פרקים בפיזיקה אטומית ומולקולרית- קורס חלקי

פרק 2 - תורת הקוונטים

תוכן העניינים

פונקציית הגל של החומר:

סיכום כללי:

- $\left|\psi\left(x\right)\right|$ היא פונקציית הגל של החומר.
- $\left|\psi\left(x\right)\right|^2$ היא צפיפות ההסתברות למצא חלקיק בנקודה מסוימת.
- ההסתברות שחלקיק נמצא בין x_1 ל-x_2 היא: $\int_{x_1}^{x_2}\left|\psi\left(x\right)\right|^2 dx$.
- נרמול: $\int_{-\infty}^{\infty}\left|\psi\left(x\right)\right|^2 dx=1$.
- כאשר מתבצעת מדידה של החלקיק פונקציית הגל קורסת.
- מיקום ממוצע: $\langle x\rangle = \int_{-\infty}^{\infty} x|\psi(x)|^2\,\mathrm{d}x$
- 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 $\langle x^2\rangle = \int_{-\infty}^{\infty} x^2|\psi(x)|^2\,\mathrm{d}x$

שאלות:

1) **דוגמה – חישוב הסתברות 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**

נתונה פונקציית הגל הבאה של חלקיק: $\psi\left(x\right)=\begin{cases}0 & x<0\\ A\sin\left(20\pi x\right) & 0\le x\le 0.05\\ 0 & x>0.05\end{cases}$.

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. Δx.

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. $A = \left(\frac{2\alpha}{\pi}\right)^{\frac{1}{4}}$. ב. x_0 . ג. x_0 .

ד. $\left(\frac{\pi}{8192\alpha^3}\right)^{\frac{1}{4}} + x_0^2$. ה. $\left(\frac{\pi}{8192\alpha^3}\right)^{\frac{1}{8}}$

עקרון אי הוודאות של הייזנברג:

סיכום כללי:

		הערות
אי ודאות מיקום תנע	$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$ $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.055 \cdot 10^{-34} J \cdot S$	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.
אי ודאות זמן אנרגיה	$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$	1. ככל שמודדים את הזמן בדיוק גבוה יותר כך הדיוק במדידת האנרגיה קטן. 2. האנרגיה נשמרת עד כדי אי הוודאות, הגופים יכולים להיות באנרגיות האסורות קלאסית.
אי ודאות במדידת הזווית והתנע הזוויתי	$\Delta L_z \Delta \theta \geq \frac{\hbar}{2}$	

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 באנרגית 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: $m = 1.67\cdot10^{-27}\text{kg}$ 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:

1) $\Delta X\min = 2.3\cdot10^{-6}\text{m}$.
2) $1.8\cdot10^{-34}\text{m}$.
3) $1.37\cdot10^{-11}\text{m}$.
4) $3\cdot10^{-8}\text{eV}$.
5) $\left|\frac{\Delta x}{\lambda}\right| = 4\cdot10^{-5}\%$, $\frac{\Delta E}{E} = 4\cdot10^{-5}\%$.
6) א. $7.4\cdot10^{-34}\text{m}$. ב. 10^{-32}m. ג. $10^{-32}\text{kg}\cdot\frac{\text{m}}{\text{sec}}$.
7) 10^{-51}kg.
8) א. $3\cdot10^{-8}\text{eV}$. ב. $3\cdot10^{-9}$. ג. $\lambda = 122\text{nm}$, $|\Delta\lambda| \approx 4\cdot10^{-7}\text{nm}$.

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. הנגזרת של פסי רציפה למעט נקודות בהן הפוטנציאל מתבדר.

בתלת מימד:

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

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: $\psi(x) = \mathrm{A}\sin(kx)$.

חבילת גלים: $\psi(x) = \sum_n \mathrm{A}_n \sin(k_n x) + \mathrm{B}_n \cos(k_n x)$.

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: $n = 1, 2, 3....$, $E_n = \frac{h^2}{8ml^2}n^2$

- 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:

1. ציירו את פונקציית הפוטנציאל ואת אנרגיית החלקיק.
2. עבור המצב ה-n ציירו גל עם $n-1$ נקודות צומת (לא כולל הקצוות).
3. ככל שהאנרגיה הקינטית גדולה יותר כך האמפליטודה ואורך הגל קטנים יותר (ולהיפך).
4. פונקציית הגל הולכת לאפס במיקום בו הפוטנציאל הולך לאינסוף.
5. 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 למצא 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}kg מוגבל לזוז בין שני קירות קשיחים במרחק 0.1mm אחד מן השני.

א. העריכו 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:

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

אנרגיית החלקיק E נתונה וקטנה מ-U_0.

