זה לזה ולכן מדובר פשוט במכפלה של אורכם. תא יחידה זה מכיל סך של 2 אטומים. אטום אחד שייך לאתר המרכזי, ואטום נוסף המורכב מ-8 שמיניות של אטומי הפינות.

ג. (6 נק') - מצאו את היחס $c/a$ כך שיתקבל פקטור אריזה (Packing Factor) מקסימלי. מהו פקטור האריזה במקרה זה?

יחס האריזה מוגדר כיחס בין הנפח הנתפס ע"י האטומים בתא היחידה לבין הנפח הכולל של תא היחידה. את נפח תא היחידה מצאנו בסעיף הקודם. ידוע לנו שישנם 2 אטומים בסה"כ פר תא יחידה ולכן הנפח הנתפס על ידם הינו

$$V_{atoms} = 2 \cdot V_{atom} = 2 \cdot \frac{4}{3}\pi r_{atom}^3 = \frac{8}{3}\pi\left(\frac{a}{2}\right)^3 = \frac{\pi a^3}{3}$$

מכאן שיחס האריזה יהיה:

$$P.F. = \frac{V_{atoms}}{V_{unit}} = \frac{\frac{\pi a^3}{3}}{a^2 c} = \frac{\pi a}{3c}$$

שימו לב! יחס זה חייב להיות שווה ל-1 או קטן ממנו, אולם היחס $c/a$ לא יתקבל מהשוואה ל-1 שכן משמעות הדבר שהאטומים תופסים את כל נפח תא היחידה. הדבר אינו הגיוני שכן האטומים הם בקירוב טוב כדורים קשיחים ועליהם למלא חלל בצורת תיבה (ולכן נצפה ל"חללים" בין האטומים, כלומר שיחס האריזה בהכרח קטן מ-1).

המגבלה הנוספת באה בדמות הדרישה על האטום המרכזי. המרחק בינו לבין כל אחד מאתרי השריג האחרים חייב להיות שווה במינימום לפעמיים הרדיוס (מרחק זה הינו הקו האדום בשרטוט מסעיף א').
על כן נרצה שאורכו של קו זה יהיה שווה ל-$a$, כלומר שיתקיים:

$$\left|\vec{d}_2\right| = \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{c}{2}\right)^2} \equiv a \Rightarrow \frac{a^2}{2} + \frac{c^2}{4} = a^2 \Rightarrow c^2 = 2a^2 \Rightarrow c = \sqrt{2}a$$

הצבת הדרישה הנ"ל בביטוי ליחס האריזה תיתן:

$$P.F. = \frac{\pi a}{3c} = \frac{\pi a}{3\sqrt{2}a} = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} = 0.74$$

ד. (6 נק') - ציירו את תא ויגנר-זייטס של שריג זה (הישיר).

בבואנו לצייר את תא ויגנר-זייטס אנו מתעלמים מהבסיס. היות וצורת השריג ללא הבסיס היא צורת תיבה, נצפה שתא ויגנר-זייטס יהיה גם הוא כצורת תיבה שמרכזה הוא אחד מאתרי השריג.

ה. (7 נק') - מצאו את הוקטורים הפרימיטיביים של הסריג ההופכי. ציירו את השריג ההופכי ומצאו את אזור ברילואין הראשון.

גם כאן נעסוק רק בשריג הפרימיטיבי ללא הבסיס. ניתן לבצע חישוב מלא לפי הגדרה של וקטורי השריג ההופכי. לחילופין, היות והוקטורים הפרימיטיביים ניצבים זה לזה בכל מקרה, ידוע לנו שבמרחב ההופכי נקבל את אחד חלקי האורך של כל וקטור כפול פקטור של $2\pi$, כלומר שנקבל את השלשה הבאה:

$$\vec{b}_1 = \frac{2\pi}{a}\hat{x}, \vec{b}_2 = \frac{2\pi}{a}\hat{y}, \vec{b}_3 = \frac{2\pi}{c}\hat{z}$$

ו. (7 נק') - יחס הדיספרסיה עבור החומר הנ"ל נתון על ידי:

$$E(\vec{k}) = -t[\cos(ak_x)\cos(ak_y) + \cos(ak_x)\cos(ck_z) + \cos(ak_y)\cos(ck_z)]$$
$$t = 2[eV]$$

מצאו את טנזור המסה האפקטיבית עבור חומר זה.

