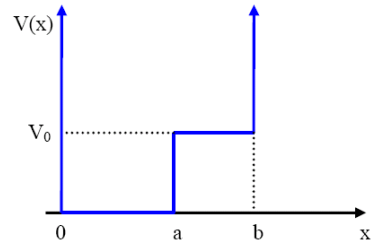


בור פוטנציאל חד מימדי

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{2m}{\hbar^2} [E - V(x)]\psi \quad V(x) = \begin{cases} 0 & 0 < x < L \\ \infty & \text{else} \end{cases}$$

$$E_n = n^2 \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} \quad \psi_n(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) & 0 < x < L \\ 0 & x > L \end{cases}$$

$$n = 1, 2, 3, \dots \quad E_\gamma^{2 \rightarrow 1} = E_2 - E_1$$



$$V(x) = \begin{cases} \infty & x < 0 \\ 0 & 0 < x < a \\ V_0 & a < x < b \\ \infty & x > b \end{cases}$$

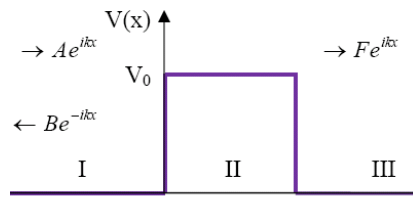
$$\psi(x) = 0 \quad x < 0$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} \psi(x) = E\psi(x) \quad 0 < x < a$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} \psi(x) + V_0\psi(x) = E\psi(x) \quad a < x < b$$

$$\psi(x) = 0 \quad b < x$$

מחסום פוטנציאל סופי



$$V(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ V_0 & 0 < x < L \\ 0 & x > L \end{cases}$$

$$\psi(x) = \begin{cases} Ae^{ikx} + Be^{-ikx} & 0 > x \quad \text{zone I} \\ Ce^{\alpha x} + De^{-\alpha x} & 0 < x < L \quad \text{zone II} \\ Fe^{ikx} + Ee^{-ikx} & x > L \quad \text{zone III} \end{cases}$$

$$k = \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}} \quad \alpha = \sqrt{\frac{2m(V_0 - E)}{\hbar^2}}$$

הסתברות: $p(x) = |\psi(x)|^2$

מקדם החזרה: $R = \left| \frac{B}{A} \right|^2$

מקדם העברה: $T = \left| \frac{F}{A} \right|^2$

חלקיק בתיבה 3D

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

$$\psi_{n_x, n_y, n_z}(x, y, z) = \sqrt{\frac{8}{abc}} \sin\left(\frac{n_x \pi}{a} x\right) \sin\left(\frac{n_y \pi}{b} y\right) \sin\left(\frac{n_z \pi}{c} z\right)$$

בראג $n\lambda = 2d \sin \theta$ (אטום דמוי מימן): $m_e r_n v_n = n\hbar$

אנרגיה: $v_n = \frac{kZ(e)^2}{n\hbar}, E_n = \frac{1}{2} m_e v_n^2 + \frac{k(Z \cdot e)(-e)}{r_n}$

תנע יחסותי: $\vec{p} = \gamma m \vec{v}$

$$E_{total} = \gamma mc^2$$

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2 \quad \gamma = \left(1 - \left(\frac{v}{c} \right)^2 \right)^{-1/2}$$

$E_K = (\gamma - 1)mc^2$ קינטית; $E_\gamma = pc$ $p = hc$

$\psi(x, t) = A \sin(kx - \omega t)$ k - מס' גל, ω - תדירות

$v = \lambda f$ $\omega = 2\pi f$ $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

$\omega > 0$ forward. A- אמפליטודת הגל.

חבורת גלים היא סופרפוזיציה של מספר גלים.