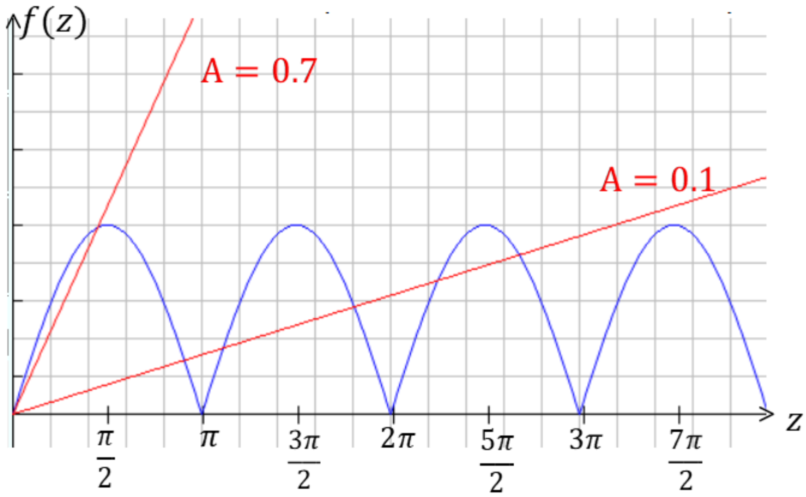
א. מצאו את פונקציית הגל בכל המרחב ללא מציאת המקדמים הקבועים של הפונקציה בכל תחום.

ב. השתמשו בתנאי השפה (פונקציית הגל רציפה והנגזרת רציפה) בשביל למצא משוואה ממנה ניתן לחשב את הערכים האפשריים של האנרגיה.
הראו כי מתקיים הקשר:

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

ג. מצאו מהו תחום הערכים האפשריים של kL והראו כי:
$|\sin(kL)| = \frac{\hbar k}{\sqrt{2mU_0}}$.

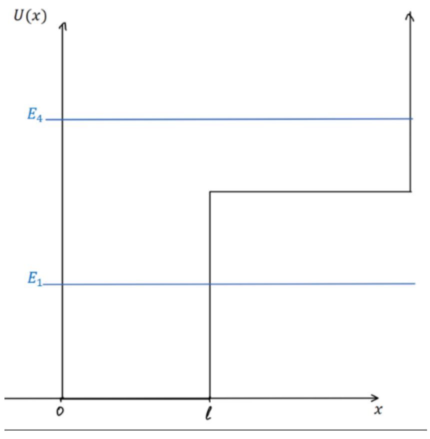
ד. כתבו את המשוואה של סעיף ג' באמצעות המשתנים: $z = kL$
ו- $A = \frac{\hbar}{L\sqrt{2mU_0}}$ כעת ניתן לפתור את הבעיה באמצעות פתרון גרפי.
הפתרונות הן נקודות החיתוך של הפונקציות משני צידי המשוואה.
סמנו את נקודות הפתרון בגרף הבא עבור: $A = 0.1$ ו- $A = 0.7$.
הקפידו על תחום ההגדרה של סעיף ג'.



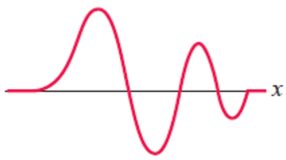
ה. מהו התנאי על A עבורו אין פתרון למשוואה?
מה המשמעות הפיזיקאלית של מצב זה?

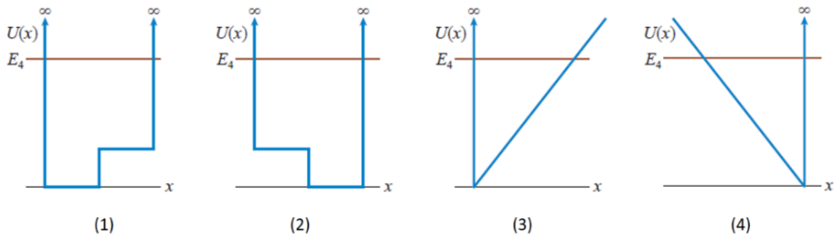
6) דוגמה – בור אינסופי עם מדרגה

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:

1) א. $6.38\cdot10^{-10}\,\mathrm{m}$. ב. $\psi(x)=A\sin\left(9.84\cdot10^{-9}\,\mathrm{m}^{-1}\cdot x\right)$.

2) 47.5%.

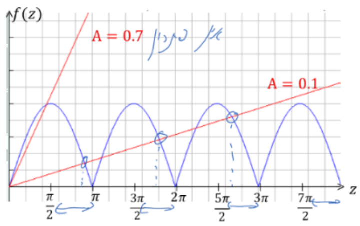
3) ממוצע: $\langle x\rangle=\frac{l}{2}$, מסתבר: $\frac{3l}{4}$, $\frac{l}{4}$.

4) א. $3\cdot10^{-17}\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{sec}}$. ב. $3\cdot10^{-10}$.

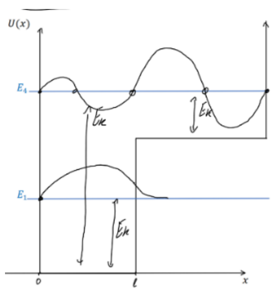
5) א. $\psi(x)=\begin{cases}Ae^{ikx}+Be^{-ikx} & x<0\\ Ce^{-\alpha x} & 0<x<L\end{cases}$ כאשר: $k=\frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}$ ו- $\alpha=\frac{\sqrt{2m(U_0-E)}}{\hbar}$.

