

כלי הוראה להעמקת ההבנה בנושא ביקוע גרעיני

תוכן

2.....	מבוא
5.....	חוברת הלימוד – המדע והטכנולוגיה של ביקוע גרעיני
7.....	הכלי הדידקטי - גליון אלקטרוני על בסיס תוכנת אקסל
10.....	פרק ראשון : מה קובע אלו יסודות ואלו איזוטופים ימצאו בטבע ואילו לא?
10.....	נוסחת המסה החצי אמפירית של ויצקאר –
13.....	הגרעינים היציבים והרדיואקטיביים הקיימים בטבע
17.....	השפעת גודל מקדמי נוסחת המסה על עמק היציבות
19.....	פרק שני : תהליך הביקוע
19.....	אנרגית קשר לנוקלאון והרווח האנרגטי בביקוע
23.....	סיכום בעזרת סרטון
23.....	פרק שלישי : יישום התיאוריה המדעית והפן הטכנולוגי

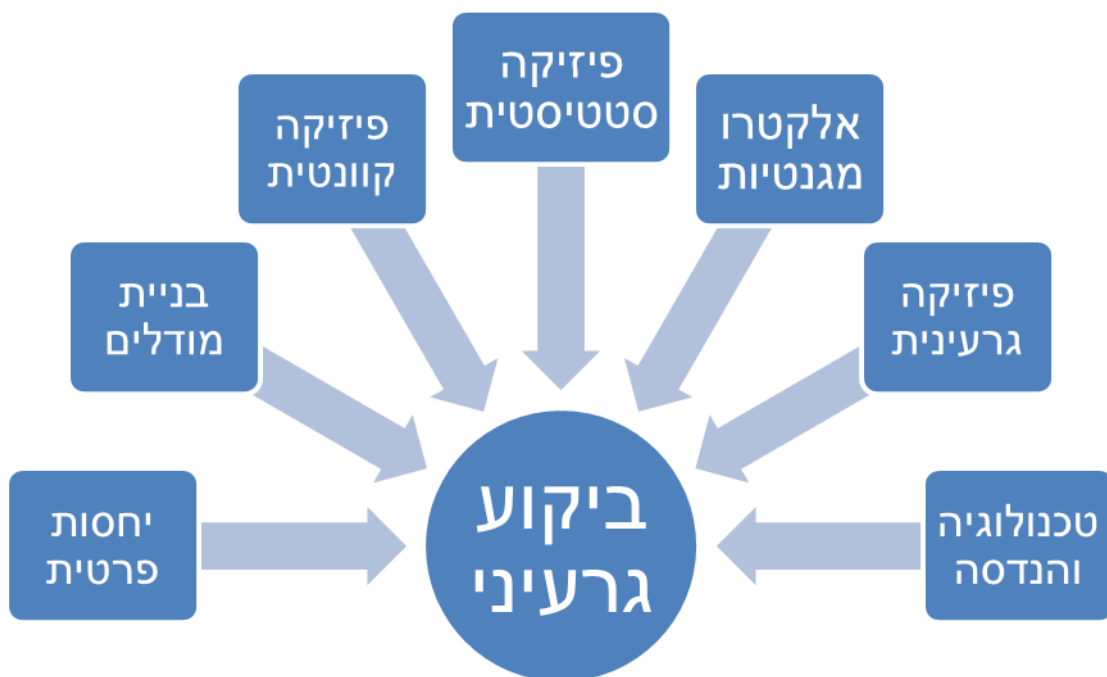
מבוא

נושא ה"ביקוע הגרעיני" הינו תחום שנמצא בכותרות העיתונים. בימים אלו מושגים כמו "צנטריפוגות", "העשרת אורניום", "מעצמה גרעינית" נמצאים בכותרות בהקשר האירני. לפני מספר שנים (2011) גל צונאמי שגרם לפגיעה רצינית בתחנת כוח גרעינית ביפן העלה לכותרות מושגים כמו "ליבת הכור", "מים כבדים", "קרינה רדיואקטיבית" ועוד.

הכותרות הללו מעוררות שאלות אצל התלמידים והמורה לפיזיקה הוא הראשון שיתבקש לתת את המענה.

היות שהפיזיקה הוא מדע העוסק בתחומים רבים, אין ציפייה שהמורה לפיזיקה ישלוט בכל התחומים ולכן לרוב, המורים לפיזיקה, לא ידעו לענות לתלמידים על שאלותיהם בנושא.

בשל נוכחות הנושא בכותרות העיתונים, הבנו שקיים צורך לחזק אצל המורים לפיזיקה את הידע סביב נושא הביקוע הגרעיני ובכך להעלות את רמת המקצועיות של המורה. בנוסף, נושא הביקוע הגרעיני כפי שאנו בחרנו להציגו משלב תחומים רבים מעולם הפיזיקה שאינם בתכנית הלימודים התיכונית כמו: פיזיקה קוונטית, פיזיקה סטטיסטית, יחסות פרטית, פיזיקה גרעינית, אלקטרומגנטיות ועוד רבים. מורה ששולט בחומר יחד עם הסקרנות הטבעית שהנושא מעורר אצל התלמידים, מאפשר לפתוח בפני התלמידים אשנב לפיזיקה ברמה גבוהה יותר.