מהירות החבורה: $v_g = \frac{d\omega}{dk}$. מהירות פאזה של כל גל: $v_p = \frac{\omega}{k}$

$J = \sigma T^4$ $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$ - הספק קרינה הנפלטת

ליחידת שטח. $p = J \cdot s$ S- שטח.

$$h\nu_{max} \approx 2.822 k_B T \rightarrow \begin{cases} \nu_{max} [\text{Hz}] \approx 5.879 \cdot 10^{10} T \\ \lambda_{max} [\text{m}] \approx 2.898 \cdot 10^{-3} T^{-1} \end{cases}$$

$E_e^{Kmax} = \frac{hc}{\lambda} - \phi = hf - \phi$ פונק' עבודה. $-\phi$

הסתברות:

$$\bar{x} = \langle x \rangle = \sum_i P_i x_i \quad \bar{y} = \langle y \rangle = \sum_i P_i y_i$$

$$\langle ay + by \rangle = a \langle y \rangle + b \langle y \rangle = (a + b) \langle y \rangle$$

$$\langle xy \rangle \neq \langle x \rangle \cdot \langle y \rangle$$

$$Var(x) = (\delta x)^2 = \langle (x - \langle x \rangle)^2 \rangle = \langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2$$

$$P(x) \geq 0 \quad \int_{-\infty}^{\infty} P(x) dx = 1 \quad \int_{x_1}^{x_2} P(x) dx = P(x_1 \leq x \leq x_2)$$

$$\langle f(x) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) P(x) dx \quad \bar{x} = \langle x \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} x P(x) dx$$

$$| \psi(x) |^2 = P(x)$$

צפיפות ההסתברות.

$$E = \frac{p^2}{2m} \quad \Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \leq \Delta E \Delta t$$

עיקרון אי הודאות: $\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \leq \Delta E \Delta t$

בסימטריה: $\langle x \rangle = 0$. אוסילטור הרמוני:

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad V(x) = \frac{Kx^2}{2} = \frac{m\omega^2 x^2}{2}$$

אוסילטור הרמוני נמצא בתנועה כל הזמן!

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{1}{2^n n!}} \cdot \left(\frac{m\omega}{\pi \hbar} \right)^{1/4} \cdot e^{-\frac{m\omega x^2}{2\hbar}} \cdot H_n \left(\sqrt{\frac{m\omega}{\hbar}} x \right)$$

$$H_n(y) = (-1)^n e^{y^2} \frac{d^n}{dy^n} e^{-y^2} \quad E_n = \hbar \omega \left(n + \frac{1}{2} \right)$$

$$H_0(y) = 1 \quad H_1(y) = y \quad H_2(y) = y^2 - 1$$

$$H_3(y) = y^3 - 3y \quad H_4(y) = y^4 - 6y^2 + 3$$

פולינומים הרמיטים.

צפיפות ההסתברות למציאת אלקטרון במרחק r במימן:

$$\cos \theta = \frac{L_z}{L} = \frac{m_l}{\sqrt{l(l+1)}} \quad P(r) = |\psi_{n,l,m}(r)|^2 4\pi r^2$$

תנ"ר: $L = \sqrt{l(l+1)}\hbar$ היטל על Z : $L_z = m_l \hbar$

ספין: $S = \sqrt{s(s+1)}\hbar$ היטל על Z : $S_z = m_s \hbar$

$s = 1/2, m_s = -s, -(s-1), \dots, (s-1), s$ לאלקטרונים.

הסרת ניוון (חלקית) של אנרגיה בשדה מגנטי

$$E_{n,m_l,m_s} = -\frac{Z^2}{n^2} E_0 + m_l \mu_B B + 2m_s \mu_B B$$

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 9.274 \cdot 10^{-24} \frac{J}{T} = 5.788 \cdot 10^{-5} \frac{eV}{T}$$

אפקט זימן הנורמלי

באפקט זה יראה פיצול של קו ספקטרום ל-3 אחד לשלושה בנוכחות שדה מגנטי אחיד. מתפצל לקו ב: תדירות גבוהה יותר, נמוכה יותר והמקורית. יקרה רק כאשר הספין הכולל של האטום הוא אפס.

כלל האיסור של פאולי - שני אלקטרונים (פרמיונים) לא יכולים להיות באותה קונפיגורציה קוונטית (כולל ספין).

קליפה-רמה- (n). סה"כ אלקטרונים ברמה $2n^2$.

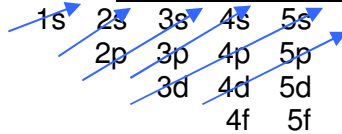
תת-קליפה- (l). כאשר תת קליפה מלאה, נכנס אלק' לתת-קליפה הבאה הפנויה בעלת האנרגיה הכי נמוכה.

אורביטל- מתואר ע"י (n, l, m_l) . עד 2 אלק' באורביטל.

