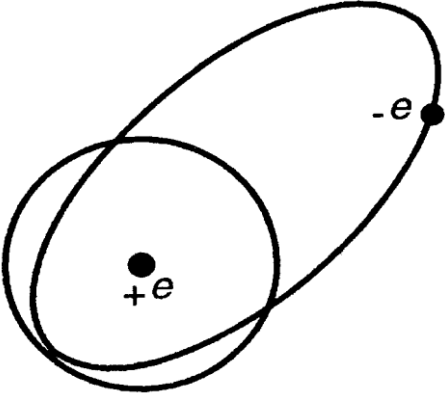
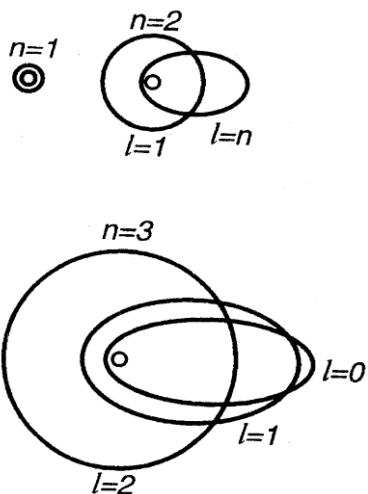


מבנה האטום וחלקיקים אלמנטריים				
יחידות שימושיות בפיזיקה של אטום וגרעין				
ערך פיזיקלי	שם היחידה	סימון	הגדרה	ערך היחידה
מסה	יחידת מסה אטומית	a.m.	1/12 של מסת הגרעין של האיזוטופ פחמן-12	$1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
אנרגיה	אלקטרון-וולט	eV	$A = QU$ ($Q = e, U = 1V$)	$1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
מטען	מטען אלמנטרי	e	מטען אלקטרון	$1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
מומנט התנע	---	\hbar	$\hbar = \frac{h}{2\pi}$	$1.055 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{sec}$
מומנט מגנטי של אלקטרון	מגנטון של בור	μ_B	$\frac{eh}{4\pi m_e}$ $-m_e$ מסת אלקטרון	$9.274 \cdot 10^{-24} \frac{\text{J}}{\text{T}}$
מומנט מגנטי של גרעין	מגנטון גרעיני	μ_N	$\frac{eh}{4\pi m_p}$ $-m_p$ מסת פרוטון	$5.051 \cdot 10^{-27} \frac{\text{J}}{\text{T}}$
התכונות הגליות של חלקיקים				
<p>גלים של דה-ברולי</p> <p>לקרינה אלקטרומגנטית תכונות הן של גלים והן של חלקיקים. גם לחלקיקים הנעים תכונות של גלים בנוסף לתכונות של החלקיקים. אורך גל של חלקיק נע נמדד באופן ניסיוני, והוא תלוי בתנע של החלקיק p:</p> $\lambda = \frac{h}{p}$		<p>h – קבוע פלנק.</p> <p>גלים אלה נקראים גלי דה-ברולי, ואורך הגל המתאים נקרא אורך גל דה-ברולי.</p>		

התכונות הגליות של חלקיקים (המשך)	
$\lambda = \frac{h}{p}$ $v = \frac{E}{\hbar}$ $\omega = \frac{E}{\hbar/2\pi}$	<p>מאפיינים גליים של חלקיקים</p> <p>v – תדירות</p> <p>E – אנרגיה</p> <p>ω – תדירות זוויתית</p> <p>λ – אורך גל דה-ברולי</p> <p>p – תנע של החלקיק</p>
$\psi = A \cos \left[\frac{2\pi}{h} (Et - pz) \right]$	<p>משוואת גל דה-ברולי מישורי</p>
מבנה האטום	
 $m_e v_n r_n = \frac{nh}{2\pi}$	<p>מודל רתרפורד-בוהר-זומרפלד</p> <p>במרכז האטום נמצא גרעין הטעון מטען חשמלי חיובי, סביבו במסלולים מעגליים ואליפטיים המוגדרים היטב מסתובבים אלקטרונים. תוך כדי תנועה במסלולים אלה (הנקראים מסלולים קבועים), האלקטרונים אינם פולטים גלים אלקטרומגנטיים (מה שמנוגד לחוקי האלקטרודינמיקה).</p> <p>החוק הראשון של בוהר: לכל מסלול קבוע מתאים ערך מסוים של אנרגיית האטום. הגרעין נמצא באחד המוקדים של המסלול האליפטי (או במרכז המסלול המעגלי). רוב המסה של האטום מרוכזת בגרעין. את הרדיוסים של המסלולים המעגליים הקבועים אפשר לחשב בעזרת הנוסחה:</p>