לצורך הכשרת מורים בתחום כתבנו חוברת לימוד ופיתחנו כלי הוראה שניתן להשתמש בו במהלך השתלמות מורים בנושא.

החלק הראשון של העבודה ייקרא "חוברת הלימוד" ובה השתדלנו לכתוב בצורה קריאה ובהירה את הידע המדעי הנדרש על מנת להבין את נושא הביקוע הגרעיני. אנו רואים חוברת הסבר זו כדבר העומד בפני עצמו ובעלת חשיבות גדולה משום שהיא מנגישה את הנושא על מורכבותו הרבה לקורא, תוך ניסיון לרכז במקום אחד עקרונות ורעיונות פיזיקליים שונים העומדים בבסיס הנושא, וכל זאת בעברית ובפורמט נוח להדפסה וללימוד.

בחלק השני של העבודה קיים הסבר על כלי ההוראה שפיתחנו והצעה לדרך שבה ניתן להשתמש בכלי זה בשילוב דפי עבודה, משימות, שאלות לדין וסרטונים.

הכלי המדובר הינו קובץ אקסל הבנוי מחמש גליונות שונים. לכל גיליון מטרה משלו כפי שיפורט בהמשך. הכלי מלמד חלק מהנושאים המוסברים בחוברת הלימוד בצורה אינטראקטיבית ומאפשר הבנה ברמה גבוהה יותר. חשוב לציין שמדובר בכלי שצריך להופיע בנוסף להסברים בחוברת ולא במקומם. שכן, מטרת הכלי הינה העמקה נוספת במה שכבר מוסבר בחוברת הלימוד.

כלי זה כבר נזכר בחלק הראשון של העבודה אך כאן אנו נפרט ונרחיב כיצד לדעתנו נכון להשתמש בו על רצף הלימוד שמעניקה החוברת.

מסמך זה עוסק בתחום הדידקטי של הוראת הנושא ומקומו בצמוד לחוברת ולקובץ האקסל. הוא נועד להסביר את השימוש בהם, ואנו משתדלים להמנע בו מהסברים בנושא גופו אלא רק לציין

נקודות לדיון, אי הבנות אפשריות, דגשים בהוראת הנושא פעילויות וצורות מומלצות לשימוש בכלי ההוראה שפיתחנו.

קהל היעד העיקרי שאליו אנו מפנים את כלי ההוראה הזה ואת חוברת הלימוד הינם קהל המורים לפיזיקה, עדיף להשתמש בו במהלך השתלמות מורים בנושא ביקוע גרעיני אבל לא רק. למעשה, כל אדם שיש לו רקע בסיסי במדעים, מכיר את השפה המדעית ומתעניין בנושא, יכול להנות מהחוברת ומכלי ההוראה, אם כי בחלקים מסויימים יתכן כי יזדקק לתווד.

חוברת הלימוד – המדע והטכנולוגיה של ביקוע גרעיני

חוברת הלימוד הנה החלק הראשון של העבודה, ובה מוסבר נושא הביקוע במושגים פשוטים ונגישים.

בחוברת הלימוד שבנינו נעשה נסיון לרכז ידע רלוונטי לנושא המספק על מנת להבין נקודות מפתח ורעיונות מרכזיים בתהליך הביקוע. בבניית החוברת נעשה נסיון לבנות אותה באופן הדרגתי כך שכל נושא ומושג אשר נעשה בו שימוש יוסבר קודם לכן, הושם דגש מיוחד על היתם של ההסברים מובנים ופשוטים, תוך שימוש בכלים ויצוגים שונים כמו דיאגרמות, גרפים ואיורים. בחוברת השתדלנו להסביר חלקים שונים מנקודות מבט שונות תוך דגש על הצורה בה כל נקודות המבט משתלבות זו בזו ונותנות תמונה שלמה ומקיפה יותר.

נושא הביקוע הגרעיני והגרעין בכלל הנו נושא נרחב ביותר, ונושאים הנמצאים בבסיסו, כמו תורת החלקיקים, והכוחות היסודיים נמצאים כעת בחזית המחקר ועדיין אינם מובנים לחלוטין.

חוברת לימוד המרכזת ידע רלוונטי לנושא ויכולה לשמש בנפרד ללימוד עצמי ולהעשרה או כבסיס להעברת השתלמות בנושא.

על מנת להשתמש בחוברת ללימוד עצמי יש צורך בידע בסיסי מסויים בפיזיקה, כמו תפיסה בסיסית של סדרי גודל, הכרת דרכי סימון מדעיים, ידע בסיסי בחשמל ומכניקה, הבנה של מושגים דוגמת כוחות ואנרגיה, מודל האטום של בוהר, ועוד מושגים ונושאים אשר לגביהם ההסבר אשר מופיע בחוברת הנו בחזקת "תזכורת" בלבד מתוך ההנחה שהם מוכרים ומובנים כבר לקורא.

