פיסיקה 3ח'

אורך	$1mm=10^{-3}m,\ 1\mu m=10^{-6}m,\ 1nm=10^{-9}m,\ 1\overset{\circ}{A}=10^{-10}m,\ 1\,fm=10^{-15}m$
מהירות האור	$c=3\cdot10^{8}\frac{m}{sec}=3\cdot10^{10}\frac{cm}{sec}$
טמפרטורה	$0^{\circ}c=273^{\circ}k \qquad 300^{\circ}k=27^{\circ}c$
קבוע בולצמן	$K_B=1.38\cdot10^{-23}\frac{J}{K^{\circ}}=8.617\cdot10^{-5}\frac{eV}{K^{\circ}}$
אנרגיה וכוח	$1Joule=10^{7}erg$, $1Joule=\frac{kg\cdot m^2}{sec^2}=Watt\cdot sec$ $1eV=1.6\cdot10^{-19}Joule$ $1[N]=10^{5}[dyne],\quad 1[N\cdot m]=1[J]$ $1T=10^{4}Gauss$
קבוע פלאנק	$h=6.626\cdot10^{-34}[J\cdot sec]=4.136\cdot10^{-15}[eV\cdot sec]$ $\hbar=1.055\cdot10^{-34}[J\cdot sec]=6.582\cdot10^{-16}[eV\cdot sec]$ $\hbar=\frac{h}{2\pi} \qquad \hbar c=1973.52[eV\cdot\overset{o}{A}] \qquad hc=12400[eV\cdot\overset{o}{A}]=1.98[J\cdot m]$
מסת אלקטרון אנרגית מנוחה מטען האלק'	$m_e=9.1095\cdot10^{-31}Kg=0.000549amu=5.6777\cdot10^{-12}\left[eV\cdot\frac{sec^2}{m^2}\right]$ $m_ec^2=0.511\cdot10^{6}[eV]=0.511[MeV]$ $e=1.602\cdot10^{-19}[col]=4.8032\cdot10^{-10}[esu]$
מקדם קולון	$k=8.988\cdot10^{9}\left[\frac{N\cdot m^2}{c^2}\right]\approx9\cdot10^{9} \qquad ke^2=14.4\overset{o}{A}eV=1.44\cdot10^{6}eV\cdot fm$
מסת פרוטון	$m_p=1.6726\cdot10^{-27}Kg, m_pc^2=938.28\cdot10^{6}eV$
מסת ניוטרון	$m_n=1.675\cdot10^{-27}Kg, m_nc^2=939.57\cdot10^{6}eV$
מספר אבוגדרו מסה	$N_a=6.022\cdot10^{23}[particles/mole]$ $1[amu]=931.4923[MeV/c^2],\quad 1[MeV/c^2]=1.7827\cdot10^{-30}[Kg]$
קבוע רידברג	$R=1.097\cdot10^{7}\ [1/m]=1.097\cdot10^{-3}\left[1/\overset{o}{A}\right]$
שטח	מעטפת כדור: $S_{shell}=4\pi R^2$
דיפרנציאלים	יחידת נפח- $dV=d^3r=4\pi r^2\cdot dr$ -ובכדור, $dV=r^2\cos\theta\cdot dr\cdot d\theta\cdot d\varphi$
טריגו	$\sin^2\theta=\frac{1-\cos(2\theta)}{2},\ \cos^2\theta=\frac{1+\cos(2\theta)}{2},\ \sin^2\theta=\frac{1-\cos(2\theta)}{2},\ \cos^2\theta=\frac{1+\cos(2\theta)}{2}$ $e^{i\theta}=\cos\theta+i\sin\theta \Rightarrow e^{i\theta}+e^{-i\theta}=2\cos\theta, e^{i\theta}-e^{-i\theta}=2i\sin\theta$
סטיית תקן	$\Delta A=\sqrt{<A^2>-<A>^2}$
פונק' גאמא	$\int_0^\infty x^n e^{-ax}dx=\frac{n!}{a^{n+1}} \quad (a>0,\ n=0,1,...)$

<u>תורת היחסות הפרטית</u>: $p=\gamma mv$, $\gamma=\left(1-\beta^2\right)^{-1/2}$, $E_{tot}=\gamma mc^2$, $E^2=p^2c^2+m^2c^4$

$$E_{rest}=mc^2,\quad E_k=(\gamma-1)mc^2\xrightarrow[non-relative]{\gamma\to1}E_k=\frac{p^2}{2m}=\frac{1}{2}mv^2$$

טרספורמצית מהירות: מהירות גוף U_x כפי שהיא נמדדת במערכת S, V

מהירות בין מערכות, מהירותו במערכת S': $V_x'=\frac{U_x-V}{1-\frac{U_xV}{c^2}}$

<u>גלים ופוטונים</u>: $k=\frac{2\pi}{\lambda},\quad \omega=2\pi\nu,\quad E=h\nu=\frac{hc}{\lambda}=pc,\ p=\frac{h}{\lambda},\quad \lambda\nu=c$

פונקצית עבודה $E=\frac{hc}{\lambda}-\Phi\leftarrow\Phi$, $v_{phase}=\frac{\omega}{k}=\lambda\nu$, $v_{group}=\frac{d\omega}{dk}=\frac{dE}{dp}$

גל הרמוני מישורי בכיוון $\hat{X}$: $\Psi(x,t)=A\cdot e^{i(kx-\omega t)}$

גל עומד בכיוון $\hat{X}$: $\Psi(x,t)=\Psi_1+\Psi_2=2A\sin(kx)\cos(\omega t)$

הגל העומד נוצר מ-2 גלים רצים: $\Psi_{1,2}(x,t)=A\sin(kx\pm\omega t)$

מרחק בין 2 אפסים (קבועים בזמן) של גל עומד: $x=\frac{n\pi}{k}$

<u>האפקט הפוטואלקטרי</u> - – פליטת אלקי' ממתכת מוקרנת בפוטונים.