מבנה האטום (המשך)

$$m_e v_n r_n = \frac{nh}{2\pi}$$



$$h\nu_{nm} = E_n - E_m$$

מודל רתרפורד-בוהר-זומרפלד (המשך)

כאשר:

m_e – מסת אלקטרון

v_n – מהירות האלקטרון במסלול

r_n – רדיוס המסלול הקבוע

h – קבוע פלנק

$n = 1, 2, 3, \dots$ – מספרי המסלולים

החוק השני של בוהר

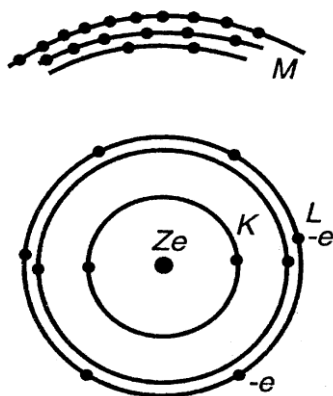
האטום פולט או בולע קוונט של אנרגיה תוך כדי מעבר ממצב קבוע אחד לשני, כאשר לכל מצב מתאים מסלול קבוע מסוים. קוונט של אנרגיה שווה להפרשי האנרגיות של האלקטרון במסלולים המתאימים למצבי המעבר:

מבנה אטום רב-אלקטרוניים

במרכז האטום מצוי גרעין הטעון חיובית, כאשר סביבו נמצאים אלקטרוניים המרוכזים בקליפות ותת-הקליפות.

מטען הגרעין (ביחידות של מטען בסיסי e) שווה למספר היסוד (המספר האטומי Z) בטבלה המחזורית של היסודות; מספר האלקטרוניים באטום נייטרלי שווה גם ל- Z .

עיקר המסה של האטום מרוכז בגרעין. הגרעין של האטום הקל ביותר – מימן – מכיל פרוטון אחד.



מסת פרוטון: $m_p = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

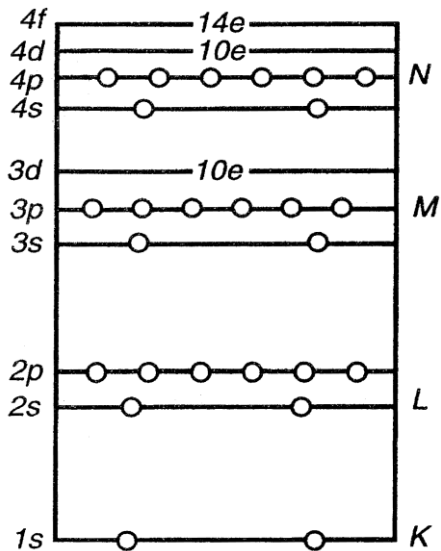
מסת אלקטרון: $m_e = 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

$$m_p = 1836 m_e$$

מבנה האטום (המשך)	
יונים	<p>האטומים שבהם מספר האלקטרונים אינו שווה ל-Z נקראים יונים.</p> <p>ביונים חיוביים מספר האלקטרונים קטן ממספר האלקטרונים באטום נייטרלי, וביונים שליליים מספרם הוא גדול יותר.</p>
אנרגיית יינן	<p>אנרגיה הדרושה כדי לעקור אלקטרון מהאטום (ללא הקניית אנרגיה קינטית).</p>
מספרים קוונטיים של אלקטרון	<p>רמות האנרגיה של האטום מוגדרות על ידי מספרים קוונטיים של האלקטרונים:</p>
<p>רמות אנרגיה של אטום מימן</p>	<p>1. מספר קוונטי ראשי</p> <p>מספר המגדיר בעיקר את רמות האנרגיה הבודדות. למשל, עבור אטום המימן, רמות האנרגיה מחושבות על פי הנוסחה:</p> $E_n = -\frac{m_e e^4}{8 \epsilon_0^2 n^2 h^2}$ <p>m_e – מסת האלקטרון e – מטען אלקטרון $n = 1, 2, 3, \dots$ – מספר קוונטי ראשי h – קבוע פלנק</p>
<p>$l = 0, 1, \dots, n - 1$</p> <p>מספר קוונטי זה מגדיר את מומנט התנע של אלקטרון:</p> $M_l = \frac{h}{2\pi} \sqrt{l(l+1)}$	<p>2. מספר קוונטי מסלולי (Orbital)</p>