הצורה המועדפת אשר אליה כוונו את בניית החוברת, הנה להשתמש בה כבסיס להשתלמות, אשר בה מרצה הבקיא היטב בחומר, ואשר הרקע שלו בפיזיקה הנו יותר מאשר בסיסי (למשל, מורה לפיזיקה אשר כבר עבר השתלמות בנושא וזוכר היטב את החומר), ילמד מורים אחרים לפיזיקה. לשם כך ניתן לבנות מצגת על בסיס החוברת, אשר תלווה את הלימוד ותשתמש בראשי הפרקים, הנושאים והאיורים, הגרפים והתרשימים המופיעים בחוברת. ובהתאם לקהל היעד ולסגנונו המיוחד יבחר במה להרחיב ובמה לקצר. כן ישולבו פעילויות אשר יעשו שימוש בין השאר בכלי ההוראה ובשאלות והתרגילים המוצעים בהמשך במקומות המתאימים כפי שיוצע.

בהתאם לרמת הלומדים ולמסגרת הלימוד ניתן להשתמש בכל החוברת או בחלקה, היות והנושא משלב מספר תחומים כה רב. ניתן לקחת נושאים ספציפיים מתוכה וכן לשנות את סדר הלמידה לפי שיקול דעתו של המרצה, אם כי אנו ממליצים על הסדר בו החוברת בנויה כעת.

בחוברת שלושה פרקים :

הפרק הראשון, "אנרגיית הקשר הגרעינית" עוסקת בשיקולים אשר מכתיבים את קיומם של גרעינים שונים, ובשאלה מדוע איזוטופים מסויימים קיימים בטבע ואילו אחרים אינם קיימים באופן חופשי. מהם התהליכים הגרעיניים היכולים להתרחש באופן ספונטני ומתי הם יתרחשו.

אנו בחרנו להתמקד במודל פשוט יחסית, הוא מודל הטיפה, לפיו נבנתה נוסחה המכונה "נוסחת המאסה החצי אמפירית" של ויצזאקר כבסיס לפרק זה.

הפרק השני, "תהליך הביקוע הגרעיני" עוסק בדינמיקה של הביקוע, מה מגביל את הביקוע הגרעיני, מגדיל או מקטין את ההסתברות להתרחשותו. מדוע ניתן לקבל אנרגיה בתהליך זה, ועוד. את הדינמיקה המדוייקת אשר מובילה לצורה הספציפית בה הגרעין מתבקע ניתן להבין רק באמצעות מודלים מורכבים יותר אשר אינם מוסברים בחוברת, אך באמצעות נוסחת המסה ומושגים אשר נלמדו בפרק הראשון וכן מושגים נוספים אשר מוסברים בפרק זה ניתן להסביר ולהבין היבטים רבים מאד של הביקוע.

הפרק השלישי, "יישום התיאוריה והפן הטכנולוגי" עוסק בשימוש בביקוע גרעיני בפועל. מהם האתגרים ההנדסיים וכיצד מתמודדים אתם כיום. הפרק עוסק בעיקר בשימוש באנרגיה גרעינית להפקת חשמל ומעט בשימוש לפצצות גרעיניות.

בשל ריבוי התחומים בהם הנושא עוסק, נאלצנו להגביל את עצמנו ברמת הפירוט בחלקים מסויימים של החוברת. מרצים הבקיאים בנושא ומעוניינים בכך ויודעים כי הרמה והרקע של תלמידיהם מספקים, יכולים להרחיב במקומות שונים מעבר לנכתב בחוברת.

הכלי הדידקטי - גליון אלקטרוני על בסיס תוכנת אקסל

קובץ האקסל המצורף הינו כלי שפיתחנו במטרה להבין לעומק את נוסחת המסה החצי אימפירית של ויצזקאר וכיצד בעזרת נוסחה זו ובעזרת תהליכים גרעיניים שונים ניתן להבין קיום ואי קיום של איזוטופים בטבע. כשלב שני, בעזרת הטבלאות השונות המופיעות בקובץ ניתן גם להבין תהליכים של רווח והפסד אנרגטי מה שיסביר קיום ואי קיום של תהליכי ביקוע שונים.