קונפיגורציה אטומית: (n, l, m_l, m_s) . בקיצור: $nL^{\#}$. תת-קליפה

באותיות: s ($l=0$), p ($l=1$), d ($l=2$), f ($l=3$).

סדר מילוי תת קליפות - לפי כלל האוטובוס



דוגמא-קונפיגורציה אטומית של אטום קריפטון ($Z=36$):

$$(1s)^2 (2s)^2 (2p)^6 (3s)^2 (3p)^6 (4s)^2 (3d)^{10} (4p)^6$$

בהפעלת שדה מגנטי לא אחיד:

$$F_Z = -\frac{\partial E_{n,m_l,m_s}}{\partial z} = m\ddot{z}$$

מצב מוצק ומוליכים למחצה (מל"מ)

$$E_F (T = 0^{\circ}K) = \frac{h^2}{2m_e} \left(\frac{3n_e}{8\pi} \right)^{2/3}$$

גדולות ממנה אין אלקטרונים (בטמפ' $0^{\circ}K$). האנרגיה תלויה בטמפ'.

$$g(E) = C\sqrt{E}, \quad C = \frac{8\sqrt{2}\pi m_e^{3/2}}{h^3}$$

אם נניח שהמספרים הקוונטים רציפים, גם מס' זה רציף.

$$N(E) dE = g(E) f_{FD}(E) dE$$

$f_{FD}(E)$ - התפלגות פרמי-דירק.

מס' אלק' הכולל ביח' נפח:

$$n_e = \int_0^{\infty} N(E) dE = \int_0^{\infty} g(E) f_{FD}(E) dE = C \int_0^{\infty} \frac{\sqrt{E}}{e^{(E-E_F)/k_B T} + 1} dE$$

$$\tilde{n}_e = n_e f_{FD}(E) = n_e \left(e^{(E-E_F)/k_B T} + 1 \right)^{-1} \quad n_e = \frac{2}{3} C (E_F)^{3/2}$$

$$\lambda' = \lambda + \lambda_c (1 - \cos \theta) \quad \lambda_c = \frac{hc}{mc^2}, \lambda_c (elec) = 0.0243 \text{ \AA}$$

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n > m \quad E_e^k = \Delta E_\gamma = \frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda'} = hc \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'} \right)$$

$$R = Z^2 \frac{m_e k^2 e^4}{4\pi c \hbar^3}, [R_H] = 1.0967 \cdot 10^7 \frac{1}{m} \quad (1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m})$$

מימן:

$\lambda_{4 \rightarrow 1} = 97.3 \text{ nm}$	Layman series	$\lambda_{5 \rightarrow 2} = 434.2 \text{ nm}$	Balmer series
$\lambda_{3 \rightarrow 1} = 102.6 \text{ nm}$		$\lambda_{4 \rightarrow 2} = 486.3 \text{ nm}$	
$\lambda_{2 \rightarrow 1} = 121.6 \text{ nm}$		$\lambda_{3 \rightarrow 2} = 656.5 \text{ nm}$	
view range:		$\lambda_{6 \rightarrow 3} = 1094.2 \text{ nm}$	Paschen series
$UV < 3900 \text{ \AA} \leq \lambda \leq 7600 \text{ \AA} < IR$		$\lambda_{5 \rightarrow 3} = 1282.3 \text{ nm}$	
$1.63 \text{ eV} \leq E \leq 3.18 \text{ eV}$		$\lambda_{4 \rightarrow 3} = 1875.8 \text{ nm}$	

רתפורד

גרעין הזהב כבד מאוד ביחד לחלקיק α לכן כל האנרגיה הופכת לחשמלית.

$$m_\alpha U = V(m_\alpha + M_{nuc}) \quad E_\alpha^k = k \frac{qQ}{r_d}$$

$$r_{d, \min} = r_\alpha + r_{gold}, Q = Z \cdot e$$

מודל בוהר וגל דה-ברולי

תנ"ר: $L = n\hbar = I\omega, n \in \mathbb{N}$
 $r_n = \frac{n^2}{Z} a_0, a_0 = \frac{\hbar}{m_e k e^2} = 0.53 \text{ \AA}$

$$\lambda_{DB} = \frac{h}{p}, v_{DB} = \frac{E}{h} \cdot E_n = -\frac{Z^2}{n^2} E_0, E_0 = \frac{m_e k^2 e^4}{2\hbar^2} = 1.61 \text{ eV}$$