ידוע לנו מהגדרת טנזור המסה האפקטיבית שיתקיים:

$$M_{i,j}^{-1} \triangleq \frac{1}{\hbar^2}\frac{\partial^2 E}{\partial k_i \partial k_j}$$

עלינו לחשב 6 נגזרות מתוך סך של 9 נגזרות (ה-3 הנותרות מתקבלות מיידית מטעמי סימטריה. נקבל:

$$M_{x,x}^{-1} \triangleq \frac{1}{\hbar^2}\frac{\partial^2 E}{\partial k_x \partial k_x} = \frac{ta^2}{\hbar^2}[\cos(ak_x)\cos(ak_y) + \cos(ak_x)\cos(ck_z)]$$

$$M_{y,y}^{-1} \triangleq \frac{1}{\hbar^2}\frac{\partial^2 E}{\partial k_y \partial k_y} = \frac{ta^2}{\hbar^2}[\cos(ak_x)\cos(ak_y) + \cos(ak_y)\cos(ck_z)]$$

$$M_{z,z}^{-1} \triangleq \frac{1}{\hbar^2}\frac{\partial^2 E}{\partial k_z \partial k_z} = \frac{tc^2}{\hbar^2}[\cos(ak_x)\cos(ck_z) + \cos(ak_y)\cos(ck_z)]$$

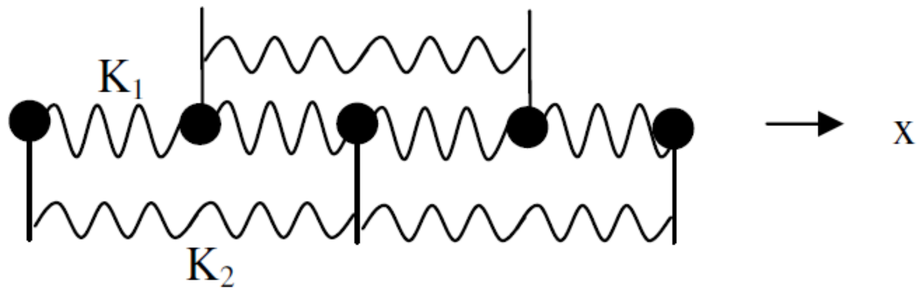
$$M_{x,y}^{-1} \triangleq \frac{1}{\hbar^2}\frac{\partial^2 E}{\partial k_x \partial k_y} = -\frac{t}{\hbar^2} a^2 \sin(ak_x)\sin(ak_y) = M_{y,x}^{-1}$$

$$M_{x,z}^{-1} \triangleq \frac{1}{\hbar^2}\frac{\partial^2 E}{\partial k_x \partial k_z} = -\frac{t}{\hbar^2} ac \sin(ak_x)\sin(ck_z) = M_{z,x}^{-1}$$

$$M_{y,z}^{-1} \triangleq \frac{1}{\hbar^2}\frac{\partial^2 E}{\partial k_y \partial k_z} = -\frac{t}{\hbar^2} ac \sin(ak_y)\sin(ck_z) = M_{z,y}^{-1}$$

## שאלה מספר 2 (35 נקודות):

נתונה שרשרת אינסופית של אטומים חד-ממדית (כל האטומים זהים). כל אטום היינו בעל מסה $m$ וקשור בקפיץ עם קבוע קפיץ $K_1$ לשני השכנים הקרובים ביותר, וכן לשני השכנים הבאים הקרובים ביותר עם קפיץ בעל קבוע $K_2$ כמתואר בציור. נתון בנוסף כי המרחק בין האטומים הוא $a$.