הקובץ בנוי מגליונות שונים. הגליונות בנויים כטבלאות, כל תא בטבלה מייצג את הגרעין התיאורטי בעל מספר הפרוטונים ומספר הנייטרונים בהתאם לעמודה ולטור בו הוא נמצא. העמודות השונות (הציר האופקי) מייצגות גרעינים תיאורטיים עם מספר פרוטונים שונה, והשורות (הציר האנכי) מייצגות גרעינים עם מספר נייטרונים שונה. מספר הפרוטונים המקסימלי המופיע בטבלאות הוא 150, מספר הנייטרונים המקסימלי הנו 250. ניתן לגלול (לנוע בגליון) לאורכו ולרוחבו של הגליון, על מנת לבדוק את התוצאות המתקבלות עבור הגרעינים השונים. בכל גליון, מומלץ להקטין ולהגדיל את העמוד על מנת לראות תמונה מלאה יותר באמצעות בחירת גודל תצוגה בתפריט או על ידי לחיצה על מקש Ctrl והזזת גלגל העכבר. כל גליון מתייחס להיבט אחר של הנוסחא והחישובים המתמטיים השונים מתבססים על הגליונות הקודמים. שינוי נתונים בגליון מסוים ישפיע בהכרח גם על הנתונים בגליונות האחרים. לכן, כל הגליונות נעולים כך שלא ניתן לשנות בהם ערכים או נוסחאות, פרט למקדמי הנוסחא בגליון המכונה "סימולציה" כפי שנסביר בהמשך.

בגליון הראשון, המכונה "אנרגיית קשר" ישנה טבלה שבה מחושבת אנרגיית הקשר ביחידות MeV עבור כל צירוף נוקלאונים לפי נוסחת המסה. בכל משבצת רשומה אנרגיית הקשר של צירוף שונה כאשר מימין לשמאל אנו עולים במספר הפרוטונים, ומלמעלה למטה אנו עולים במספר הנייטרונים.

החישובים נעשו על סמך נוסחת המסה של ויצזקאר תוך שימוש בארבעת איברי הנוסחא הראשונים. כברירת מחדל נלקחו הפרמטרים הנדרשים לחישוב אנרגיית הקשר, המקדמים של האיברים השונים בנוסחא, מתוך הספרות. פרמטרים אלו ניתן לשנות מאוחר יותר. כל החישובים בקובץ והתוצאות המתקבלות מתבססות אך ורק על תוצאותיה התיאורטיים של הנוסחא.

בעזרת הטבלה שהתקבלה ניתן לבדוק, משיקולים של תעודף אנרגטי אם תהליך גרעיני מסוים יתקיים:

טפטוף נייטרון למשל, הנו מעבר ממשבצת למשבצת בכוון למעלה. לו אנרגיית הקשר המחושבת במשבצת מסוימת קטנה מאנרגיית הקשר במשבצת מעליה, הרי גרעין המכיל צירוף נוקלאונים המתאים לאותה משבצת יאבד נייטרון וכעת צירוף הנוקלאונים יתאים למשבצת מעליו. אם שוב

אנרגיית הקשר קטנה מאשר המשבצת מעליו, יאבד שוב נייטרון ויעלה בעוד משבצת. כך יחזור על התהליך שוב ושוב כל עוד זהו תהליך מועדף מבחינה אנרגטית. באותו אופן, טפטוף פרוטון הנו מעבר למשבצת הסמוכה מימין. פליטת בטא פלוס או בטא מינוס הנו מעבר אלכסוני למשבצת הסמוכה מימין למטה או משמאל למעלה, ופליטת אלפא הנה מעבר שתי משבצות למעלה ושתיים ימינה. כל אחד מהתהליכים יקרה לו אנרגיה הקשר המחושבת במשבצת ה"מיועדת" גדולה יותר מאשר במקורית. ברגע שהגענו למשבצת שלא ניתן לעבור ממנה למשבצת אחרת בעזרת התהליכים הגרעיניים הנ"ל גרעין זה מוגדר להיות גרעין יציב. אוסף הגרעינים הללו מוגדרים להיות ב"עמק היציבות".

בגליון השני המכונה "עמק היציבות, קרינת בטא וטפטוף" מופיעה טבלה צבעונית. בטבלה זו, חושבו אפשרויות השונות לתהליכים הגרעיניים הנ"ל בהסתמך על החישובים מהגליון הראשון. כל משבצת סומנה בהתאם לתהליך שתעבור:

טפטוף פרוטון נצבע בורוד וסומן באות p , טפטוף נייטרון נצבע בסגול וסומן באות n , קרינת בטא פלוס סומן ב $B+$ ונצבע בכתום וקרינת בטא מינוס סומן ב $B-$ ונצבע בכחול. משבצות (צירופי נוקלאונים) אשר לא יעברו תהליך של דעיכה גרעינית צבועות בירוק בהיר ומסומנות באות s , צירופים אלו הנם יציבים וזהו המופע של יסודות אלו בטבע. קו עקום זה מכונה "עמק היציבות". המשבצות הלבנות הן גרעינים שלא יתקיימו לעולם משום שאנרגיית הקשר שלהם שלילית.

בגליון השלישי המכונה "קרינת אלפא" מופיעה טבלה שבה ניתן לראות מהם הצירופים שעשויים לעבור תהליך פליטת אלפא. גרעינים אלו נצבעו בורוד וסומנו ב $a++$. בתחילת הגליון בפינה, במרוחק מהאזור בו נמצאים רוב הגרעינים שיתפרקו, מצוי גרעין בודד המסומן כצפוי לדעוך. זהו גרעין הליום 4.