א. עבור $\nu<\nu_c$) ν_c - תדירות קריטית אופיינית למתכת) אין פליטת אלקי'

ב. אותו שיפוע h עבור כל המתכות ועבור האלק': $E_{k,max}=h\nu-\Phi=kf-\Phi$

ג. תדירות סף לפליטת אלקטרון: $\nu_c=\frac{E_0}{h}=\frac{\Phi}{h}$

ד. האלק' נפלטים מיד עם הקרנת המתכת: $t_{extract}<10^{-9}$

ה. עוצמת האור $\propto$ מספר האלק' הנפלטים (הזרם): $i_{current}=I_{light}$

ו. מתח עצירה (V_0 מתח עצירה, q מטען) - $qV_0=h\upsilon-\Phi$

<u>אפקט קומפטון</u> - אור שפוגע בחומר גורם לפליטת קרינה ב- $\lambda'>\lambda$

נוסחת הפיזור (θ - זווית פיזור הפוטון, λ - אורך גל של הפוטון (לפני)).

$$\lambda'-\lambda=\frac{hc}{mc^2}(1-\cos\theta);\quad E_{ph}=\frac{hc}{\lambda}\Rightarrow E'_{ph}=\frac{E_{ph}}{1+\frac{E_{ph}}{mc^2}(1-\cos(\theta))};\quad \lambda_c=\frac{hc}{m_ec^2}=0.0243\overset{\circ}{A}$$

כאשר (נגדיר) $\Delta\equiv\lambda_c(1-\cos\theta)$ $\qquad E_{ph}-E'_{ph}=\frac{E_{ph}\Delta}{\lambda+\Delta}=\frac{E_{ph}\Delta}{\lambda'}$

למציאת ז' הפיזור של החלקיק ℓ ($\lambda\upsilon=c$) - $\cot\left(\frac{\theta}{2}\right)=\left(1+\frac{h\upsilon}{mc^2}\right)\cdot tg(\ell)$

<u>הערה</u>: אנרגיה מקסימאלי מועברת כאשר הפוטון מוחזר בזוית של 180^{o}

<u>הערה</u>: כאשר <u>האלק'</u> (או חלקיק אחר בו מתנגש הפוטון) **<u>אינו במנוחה</u>** יש להשתמש באפקט <u>דופלר</u> לשינוי אורך הגל של הפוטון

<u>אפקט דופלר – שינוי אורך גל של חלקיק (פוטון) במערכת יחסותית</u>:

אפקט דופלר עבור 2 מערכות אשר:

נעות זו לקראת זו: $\lambda'=\lambda\sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}}$, המתרחקות זו מזו: $\lambda'=\lambda\sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}}$

הערה חשובה: במידה והייתה התנגשות וכעת אחד הגופים בלבד שינה כיוון, חזרה לאורך גל המקורי תתבצע באמצעות אותה נוסחה!

<u>קרינת X</u> – אלקי' שפוגע בחומר גורם לפליטת קרינת X – ההפך מאפקט פוטואלקטרי.

א. אורך הגל של הקרינה: $eV=h\nu=\frac{hc}{\lambda} \Rightarrow \lambda_{min}=\frac{hc}{V_0}=\frac{12400}{V_0}$

ב. שיאים בגלל בליעה מוחלטת של אנרגיה ופליטתה במעבר בין רמות.

<u>גוף שחור</u> - גוף שבולע (אידיאלית) את כל האור שמאירים עליו.

הגוף גם פולט אידיאלי ובסופו של הדבר יגיע לשיווי משקל.

<u>אנרגיה ממוצעת של גלים שנפלטים בטמפרטורה</u> T: $\bar{E}=K_BT$

אנרגיה ממוצעת של פוטון: $\bar{E}_{ph}=\overline{h\nu}\cong2.7\cdot K_BT$

בתוך חלל של גוף שחור יתכנו רק גלים עומדים בעלי אנרגיה: $E=nh\nu$

<u>חוק ווין (Wein)</u>: כל גוף בטבע פולט קרינה בכל אורכי הגל וקיים

$\lambda_{I,max}$ - <u>אורך הגל של הקרינה הנפלטת בעלת העוצמה הגדולה ביותר</u>

המקשר בין אורך הגל לטמפ': $\lambda_{max}=\frac{b}{T}[m]\quad b=2.898\cdot10^{-3}\left[K^{o}m\right]$

עוצמת הקרינה הנפלטת $D(\nu)$ ואנרגיה של הקרינה $U(\lambda)$ (ניסוי פלאנק):

$$D(\nu)=\frac{8\pi\nu^2}{c^3}\cdot\frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{KT}}-1}\ ;\ U(\lambda)=D(\nu)\left|\frac{d\nu}{d\lambda}\right|=D(\nu)\frac{c}{\lambda^2}$$

<u>חוק סטפן-בולצמן</u>: <u>קצב פליטת (הספק) אנרגיה ליח' שטח של גוף שחור</u>

$$J=\sigma T^4\ ;\ \sigma=5.67\cdot10^{-8}\frac{Watt}{(K^{o})^4m^2}=7.54\cdot10^{-16}\frac{J}{(K^{o})^4m^3}$$

קצב פליטת אנרגיה ממעטפת כוכב בטמפ' T_* ורדיוס R_*: $P_*=\sigma T_*^{\,4}\cdot4\pi R_*^2$

אנרגית קרינה ביח' נפח בטמפ' T: $\rho=\frac{E}{V}=\int_0^\infty D(\nu)d\nu=\frac{8\pi^5K_B^4}{15h^3c^3}T^4$

<u>גלי דה-ברולי</u> - כשם שגל נוהג כמו חלקיק, גם החלקיק נוהג כמו גל.

התנהגות גלית של חומר: $f=\frac{E_k}{h}\quad;\quad \lambda_{particle}=\frac{h}{p}=\frac{hc}{\sqrt{E_k\,2mc^2}}$

הערה: עבור חלקיקים "גדולים" (אפילו אבק) אורך הגל יוצא קטן מאד

ככל שהגוף גדול יותר כך האורך גל קטן יותר כי $\lambda\propto1/p$

<u>פיזור בראג</u> – התאבכות של חלקיקים אלמנטריים (ולא רק גלים).

θ - הזווית בין האלומה למשטח: $2d\sin\theta=n\lambda\ ;\ n=0,1,2,...,\left[\frac{2d}{\lambda}\right]$

הערה: הפרשי דרכים שמהווים מס' שלם של אורכי גל = התאבכות בונה

<u>פיזור רתרפורד</u> – חלקיק (α) מתפזר בזווית θ מגרעין של אטום (b פרמטר פיזור):

$$\cot\left(\frac{\theta}{2}\right)=\frac{mV_0^2\cdot b}{kQq}\Rightarrow b(\theta)=\frac{kQq}{mV_0^2}\cot\left(\frac{\theta}{2}\right)=\frac{1}{2}r_0\cot\left(\frac{\theta}{2}\right), r_0=\frac{ke^2z_1z_2}{E_k}$$

<u>הערה</u>: עבור $b=0$ מקבלים את הזווית המרבית $\theta=180^{o}$, b גדול מאוד $\leftarrow$ $\theta=0^{o}$.

<u>"מרחק החליפה" (הקצר ביותר לגרעין)</u>: $r_{min}=\frac{1}{2}r_0\left(1+\frac{1}{\sin(\theta/2)}\right)$

סטייה מנוסחת הפיזור – מצב בו "מרחק החליפה" <u>קטן</u> מרדיוס הגרעין-כניסה לגרעין.