א. (10 נק') - כתבו את האנרגיה הפוטנציאלית עבור חלקיק (או חלקיקים) הנמצא בתא היחידה $u_n$ (אם מדובר ביותר חלקיקים אז השתמשו בסימון נוסף), המוגבל לתנועה רק בכיוון $x$. גזרו את משוואת התנועה המתאימה.

במקרה שלנו, תא היחידה מורכב מאטום אחד. למעשה, הבעיה היא בעיה של שכנים קרובים מסדר ראשון ושני. נכתוב את סך האנרגיה הפוטנציאלית:

$$U = \frac{K_1}{2}[(u_n - u_{n-1})^2 + (u_{n+1} - u_n)^2] + \frac{K_2}{2}[(u_n - u_{n-2})^2 + (u_{n+2} - u_n)^2]$$

כעת נוכל לגזור את האנרגיה ולקבל את משוואות התנועה לכל רכיב:

$$F = -\frac{dU}{du_n} = K_1[-(u_n - u_{n-1}) + (u_{n+1} - u_n)] + K_2[-(u_n - u_{n-2}) + (u_{n+2} - u_n)] =$$
$$= K_1[-2u_n + u_{n-1} + u_{n+1}] + K_2[-2u_n + u_{n-2} + u_{n+2}]$$

ב. (10 נק') - ננחש פתרון מהצורה $u_n = Ae^{i(kan-\omega t)}$. מצאו את יחס הנפיצה $\omega(k)$ של השרשרת.

נציב את הפתרונות במשוואה שקיבלנו כאשר נזכור שהכוח שווה לתאוצה:

$$m\ddot{u}_n = K_1[-2u_n + u_{n-1} + u_{n+1}] + K_2[-2u_n + u_{n-2} + u_{n+2}] \Rightarrow$$
$$\Rightarrow -m\omega^2 Ae^{i(kan-\omega t)} = K_1[-2Ae^{i(kan-\omega t)} + Ae^{i(kan-ka-\omega t)} + Ae^{i(kan+ka-\omega t)}] + K_2[-2Ae^{i(kan-\omega t)} + Ae^{i(kan-2ka-\omega t)} + Ae^{i(kan+2ka-\omega t)}] \Rightarrow$$
$$\Rightarrow -m\omega^2 = K_1[-2 + e^{-ika} + e^{ika}] + K_2[-2 + e^{-2ika} + e^{2ika}] \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \omega^2 = \frac{1}{m}[2K_1 + 2K_2 - 2K_1\cos(ka) - 2K_2\cos(2ka)] \Rightarrow$$
$$\omega = \sqrt{\frac{1}{m}[2K_1 + 2K_2 - 2K_1\cos(ka) - 2K_2\cos(2ka)]}$$

ג. (5 נק') – איזה אופן קיבלתם? אקוסטי או אופטי? נמקו! באם מדובר באופן אקוסטי, חשבו את מהירות הקול של האופן.

יש לבחון את הדיספרסיה בערכי $k$ קטנים:

$$\omega=\sqrt{\frac{1}{m}[2K_1+2K_2-2K_1\cos(ka)-2K_2\cos(2ka)]}\approx$$
$$\approx\sqrt{\frac{1}{m}[2K_1+2K_2-2K_1(1-\frac{a^2k^2}{2})-2K_2(1-\frac{a^2k^2}{2})]}=$$
$$=\sqrt{\frac{K_1+K_2}{m}a^2k^2}=\sqrt{\frac{K_1+K_2}{m}}ak$$

דיספרסיה ליניארית ו $\omega(k=0)=0$

לכן האופן אקוסטי.