בגליון הרביעי המכונה "אנרגיה לנוקלאון" ישנה טבלה נוספת שבה בכל משבצת מופיע חישוב של אנרגיית קשר ממוצעת עבור נוקלאון יחיד ביחידות של MeV . אנרגיית הקשר הכוללת כפי שחושבה בגליון הראשון חולקה במספר הנוקלאונים הכולל, כלומר, סכום הנייטרונים והפרוטונים.

התאים נצבעו בגווני אפור בהתאם לתוצאה כאשר הגוון מתכהה עבור ערכים הגדולים מ-6, ונהיה כהה יותר ככל שערך התא הנו גבוה יותר. שתי השורות התחתונות בעמוד משמשות לצורך חישוב ומציאת המקסימום של הגליון, וזאת לצורך קביעת הגוונים בהם יצבעו התאים.

הגליון החמישי נקרא "סימולציה". בו, ניתן לשנות את ערכם המספרי של המקדמים בנוסחת המסה ולראות כיצד השינוי ישפיע על החישובים שבוצעו בארבעת הגליונות הקודמים. (למשל, איפוס המקדם הקולוני יגרום לעמק היציבות להראות כקו אלכסוני ישר. הגדלת המקדם הקולוני תגרום לעמק היציבות להראות מעוקם כלפי מטה וכדו').

העמודה האמצעית הנה עמודת הערכים בהם נעשה שימוש לצורך החישובים, ואותה ניתן לשנות. כברירת מחדל הערכים הכתובים בעמודה הנם אלו הלקוחים מהספרות. כדי לחזור לערכים אלו יש להעתיק אותם מהעמודה השמאלית. נזכיר שאת המקדמים של איברי הנוסחא העריכו באמצעות התאמה לנתונים שנמדדו בניסויים מכאן הכינוי "נוסחא חצי אמפירית". יתכן כי בהמשך בעזרת שימוש בתכונות מתקדמות יותר של התוכנה נהפוך קובץ זה לסימולציה אמיתית כדוגמת אלו המופיעים בphet.

הגליון הששי נקרא "גרף" ובו מופיע גרף של אנרגית קשר לנוקלאון כפונקציה של מספר הנוקלאונים עבור האיזוטופים הנמצאים בעמק היציבות. ברגע שמשנים את גודל מקדמי נוסחת המסה בגליון "סימולציה" גם גרף זה ישתנה.

חלקים אלו העוסקים בפן הדידקטי של הוראת הנושא מיועד למרצה אשר בקיא בתחום, קרא ומכיר את החוברת ואת הנושאים.

פרק ראשון: מה קובע אלו יסודות ואלו איזוטופים ימצאו בטבע ואילו לא?

נוסחת המסה החצי אמפירית של ויצקאר –

Weizsäcker's Semi empirical mass formula SEMF

נוסחת המסה החצי אימפירית הנה מודל בסיסי ומופשט בעזרתו ניתן להבין ולהסביר תופעות שונות המתרחשות בגרעינים בטבע. כפי שהוסבר בפרוט בחוברת הלימוד (החלק הראשון של העבודה) הנוסחה כוללת בתוכה רעיונות פיזיקליים בסיסיים מתחומים שונים, את הכוחות הפועלים בגרעין, שיקולים קוונטים וסטטיסטיים שכולם יחד משפיעים על מבנה גרעין האטום ועל יציבותו.

כאשר אנו ניגשים ללמד את נושא הביקוע הגרעיני, בחרנו להתמקד בנוסחה הזו. הנוסחה הנה פשוטה יחסית מבחינה מתימטית והשיקולים שבבסיס האיברים שלה יכולים להיות מובנים לדעתנו בנקל. כן הנה דוגמא הממחישה בצורה טובה דרך חשיבה פיזיקלית המכוונת לבניית מודל "חצי אמפירי" ומה משמעותו של מודל כזה. כמו כן רצוי להדגיש קיומם של מודלים אחרים אשר מסבירים תופעות אחרות נוספות, ואת העובדה כי לא קיים כרגע מודל "מלא" המסביר את כל תופעות הגרעין.

היות שקהל היעד שלנו מגיע מרקעים שונים בפיזיקה, מומלץ להתחיל מהבסיס וליישר קו בין התלמידים השונים. לכן, נתחיל מהמושגים ומהעקרונות הפיזיקליים הבסיסיים הנדרשים להבנת הנוסחה.

מושגים:

- מבנה האטום והגרעין
- נוקלאונים: פרוטונים וניטרונים
- מספר אטומי ומספר מסה
- איזוטופים
- יחידות אופייניות (אלקטרון-וולט, פרמי, יחידת מטען האלקטרון...)