<u>תוצאה 1</u>: עבור התנגשות חזיתית $b=0 \Rightarrow \theta=180^{o} \Rightarrow r_{min}=r_0$

וכאן כל האנרגיה הקינטית הפכה לאנרגיה פוטנציאלית.

<u>תוצאה 2</u>: החלקיקים הפוגעים במשטח πb^2 יתפזרו בזוית גדולה מ- θ.

למשטח זה קוראים <u>חתך פעולה דיפרנ'</u>

<u>חלק מהחלקיקים המתפזרים בזווית גדולה מ-</u> θ: $f=\pi b^2(\rho_tt_t)$

$\rho_t[m^{-3}]$ צפיפות גרעינים, $S[m^2]$ שטח האלומה, $t_t[m]$ עובי השכבה המפוזרת.

כל חלקיק מפוזר מגרעין בודד, לכן <u>מס' החלקיקים שפוזרו</u>: ρSt

<u>השטח שבו פוגעים החלקיקים (טבעת)</u>: $dA=2\pi\left(r\sin(\theta)\right)(rd\theta)$

מס' החלקיקים שנופל על יח' שטח בטבעת $(\theta\leftrightarrow\theta+d\theta)$:

$$\frac{dN(\theta)}{dA}\equiv N_0\frac{df}{dA}=N_0\frac{\rho_t\cdot t_t\cdot r_0^2}{16r_{scr}\sin^4(\theta/2)}\quad\Rightarrow\quad\frac{dN(\theta)}{dA}\propto\frac{1}{\theta}$$

N_0 - מס' החלקיקים הכללי הנופל על המשטח, r_{scr} - מרחק המסך.

מס' החלקיקים הפוגעים בגלאי: $a=jN_t\frac{S}{r^2}\frac{d\sigma}{d\Omega}$

כאשר j זרם ליח' שטח, S – שטח גלאי, r – מרחק הגלאי.

פיזור: $N\left[\frac{1}{\sec}\right]=S[m^2]\cdot n\left[\frac{1}{m^2}\right]\cdot I_0\left[\frac{1}{\sec}\right]=\pi(b_{(\theta_1)}^2-b_{(\theta_2)}^2)\cdot\rho_t t_t\cdot(J\cdot A)$

S- שטח פגיעה רצוי (ע"פ זווית) עבור גרעין בודד. n - מס' הגרעינים המחזירים במטרה ליח' שטח. I_0 - מס' החלקיקים הפוגעים במטרה כולה לשניה. N – מס' החלקיקים המפוזרים לשניה.

$A_{[m^2]}$ שטח חתך האלומה הפוגעת. $J_{[m^{-2}\sec^{-1}]}$ שטף אלומת החלקיקים.

מבנה האטום $R_a=1\mathring{A}$; $R_{nucl}=1fm\approx R_0A^{1/3}$

A מס' אטומי – סה"כ נוקלאונים, $R_0=1.4\,fm$ מניסוי.

מודל תומסון – מודל עוגת הצימוקים – אלק' מפוזרים באחידות, ונוגד את ניסוי רתרפורד.

מודל בוהר - נובע מהרכבה של חוק קולון: $\frac{Ke^2}{r^2}=ma_r=\frac{mv^2}{r}$

אנרגיה קינטית: $E_k=\frac{1}{2}mv^2$

וקוונטוט התנע הזוויתי (הכי חשוב): $L=mvr=n\hbar\quad n=1,2,...$

אנרגיה: $E_n=-\frac{\mu K^2e^4\cdot Z^2}{2\hbar^2\cdot n^2}=-\frac{\mu K^2e^4\cdot Z^2}{2\cdot L^2}=-E_0\frac{Z^2}{n^2},\quad E_0=-13.6_{ev}\quad n=1,2,...$

אנרגית עירור: $\Delta E_{1\to n}=E_i-E_f=h\nu=\frac{hc}{\lambda}=E_0\left(\frac{1}{n_f^2}-\frac{1}{n_i^2}\right)$ ואז נפלטת קרינה (פוטון).

הערה: במצב קשור $E<0$ ואילו במצב חופשי $E>0$

ורדיוס: $R_n=\frac{\hbar^2}{\mu Ke^2}\cdot\frac{n^2}{Z}=R_0\cdot\frac{n^2}{Z},\quad R_0=0.53\mathring{A}\quad n=1,2...$ ⇐ רדיוס בור - R_0.

אם משקל הגרעין לא ∞, נחליף את m ב- $\mu=m_e\cdot\frac{M_{nucl}}{M_{nucl}+m_e}=m_e\cdot\frac{1}{1+\frac{m_e}{M_{nucl}}}$

ספקטרום הבליעה - ייתכנו אורכי גל רק בגדלים מסוימים – קוונטוט.
ישנן מספר סדרות לאורכי גל, וכל סדרה נמצאת במקום אחר על גבי הספקטרום (בטווח אחר של אורכי גל). הסדרות הן (R – קבוע רידברג): $\frac{1}{\lambda}=Z^2R\left(\frac{1}{n_f^2}-\frac{1}{n^2}\right)$.

ליימן $n_f=1$, באלמר $n_f=2$, פאשן $n_f=3$, בראקט $n_f=4$. כמו כן $n=n_f+1,n_f+2,.....$.

חוק מוזלי $\frac{1}{\lambda}=R(\frac{1}{n_f^2}-\frac{1}{n_i^2})(Z-b)^2$ או $\Delta E=E_i-E_f=E_0(\frac{1}{n_f^2}-\frac{1}{n_i^2})(Z-b)^2$

עבור ירידה לקליפה K ($n_f=1$) יש להציב $b=1\ \leftarrow\ n_i=2,3,4,...$

בירידה לקליפה L ($n_f=2$) יש להציב $b=7.4\ \leftarrow\ n_i=3,4,5,...$.

X_Y - מעבר של אלקי' לקליפה X מ- $|Y|$ רמות מעל.

$Y\in\{\alpha,\beta,\gamma,...\}=\{1,2,3,...\}$. למשל $K_\gamma\ \Leftrightarrow\ n_i=4;n_f=1$

b נמצא בניסויים ושונה בין רמות בגלל סיכוך האלקי' בכל רמת אנרגיה.

הערה:
1. יינון של אלק' משמעותו הוצאת האלק' מהאטום ($n_f=\infty$)
2. $\lambda_{max}\Leftrightarrow\Delta E_{min}$ כתוצאה מקריסה שלאחר יינון יתקבל: $n_i=n_f+1$

עקרון אי הודאות של אייזנברג – מיקום ואנרגיה אינם חד משמעיים.