מבנה האטום (המשך)	
$m_i = -1, \dots, 0, \dots, +1$	3. מספר קוונטי מגנטי
<p>מספר קוונטי זה מגדיר את ההיטל של מומנט התנע לכיוון מסוים (למשל, כיוון השדה המגנטי):</p> $M_{is} = m_i \cdot \frac{h}{2\pi}$	
<p>מספר קוונטי זה מגדיר את מומנט התנע העצמי (Spin) של אלקטרון:</p> $M_s = \frac{h}{2\pi} \sqrt{s(s+1)}$ <p>ואת ההיטל שלו: $M_{sz} = \pm \frac{1}{2} \frac{h}{2\pi}$</p>	4. ספין (Spin) $s = \frac{1}{2}$
<p>אלקטרונים הנמצאים באותו האטום נבדלים אחד מהשני לפחות במספר קוונטי אחד.</p>	עיקרון פאולי
	<p>קליפות ותת-קליפות אלקטרוניות</p> <p>אלקטרונים בעלי אותו מספר קוונטי ראשי, הנבדלים במספרים קוונטיים אחרים, מהווים קליפה.</p> <p>אלקטרונים בעלי מספרים קוונטיים n ו-l שווים, ומספרים שונים של m_l, מהווים תת-קליפה.</p> <p>קליפות מסומנות על ידי אותיות לועזיות גדולות K, L, M, N, \dots;</p>

מבנה האטום (המשך)



$$l = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$$

קליפות ותת-קליפות של אלקטרונים

תתי-הקליפות מסומנות על ידי ספרה ואות לועזית קטנה.

מספר קוונטי ראשי n	1	2	3	4
קליפה	K	L	M	N
תת-קליפה	1s	2s, 2p	3s, 3p, 3d	4s, 4p, 4d, 4f

בשרטוט משמאל מסומנים המספרים המקסימליים של אלקטרונים בתתי-הקליפות.

האותיות s, p, d, f, ... מסמנות את המצבים בעלי המספרים הקוונטיים:

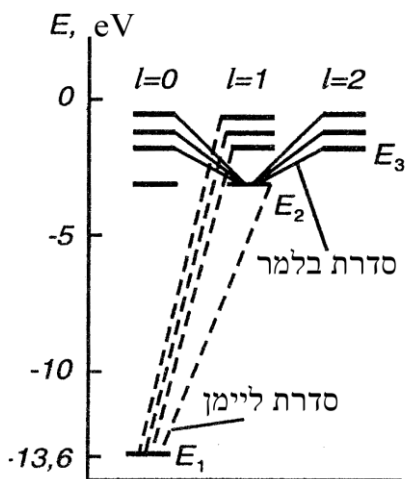
מעברים מלווי קרינה

מעבר אלקטרונים בין רמות אנרגיה שונות מלווה בשינוי המספרים הקוונטיים של האלקטרונים. המעבר מתאפשר רק כאשר שינויי המספרים הקוונטיים מקיימים את התנאים:

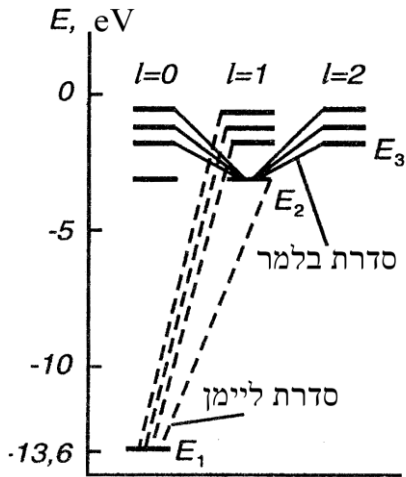
$$\Delta m_l = 0, \pm 1$$

$$\Delta l = -1, +1$$

במקרה זה מתרחשות פליטה של פוטון או בליעתו.



מבנה האטום (המשך)



מעברים מלווי קרינה (המשך)

המעברים בין הקליפות החיצוניות מלוות בקרינת אור אינפרה-אדום, נראה ואולטרה-סגול.

אם נוציא אלקטרון מהקליפה הפנימית, אזי את מקומו יתפסו אלקטרונים מקליפות חיצוניות, בעלות מספרי n גדולים יותר.

מעברים אלה מלווים בפליטת קרינה אלקטרומגנטית בעלת ספקטרום קווי בתחום הרנטגן.