אטום המימן

$$\Psi_{n,l,m}(r, \theta, \varphi) = C_{n,l,m} R_{n,l}(r) Y_{l,m}(\theta, \varphi)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots \quad l = 0, 1, \dots, (n-1)$$

$$m_l = -l, -(l-1), \dots, -1, 0, 1, \dots, (l-1), l$$

$$R_{n,l}(r) = \frac{a_0}{r} e^{-\frac{r}{a_0 n}} L_{n,l} \left(\frac{r}{a_0} \right) \cdot \iiint \psi^* \psi dV = 1$$

n	l	$R_{n,l}(r)$
$L_{n,l}(y)$ פולינום לאגר	$n=1$ $l=0$	$R_{1,0}(r) = \frac{2}{\sqrt{a_0^3}} e^{-\frac{r}{a_0}}$
	$n=2$ $l=0$	$R_{2,0}(r) = \frac{1}{\sqrt{2a_0^3}} \left(1 - \frac{r}{2a_0} \right) e^{-\frac{r}{2a_0}}$
	$l=1$	$R_{2,0}(r) = \frac{1}{\sqrt{24a_0^3}} \frac{r}{a_0} e^{-\frac{r}{2a_0}}$

$Y_{l,m}(\theta, \varphi)$ - פונקציות ספריות (Spherical) הרמוניות:

$$Y_{l,m}(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{2l+1}{4\pi} \frac{(l-m)!}{(l+m)!}} P_{l,m}(\cos \theta) e^{im\varphi}$$

l	m	$Y_{l,m}(\theta, \varphi)$
$P_{l,m}(\cos \theta)$ פולינום לאז'נדר	$l=0$ $m=0$	$Y_{0,0}(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{1}{4\pi}}$
	$l=1$ $m=1$	$Y_{1,1}(\theta, \varphi) = -\sqrt{\frac{3}{8\pi}} \sin \theta e^{i\varphi}$
	$l=1$ $m=0$	$Y_{1,0}(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{3}{4\pi}} \cos \theta$
	$m=-1$	$Y_{1,-1}(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{3}{8\pi}} \sin \theta e^{-i\varphi}$

גדלים הקשורים לאנרגיית פרמי: מהירות אלק' בעלי אנרגיית פרמי, טמפ' פרמי, אנרגיה ממוצעת של אלק' חופשיים במתכת:

$$\frac{1}{2} m_e v_F^2 = k_B T_F = \frac{5}{3} \bar{E}_e = E_F$$

$$E_n = \frac{h^2 n^2}{8m_e L^2} \text{ : רמות אנרגיה של אלק' במימד אחד}$$

פרמיונים ספין חצי שלם ($\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$) **בוזונים** ספין שלם (0, 1, ...)

פיסיקה גרעינית וחלקיקים יסודיים

$$M_{nuc} = Zm_p + Nm_n - \frac{E_B}{c^2} \text{ : נוסחת המסה חצי אמפירית}$$

אנרגיית הקשר:

$$E_B = \left[a_1 A - a_2 A^{2/3} - a_4 \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_4 \frac{(A-2Z)^2}{A} + \frac{a_5}{A^{3/4}} \right] c^2$$

$$a_1 c^2 = 15.8 \text{ MeV} \quad a_2 c^2 = 17.8 \text{ MeV} \quad a_3 c^2 = 0.71 \text{ MeV}$$

$$a_4 c^2 = 23.7 \text{ MeV} \quad \delta_0 = 34 \text{ MeV}$$

$$a_5 c^2 = \begin{cases} \delta_0 & Z, N \text{ even (A even)} \\ 0 & A \text{ odd} \\ -\delta_0 & Z, N \text{ odd (A even)} \end{cases}$$

A - מס' מסה, A = Z + N מספר פרוטונים - N, נויטרונים.

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t) \rightarrow N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \text{ : דעיכה רדיואקטיבית}$$

N(t) - מס' גרעינים בזמן t, λ - קבוע דעיכה, N₀ - גרעינים ב-0.

$$\tau = \langle t \rangle = \frac{1}{N_0} \int_0^\infty t N(t) dt = \frac{1}{\lambda} \text{ : זמן חיים ממוצע}$$

$$N(T_{1/2}) = \frac{N_0}{2} \quad T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ln 2 \text{ : זמן מחצית חיים}$$

קצב התפרקות (פעילות רדיואקטיבית):

$$R(t) = -\frac{d}{dt} N(t) = \lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = R_0 e^{-\lambda t}$$

לפטונים

חלקיקי L_e = +1 : הם e⁻, ν_e. חלקיקי L_μ = +1 : הם μ⁻, ν_μ.

