

הוראות לדף הנוסחאות



הוראות הדפסה!

את הדף יש להדפיס עם שוליים מותאמים אישית ברוחב 0.5 בכל צד.

ב WORD, יש לבחור בלשונית הדפסה את חלון השוליים, לבחור שוליים מותאמים אישית ולשנות ל 0.5 בכל הכיוונים

עריכה:

בדף הכנסנו כמה שיותר הסברים, נוסחאות ותמונות. אם מספר העמודים חורג ממספר העמודים המותר בבחינה ניתן לערוך את קובץ ה WORD ולהוריד הסברים מורחבים, תמונות או נוסחאות טריוויאליות. ניתן גם כמובן להוסיף הסברים שלכם או נוסחאות.

בכל מקרה מומלץ מאוד לעבור על הדף לפני המבחן!! הוא גם סיכום של החומר.

אין להוריד את הסמל של GOOL או כל סימן מסחרי אחר!!

מבנה הדף:



הדף בנוי משלושה טורים.

ההתחלה היא בפינה הימנית העליונה.

בסוף הטור הראשון עוברים לטור השני באותו עמוד (ולא לעמוד הבא). בסוף הטור האחרון עוברים לטור הראשון (הימני) בעמוד הבא.

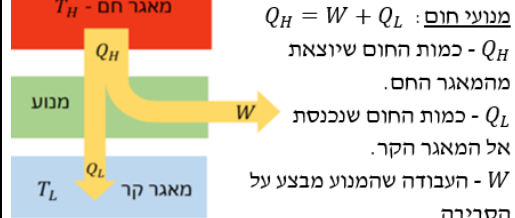
ניתן לשנות את כיוון הפריסה לרוחב, זה יוצר מראה יותר מרווח על חשבון מספר עמודים.

כל הזכויות שמורות למני גבאי ולאתר GOOL

הדף מיועד לכל שימוש שאינו מסחרי ובפרט לשימוש מרצים, מורים, סטודנטים ותלמידים בקורסים שונים, ניתן לערוך את הדף אך יש להשאיר סימונים של אתר גול.

החוק השני של התרמודינמיקה

החוק השני לפי קלאוזיוס: חום זורם בצורה ספונטנית מהגוף החם לגוף הקר, חום לא זורם ספונטנית מהגוף הקר לגוף החם.



מנועי חום: $Q_H = W + Q_L$
- כמות החום שיוצאת מהמאגר החם.
- Q_L כמות החום שנכנסת אל המאגר הקר.
- העבודה שהמנוע מבצע על הסביבה.

- שימו לב: כל הסימנים חיוביים!
- T_H ו- T_L נקראות טמפרטורות העבודה.
נצילות: $\eta = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$

- לא קיים מכשיר שיש לו נצילות 100% (גם ניסוח לחוק) - תהליך הפוך: תהליך שמתבצע באיטיות אינפיניטסימלית (או בצורה קוויזיטטית) כך שניתן לתארו כסדרה של מצבי שיווי משקל, וניתן לבצעו בכיוון ההפוך כאשר העבודה והחום שנעשים בכיוון ההפוך שווים לעבודה והחום שנעשו בכיוון המקורי.

מנוע קרנו: השטח שסגור בתוך הלולאה שווה לעבודה נטו שנעשית על ידי המנוע.

נצילות: $\eta_{קרנו} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$
הטמ' בקלווין!
- השטח שסגור בתוך הלולאה שווה לעבודה נטו שנעשית על ידי המנוע.

- מורכב מתהליכים הפיכים ולכן לא קיים במציאות, ניתן רק לשאוף אליו.
משפט קרנו: לכל המנועים הפיכים שפועלים באותן טמפרטורות עבודה T_H ו- T_L קבועות יש אותה הנצילות. לכל מנוע בלתי הפיך שפועל תחת אותן טמפרטורות עבודה קבועות, תהיה נצילות נמוכה מזו.