בשרטוט משמאל מסומנים מעברים אלקטרוניים בעלי הסתברות גבוהה ביותר באטום מימן בודד. במעברים מסוגים אלה

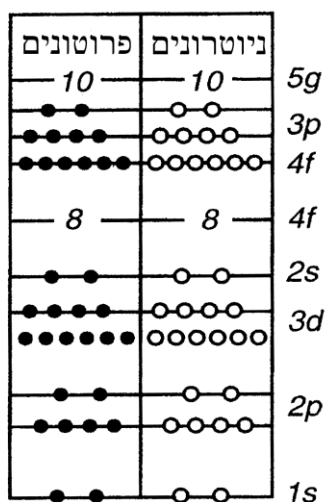
המספר l משתנה ב-1.

הרמות E_1, E_2, E_3 מסמנים את המתאימות למספרים קוונטיים ראשיים 1, 2, 3.

סדרת **בלמר** מסמנת את המעברים מרמות גבוהות לרמה E_1 , סדרת **ליימן**, מקורה במעברים מרמות גבוהות לרמה E_2 .

המומנט המגנטי של אטום מימן בודד מכווון באופן אקראי.

הגרעין האטומי



נוקלאונים

גרעין האטום מכיל פרוטונים ונויטרונים אשר מהווים שני מצבים שונים של חלקיק אחד – נוקלאון. לכן לעתים נאמר שהגרעין בנוי מנוקלאונים, חלק אחד מהם נמצא במצב של פרוטונים, וחלק שני – במצב של נויטרונים. מספר הפרוטונים שווה למספר סידורי Z של היסוד בטבלה המחזורית של היסודות;

$$Q_n = Ze$$

מספר הנוקלאונים בגרעין נקרא **מסה אטומית** A . מספר הנויטרונים N בגרעין שווה להפרש $A - Z$. הנוקלאונים בגרעין מסודרים בקליפות המסומנות כמו הקליפות של האלקטרונים.

סמל הגרעין

${}_Z Y^A$ - הגרעין Y בעל מספר סידורי Z ומסה אטומית A .

איזוטופים ואיזוברים

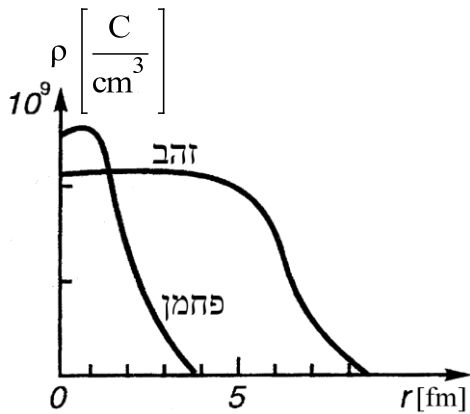
גרעינים בעלי מספר שווה של פרוטונים ומספרים שונים של נויטרונים נקראים **איזוטופים**.

גרעינים בעלי מספר שווה של נוקלאונים ומספרים שונים של פרוטונים נקראים **איזוברים**.

גודל הגרעין וריכוז הנוקלאונים

גודל הגרעין תלוי במספר הנוקלאונים המרכיבים אותו. בגרעין מבדילים בין האזור הפנימי לבין השכבה החיצונית.

הגרעין האטומי (המשך)



תלות של צפיפות המטען החשמלי בגרעין של זהב ושל פחמן במרחק למרכז.

$$R = R_0 \cdot A^{\frac{1}{3}}$$

$$R_0 = (1.2 \dots 1.3) \cdot 10^{-15} \text{ m}$$

A – מסה אטומית

גודל הגרעין וריכוז הנוקלאונים (המשך)
 ריכוז הנוקלאונים באזור הפנימי פחות או יותר קבוע לכל סוגי הגרעין בעלי $A > 10$ והוא שווה ל-

$$1.68 \cdot 10^{44} \frac{\text{Nucleon}}{m^3}$$

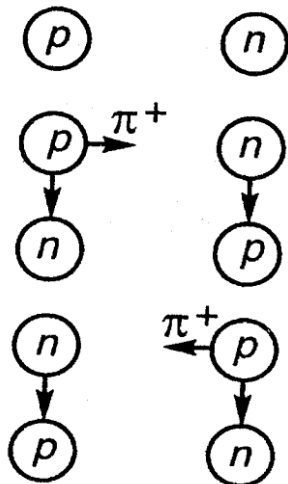
בשכבה החיצונית, שהעובי שלה כמעט שווה לכל סוגי הגרעין: $(1.5 - 2) \cdot 10^{-15} \text{ m}$. ריכוז החלקיקים יורד עד אפס.

צפיפות המטען החשמלי תלויה בריכוז הנוקלאונים. מקובל להגדיר את רדיוס הגרעין כמרחק מהמרכז לשכבה שבה צפיפות המטען שווה למחצית מערכה המרבי.