חישוב מהירות הקול:

$$v_s\triangleq\frac{d\omega(k)}{dk}=\sqrt{\frac{K_1+K_2}{m}}a$$

ד. (5 נק') - מהי התדירות המקסימלית של המערכת? עבור איזה ערך של $k$ מתקבל מקסימום זה?
לרשותכם עומדות הזהויות הבאות:

$$\sin(2ka)=2\cos(ka)\sin(ka)$$
$$\cos(2ka)=2\cos^2(ka)-1$$

עלינו למעשה למצוא את נקודות הקיצון של יחס הנפיצה. לשם כך, נגזור את יחס הנפיצה לפי $k$ ונשווה ל-0:

$$\frac{d\omega(k)}{dk}=[\frac{1}{m}[2K_1+2K_2-2K_1\cos(ka)-2K_2\cos(2ka)]]^{-1/2}\cdot[\frac{2K_1a}{m}\sin(ka)+\frac{4K_2a}{m}\sin(2ka)]=0\Rightarrow$$
$$\Rightarrow K_1\sin(ka)+2K_2\sin(2ka)=0$$

כעת נשתמש בזהות הראשונה $\sin(2ka)=2\cos(ka)\sin(ka)$ :

$$K_1\sin(ka)+2K_2\sin(2ka)=0\Rightarrow$$
$$\Rightarrow K_1\sin(ka)+4K_2\cos(ka)\sin(ka)=0\Rightarrow$$
$$\Rightarrow\sin(ka)[K_1+4K_2\cos(ka)]=0$$

נשים לב שמידית קיבלנו התאפסות בקצה אזור ברילואן $k=\frac{\pi}{a}$.

עבור ערך זה נקבל מיחס הנפיצה:

$$\omega(k=\frac{\pi}{a})=\sqrt{\frac{1}{m}[2K_1+2K_2+2K_1-2K_2]}=\sqrt{\frac{4K_1}{m}}$$

אולם נשים לב שהביטוי $[K_1+4K_2\cos(ka)]$ עשוי גם הוא להגיע אפס. הדבר יקרה עבור התנאי $K_1<4K_2$. נניח ותנאי זה יתקיים. הסוגריים יתנו את התוצאה הבאה:

$$K_1+4K_2\cos(ka)=0\Rightarrow$$
$$\Rightarrow\cos(ka)=-\frac{K_1}{4K_2}$$

שימוש בזהות השנייה $\cos(2ka)=2\cos^2(ka)-1$ יתן:

$$\cos(2ka)=2\cos^2(ka)-1=\frac{K_1^2}{8K_2^2}-1$$

הצבת שני הערכים הנ"ל אל תוך יחס הנפיצה תיתן:

$$\omega(\cos(ka)=-\frac{K_1}{4K_2})=\sqrt{\frac{1}{m}[2K_1+2K_2+2K_1\frac{K_1}{4K_2}-2K_2(\frac{K_1^2}{8K_2^2}-1)]}=$$
$$=\sqrt{\frac{1}{m}[2K_1+4K_2+\frac{K_1^2}{4K_2}]}$$

נניח ש- $4K_2=2K_1>K_1$ (מקרה פרטי שבחרנו) ונקבל:

$$\omega(\cos(ka)=-\frac{K_1}{4K_2},4K_2=2K_1)=\sqrt{\frac{1}{m}[2K_1+2K_1+\frac{K_1^2}{2K_1}]}=\sqrt{\frac{4.5K_1}{m}}$$

תדר זה גדול מהתדר הקודם שמצאנו עבור קצה אזור ברילואין, כלומר שהתשובה תלויה בהאם $K_1<4K_2$ או לא.

ה. (5 נק') – עבור התדר המקסימלי שקיבלתם בסעיף הקודם, ציירו את כיוון תנועת האטומים היחסית באתרים סמוכים.

התשובה משתנה כתלות בהאם $K_1<4K_2$ או לא. במקרה שלא, המקסימום מתקבל בקצה אזור ברילואן ותנועת האטומים היא בצורה נגדית אחד לשני (כך גם מהירות החבורה מתאפסת כנדרש).