מנוע בעירה: A כיוון אדיאבטי עד ל- B . הצתה ושריפה של הדלק לפני שהבוכנה עולה. תהליך מהיר שנוצר חום אבל הנפח לא משתנה עדיין. CD הגז החם מתפשט אדיאבטית ומרחיב את הנפח ועושה עבודה. DA נפתח שסתום וחום נפלט לסביבה.

מקדם יעילות מקרר/מזגן: $COP = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L}$
 $COP_{ideal} = \frac{T_H}{T_H - T_L}$
מקדם יעילות משאבת חום: $COP = \frac{Q_H}{W}$

תמיד גדול מאחד
אנטרופיה

החוק השני במונחים של אנטרופיה:

האנטרופיה של מערכת מבודדת תמיד עולה (תהליך בלתי הפיך) או נשארת קבועה (תהליך הפיך).

או, האנטרופיה הכוללת של מערכת והסביבה שלה כתוצאה מתהליך טבעי: $\Delta S_T = \Delta S_{sys} + \Delta S_{env} > 0$

פרשנות סטטיסטית לאנטרופיה והחוק השני מצב מיקרוסקופי: מה המיקום והמהירות של כל מולקולה בחומר.

מצב מקרוסקופי: מתואר על ידי משתנה מצב כלליים לכל המערכת כמו - לחץ, נפח, טמפרטורה ומספר המולים.

האנטרופיה כתלות מספר המצבים: $S = k \ln \Omega$

k - קבוע בולצמן
 Ω - פונקציה המתארת את מספר המצבים המיקרוסקופיים המתאימים לאותו מצב מקרוסקופי.

התיאוריה הקינטית של הגזים

האנרגיה הקינטית הממוצעת של מולקולה בגז נמצאת ביחס ישר לטמפרטורה:

$$\bar{E}_k = \frac{3}{2} kT = \frac{1}{2} m \bar{v}^2$$

$\bar{v}^2$ - ממוצע של המהירות בריבוע. m - מסת המולקולה.

T - טמפרטורה. קבוע בולצמן $k = \frac{R}{N_A} = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$

מהירות rms: $v_{rms} = \sqrt{\bar{v}^2}$

התפלגות מקסוול-בולצמן למהירויות:

$$f(v) = 4\pi N \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$$

N - מספר המולקולות הכולל.

תמיד נדבר על מספר המולקולות בטווח של מהירויות. השטח מתחת לגרף הפונקציה בין המהירויות v_1 ל- v_2 נותן את מספר המולקולות עם מהירויות בין v_1 ל- v_2 .

סך כל המולקולות: $N = \int_0^\infty f(v) dv$

v_p - השכיח, המהירות הכי נפוצה.

- עבור טמפרטורה גדולה יותר הגרף זז ימינה ומתרחב.

חום וחוק הראשון של התרמודינמיקה

$1 \text{ cal} / 1 \text{ kcal}$ היא כמות החום הדרושה בשביל להעלות גרם/קילוגרם של מים במעלה אחת (צלזיוס):

$$1 \text{ cal} = 4.186 \text{ J}$$

$4.186 \text{ kJ} = 1 \text{ kcal}$ (או עם C גדולה) אנרגיה פנימית - סך האנרגיות של כל המולקולות בחומר.

אנרגיה פנימית של גז אידיאלי מונואטומי: $E_{int} = \frac{3}{2} nRT$

אנרגיה פנימית של גז אידיאלי דו-אטומי: $E_{int} = \frac{5}{2} nRT$

n - מספר המולים של החומר. T - טמפרטורה.

חישוב חום: $Q = mc\Delta T$

m - מסת הגוף. c (קטנה) קיבול החום הסגולי (קיבול חום של יחידת מסה) תלוי רק בסוג החומר. ΔT שינוי בטמ'.