רדיוס הגרעין R הולך וגדל יחד עם מספר הנוקלאונים. את גודלו המקורב אפשר לחשב בעזרת הנוסחה:

יחידת מרחק בתוך הגרעין – 1 פרמי:

$$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$$



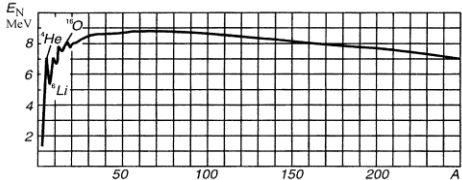
הכוחות הגרעיניים

נוקלאונים בתוך הגרעין קשורים על ידי כוחות גרעיניים, המבוססים על החלפה הדדית של פי-מזונים (π - meson).

הכוחות הגרעיניים מתגלים אך ורק במרחקים קטנים המשתווים למרחקים בין הנוקלאונים בתוך הגרעין (סדר גודל של 1 פרמי – 10^{-15}). הכוחות אינם תלויים במטען חשמלי של הנוקלאונים (עקרון אי-תלות במטען).

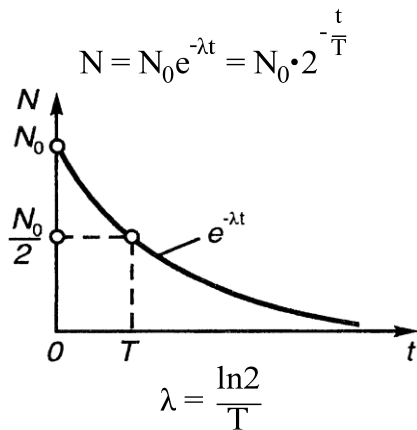
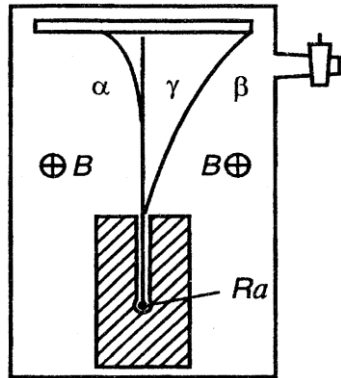
הגרעין האטומי (המשך)	
	<p>הכוחות הגרעיניים (המשך)</p> <p>כל נוקלאון פועל באופן הדדי על מספר מצומצם של נוקלאונים שכנים (תכונת הרוויה). בנוסף לזה, הכוחות הגרעיניים תלויים בכיווני הספינים.</p> <p>השרטוט משמאל מציג את תלות האנרגיה הפוטנציאלית של שני פרוטונים בעלי ספינים מקבילים.</p>
$\Delta M = Zm_p + (A - Z)m_n - M$	<p>פגם המסות</p> <p>מסת הגרעין M תמיד קטנה יותר מסכום מסות המנוחה של הנוקלאונים המרכיבים את הגרעין. ההפרש בין סכום מסות המנוחה של הנוקלאונים לבין מסת הגרעין נקרא – פגם המסות:</p> <p>על ידי פגם המסות נקבעת אנרגיית הקשר של נוקלאון, השווה לעבודה שאותה יש להשקיע כדי לעקור את הנוקלאון מהגרעין (ללא הקניית אנרגיה קינטית).</p>
$\Delta E = \Delta M \cdot c^2$	<p>אנרגיית הקשר</p> <p>אנרגיית הקשר של הגרעין שווה לעבודה שיש לבצע כדי לפרקו לנוקלאונים שאינם מקיימים יחסי גומלין בינם לבין עצמם, כאשר האנרגיה הקינטית שלהם שווה לאפס.</p> <p>אנרגיית הקשר של הגרעין מחושבת על פי הנוסחה:</p> <p>ובקירוב היא נמצאת ביחס ישר למספר הנוקלאונים בגרעין.</p>

הגרעין האטומי (המשך)