עקרונות פיזיקליים:

- שקילות מסה-אנרגיה $E = mc^2$
- אנרגיית קשר גרעינית ומסת הגרעין
- "שאיפה למינימום אנרגיה"
- הכוחות הפועלים
- הקשר בין כח לאנרגיה $F = -\nabla V$
- עקרון האיסור של פאולי

$$M = Zm_p + (A - Z)m_n - \frac{E_B}{c^2}$$

עבור מי שלא עסק לאחרונה בפיזיקה מעבר לנלמד בתיכון יתכן קושי מסויים להתרגל ולהטמיע מספר עקרונות פיזיקליים. מומלץ להתעכב על הקשר מסה-אנרגיה-כוח וכיצד אחד מוביל לשני. מומלץ להתעכב על רעיון "אנרגיית הקשר", וכיצד היא מתייחסת לאנרגייה הכוללת של הגרעין, ליציבות הגרעין, ולכוחות הפועלים בגרעין.

כמו כן יתכן בלבול בין מושג "מסת המנוחה" כפי שהוא מופיע בנוסחה של איינשטיין לבין תוספת המסה עבור גוף הנע במהירות וצבר אנרגיה קינטית.

רעיון ה"שאיפה למינימום אנרגיה" הנו רעיון מורכב וקשה להבנה. בחוברת בחרנו, וזו גם המלצתנו, לא להכנס אליו לעומק ולציין רק כי מדובר בתכונה סטטיסטית. מרצה הבקיא בפיזיקה סטטיסטית יכול להרחיב מעבר לכך, אם רמת הלומדים והרקע שלהם גבוהים מספיק.

מומלץ להתעכב על כל איבר בנוסחת המסה ועל השיקולים שהובילו לכתיבתו. קל יותר להבין את הרעיונות שמובילים להוספת האיברים ויותר קשה להבין כיצד מתקבלת צורתו הספציפית של איבר מסויים. בחוברת בחרנו לפרט זאת אך באופן חלקי.

מרצה המעוניין להעמיק בנוסחא יכול לבנות פעילות, המתבססת על קובץ האקסל, אשר בה הוא בונה את הנוסחה יחד עם התלמידים איבר אחרי איבר. להעלות שיקולים פיזיקליים ולחשוב כיצד יראה, מתימטית, איבר המתבסס על שיקולים אלו. להעריך את המקדמים ולראות מהם האיזוטופים המתקבלים בעזרת אותם שיקולים, כיצד נראה עמק היציבות בהשוואה לתוצאות הניסוייות, ואיזה שיקולים ישפיעו כך שיראה דומה יותר. אנו לא בנינו פעילות מובנית כזו, אך מרצה אשר יעשה זאת צריך לקחת בחשבון כי היא יכולה לקחת זמן רב, ויש צורך לשם כך להחליף את סדר תני הפרקים וללמד את תהליכי הדעיכה הגרעינית קודם. אך אין ספק שרמת ההבנה של הנוסחא לאחר פעילות כזו תהיה טובה מאד.

שאלה: מדוע הנוסחה נקראת נוסחת המסה אם למעשה מדובר באנרגיית קשר גרעינית?

תשובה: מתורת היחסות למדנו שקיימת שקילות בין מסה לאנרגיה. אנרגיית הקשר הגרעינית מוגדרת להיות ההפרש בין מסת המנוחה של מרכיבי הגרעין (אוסף הפרוטונים וניטרונים במצב שאינו קשור) לבין מסת המנוחה של הגרעין, כלומר, המצב הקשור. בשפה המתמטית: מסת

הגרעין היא- $M = Zm_p + (A - Z)m_n - \frac{E_B}{c^2}$ ונוסחת המסה של הגרעין נותנת את הביטוי המתמטי לאנרגיית הקשר.

פעילות להעמקה בנוסחת המסה

בשביל להבין את החשיבות של נוסחת המסה ואת הקשר בינה לבין קיום ואי קיום של איזוטופים בטבע נשתמש בכלי ההוראה שפיתחנו.

לאחר שהבנו את הרקע התיאורטי שעומד בבסיסה של הנוסחה כשלב ראשון נתרגל שימוש בנוסחה. כלומר, מציאת אנרגיית הקשר של גרעינים שונים על ידי הצבה בנוסחה. לצורך כך נעזר **בדף עבודה 1** המופיע בנספח 1.

בדף מופיעה טבלה ריקה שבה בכל עמודה בטבלה יש מספר קבוע של פרוטונים בגרעין (Z) ובכל שורה, מספר קבוע של ניטרונים (N).