C (גדולה) קיבול החום הכולל של הגוף: $C = mc$

קיבול חום סגולי c בטמפרטורה $20^\circ C$ ובלחץ 1 atm

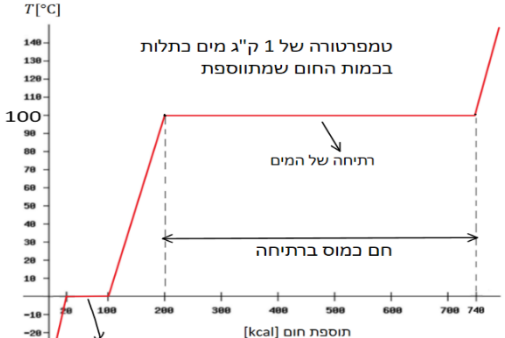
חומר	$c \text{ [J/(kg} \cdot ^\circ C)]$	$c \text{ [cal/(g} \cdot ^\circ C)]$
אלומיניום	900	0.22
אלכוהול (אתילי)	2400	0.58
נחושת	390	0.093
זכוכית	840	0.20
ברזל / פלדה	450	0.11
עופרת	130	0.031
שיש	860	0.21
כספית	140	0.033
כסף	230	0.056
עץ	1700	0.40
קרח ($-5^\circ C$)	2100	0.50
מים נוזליים ($15^\circ C$)	4186	1.00
קיסור ($110^\circ C$)	2010	0.48
גוף האדם (ממוצע)	3470	0.83

חום כמס: חום שהולך לשינוי מצב הצבירה של החומר ואינו משנה את הטמפרטורה:

$$Q = m \cdot L$$

Q - החום הכמוס בחומר. m - מסת הגוף.

L - חום כמוס ליחידת מסה (תלוי בחומר ונמצא בטבלה).



חומר	נק' היתוך ($^\circ C$)	L_f היתוך (kJ/kg)	נק' רתיחה ($^\circ C$)	L_v אדיוי (kJ/kg)
חמצן	-219	14	-183	210
חנקן	-210	26	-195.8	200
אתנול	-114	104	78	850
אמוניה	-117	33	-33.4	137
מים	0	333	100	2260
עופרת	327	25	1750	870
כסף	961	88	2193	2300
ברזל	1808	289	3023	6340
טונגסטן	3410	184	5900	4800

החוק הראשון של התרמודינמיקה: $\Delta E_{int} = Q - W$

או בצורה רחבה יותר: $\Delta U + \Delta E_k + \Delta E_{int} = Q - W$

ΔE_{int} - שינוי באנרגיה פנימית.

Q - חום. אם חום נכנס למערכת אז Q חיובי ואם חום יוצא מהמערכת אז Q שלילי.

W - עבודה שנעשית מכל סיבה אחרת. אם המערכת מבצעת עבודה אז W יהיה חיובי ואם מתבצעת עבודה על המערכת אז W יהיה שלילי.

תהליך איזותרמי (טמפרטורה קבועה):

מתרחש כאשר המערכת צמודה למאגר חום גדול והתהליך הוא קוויזיטטי (מאוד איטי)

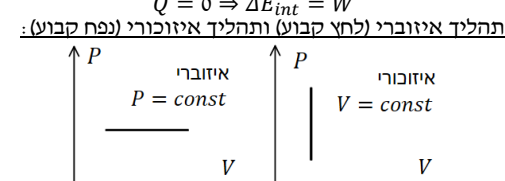
$$T = \text{const} \Rightarrow \Delta E_{int} = 0 \Rightarrow Q = W$$

תהליך אדיאבטי (אין מעבר חום $Q = 0$)

מתרחש אם המערכת מבודדת מאוד או אם התהליך מהיר ואז חום (שזורם לאט בדרי"כ) לא מספיק לעבור.

$$Q = 0 \Rightarrow \Delta E_{int} = W$$

תהליך איזוברי (לחץ קבוע) ותהליך איזוכורי (נפח קבוע):



חישובי העבודה שנעשית בשינוי נפח: $W = \int P dV$

- הנוסחה נכונה לגזים, נוזלים ומוצקים.

- העבודה היא גם השטח מתחת לגרף $P(V)$.

- בתהליך איזוכורי העבודה מתאפסת (כי אין שינוי נפח).

- בתהליך איזוברי העבודה שווה $P\Delta V$ כי הלחץ קבוע (לא צריך אינטגרל).