<p style="text-align: center;">תלות E_N במסה אטומית A</p> 	<p style="text-align: center;">אנרגיית הקשר הסגולית</p> <p>אנרגיית הקשר המחושבת לנוקלאון אחד:</p> $E_N = \frac{\Delta E}{A}$ <p style="text-align: right;">A – מסה אטומית</p> <p style="text-align: right;">ΔE – אנרגיית הקשר של הגרעין</p>
<h3 style="margin: 0;">תהליכים רדיואקטיביים</h3>	
<p>גרעינים כבדים במצב יסוד לעתים קרובות אינם יציבים, ומתפרקים באופן ספונטני; כתוצאה מכך נוצרים גרעינים חדשים (גרעיני בת) וחלקיקים אחרים. תכונה זאת של הגרעין נקראת רדיואקטיביות, והגרעינים מסוג זה נקראים גרעינים רדיואקטיביים.</p>	
${}_Z X^A \rightarrow {}_{Z-2} Y^{A-4} + {}_2 \text{He}^4$	<p style="text-align: center;">התפרקות אלפא</p> <p>מגרעין רדיואקטיבי נפלטים חלקיקי אלפא (גרעיני הליום ${}_2 \text{He}^4$) המורכבים משני פרוטונים ושני ניוטרונים. המספר הסידורי Z של גרעין הבת קטן ב-2, ומסת A קטנה ב-4.</p>
${}_Z X^A \rightarrow {}_{Z+1} Y^A + e^- + \bar{\nu}_e$	<p style="text-align: center;">התפרקות ביתא שלילית</p> <p>מהגרעין הרדיואקטיבי נפלטים אלקטרונים ואנטי-ניוטרינו אלקטרוני (חלקיק חסר מסה ומטען שאינו משנה את סוג היסוד). המספר הסידורי של גרעין הבת גדל ב-1, והמסה האטומית אינה משתנה.</p>
${}_Z X^A \rightarrow {}_{Z-1} Y^A + e^+ + \nu_e$	<p style="text-align: center;">התפרקות ביתא חיובית</p> <p>מהגרעין נפלטים פוזיטרון וניוטרינו אלקטרוני. המספר הסידורי של גרעין הבת קטן ב-1, והמסה האטומית אינה משתנה.</p>

תהליכים רדיואקטיביים (המשך)	
${}_Z X^A + e^- \rightarrow {}_{Z-1} Y^A + \nu_e$	<p>לכידת האלקטרון (לכידת – K)</p> <p>הגרעין תופס אלקטרון הנמצא בקליפה אלקטרונית K, ואחד הפרוטונים הופך לניוטרון; המספר הסידורי Z של גרעין הבת קטן ב- 1. כמו כן נפלטים נויטרונים אלקטרוני וקרנת רנטגן.</p>
$({}_Z X^A)' \rightarrow {}_Z X^A + \gamma$	<p>פליטת גמא</p> <p>הגרעין המעורר X' עובר למצב יסוד ופולט קרינה אלקטרומגנטית בעלת אורכי גל בתחום: $(10^{-3} - 10^{-4}) \text{ nm}$</p>
${}_Z X^A \rightarrow {}_{Z1} Y^{A1} + {}_{Z2} Y^{A2} + 2n$	<p>התפרקות ספונטנית של הגרעין</p> <p>הגרעין מתפרק ללא השפעה חיצונית, לשני חלקים, המלווה בפליטת שניים-שלושה נייטרונים. גרעיני אורניום ופלוטוניום מתפרקים לשני רסיסים בעלי מסות שונות.</p>
${}_Z X^A \rightarrow {}_{Z-1} Y^{A-1} + {}_1 H^1$	<p>פליטת פרוטון</p> <p>הגרעין פולט פרוטונים – שהם גרעיני האיזוטופ הקל של מימן; מספר Z של הגרעין החדש קטן ב- 1, והמסה A גם קטנה ב- 1.</p>
	<p>חוקי רדיואקטיביות</p> <p>1. התפרקות רדיואקטיבית אינה תלויה בתנאים חיצוניים (כמו טמפרטורה, לחץ, תהליכים כימיים).</p>

תהליכים רדיואקטיביים (המשך)



חוקי רדיואקטיביות (המשך)

2. ספקטרום האנרגיות של חלקיקי אלפא וגמא הוא קווי (ערכי אנרגיה בודדים), אנרגיות של חלקיקי ביתא משתנות באופן רציף מאפס עד ערך מקסימלי כלשהו.

הפרדת החלקיקים נעשית בשדה מגנטי רוחבי, כמו שמתואר בשרטוט משמאל.

3. כמות הגרעינים הרדיואקטיביים משתנה בזמן על פי הנוסחה:
כאשר:

N_0 – מספר הגרעינים ברגע $t = 0$

N – מספר הגרעינים ברגע t

T – זמן מחצית החיים השווה לפרק הזמן שבמהלכו יתפרקו מחצית הגרעינים.