התלמידים נדרשים לפעול לפי ההוראות המופיעות בדף:

- לפניך טבלה שמציגה צירופי נוקלאונים תיאורטיים, חלקם אפשריים וחלקם לא.
- צירה האופקי של הטבלה מתאר את מספר הפרוטונים בגרעין (Z) וצירה האנכי מתאר את מספר הניטרונים בגרעין (N).
- חשב את אנרגיית הקשר של גרעין בעל 5 פרוטונים ו-4 ניטרונים, על ידי הצבת הנתונים המתאימים בנוסחת המסה של ויצקאר:

$$E_B(A, Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_A \frac{(A-2Z)^2}{A}$$

הקבועים הם:

$$a_A \approx 93.14 \text{Mev}, a_c \approx 0.697 \text{Mev}, a_s \approx 17.23 \text{Mev}, a_v \approx 15.56 \text{Mev}$$

- אתר שני גרעינים נוספים אשר אנרגיית הקשר המחושבת עבורם הנה חיובית, ושניים עבורם מחושבת אנרגיית קשר שלילית.
- מה המשמעות של אנרגיית קשר שלילית?

דף עבודה 1: חישוב אנרגיית הקשר הגרעינית עבור נרעינים שונים

למדך טבלה שמציגה גירוי נוקליאונים האנרגיים, חלקם אנטיניים וחלקם לא, בכל נעודה בטבלה יש מספר קבוע של פרוטונים בגרעין (Z) ובכל שורה, מספר קבוע של נייטרונים (N).

- חשב את אנרגיית הקשר של גרעין בעל 5 פרוטונים ו-4 נייטרונים על ידי הגבת התנאים המתאימים בנוסחת המסה של (במקרה):

$$E_B(A, Z) = a_p A - a_n Z^2 - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/2}} - a_s \frac{(A-2Z)^2}{A}$$
- אתר שני נרעינים נוספים אשר אנרגיית הקשר המחושבת עבורם הנה חיובית, והגיים עבורם מחושבת אנרגיית קשר שלילית.
- נסח לחצוב מה המשמעות של אנרגיית קשר שלילית.

$a_p \approx 15.56 \text{ MeV}$
 $a_n \approx 17.23 \text{ MeV}$
 $a_c \approx 0.697 \text{ MeV}$
 $a_s \approx 93.14 \text{ MeV}$

12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	Z / N
													0
													1
													2
													3
													4
													5
													6
													7
													8
													9
													10
													11
													12
													13
													14
													15
													16
													17
													18

לאחר שהתלמידים מצאו את אנרגיית הקשר עבור חמישה גרעינים שונים ניתן לפתוח את הגליון הראשון בקובץ האקסל. **גליון בשם "אנרגיית קשר"**.

בגליון זה מופיעה בדיוק אותה טבלה כפי שהופיעה בדף העבודה רק שבגליון מדובר בטבלה הרבה יותר גדולה ובניגוד לדף העבודה, הפעם הטבלה מלאה. למעשה, בטבלה מצאנו את אנרגיית הקשר ביחידות של MeV עבור כל גרעין תיאורטי שבהמשך נבין אם הוא קיים בטבע או לא ולמה.

ניתן למצוא בגליון האקסל את ארבעת הגרעינים שחישובנו עבורם את אנרגיית הקשר בדף העבודה ולהשוות את התוצאות.

שאלה: מה המשמעות של אנרגיית קשר שלילית?

תשובה: מהביטוי המתמטי עבור מסת הגרעין:

ניתן לראות שאם אנרגיית הקשר שלילית, האנרגיה של מרכיבי הגרעין במצב הלא קשור קטנה יותר מהאנרגיה במצב הקשור. בגלל "השאיפה למינימום אנרגיה" אין סיבה שהנוקלאונים יתחברו לגרעין אחד. במילים אחרות, אנרגיית קשר שלילית משמעותה שהגרעין המדובר לא יתקיים לעולם.

הגרעינים היציבים והרדיואקטיביים הקיימים בטבע

פרק זה מדבר על תהליכים גרעיניים. לא כל הגרעינים התיאורטיים בעלי אנרגיית הקשר החיובית קיימים. הסיבה לכך היא תהליכי דעיכה או התפרקות. התהליכים בהם נדון:

- טפטוף פרוטון וניטרון
- קרינת β^- , β^+
- קרינת α
- עמק היציבות

יש לשים לב כי לכל תהליך הסתברות שונה.

התפרקות אלפא מתרחשת בתהליך מנהור קוונטי עליו לא פרטנו בחוברת.

כל תהליך המתרחש בגרעין כמו כמו כן כל תהליך בכלל מחוייב בשימור גדלים פיזיקליים מסויימים. דוגמא טובה הנה דעיכת בטא, בה משתחרר אנטי נייטרינו ואלקטרון או נייטרינו ופוזיטרון כדי לקיים כללים אלו.

קיימים תהליכים גרעיניים שלא נדונו בחוברת, כמו לכידת אלקטרון אך תהליכים אלו אינם רלוונטים אלינו ולכן אין בכוונתנו להתמקד בהם.

פעילות להבנת התהליכים הגרעיניים

נחזור לקובץ האקסל, גליון בשם "אנרגית קשר". המרצה ידגים כל אחד מתהליכי הדעיכה על הגליון.