- גז בתהליך איזותרמי נעשה אינטגרל ונציב $P = \frac{nRT}{V}$

קיבול חום לגזים:

גזים קיבול החום משתנה בהתאם לתהליך

$$Q_V = nC_V \Delta T$$

$$Q_P = nC_P \Delta T$$

n - מספר המולים של החומר.

C_P/C_V (גדולה) - קיבול חום בנפח/לחץ קבוע למול

(בניגוד ל- C גדולה במוצקים ונוזלים, שם קיבול כל המסה)

$$C_V = m_{mol} c_V ; C_P = m_{mol} c_P$$

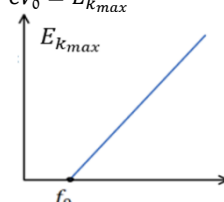
c_P/c_V - קיבול חום בנפח/לחץ קבוע (ליחידת מסה)

$$M_T = nm_{mol}$$

$$C_P - C_V = R$$

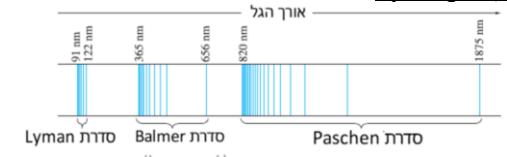
הפרש קיבולי החום תמיד קבוע:

- גז בתהליך אדיאבטי קוויזיטטי (מאוד איטי) נעשה אינטגרל ונציב $P = \frac{Const}{V^\gamma}$

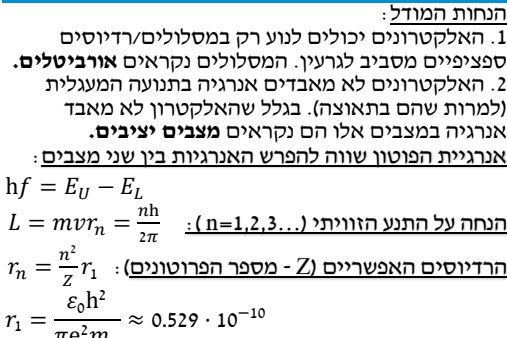
אנרגיה קינטית מקסי' של האלקטרונים: $E_k = hf - W_0$
מתח עצירה: $eV_0 = E_{kmax}$

השוואה לתורה הגלית:
לפי התורה הפוטונית
 1. עוצמת האור קשורה למספר הפוטונים ולא אנרגיה של כל אחד מהם. הגדלת העוצמה תגדיל את מספר האלק' הנפלט אבל לא את האנרגיה הקינטית שלהם.
 2. האנרגיה של הפוטון תלויה בתדירות.
 3. רק פוטון אחד נותן את כל האנרגיה שלו ולכן קיימת תדירות סף.
לפי התורה הגלית-אלקטרומגנטית
 1. עוצמת האור קשורה לגודל השדה, הגדלת העוצמה תגדיל את האנרגיה הקינטית של האלקטרונים.
 2. התדירות לא משפיעה על האנרגיה של האלקטרונים.

אנרגיה מסה ותנע של פוטון:
אנרגיה של פוטון יחיד: $E = hf$
תנע של פוטון: $p = \frac{E}{c} = h \frac{f}{c} = \frac{h}{\lambda}$
מסת מנוחה של פוטון: $m = 0$
אפקט קומפטון:
הסחת קומפטון: $\lambda' = \lambda + \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$
 λ - אורך הגל של הקרן הפוגעת. λ' - אורך הגל של הקרן המפוזרת. θ - זווית ביחס לכיוון הקרן הפוגעת.
 $\frac{h}{m_e c}$ - אורך גל של האלקטרון החופשי.