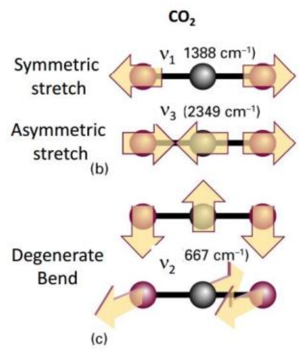
באם $K_1<4K_2$, נקבל שהאטומים נעים עם פאזה של $ka=\cos^{-1}(\frac{K_1}{4K_2})$ האחד ביחס לשני (קצת קשה יותר לציור אך כל תשובה התלויה בקשר זה מתקבלת).

## שאלה מספר 3 (10 נקודות):

נתון אוסף של גז המורכב ממולקולות תלת-אטומיות ישרות (ליניאריות) הנמצא בטמפרטורה כלשהיא.

1. (2 נק') - בקורס עסקנו בדרגות חופש של הזזה, סיבוב ורטט. מצאו כמה דרגות חופש קיימות עבור כל מולקולה לפי סוג הדרגה.

מבחינת הזזה, היות והמולקולות שלנו נעות בעולם תלת-מימדי, עבור כל המולקולה ישנן 3 דרגות חופש להזזה (לכל ציר בהתאם). מבחינת סיבוב, היות והמולקולה ישרה (ליניארית), ישנם רק שני צירים בהם ניתן לסובב אותה ולכן מספר דרגות החופש עבור הסיבוב הינו 2. מבחינת רטט, ישנם 4 מצבים אפשריים (ראו ציור):




בסה"כ קיבלנו 9 דרגות חופש בסה"כ.

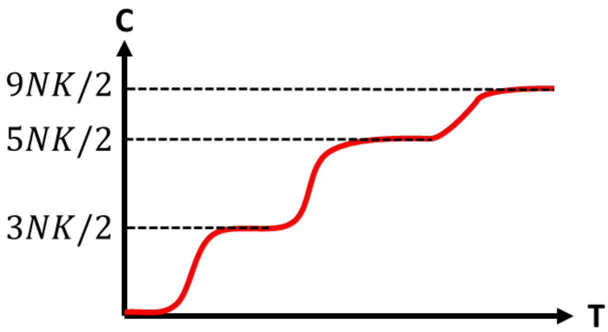
ידוע שעבור דרגות החופש השונות, האנרגיות הטיפוסיות עבור כל דרגה מקיימות:

$$\varepsilon_{Translation} \ll \varepsilon_{Rotation} \ll \varepsilon_{Vibration}$$

2. (6 נק') - כיצד יראה קיבול החום של גז המורכב מהמולקולות הנ"ל כתלות בטמפרטורה? ציירו גרף, סמנו נקודות עיקריות והסבירו את ההתנהגות עבור כל אזור בגרף!

ידוע לנו שקיבול החום נגזר מהאנרגיות האפשריות עבור המערכת בכל טמפרטורה. האנרגיות הנ"ל נקבעות לפי הגודל של האנרגיה התרמית $E_{Therm} = k_B T$ ביחס לשאר האנרגיות הקיימות במערכת. אי לכך, ככל שנעלה בטמפרטורה, כך יהיו יותר מצבים אנרגטיים אפשריים במערכת וקיבול החום יגדל בהתאם בכל פעם שהאנרגיה התרמית תתקרב לאנרגיה טיפוסית חדשה.

שימו לב! בשונה מהמצב של מערכת שלוש הרמות במועד א', כאן אין מגבלה על האכלוס של אף רמת אנרגיה! משמעות הדבר היא שכל קיבול חום שהרווחנו משחרור דרגת חופש נוספת נשאר איתנו ככל שהטמפרטורה עולה!




3. (2 נק') - הסבירו בקצרה מה טוען משפט החלוקה השווה. כיצד הדבר מסתדר עם הגרף שקיבלתם עבור טמפרטורות שונות?