λ – הסתברות להתפרקות של גרעין אחד בשנייה אחת (קבוע ההתפרקות):

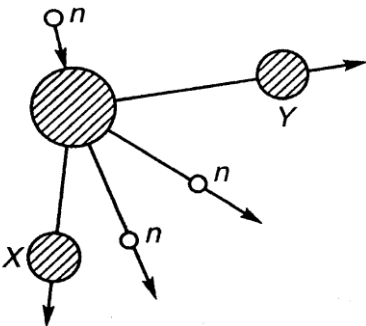
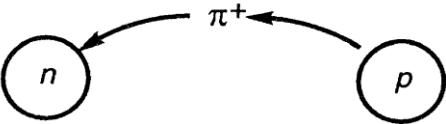
4. כתוצאה מהתפרקות רדיואקטיבית נוצרים גרעינים חדשים בעלי מספרים סידוריים Z אחרים (למעט קרינת גמא).

תגובות גרעיניות

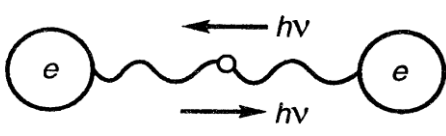
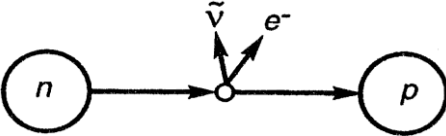
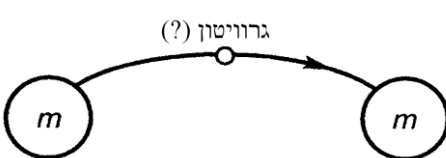
יחסי גומלין של כוחות תוך-גרעיניים עם חלקיקים אלמנטריים או עם גרעינים אחרים גורמים לתהליך שבמהלכו הגרעין עובר למצב מעורר או שהוא הופך לגרעין מסוג אחר. תהליך כזה נקרא **תגובה גרעינית**. על מנת שהיא תתרחש דרושה התקרבותם של גרעין וחלקיק למרחק בסדר גודל של 10^{-15} מטר, אשר בו מתגלים כוחות גרעיניים. כדי להגיע למרחק כזה, מקרינים במאיצי חלקיקים את הגרעין בשטף חלקיקים בעלי אנרגיה קינטית גבוהה.

תגובות גרעיניות (המשך)	
	<p style="text-align: center;">חתך פעולה של תגובה גרעינית</p> $\sigma = \frac{\Delta N}{N_0 \cdot n \cdot \Delta Z}$ <p>ΔN – מספר חלקיקים המשתתפים בתגובה גרעינית.</p> <p>N_0 – צפיפות חלקיקים באלומה מקבילה הפוגעת במטרה (מספר חלקיקים העוברים דרך משטח בשטח של 1 מ"ר בשנייה אחת).</p> <p>ΔZ – עובי המטרה (קטנה מספיק כדי שהחלקיקים יעברו דרך המטרה).</p> <p>n – מספר הגרעינים בשטח של 1 m² של המטרה.</p> <p>יחידות של החתך: מטר מרובע, m².</p>
<p>האנרגיה שמשתחררת בכל מקרה של תהליך תוך-גרעיני.</p>	אנרגיית התגובה
<p>האנרגיה המינימלית של חלקיקי האלומה הפוגעת הדרושה לקיומו של תהליך גרעיני.</p>	הסף האנרגטי של התגובה
<p>1. מטען 2. מסה – אנרגיה 3. תנע 4. תנע זוויתי</p> <p>מלבד החוקים האלה מתקיים חוק שימור מספר בריואני ומספר לפטוני, וגם חוקי שימור נוספים הקשורים במודלים של חלקיקים אלמנטריים.</p>	<p style="text-align: center;">חוקי שימור בתגובות גרעיניות</p> <p>במהלך תגובה גרעינית מתקיימים חוקי השימור הבאים:</p>

תגובות גרעיניות (המשך)	
${}_4\text{Be}^9 + {}_2\text{He}^4 \rightarrow {}_6\text{C}^{12} + {}_0\text{n}^1$	יצירת נויטרונים
${}_{13}\text{Al}^{27} + {}_2\text{He}^4 \rightarrow {}_{15}\text{P}^{30} + {}_0\text{n}^1,$ ${}_{15}\text{P}^{30} \rightarrow {}_{14}\text{Si}^{30} + \beta^+ + \nu_e$	יצירת פוזיטרונים
${}_1\text{H}^2 + \gamma \rightarrow {}_0\text{n}^1 + {}_1\text{p}^1$	אפקט פוטו-אלקטרי גרעיני
${}_5\text{B}^{10} + \text{n} \rightarrow {}_3\text{Li}^7 + {}_2\text{He}^4$	גלאי נויטרונים
$\beta^- + \beta^+ \rightarrow 2\gamma$ $\text{p} + \bar{\text{p}} \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^- + \pi^- + \pi^0$	תגובת אניהילציה אלקטרון + פוזיטרון: פרוטון + אנטי-פרוטון:
${}_1\text{H}^2 + {}_1\text{H}^3 \rightarrow {}_2\text{He}^4 + {}_0\text{n}^1$ 17.8 MeV	היתוך גרעיני יצירת גרעינים קלים בטמפרטורות גבוהות ($10^7 - 10^8 \text{ }^\circ\text{K}$): שחרור אנרגיה במהלך התגובה:
${}_{92}\text{U}^{235} + {}_0\text{n}^1 \rightarrow {}_{92}\text{U}^{236} \rightarrow {}_{36}\text{X}^{96} + {}_{56}\text{Y}^{140}$	ביקוע גרעינים כבדים רסיסי הגרעינים המסומנים באופן סכמתי ב- X וב- Y, משחררים נויטרון אחד או שניים.