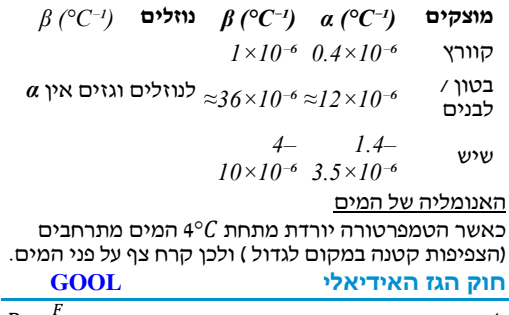
אינטראקציות של פוטונים ויצירת זוגות:
תנאים ביצירת זוגות:
 1. חייב להיווצר זוג בשביל שיתקיים שימור מטען.
 2. אנרגיית הפוטון שווה לאנרגיית הזוג, יש להוסיף אנרגיית מנוחה יחסותית לכל חלקיק mc^2 .
 3. בשביל ליצור זוג חייבת להיות אינטראקציה עם גוף נוסף ב"כ" (גרעין) כדי שיהיה שימור תנע.
 4. התהליך יכול גם לפרות הפוך ונקרא אינהלציה. לדוגמה פוזיטרון פוגש אלקטרון, הם נכחדים ויוצרים פוטון.
דואליות גל חלקיק והאופי הגלי של החומר:
 אורך גל דה ברולי של חלקיק:
 $\lambda = \frac{h}{p}$
 $p = mv$ לא יחסותי, $p = mv\gamma$ יחסותי

מודלים מוקדמים של האטום:
אורכי הגל הנפגעים מאטום המימן: $\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$
קבוע Rydberg: $R = 1.097 \cdot 10^7 m^{-1}$

בעיות במודל הפלנטארי של ראתפורד:
 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.

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

חוק וויין: $\lambda_p T = 2.90 \cdot 10^{-3} m \cdot K$
 λ_p - אורך הגל בשיא. T - הטמפרטורה בקלווין
נוסחת פלאנק לקרינת גוף שחור: $I(\lambda, T) = \frac{2\pi^5 k^4 \lambda^{-5}}{15 \hbar^3 c^2} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$

קבוע בולצמן: $k = 1.38 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}$
קבוע פלאנק: $h = 6.626 \cdot 10^{-34} J \cdot s$
הנחה הקוונטית של פלאנק: האנרגיה המינימלית של מטען בתנועה הרמונית באטום היא $E_{min} = hf$
אנרגיית המטען חייבת להיות כפולה שלמה של הערך המינימלי: $E = nhf$
 כאשר n הוא המספר הקוונטי
התיאוריה הפוטונית והאפקט הפוטואלקטרי:
אנרגיה של פוטון יחיד (f - תדירות האור): $E = hf$
הניסוי הפוטואלקטרי:
 תדירות סף $hf_0 = W_0$ (פונקציית העבודה של המתכת)