משפט החלוקה השווה טוען שעבור טמפרטורה כלשהיא, האנרגיה התרמית הזמינה במערכת תתחלק בצורה שווה בין כל דרגות החופש הקיימות. המשפט מסתדר עם הגרף שהתקבל מהסיבה שבטמפרטורה נמוכה לדרגות חופש עם אנרגיית ערור גבוהה יש הסתברות ערור זניחה. כלומר אפקטיבית בטפרטורה נמוכה אנו נחשפים למספר קטן יותר של דרגות חופש ועל כן משפט החלוקה השווה תקף רק על הדרגות שאנו נחשפים אליהן.

## **שאלה מספר 4 (20 נקודות):**

ענו על הסעיפים הבאים בקצרה – עד 4-5 משפטים לכל סעיף **(הסעיפים אינם קשורים זה לזה)**. נמקו את תשובותיכם היטב. באם יש צורך, השתמשו בנוסחאות אותן ראינו בקורס:

1. (2 נק׳) - מהו ההבדל בין מודל איינשטיין לבין מודל דבאי?

מודל איינשטיין מתייחס רק למוד פונוני בודד ולא לכל המודים הקיימים (אשר ניתן למצאם לפי יחס הנפיצה הפונוני).

2. (2 נק׳) - עבור מחסום פוטנציאל ריבועי, הסבירו: מדוע ישנן אנרגיות אשר בהן מתקבל שיא בהסתברות למנהור?

כפי שראיתם בתרגול, עבור אנרגיות הגבוהות מערכו של המחסום, מתקבלים שיאים בהסתברות למנהור החלקיק. הסיבה לכך היא שאורך הגל של החלקיק תואם לרוחב המחסום ואנו מקבלים מצב רזונטיבי. תופעה זו מתקיימת באופן הרבה יותר חזק עבור 2 מחסומים בעלי מרווח כלשהוא בינהם. גם הטיעון של התאבכות בונה נכון (למעשה זהו אותו הטיעון של אורך הגל).

3. (2 נק׳) - הצדיקו את השימוש בקירוב יחס הנפיצה הפרבולי עבור צפיפות המצבים במוליכים למחצה.

עבור מוליכים למחצה, רמת פרמי נמצאת בתוך הפס האסור במיקום כלשהוא. הן פס ההולכה והן פס הערכיות רואים רק את הזנבות של ההתפלגות, כלומר שרק קצות הפסים הקרובים לפער האסור יכילו חלקיקים (זכרו שהרוחב הטיפוסי של כל פס הוא כאלקטרון-וולט אולם התפלגות פרמי-דיראק משתנה על סקאלה של מיליאלקטרון-וולטים (או כמה עשרות שלהם לכל היותר), ולכן מסתכלים רק על קצות הפסים בהם הקירוב הפרבולי תופס.

4. (2 נק׳) – עבור בעיית פיזור של חלקיק מפוטנציאל, כיצד ניתן להתגבר על בעיה שפונקציית הגל הכוללת איננה ניתנת לנרמול (ישנן שתי דרכים שונות עליהן דיברנו בכיתה – ציינו אחת)?

עבור בעיות פיזור, הנחת היסוד שלנו הייתה שמדובר בגלים מישוריים שמגיעים מהאינסוף ומתפזרים מהפוטנציאל שלנו. הנחה זו בעייתית מכיוון שפונקציית הגל הכוללת איננה ניתנת לנרמול. לסתירה זו (שבפועל אינה באמת סתירה) יש שתי דרכי פתרון אפשריות. הראשונה היא שעלינו לזכור שגל מישורי אינו מקיים את עקרון אי-הודאות ושבפועל חלקיקים מתוארים בצורה הטובה ביותר ע״י חבילת גלים אשר ניתנת לנרמול. השנייה היא הנחה שהבעיה שלנו איננה אינסופית ושבפועל ישנם גבולות סופיים לבעיה אשר מאפשרים נרמול של פונקציות הגל.