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

ד. $|\sin(z)|=Az$. ה.



6)



7) 4.

מנהור (tunneling):

סיכום כללי:

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

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: $\psi(x) = A\sin\left(\pi \cdot 10^{10}x\right)$ כאשר x במטרים. מצאו את:

א. אורך הגל והתנע של האלקטרון.

ב. מהירות האלקטרון.

ג. אנרגיית האלקטרון.

3) **מהירות מינימלית בבור אינסופי**

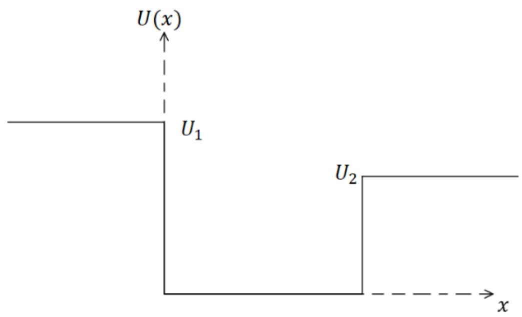
מהי המהירות המינימלית של אלקטרון הנמצא בבור פוטנציאל אינסופי ברוחב 0.30nm?

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

5) **הסתברות למצא אלקטרון בבור**
אלקטרון נמצא בקופסה סגורה וקשיחה ברוחב 1.00nm.
מה ההסתברות למצא את האלקטרון במרחק 0.10nm 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 1.2mA המכיל פרוטונים באנרגיה 1.8MeV נתקל במחסום פוטנציאל בגובה 2.0MeV 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. 38eV.

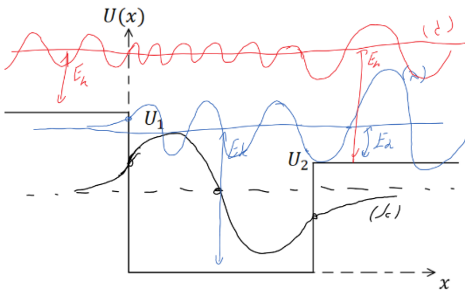
3) $1.2 \cdot 10^{6}\frac{\text{m}}{\text{sec}}$.

4) הוכחה.

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

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

7)



8) $96nA$.

אוסילטור הרמוני:

סיכום כללי:

פונקציות הגל:

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

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

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

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

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

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

פתרון כללי ל

שאלות:

1) דוגמה – אלקטרון בתנודה הרמונית פולט פוטון

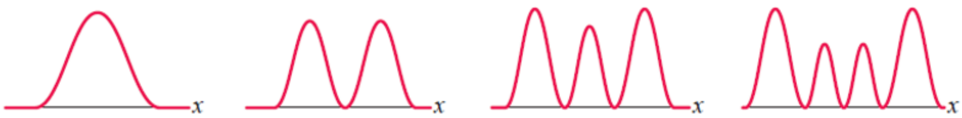
אלקטרון הנמצא באוסילטור הרמוני קוונטי פולט פוטון באורך גל של 400nm כאשר הוא יורד רמת אנרגיה אחת.

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: $E=\frac{7}{2}\hbar\omega$?



(1) (2) (3) (4)

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 ψ 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 הודאות 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 91.9GeV והרוחב במדידת האנרגיה הוא 2.5GeV.
מהו זמן החיים המוערך של הבוזון Z^0?

8) כדור מקפץ

כדור קטן במסה 10^{-6}kg משוחרר ממנוחה בגובה 2m 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: $\psi(x) = b^{-\frac{1}{2}}\left|\frac{x}{b}\right|^{\frac{1}{2}} e^{-\left(x/b\right)^2/2}$, כאשר $b = 0.5\text{nm}$.

א. בדקו כי פונקציית הגל מנורמלת.

ב. מהו המיקום המסתבר ביותר בו נמצא החלקיק בתחום $x > 0$?

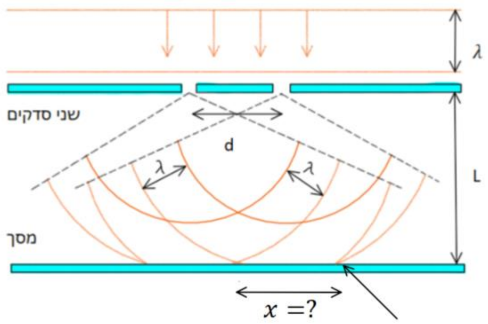
ג. מה ההסתברות למצא את החלקיק בין $x = 0$ ל-$x = 0.50\text{nm}$?

10) נויטרונים בניסוי שני סדקים

עורכים את ניסוי שני הסדקים עם נויטרונים בעלי אנרגיה של: 0.0040eV.

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. 0.35nm. ג. 63%.
10) $6.5 \cdot 10^{-7}\,\text{m}$.