מוצקים
 קוורץ $\alpha (^\circ C^{-1}) = 0.4 \cdot 10^{-6}$ $\beta (^\circ C^{-1}) = 1 \cdot 10^{-6}$ $\gamma (^\circ C^{-1}) = 36 \cdot 10^{-6}$
 בטון / לבנים $\alpha (^\circ C^{-1}) = 12 \cdot 10^{-6}$ $\beta (^\circ C^{-1}) = 36 \cdot 10^{-6}$
 שיש $\alpha (^\circ C^{-1}) = 1.4 \cdot 10^{-6}$ $\beta (^\circ C^{-1}) = 4 \cdot 10^{-6}$
האנומליה של המים
 כאשר הטמפרטורה יורדת מתחת $4^\circ C$ המים מתרחבים (הצפיפות קטנה במקום לגדול) ולכן קרח צף על פני המים.
חוק הגז האידיאלי
לחץ: $P = \frac{F}{A}$
 F - כוח. A - שטח עליו פועל הכוח.
הלחץ שמפעיל נוזל בנקודה מסוימת: $P = \rho_l gh$
 h - גובה הנוזל מעל אותה הנקודה. ρ_l - צפיפות הנוזל.
 - הלחץ של נוזל תלוי רק בגובה הנוזל (ובסוג הנוזל) ולא בכמות הנוזל.
לחץ אטמוספרי: $1 atm = 1.013 \cdot 10^5 Pa$
לחץ שלילי (תת לחץ): הוא לחץ יחסי (נמדד ביחס ללחץ אטמוספרי) ונמוך מהלחץ האטמוספרי.
לחץ אבסולוטי: הוא הלחץ שנמדד ביחס ללחץ אפס מוחלט (כאשר הכוח הוא אפס).
מעבר מצלזיוס לקלווין: $T(K) = T(^\circ C) + 273.15$
מספר אבוגדרו: $N_A = 6.02 \cdot 10^{23}$
 כמות של N_A חלקיקים (אטומים או מולקולות) נקראת **מול** (mol) של החומר
 מסה מולרית (המסה של מול אחד, או מספר אבוגדרו של חלקיקים): $M_{mol} = N_A \cdot m_a$
 m - מסה אטומית. N_A - מספר אבוגדרו.
 - המסה המולרית שווה למסה האטומית רק בגרם במקום ביחידת מסה אטומית
הקשר למסת כל החומר: $m = N \cdot m_a = n \cdot M_{mol}$
 n - מספר המולים בחומר. N - מספר החלקיקים הכולל
 m - מסת כל החומר. M_{mol} - המסה המולרית.
מסה מולקולרית: לפעמים הכוונה למסה של מולקולה אחת בחומר. ולפעמים למסה של מול אחד של מולקולות בחומר (כמו המסה המולרית רק של מולקולות).
משוואת המצב של גז האידיאלי: $PV = nRT$ (או $PV = NkT$)
 P - לחץ **אבסולוטי**. V - נפח. T - טמ' בקלווין.
 n - מספר המולים בחומר.
 N - מספר החלקיקים הכולל בגז (אטומים או מולקולות)
קבוע בולצמן: $k = \frac{R}{N_A} = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$
 $R = 8.314 \frac{J}{mol \cdot K} = 0.0821 \frac{L \cdot atm}{mol \cdot K} = 1.99 \frac{cal}{mol \cdot K}$
 - הנוסחה תקפה כל עוד הלחץ בסדר גודל של לחץ אטמוספרי או פחות והטמפרטורה רחוקה מהטמפרטורה בה הגז הופך לנוזל (טמפרטורת הרתיחה)
Standard Temperature and Pressure - STP: $T = 0^\circ C = 273 K$, $P = 1 atm = 101,325 Pa$
תיאוריות מוקדמות של תורת הקוונטים והאטום:

תהליכים איזותרמים (טמ' קבוע)
 לאורך כל הגוף $P = \frac{nRT}{V}$
תהליך אדיאבטי קוויזסטטי (מעבר בין הטמ' 'P = Const/Vr')