חלקיקי L_τ = +1 : הם τ⁻, ν_τ. **קוורקים:**

שם	סימון	ספין (S)	מטען (e)	מס' בריוני (B)
Up	u	1/2	+2/3	1/3
Down	d	1/2	-1/3	1/3
Strange	s	1/2	-1/3	1/3
Charmed	c	1/2	+2/3	1/3
Bottom	b	1/2	-1/3	1/3
Top	t	1/2	+2/3	1/3

בריונים Baryons: מורכבים מ-3 קוורקים. B = ±1. דוגמאות

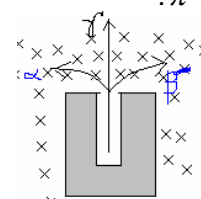
p, n, Λ, Σ, Ξ, Ω⁻ : B = +1 בריוני

הרכבים: p = [uud] n = [udd] Λ⁰ = [uds] Σ⁺ = [uus]

מזונים Mesons: מורכבים מקוורק ואנטי-קוורק. מס' בריוני

תמיד אפס. לדוגמא: π⁺ = [dū] K⁰ = [d̄s]

דעיכות:



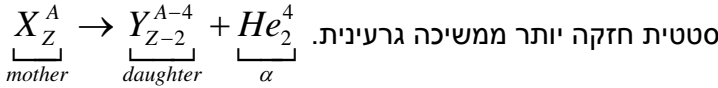
$$\alpha : Q = [M(A, Z) - M(A-4, Z-2) - m_\alpha] c^2$$

$$\beta^- : Q = [M(A, Z) - M(A, Z+1) - m_e] c^2$$

$$\gamma : Q = 0 \quad Q > 0 \rightarrow \text{spontaneous}$$

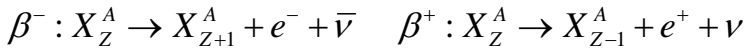
התפרקות α- פליטת אטום הליום ⁴He. ליסודות בעלי מס'

נוקליאונים גדול מ-210, ההתפרקות נבלמת בנייר. דחייה אלקטרו-



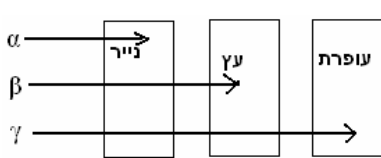
התפרקות β- שלילית: כאשר יש יותר נויטרונים מפרוטונים לייצוב.

נויטרון הופך לפרוטון ונפלט אלקטרון ואנטי-נויטרينو. חיובית: יותר פרוטונים, פרוטון הופך לנויטרון, נפלט פוזיטרון ונויטרينو.



התפרקות γ- פליטת פוטון בעל אורך גל מאוד נמוך (מס' 5 ומטה)

כושר חדירה גבוה. נבלמת בעופרת. אין שינוי במס' נוקליאונים, ירידה מרמה מעוררת לרמת יסוד לאחר התפרקות אלפא או ביתא.



לכידת אלק': X_Z^A + e⁻ → Y_{Z-1}^A

נויטרינו: (1) לאזן שימור אנרגיה

בהתפרקות β. (2) איזון תנע.

(3) איזון ספין.

חסר מסה, ומטען, אך בעל אנרגיה, תנע, וספין 1/2.

חלקיקים שפועל עליהם הכוח החזק (בין נוקליאונים): הדרונים.

בריונים: פרמיונים שהם הדרונים. **מזונים:** בוזונים שהם הדרונים.

לפטונים: פרמיונים שלא הדרונים. **בוזונים:** שלא הדרונים; נושאי

הכוחות פוטון: מעביר אינטרקציה א"מ. **גרביטון:** מעביר גרביטציה

$$U_V = \frac{8\pi h\nu^3}{\left(e^{h\nu/k_B T} - 1 \right) c^2} \text{ : צפיפות אנרגיה גוף שחור}$$

$$\text{הספק קרינה: } I(\lambda, T) = \frac{2\pi e k_B T}{\lambda^4} \text{ (ריילי ג'ונס)}$$