דיוק המיקום מסדר גודל אורך הגל: $\Delta x\approx\lambda$ כמו כן $\Delta p\approx\frac{h}{\lambda}$ ולכן: $\Delta x\cdot\Delta p\approx h$ לאחר חישוב ומיצוע נקבל: $\Delta x\cdot\Delta p\ge\frac{\hbar}{2},\quad\Delta E\cdot\Delta t\ge\frac{\hbar}{2}$

סטיית תקן: $\Delta A=\sqrt{\langle A^2\rangle-\langle A\rangle^2}$; $\langle A\rangle=0\Rightarrow\langle A^2\rangle=(\Delta A)^2$

אנרגיה ממוצעת של גוף (m) הקשור לקפיץ: $\langle E\rangle=\frac{1}{2m}\langle p^2\rangle+\frac{k}{2}\langle x^2\rangle$

$$\langle p\rangle=\langle x\rangle=0\to\langle E\rangle\ge\frac{\hbar}{8m(\Delta x)^2}+\frac{k(\Delta x)^2}{2}\xrightarrow[\Delta x]{<E>}\langle E\rangle_{min}=\frac{\hbar}{2}\sqrt{\frac{k}{m}}=\frac{\hbar\omega}{2}>0$$

אנרגיה ורדיוס באטום המימן (מודל פלנטארי): $\langle E\rangle=\frac{1}{2m}\langle p^2\rangle-\frac{ke^2}{<|R|>}$

$$\langle\vec R\rangle=\langle p\rangle=0\to\langle E\rangle\ge\frac{1}{2m}(\Delta p)^2-\frac{ke^2}{\Delta R}\xrightarrow[\Delta R]{<E>}\langle E\rangle_{min}\equiv E_0;\Delta R=\frac{\hbar}{kme^2}\equiv R_0$$

דיוק מיקום: $p=\sqrt{2mE}\Rightarrow\frac{\Delta p}{\Delta E}=\sqrt{\frac{m}{2E}}$; $\Delta x\ge\frac{\hbar}{2\Delta p}=\frac{hc}{2\Delta E}\sqrt{\frac{2E}{mc^2}}$

שרדינגר ותורת הקוונטים

פונקצית הגל – תיאור הסתברותי של חלקיק (יתכן קומפלקסי / שלילי): יש לדרוש:

$\int_{-\infty}^{\infty}|\Psi|^2dv=1\Rightarrow\Psi_\infty=0$ וכן $\Psi,\frac{d\Psi}{dx},...$ רציפות ו- 1:1

צפיפות ההסתברות: $P(x)=|\Psi|^2d^{\dim}x\quad\dim\in\{1,2,3\}$

הערה: סיכוי למצוא את החלקיק במקום מסויים ניתן לחשב ע"י: $P_{prob}(x)=\frac{d}{dx}|\Psi|^2d^{\dim}x\Big|_{x_0}^{x_0+\Delta x}$ (לא תמיד נכון - שימוש באחריותכם)

אופרטורים $\hat L_z=-i\hbar\frac{\partial}{\partial\varphi}$, $\hat E=i\hbar\frac{\partial}{\partial t}$, $\hat p_x=-i\hbar\frac{\partial}{\partial x}$

אופרטור ת"ז כולל: $\hat L^2=-\hbar^2\left[\frac{1}{\sin\theta}\cdot\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial}{\partial\theta}\right)+\frac{1}{\sin^2\theta}\frac{\partial^2}{\partial\varphi^2}\right]=\left(\hat L_z\right)^2$

הפעלת אופרטור על ψ - פ' גל **מנורמלת**!: $\langle\hat A\rangle=\iiint_V\psi\psi^*\cdot\hat A\cdot dV$

הערה: עבור סימטריה כדורית מתקיים $\langle\hat A\rangle=\int_0^\infty|\psi|^2\cdot\hat A\cdot4\pi r^2dr$

משוואת שרדינגר 1D לא תלויה בזמן: $\left[-\frac{\hbar^2}{2m}\partial_x^2+V(x)\right]\psi=E\psi$

פתרון כללי של המשוואה האחרונה: $\psi=A\sin(kx)+B\cos(kx)$

משי' 3D: $\left[-\frac{\hbar^2}{2m}(\partial_x^2+\partial_y^2+\partial_z^2)+V(x,y,z)\right]\psi=\left(E_x+E_y+E_z\right)\psi$

בקאורד' כדוריות: $\Psi_{n,l,m_l}=R_{n,l}(r)\cdot\Phi_{m_l}(\varphi)\cdot\Theta_{l,m_l}(\theta)$, $V(r)=-K\frac{e^2}{r}$

R - $\frac{1}{r^2}\frac{d}{dr}\left(r^2\frac{dR}{dr}\right)+\left[\frac{2\mu}{\hbar^2}(E-V(r))-\frac{l(l+1)}{r^2}\right]R=0$

Θ - $\frac{1}{\sin\theta}\frac{d}{d\theta}\left(\sin\theta\frac{d\Theta}{d\theta}\right)+\left(l(l+1)-\frac{m_l^2}{\sin\theta}\right)\Theta=0$

Φ - $\frac{d^2\Phi}{d\varphi^2}+m_l^2\Phi=0\Rightarrow\Phi(\varphi)=Ae^{im_l\varphi}$

מספרים קוונטיים:
מס' קוונטי כללי: $n=1,2,3,...$
מס' קוונטי אורביטלי (תנע זוויתי) $l=0,1,2,...,n-1$
מס' קוונטי מגנטי (היטל התי"ז של שד"מ חיצוני): $m_l=0,\pm1,\pm2,...,\pm l$
מס' קוונטי היטל הספין על ציר $\hat Z$ (של פרמיונים): $m_s=\pm\frac{1}{2},\pm\frac{3}{2},...$
תנע זוויתי $L=\sqrt{l(l+1)}\hbar$, בציר z ($2l+1$ מצבים): $L_z=m_l\hbar$

דוגמאות לפונק' גל שונות (עפ"י מס' קוונטיים שונים): r_0 - רדיוס בוהר.

$$\psi_{2,1,\pm1}=\left[\frac{1}{2\sqrt{6}(r_0)^{3/2}}\cdot\frac{r}{r_0}\cdot e^{-\frac{r}{2r_0}}\right]\left[\frac{\sqrt{3}}{2}\sin(\theta)\right]\left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{i\varphi}\right]$$

רמת היסוד: $\psi_{1,0,0}=\frac{1}{\sqrt{\pi r_0^3}}e^{-r/2r_0}$

רמות נוספות: $\psi_{2,0,0}=\frac{1}{4\sqrt{2\pi r_0^3}}\left(2-\frac{r}{r_0}\right)e^{-r/2r_0},\psi_{2,1,0}=\frac{1}{4\sqrt{2\pi}}\frac{1}{r_0}r\cdot e^{-r/2r_0}\cos(\theta)$

$\psi_{2,1,\pm1}=\frac{1}{8\sqrt{2\pi r_0^3}}r\cdot e^{-r/2r_0}\sin(\theta)e^{\pm i\varphi}$

הערה כללית לכל הבורות: $l,\ m_l$ לא קיימים בבורות כי אין תנע זוויתי !