התפשטות חופשית: תהליך שבו גז מתפשט במרחב בצורה **אדיאבטית ומבלי לעשות עבודה**.
 אי אפשר לצייר התפשטות חופשית בדיאגרמת P-V מכיוון שמשטחי המצב לא מוגדרים במהלך ההתפשטות (הגז עדיין לא תופס את כל הנפח של הכלי והלחץ לא אחיד)
הולכה הסעה וקרינה
הולכה - מעבר אנרגיה על ידי התנגשויות בין המולקולות
קצב הולכת חום: $\frac{dQ}{dt} = kA \frac{(T_1 - T_2)}{l}$
 k - מוליכות תרמית - תלוי בסוג החומר
 A - שטח חתך. l - אורך
R-value: $R = \frac{l}{k}$
 - תלוי גם בגודל החומר ולא רק בסוג.
 - ערכים גבוהים מסמלים מבודד טוב.
הסעה - מעבר חום באמצעות תנועה של המולקולות בחומר.
קרינה - מועברת דרך גלים אלקטרומגנטיים, אינו דורש תווך.
משוואת סטפן בולצמן (קצב החום הנפלט מגוף ע"י קרינה): $\frac{dQ}{dt} = \epsilon \sigma AT^4$
 $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$
 A - שטח הפנים של הגוף הפולט. T - הטמפרטורה של הגוף הפולט. ϵ - קירון (אמיסיביות) $0 < \epsilon < 1$, תכונה של פני הגוף שקורן. גופים שחורים, לדוגמה פחם, $\epsilon \approx 1$ מתכות מבריקות $\epsilon \approx 0$. האמיסיביות זהה לקליטה ופליטה.
הנטו של קצב פליטת הקרינה (פליטה פחות קליטה) הוא: $\frac{dQ}{dt} = \epsilon \sigma A (T_1^4 - T_2^4)$
 T1 - הטמפרטורה של הגוף הפולט.
 T2 - הטמפרטורה של הסביבה.
קרינת שמש:
 הקבועה סולרי הוא $1350 \frac{W}{m^2 \cdot s}$. האטמוספירה יכולה לספוג עד 70% מהקרינה. ביום בהיר נעריך את הקבוע כ 1000 וכמות החום שגוף סופג מקרינת השמש:
 $\frac{dQ}{dt} = \left(1000 \frac{W}{m^2 \cdot s} \right) \epsilon A \cos \theta$
 θ - הזווית בין האנך למשטח של הגוף ובין קרני השמש.
טמ' והתפשטות תרמית
יחידת מסה אטומית: $1u = 1.6605 \cdot 10^{-27} kg \approx m_p$
מסת האטום ביחידת מסה אטומית: $m_a \approx A \cdot 1u$
 A - מספר המסה (מסר הפרוטונים והנויטרונים בגרעין)
מעבר מפרנהייט לצלזיוס: $T(^\circ C) = \frac{5}{9} [T(^\circ F) - 32]$
התפשטות תרמית לינארית: $\Delta l = \alpha l_0 \Delta T$
 $\Delta T = T - T_0$ ו- $\Delta l = l - l_0$
 α קבוע התלוי בחומר (בטבלה)
התפשטות תרמית משטחית: $\Delta A = \gamma A_0 \Delta T$
 γ - תלוי בחומר. $\Delta A = A - A_0$
 חורים גדלים עם עליה בטמפרטורה
התפשטות נפחית: $\Delta V = \beta V_0 \Delta T$
 $\Delta V = V - V_0$; $\beta \approx 3\alpha$
מוצקים
 אלומיניום $\alpha (^\circ C^{-1}) = 25 \cdot 10^{-6}$ $\beta (^\circ C^{-1}) = 75 \cdot 10^{-6}$ $\gamma (^\circ C^{-1}) = 950 \cdot 10^{-6}$
 פלז $\alpha (^\circ C^{-1}) = 19 \cdot 10^{-6}$ $\beta (^\circ C^{-1}) = 56 \cdot 10^{-6}$ $\gamma (^\circ C^{-1}) = 180 \cdot 10^{-6}$
 נחושת $\alpha (^\circ C^{-1}) = 17 \cdot 10^{-6}$ $\beta (^\circ C^{-1}) = 50 \cdot 10^{-6}$ $\gamma (^\circ C^{-1}) = 1100 \cdot 10^{-6}$
 זהב $\alpha (^\circ C^{-1}) = 14 \cdot 10^{-6}$ $\beta (^\circ C^{-1}) = 43 \cdot 10^{-6}$ $\gamma (^\circ C^{-1}) = 500 \cdot 10^{-6}$
 ברזל / פלדה $\alpha (^\circ C^{-1}) = 12 \cdot 10^{-6}$ $\beta (^\circ C^{-1}) = 35 \cdot 10^{-6}$ $\gamma (^\circ C^{-1}) = 210 \cdot 10^{-6}$
 עופרת $\alpha (^\circ C^{-1}) = 29 \cdot 10^{-6}$ $\beta (^\circ C^{-1}) = 87 \cdot 10^{-6}$ $\gamma (^\circ C^{-1}) = 3 \cdot 10^{-6}$
 זכוכית (פיירקס) $\alpha (^\circ C^{-1}) = 3 \cdot 10^{-6}$ $\beta (^\circ C^{-1}) = 9 \cdot 10^{-6}$ $\gamma (^\circ C^{-1}) = 3400 \cdot 10^{-6}$
 זכוכית רגילה $\alpha (^\circ C^{-1}) = 9 \cdot 10^{-6}$ $\beta (^\circ C^{-1}) = 21 \cdot 10^{-6}$ $\gamma (^\circ C^{-1}) = 21 \cdot 10^{-6}$
 *רוב הגזים האחרים בלחץ אטמוספרי

פוטנציאלית, 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 (ולחיצה).
- פונקציית הגל הולכת לאפס במיקום בו הפוטנציאל הולך לאינסוף.
- פונקציית הגל דועכת אקספוננציאלית במקומות האסורים קלאסית. ככל שהפרש בין האנרגיה הפוטנציאלית לאנרגיה הכללית גדול יותר כך הדעיכה מהירה יותר.