תגובות גרעיניות (המשך)	
	<p>ביקוע גרעינים כבדים (המשך)</p> <p>כמות קטנה של נויטרונים נוספים נוצרת בתהליך הביקוע עצמו.</p> <p>האנרגיה המשוחררת בתגובה היא כ – 0.8 Mev</p> <p>השרטוט משמאל מתואר את תהליך הביקוע.</p>
$p + \beta^- \rightarrow n + \nu$	<p>לכידת האלקטרון</p> <p>מקליפה אלקטרונית K (לעתים מקליפות רחוקות יותר – L או M) נתפס אלקטרון אחד. בתוך הגרעין מתרחשת התגובה:</p> <p>במהלכה אחד הפרוטונים הופך לנויטרון ונפלט נויטרינו.</p>
$({}_Z Y^A)' \rightarrow {}_Z Y^A + \gamma$	<p>התפרקות גמא</p> <p>הגרעין מעורר על ידי הפצצה של חלקיקים ופוטונים; תוך כדי המעבר חזרה לרמת היסוד נפלט קוונט גמא (קרינת גמא):</p>
פעולות הדדיות בסיסיות	
<p>את כל הכוחות הנחקרים בפיזיקה אפשר לשייך לארבעה סוגים של פעולות הגומלין ההדדיות הבאות: חזק, חלש, אלקטרומגנטי וגרביטציוני.</p>	
	<p>כוחות חזקים</p> <p>הכוחות שפועלים בתוך הגרעין בין הנוקלאונים בטמפרטורות לא גבוהות במיוחד, וקושרים אותם אחד למשנהו.</p> <p>הכוחות החזקים מתקיימים הודות להחלפה הדדית בין הנוקלאונים של חלקיקי קשר מיוחדים הנקראים פי-מזונים.</p>

פעולות הדדיות בסיסיות (המשך)

300 meV		<p>כוחות חזקים (המשך)</p> <p>מסת המנוחה של פי-מזונים היא כ:</p> <p>הכוחות החזקים פועלים גם בין הקווארקים; במקרה זה הכוחות מתקיימים על ידי החלפת חלקיקים הנקראים גלואונים.</p>		
		<p>כוחות אלקטרומגנטיים</p> <p>כוחות אלה פועלים בין חלקיקים טעונים, באמצעות שדה אלקטרומגנטי. הכוחות פועלים על ידי החלפת פוטונים.</p>		
		<p>הכוחות החלשים</p> <p>כוחות אלה פועלים בין כל החלקיקים, וטבעם בהחלפת חלקיקי ביניים הנקראים בוזונים. לדוגמה: התפרקות ביתא.</p>		
		<p>כוחות גרביטציה</p> <p>לדוגמה: משיכה בין גופים; הפעולה מתבצעת על ידי החלפת חלקיקים הנקראים גרביטונים (טרם נתגלו).</p>		
תכונות עיקריות של הכוחות	חזקים	אלקטרו-מגנטיים	חלשים	גרביטציה
מרחק פעולה (מטרים)	10^{-15}	∞	10^{-17}	∞
עוצמה יחסית	1	$\frac{1}{137}$	10^{-14}	10^{-39}

פעולות הדדיות בסיסיות (המשך)				
גרביטציה	חלשים	אלקטרו- מגנטיים	חזקים	תכונות עיקריות של הכוחות
0	100 GeV	0	גלואון – 0 פי-מזון – $\approx 300 \text{ MeV}$	מסת מנוחה של החלקיק, mc^2
2h	h	h	h	ספין החלקיק
אינו ידוע	10^{-10}	10^{-20}	10^{-23}	זמן החיים (הזמן האופייני), sec