בור פוטנציאל חד מימדי

פתרון כללי למשוואה: $\psi(x)=A\sin(kx)$, $k=\frac{\sqrt{2m(E-V_0)}}{\hbar}$

אחרי דרישות רציפות ועבור בור $0<x<L$: $(V_0=0)$ $\psi(x)=A\sin\left(\frac{n\pi}{L}\cdot x\right)$

אחרי נרמול $(V_0=0)$ $\psi(x)=\sqrt{\frac{2}{L}}\sin\left(\frac{n\pi}{L}\cdot x\right),\quad n=1,2,3,...$

אנרגיה (תחתית הבור היא V_0): $E_n=\frac{\pi^2\hbar^2n^2}{2mL^2}+V_0=\frac{h^2n^2}{8mL^2}+V_0$, $n\neq0$.

כאשר מרכז הבור ב $x=0$

$$\psi_n(x)=\begin{cases}\sqrt{\frac{2}{L}}\cos\left(\frac{n\pi}{L}\cdot x\right)\cdot(-1)^l & n=2l+1\\ \sqrt{\frac{2}{L}}\sin\left(\frac{n\pi}{L}\cdot x\right)\cdot(-1)^l & n=2l\end{cases}$$

הערה: $\langle x^2\rangle=\int_0^L|\psi|^2Adx=\frac{2}{L}\int_0^L\sin^2(\frac{n\pi}{L}x)x^2dx=L^2\left(\frac{1}{3}-\frac{1}{2\pi^2n^2}\right)$

בור פוטנציאל דו-מימדי

$\psi(x,y)=\psi_1(x)\cdot\psi_2(y)$

פוטנציאל $V(x,y)=\{0|0\le x\le a,0\le y\le b\}\ \ or\ \ \{\infty|else\}$

אנרגיה $E_{n_x,n_y}=\frac{\pi^2\hbar^2}{2m}\left(\frac{n_x^2}{a^2}+\frac{n_y^2}{b^2}\right),\ \ n_x,n_y=1,2,3,...$

עבור בור פוטנציאל $L\times L$ רמות האנרגיה הן : $E_{n_1,n_2}=E_0(n_1{}^2+n_2{}^2)$

רמת יסוד (ללא ניוון) $n_x=n_y=1$.

בור פוטנציאל תלת-מימדי

$\psi(x,y,z)=\psi_1(x)\cdot\psi_2(y)\cdot\psi_3(z)$

פוטנציאל $V(x,y,z)=\{0|0\le x\le a,0\le y\le b,0\le z\le c\}\ \ or\ \ \{\infty|else\}$

אנרגיה $E_{n_x,n_y,n_z}=\frac{\pi^2\hbar^2}{2m}\left(\frac{n_x^2}{a^2}+\frac{n_y^2}{b^2}+\frac{n_z^2}{c^2}\right),\ \ n_x,n_y,n_z=1,2,3,...$

רמת יסוד (ללא ניוון) $n_x=n_y=n_z=1$.

אוסילטור הרמוני חד מימדי

<u>פוטנציאל, כוח ותדירות</u> $V(x)=\frac{1}{2}kx^2,\quad F(x)=-kx,\quad \omega=\sqrt{\frac{k}{m}}$

<u>צורת הפתרון הכללית של משוואת שרדינגר</u>: $\psi(x)=C\cdot e^{-\alpha x^2}\cdot H_n(x)$

C - קבוע נירמול, $H_n(x)$ - פולינום הרמיט מסדר n :

$H_0(x)=1\ ;\ H_1(x)=2x\ ;\ H_2(x)=-2+4x^2\ ;\ H_3(x)=-12x+8x^3$

$H_4(x)=12-48x^2+16x^4\ ;\ H_5(x)=120x-160x^3+32x^5$

<u>הערות</u>: לחלקיק "מותר" להיות בכל מקום (גם מחוץ לבור).
במצב יסוד הסיכוי למצוא את החלקיק בראשית מקסימאלי.

<u>אנרגיה</u> (אנרגית אפס מותרת!) $E_n=(n+\frac{1}{2})\omega\hbar=(n+\frac{1}{2})h\nu,\quad n=0,1,2,...$

<u>פליטת פוטון</u> $h\nu_{if}=E_i-E_f=(n_i-n_f)\hbar\omega$

אוסילטור הרמוני תלת-מימדי

$\psi(x,y,z)=\psi_1(x)\cdot\psi_2(y)\cdot\psi_3(z)$

פוטנציאל $V(x,y,z)=\frac{1}{2}kr^2=\frac{1}{2}k\left(x^2+y^2+z^2\right)$

לכל ציר $E_{n_x}=(n_x+\frac{1}{2})\omega\hbar,\ \ E_{n_y}=(n_y+\frac{1}{2})\omega\hbar,\ \ E_{n_z}=(n_z+\frac{1}{2})\omega\hbar$

אנרגיה $E_T=E_1+E_2+E_3=(n_x+n_y+n_z+\frac{3}{2})\omega\hbar\ ,\ \ n_x,n_y,n_z=0,1,2,...$

כאשר $n=n_x+n_y+n_z$ נקבל $E_T=(n+\frac{3}{2})\omega\hbar\ ,\ \ \omega=\sqrt{\frac{k}{m}}$

רמת יסוד (חסרת ניוון) $E_0=\frac{3}{2}\omega\hbar\ ,\ \ n_x=n_y=n_z=0$

עבור כל רמה אחרת קיים ניוון מגודל $\frac{(n+1)(n+2)}{2}$.