מנהור (tunneling): GOOL

מקדם ההעברה עבור $T \ll 1$ (ההסתברות לעבור):

$$T \approx 16 \frac{E}{U_0} \left(1 - \frac{E}{U_0}\right) e^{-2\alpha l}$$

$\alpha = \frac{\sqrt{2m(U_0 - E)}}{\hbar}$, l - אורך המחסום, $U_0 > E$ גובה הפוטנציאל במחסום.

מקדם החזרה: $R = 1 - T$

אוסילטור הרמוני: GOOL

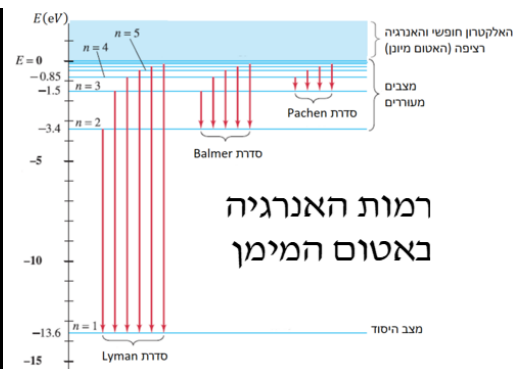
פונקציות הגל: $\psi_1(x) = (\pi b^2)^{-\frac{1}{4}} e^{-\frac{x^2}{2b^2}}$ $b = \sqrt{\frac{\hbar}{m\omega}}$

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

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

רמות האנרגיה, n שלם שמתחיל מ-1: $E_n = \left(n - \frac{1}{2}\right) \hbar \omega$

או שאפשר להתחיל את n מאפס ואז $E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) \hbar \omega$



רמות האנרגיה באטום המימן

בעיית שני הגופים ומסה מצומצמת: GOOL

מעבר למשתנים החדשים והמעבר ההפוך:

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

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

האנרגיה במשתנים החדשים:

$$E = \frac{1}{2}(m_1 + m_2)v_{c.m.}^2 + \frac{1}{2}\mu v_{rel}^2 + U(r_{rel})$$

$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$ מסה מצומצמת:

בהנחה שאין כוחות חיצוניים אז החלק הראשון קבוע והאנרגיה תלויה רק ב- r_{rel} והנגזרת שלו כמו במימד אחד. תנ"י:

$$\vec{L} = \vec{r}_{c.m.} \times \vec{p}_{c.m.} + \vec{L}_{c.m.} ; \quad \vec{L}_{c.m.} = \mu \vec{r}_{rel} \times \vec{v}_{rel}$$

פונקציית הגל של החומר: GOOL

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 למצוא אותו על ידי נגזרת).

שונות: $\sigma^2 = \langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2$

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

עקרון אי הודאות של הייזנברג: GOOL

אי ודאות מיקום תנע: $\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.055 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

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 הודאות, הגופים יכולים להיות באנרגיות האסורות קלאסית.

אי ודאות במדידת הזווית והתנע הזוויתי: $\Delta L_z \Delta \theta \geq \frac{\hbar}{2}$

משוואת שרדינגר: GOOL

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: $i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \vec{\nabla}^2 \Psi + U \Psi$

משוואת שרדינגר ללא תלות בזמן במימד אחד:

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

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

חלקיק חופשי ובור פוטנציאל אינסופי: GOOL

פונקציית הגל, 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 ברוחב l :

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin\left(\frac{\pi n}{l} x\right)$$

$$E_n = \frac{\hbar^2}{8ml^2} n^2, n = 1, 2, 3, \dots$$

לפי תורת הקוונטים קיימת אפשרות שהחלקיק יהיה במקום שבו האנרגיה הכוללת קטנה מהאנרגיה