5. (2 נק׳) - בהרצאה ראיתם שניתן להגדיר את מהירות הקול עבור שריגים (שהם מבנים מסודרים) כשם שניתן להגדיר אותה עבור חומרים אמורפיים (שאינם מסודרים) כמו אויר, מים וכו׳. הצדיקו את ההגדרה הנ״ל (תחת איזה קירוב שעשינו היא מתקיימת?).

את מהירות הקול הגדרנו עבור וקטורי גל קטנים מאוד, כלומר שאורך הגל האופייני גדול הרבה יותר מקבוע השריג (במקרה של חומרים מסודרים) או מהמרחק הטיפוסי בין המולקולות (במקרה של חומרים שאינם מסודרים), כלומר שההנחה היא שאורך הגל גדול יותר מהמרחק הטיפוסי בין המולקולות המרכיבות את החומר.

6. (2 נק׳) - בהרצאה ראיתם שעבור בור-פוטנציאל כלשהוא, רמת האנרגיה הראשונה תמיד ממוקמת באנרגיה מסויימת שהיא מעל לתחתית הבור. מדוע?

היות ועל החלקיק הכלוא בבור לקיים את עקרון אי-הודאות, בהכרח שרמות האנרגיה ימצאו מעל לתחתית הבור (ובפרט רמת האנרגיה הראשונה). אם הרמה הראשונה הייתה ממוקמת בתחתית הבור, התנע של החלקיק היה זהותית אפס ועל כן מיקומו אמור היה להיות אינסופי, אך הדבר אינו אפשרי.

7. (2 נק') - במוליכים למחצה בעלי פער אנרגיה עקיף, מסממים מסוגים שונים נוטים להגדיל את קצב ההתאחדות של אלקטרונים וחורים. הצדיקו את המשפט הנ"ל בהנחה שריכוז המסממים קטן הרבה יותר מריכוז האטומים המקוריים של השריג (למשל אטומי סיליקון).

מסממים מייצרים מצבי אנרגיה נוספים הממוקמים במרחב הממשי והנפרשים במרחב התנע. על כן הם מסוגלים לקיים מעברים אשר אינם מתקיימים בין קצות הפסים במל"מ בעל פער אנרגיה עקיף מכיוון שיש אי-ודאות בתנע עבור המצבים הממוקמים שלהם.

8. (2 נק') - "פסי אנרגיה מלאים אינם תורמים להולכה החשמלית" – הצדיקו משפט זה.

היות ולכל פס, עבור מצב עם תנע כלשהוא יתקיים גם מצב עם התנע ההופכי לו (נובע מהסימטריה של השריג), והיות וכל הפס מאוכלס, סך התנע הכולל של כל החלקיקים המאכלסים את הפס הוא אפס. הרבה ציינו שהפס מלא ואין לאלקטרונים/חורים לאן ללכת. זהו רק חלק מהתשובה והדגש על סכום התנע חשוב.

9. (2 נק') - נתונים שני פתרונות (בלבד) לבור פוטנציאל כלשהוא – סימטרי ואנטי-סימטרי. מי מהם בעל האנרגיה הגדולה יותר?

כפי שראיתם בהרצאה, מצב אנטי-סימטרי מכיל חציה של האפס ולכן מכיל גם שיפועים "חדים" יותר. שיפוע חד יותר משמעו תנע גדול יותר ולכן גם אנרגיה גדולה יותר. מכאן שהמצב הסימטרי הוא הנמוך והמצב האנטי-סימטרי הוא הגבוה.

10. (2 נק') - נתונה מערכת תרמודינמית קנונית המחולקת ל-2, כאשר שני החלקים בעלי אותה טמפרטורה. האם האנטרופיה של המערכת מקסימלית?

במקרה הנ"ל האנטרופיה של המערכת אכן מקסימלית מכיוון שהמערכת קנונית, כלומר שמותר מעבר אנרגיה אך לא חלקיקים, כלומר שרק הטמפרטורה (ללא הפוטנציאל הכימי) משחקת תפקיד ואם הטמפרטורה בכל תת המערכות שווה, הרי שהמערכת בש"מ תרמי.