<u>סיכום בורות</u>:

E_n	ψ	V
$E_n=\frac{\pi^2\hbar^2n^2}{2mL^2}$	$\psi(x)=\sqrt{\frac{2}{L}}\sin\left(\frac{n\pi}{L}\cdot x\right),n=1,2,3...$	$V=\begin{cases}0 & 0\le x\le L\\ \infty & \text{else}\end{cases}$
$E_n=(n+\frac{1}{2})\hbar\omega$	$\psi(x)=C\cdot e^{-\alpha x^2}\cdot H_n(x),n=0,1,2...$	$V=\frac{1}{2}m\omega^2x^2$
$E_n=(n+\frac{1}{2})H_n(x)$	$\psi(x)=\begin{cases}C\cdot e^{-\alpha x^2}\cdot H_n(x), & n=1,3,5\ \ 0<x\\ 0 & x<0\end{cases}$	$V=\begin{cases}\frac{1}{2}m\omega^2x^2 & 0<x\\ \infty & \text{else}\end{cases}$

מדרגת פוטנציאל סופי (האורך L סופי) V_0 :

ψ_I לפני המדרגה $\psi_I=Ae^{ik_1x}+Be^{-ik_1x},\ \ k_1=\frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}=\frac{p_1}{\hbar}\Rightarrow V_1=\sqrt{\frac{2E}{m}}$

ψ_{II} בתוך המדרגה $\psi_{II}=Ce^{ik_2x}+\cancel{De^{-ik_2x}},\quad k_2=\frac{\sqrt{2m(E-V_0)}}{\hbar}\Rightarrow V_2=\sqrt{\frac{2\left(E-V_0\right)}{m}}$

$V_0>E\ \Leftarrow\ \psi_{II}=Ce^{k_2x}+De^{-k_2x}\ \Rightarrow\ k_2=\frac{\sqrt{2m(V_0-E)}}{\hbar}$

- אין רכיב $De^{\beta x}$ כי הגל ממשיך ללא הפרעה, ומרציפות הפונק' נקבל $A+B=C$.
- מרציפות הפונק' הנגזרות: $\frac{B}{A}=\frac{k_1-k_2}{k_1+k_2}>0,\ \ \frac{C}{A}=\frac{2k_1}{k_1+k_2}<1$
- נירמול המקדם: $A=\int_{-\infty}^{\infty}\Psi\Psi^*dx$

מקדם החזרה- $R=\left(\frac{B}{A}\right)^2\frac{k_1}{k_1}=\left(\frac{k_1-k_2}{k_1+k_2}\right)^2>0$, מקדם מעבר - $T=\left(\frac{C}{A}\right)^2\frac{k_2}{k_1}=\frac{4k_1k_2}{\left(k_1+k_2\right)^2}<1$

סה"כ נקבל $T+R=1$

מחסום פוטנציאל סופי - אפקט המנהרה (tunneling)

חלקיק בעל אנרגיה E פוגש מחסום V_0 ברוחב Δx

ψ_I לפני המדרגה $\psi_I=Ae^{ik_1x}+Be^{-ik_1x},\ \ k_1=\frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}=\frac{p_1}{\hbar}$

ψ_{II} בתוך המדרגה $\psi_{II}=De^{k_2x}+Fe^{-k_2x},\ \ k_2=\frac{\sqrt{2m(V_0-E)}}{\hbar}$

ψ_{III} אחרי המדרגה $\psi_{III}=Ce^{ik_3x},\ \ k_3=k_1=\frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}$

סיכוי המעבר (מקדם מעבר) $T=\frac{|C|^2\cancel{k_3}}{|A|^2\cancel{k_1}}\cong e^{-2\int_{x_1}^{x_2}k_2dx}\ ,\ R=1-T$

כאשר k_2 לא תלוי ב-x $T\cong e^{-2k_2\Delta x}$

פתרון תרגיל "לכידה":

עבור חלקיק בעל מסה m ואנרגיה $E<V_0$ הפוגע במחסום פוטנציאל :

$$V(x)=\left\{\infty\middle|x<0,\ \ 0\middle|0<x<a,\ \ V_0\middle|a<x<a+b,\ \ 0\middle|x>a+b\right\}$$

הביטוי המקורב לסיכוי החלקיק להילכד בבור פוטנציאל $0<x<a$:

$$\psi_{2(a)}=\psi_{3(a)}=Ce^{k_3a}\ ,\ \ \psi_{3(a+b)}=\psi_{4(a+b)}=Ce^{k_3(a+b)}+De^{-k_3(a+b)}$$

הסתברות לכידה (החלקיק לא מוחזר מתחום 3): $D\equiv0$

$$P=\left|\frac{\psi_{(a)}}{\psi_{(a+b)}}\right|^2=\frac{|C|^2e^{2k_2a}}{|C|^2e^{2k_2(a+b)}}=e^{-2k_2b}=e^{-2b\sqrt{\frac{2m(V_0-E)}{\hbar^2}}}$$

אנרגיה של אטום בשדה מגנטי:

<u>אפקט זימן הנורמלי</u> – פיצול קווים ספקטראליים תחת שד"מ.

<u>אנרגיה של חלקיק בתוך שד"מ</u>: $E_{Tot}=E_n+\mu_B\cdot B\left(m_l+2m_s\right)$

$$\mu_B=\frac{e\hbar}{2m_e}=9.276\cdot10^{-24}\left[\frac{Joul}{Tesla}\right]=5.798\cdot10^{-9}\left[\frac{ev}{gauss}\right]=5.79\cdot10^{-5}\left[\frac{ev}{Tesla}\right]$$

תוספת לאנרגיה בעת מעבר בין רמות $\Delta E=\pm\mu_B\cdot B$

חשוב – למספר הקוונטי l אין משמעות בשיקולי אנרגיות
אלא רק למס' n,m_l,m_s .

קווי בליעה – אם קיים שד"מ אז **חייב** להתקיים $|\Delta m_l|\le1$, $\Delta l=\pm1$
כאשר מתבצע מעבר בין רמות אנרגיה.
קווי הבליעה מאופיינים ע"י (n,m_l,m_s) בלבד, ללא l .

<u>פיצול הקווים הספקטרליים</u>: $\Delta\nu=\frac{\mu_B\cdot B}{h}$: $\nu_0-\Delta\nu,\ \ \nu_0,\ \ \nu_0+\Delta\nu$

<u>רוחב קווי האנרגיה באטום</u>:

1. רוחב קו האנרגיה עבור $\Delta m_l=0$, $\Delta l=1$ (מעיקרון אי הוודאות)

τ - זמן החיים של הרמה המעוררת (לפני שהיא קורסת חזרה): $\Delta E\approx\frac{\hbar}{2\tau}$

2. רוחב קו האנרגיה עבור $\Delta m_l=1$, $\Delta l=0$: $\Delta E=\mu_B B$

<u>אפקט שטרן גרלך</u>: (θ זווית הפיזור, l אורך שד"מ B) $\theta\cong\frac{\mu_B l}{2E_k}\frac{\partial B}{\partial z}$

<u>הערה</u>: אלומה אשר עוברת בשדה מגנטי תתפצל למספר אלומות כפונקציה של המס' הקוונטיים, כי: $E_B=-\vec{\mu}\vec{B}=-\mu_zB_z$. מכאן - $F=-\nabla E_B=\mu_{z(m_l,m_s)}\cdot\frac{\partial B_z}{\partial z}$

$$\left\langle\mu_z\right\rangle=-\mu_B(m_l+2m_s)=-\frac{e\hbar}{2m}(m_l+2m_s)$$

הקליפות המלאות לא משפיעות כי כ"א מהערכים מתבטל ע"י האחר.

מספרים קוונטים – קונפיגורציות

<u>עקרון האיסור של פאולי</u>:

"שני חלקיקים לא יכולים להיות באותו מצב קוונטי". בניסוח אחר :
פונק הגל צריכה להיות אנטי-סימטרית תחת החלפה $\Psi_{(r_1,r_2)}=-\Psi_{(r_2,r_1)}$

<u>הערה</u>: העיקרון חל על כל החלקיקים בעלי ספין חצי שלם בלבד (אלק', פרוטון, ניוטרון ועוד. חלקיקים אלה נקראים "פרמיונים").
<u>הערה</u>: חלקיקים בעלי ספין שלם (לא נשמעים לעיקרון זה) נקראים "בוזונים" והם כולם יכולים להיכנס לאותה רמת אנרגיה.

<u>מס' אלק' מקסימאלי ברמה</u> n : $\sum_{l=0}^{n-1}\left[2\left(2l+1\right)\right]=2n^2$

בחישוב של כל הקומבינציות האפשריות ל- $\left\langle\mu_z\right\rangle$: $N_{beams}=2l+3$

<u>הערה חשובה</u>: התוצאה האחרונה הינה ניסיונית שלי ומסתמכת על קיום 2 ערכים בלבד לספין $\pm1/2$ (לא בטוח!) ... בקיצור לחשב !!!

מציאת מצבים קוונטים אפשריים – מתחילים למלא כל רמה בהתאם ל-n ,
כך שיתקיים שכל מס' קוונטי יעמוד במגבלות שלו. לזכור שאפשר להכניס לאותה רמה
מס' חלקיקים עם ספינים שונים – ספין $\frac{1}{2}=\pm\frac{1}{2}$, ספין $\frac{3}{2}=\pm\frac{3}{2},\pm\frac{1}{2}$ וכו'.

סידור ספקטרו-סקופי למצבים של אטום המימן (n,l מס׳ קוונטיים) :

l		s	p	d	f	g
n		0	1	2	3	4
K	1	1s	---	---	---	---
L	2	2s	3p	---	---	---
M	3	3s	3p	3d	---	---
N	4	4s	4p	4d	4f	---
	5	5s	5p	5d	5f	5g

קונפיגורציה אלקטרונית : (בנסיון, ההרכב נראה אחרת עבור מס׳ גדולים)

$$(1S)^2\ (2S)^2\ (2P)^6\ (3S)^2\ (3P)^6\ (3d)^{10}\ (4S)^2\ (4P)^6\ (4d)^{10}\ (4f)^{14}$$

ייצוג כללי: $(n\,l)^e$ כאשר (n,l) - מס׳ קוונטיים רגילים המציינים רמות אנרגיה,
e - מספר האלקטרונים ברמה המיוצגת ע״י (n,l)

פיסיקה גרעינית

רדיוס הגרעין : $r_0=1.08\cdot10^{-13}\,cm\ ,\quad R=r_0A^{1/3}$

צפיפות הגרעין : $\rho_0\cong2.7\cdot10^{14}\,[gr/cm^3]\ ,\quad \rho\cong\dfrac{\rho_0}{1+e^{\frac{r-R}{d}}}$

סימון אטומי : ${}^A_ZX$ כאשר X - שם היסוד, Z - מס׳ פרוטונים בגרעין,
N - מס׳ נויטרונים בגרעין, $A=Z+N$ - מס׳ נוקלאונים בגרעין.

איזוטופים = גרעינים בעלי אותו Z , למשל ${}^{13}_6C$ ו- ${}^{14}_6C$

איזוטונים = גרעינים בעלי אותו N, למשל ${}^{13}_6C$ ו- ${}^{14}_7N$ ($14-7=13-6$)

איזוברים = גרעינים בעלי אותו A, למשל ${}^{14}_6C$ ו- ${}^{14}_6N$

יציבות הגרעין – השיקולים

1. כלל האיסור של פאולי - $N\cong Z$ (עדיפות לשוויון).
2. כוח אלקטרוסטאטי מינימאלי (עדיפות לנויטרונים).

אנרגיית הקשר (Binding Energy) :
ככל שאנרגיה זו גדולה יותר, הגרעין מרוכז יותר ומסתו קטנה יותר.

$$\frac{E_{binding}}{c^2}=a_1A-a_2A^{\frac{2}{3}}-a_3Z(Z-1)A^{-\frac{1}{3}}-a_4(N-Z)^2A^{-1}+a_5A^{-\frac{3}{4}}$$

$$a_1=15.7_{[Mev]}\ ,\ a_2=17.8_{[Mev]}\ ,\ a_3=0.71_{[Mev]}\ ,\ a_4=23.6_{[Mev]}$$

$$a_5=\{34_{[Mev]}|evev,even;\ \ -34_{[Mev]}|odd,odd;\ \ 0|else\}$$

(זוגי – even, אי זוגי – odd).

איזובר יציב : (מס׳ ה-p באיז׳ היציב ביותר) $Z\cong\dfrac{2}{\frac{4}{A}+\frac{a_3}{a_4}A^{-\frac{1}{3}}}(\pm0.5)$

עבור תשובות הנבדלות ב-1 יש להשתמש בנוסחא המלאה (בגלל הדיוק המוגבל של הקירוב).

מסת גרעין : $M_{Nucleus}=Z\cdot m_p+N\cdot m_n-E_{binding}$

דעיכה וקרינה רדיואקטיבית :

החוקיות מהניסיון : $-dN=N\Rightarrow\ -\dfrac{dN}{dt}\equiv\lambda N\Rightarrow\ \int_{N_0}^{N}\dfrac{dN}{N}=-\int_0^t\lambda dt$

חוק הדעיכה האקספוננציאלי : $N(t)=N_0e^{-\lambda t}$, ובקירוב $e^{-\lambda t}\approx1-\lambda t\quad(\lambda t<<1)$

$N_0=m_{tot}\dfrac{N_a}{A_{element}}\cdot(radioactive\ part)$ = מס׳ אטומים התחלתי

קצב הדעיכה (התפרקויות לזמן) : $R_0=\lambda N_0$, $R(t)=-\dfrac{dN}{dt}=R_0e^{-\lambda t}$

זמן מחצית חיים : $T_{1/2}=(\ln2)\tau$, זמן חיים ממוצע τ : $\tau=\dfrac{\int N_0te^{-\lambda t}dt}{\int N_0e^{-\lambda t}dt}=\dfrac{1}{\lambda}\ \Leftarrow\ \lambda=\dfrac{\ln2}{T_{1/2}}$

$$T_{1/2}[year]=T_{1/2}\ 60\cdot24\cdot365[\min]=T_{1/2}\ 525600[\min]$$

סדרות גרעיניות : שרשרת ההתפרקות היא קבועה לפי אטומי אב :

$$T_h^{232}\ ;\quad T_p^{237}\ ;\quad U^{238}\ ;\quad U^{232}$$

$$Z=4n\ ;Z=4n+1\ ;Z=4n+2;Z=4n+3$$

הערה : כל חומר פולט חלקיקי α עד שמגיע לאחת הסדרות הנ״ל.

אנרגיית סף לריאקציה : $x+X\rightarrow y+Y+Q$

$$Q=\left(m_x+M_x-m_y-M_y\right)c^2\qquad\left(E_k\right)_{\min}=-Q\left(1+\frac{m_x}{M_X}\right)$$

תגובות גרעיניות :

הפרשי מסה מהריאקציה - $Q=\Delta MC^2$	יצירת החלקיק – זהו האלקי׳ שמשתחרר, בנוסף לניוטרינו/אנטי ניוטרינו	התהליך האטומי – $father=daughter+particle$
$Q=\left(M_X-M_Y-M_{He}\right)c^2$	$M_\alpha=M({}^4_2He)=4.002603[amu]$	${}^A_ZX\rightarrow{}^{A-4}_{Z-2}Y+{}^4_2He$
$Q=\left(M_X-M_Y\right)c^2$	$\beta^-:\ n\rightarrow p+e^-+\bar{\nu}_e$	${}^A_ZX\rightarrow{}^A_{Z+1}Y+e^-+\bar{\nu}_e$
$Q=\left(M_X-M_Y-2m_e\right)c^2$	$\beta^+:\ p\rightarrow n+e^++\nu_e$	${}^A_ZX\rightarrow{}^A_{Z-1}Y+e^++\nu_e$
$Q=\left(M_X-M_Y\right)c^2$	לכידת אלקי׳: $e^-+p\rightarrow n+\nu_e$	${}^A_ZX+e^-\rightarrow{}^A_{Z-1}Y+\nu_e$
	דעיכה בתוך הגרעין: γ	${}^A_ZX\rightarrow{}^A_ZX+\gamma$

ביקוע הגרעין : מתרחש ע״י פגיעה של ניוטרון בגרעין כבד ועירורו ע״י כך. הגרעין מתפרק ל-2 גרעינים ומשתחררת אנרגית הקשר.
תגובת שרשרת : פגיעת ניוטרון שיוצא כתוצאה מביקוע בגרעין אורניום אחר שגורמת לביקוע נוסף וכך הלאה, אם לא נבלום אותם.
תופעות לוואי : יצירת פלוטוניום 239 שהוא חומר בקיע ע״י ניוטרון מהיר.

מצב מוצק

ספקטרום מולקולה דיאטומית : $\nu=\Delta n\cdot\nu_0\pm\dfrac{\hbar}{2\pi\mu R_2}l_>$

כאשר $l_>$ הינו הגדול מבין l_i,l_f ו- $\nu_0=\dfrac{\omega}{2\pi}$

קבוע מודלונג : $fcc:\alpha=1.7476\qquad bcc:\alpha=1.7627$

אנרגיה אלקטרוסטטית של גביש (אנרגיית קשר) : $V_{elc}=-\alpha\dfrac{Ke^2}{r}$

במצב שיווי משקל: $V=-\alpha\dfrac{Ke^2}{r}+\dfrac{A}{r^n}$

אנרגיה פוטנציאלית של אטום בגביש : $V=-\alpha\dfrac{Ke^2}{r_0}\left[\dfrac{r_0}{r}-\dfrac{1}{n}\left(\dfrac{r_0}{r}\right)^n\right]$

r_0 הוא מרחק השווי משקל, ועבור $r=r_0$: $V(r_0)=-\alpha\dfrac{Ke^2}{r_0}\left(1-\dfrac{1}{n}\right)$

פוטנציאל לנרד-ג׳ונס (לקשר ואן דר-ואלס) : $V(r)=\dfrac{A}{r^{12}}-\dfrac{B}{r^6}$

צפיפות אלקטרוני ערכיות(V נפח, M מסה אטומית) : $\dfrac{N}{V}=N_\alpha\dfrac{\rho}{M}Z_f$
Z_f - מס׳ אלקטרונים מוליכים לאטום חומר (אלקטרונים חופשיים)

אנרגיית פרמי :

מודל בור חד-מימדי : $\bar{E}=\dfrac{1}{3}E_F\ ;E_F(0^o)=\dfrac{h^2}{32m_e}\left(\dfrac{N}{L}\right)^2=\left(\dfrac{N}{2}\right)^2E_1$

מודל בור דו-מימדי : $\bar{E}=\dfrac{1}{2}E_F\qquad E_F=\dfrac{\pi\hbar^2}{m}\dfrac{N}{S}$

מודל בור תלת-מימדי : $\bar{E}=\dfrac{3}{5}E_F\qquad E_F=\dfrac{h^2}{8m_e}\left(\dfrac{3N}{\pi V}\right)^{2/3}$

טמפרטורת פרמי (עד אליה המודל פועל טוב) : $K_BT_F=E_F$

כדור/רדיוס פרמי : $k_F=\left(3\pi^2\dfrac{N}{V}\right)^{1/3}$

מהירות פרמי : $u_F=\dfrac{\hbar k_F}{m_e}$ קיבול חום : $c_V=\dfrac{\pi^2R}{2}\dfrac{T}{T_F}$

פונק׳ ההתפלגות של דירק : $F=\left(e^{\frac{E-E_F}{K_BT}}+1\right)^{-1}$

התקן p-n : זרם חורים לכיוון n וזרם אלקי׳ לכיוון p. בלי פוטנציאל חיצוני הזרם זניח. כאשר פוטנציאל חיובי בצד p ושלילי בצד n (Reverse Bias) אין כמעט זרם עד למתח פריצה. כאשר המצב הפוך (Forward Bias) הזרם מתחזק. ההולכה יורדת עם הטמפ׳ ולהפך.

מוליך למחצה – הטרנזיסטור :

הגברת מתח : $\dfrac{V_L}{V_S}=\beta\dfrac{R_L}{R_G+r_b}$

פיסיקה 3ח' – תיקון לדף נוסחאות

בדף הנוסחאות נפלה הטעות. הנוסחאות הנכונות הן:

דוגמאות לפונק' גל שונות (עפ"י מס' קוונטיים שונים): r_0 - רדיוס בוהר.

רמת היסוד:

$$\psi_{1,0,0} = \frac{1}{\sqrt{\pi r_0^3}} e^{-r/r_0}$$