כפי שהוסבר קודם, בגליון זה כל אחד מתהליכי הדעיכה הגרעיניים יכול להתבטא בתנועה ממשבצת המתארת את מצב הגרעין לפני תהליך הדעיכה, למשבצת אחרת המתארת את מצב הגרעין לאחר תהליך הדעיכה.

לאחר ההדגמה, התלמידים יקבלו את דף עבודה 2 המופיע בנספח 2. בדף זה התלמידים נדרשים לבצע בעצמם את המעברים בין המצבים השונים של הגרעינים כתוצאה מתהליכי הדעיכה הנ"ל ולסמן את כל הגרעינים היציבים. להלן פרוט המשימה כפי שהיא מופיעה בדף העבודה :

לפניך טבלה שמציגה את אנרגית הקשר ביחידות של MeV, עבור צירופי נוקלאונים תיאורטיים, חלקם אפשריים וחלקם לא. הטבלה בנויה בדיוק כמו הטבלה בדף עבודה 1.

1. בחר מהטבלה גרעין באופן שרירותי ובדוק האם תהליך של טפטוף (פרוטון או נייטרון) יגרום לו להפוך לגרעין יציב יותר. אם כן, עבור לגרעין היותר יציב וחזור על התהליך. אם לא, עבור לשלב הבא.
2. בדוק האם קרינת בטא (חיובית או שלילית) תגרום לגרעין להגיע למצב יציב יותר. אם כן, עבור לגרעין היותר יציב וחזור על התהליך. אם לא, סמן את הגרעין שאליו הגעת ועבור לשלב הבא.
3. חזור על התהליך מספר פעמים.

האם הגרעינים המסומנים יכולים להמשיך לדעוך בתהליכים הגרעיניים הנ"ל? כיצד קבעת זאת?

דף עבודה 2: מציאת עמק היציבות

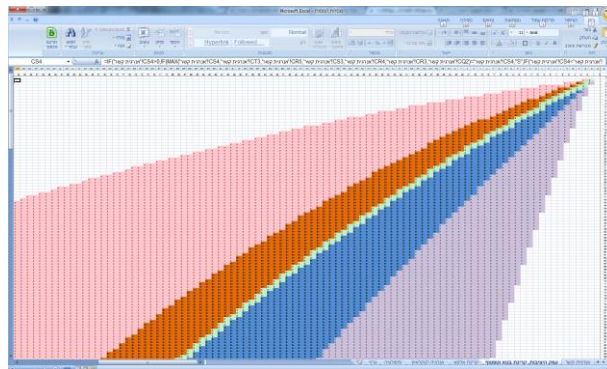
לפניך טבלה שמגישה את אנתזת הקשר בחדות של MeV, עבור יזרמי נקטאונים תיאוריים, חלקם אמפיריים וחלקם סא. הטבלה נבחרה בדיוק כמו הטבלה בדף עבודה 1.

1. מצור הטבלה גרעין באופן שרירותי (בדלת האם תהליך של ספטוף (פרטון) או נטרון) נריום לו להפוך לגרעין יציב יותר. אם כן, עבור לגרעין היותר יציב חזור על התהליך, אם לא, עבור לטבלה הבאה.
2. בדלת האם קרינת בטא (שליטה) תגרום לגרעין להגיע למצב יציב יותר. אם כן, עבור לגרעין היותר יציב וחזור על התהליך. אם לא, סמן את הגרעין שאילוי הגעת יציב לטבלה הבאה.
3. חזור על התהליך מספר מרובים.

האם הגרעינים המסומנים יכולים להמשיך לדורך בתהליכים הגרעיניים הנלוו כמעט וזאת?

z/n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
-290.5	-270.7	-251.2	-231.8	-212.7	-193.7	-175	-156.3	-137.9	-119.5	-101.3	-83	-64.61	-45.84	-26.07	0	
-213	-193.8	-174.9	-156.3	-137.9	-119.9	-102.3	-84.99	-68.17	-51.89	-36.32	-21.76	-8.829	1.0071	3.2159	-25.37	1
-146	-128	-110.3	-93.18	-76.52	-60.44	-45.02	-30.4	-16.76	-4.386	6.2897	14.531	19.011	17.067	2.4569	-43.63	2
-87.7	-71.21	-55.31	-40.07	-25.58	-11.95	0.6494	12.018	21.853	29.727	34.998	36.655	33.016	21.049	-5.316	-60.26	3
-36.75	-22.05	-8.13	4.9253	16.987	27.892	37.432	45.325	51.191	54.499	54.48	49.984	39.205	19.133	-15.65	-75.98	4
7.9735	20.723	32.526	43.258	52.762	60.842	67.244	71.64	73.592	72.502	67.537	57.495	40.574	13.941	-27.12	-91.08	5
47.354	58.08	67.691	76.042	82.952	88.196	91.491	92.475	90.671	85.449	75.949	60.969	38.774	6.766	-39.14	-105.7	6
82.126	90.795	98.193	104.16	108.49	110.95	111.23	108.94	103.58	94.525	80.898	61.534	34.794	-1.684	-51.44	-120.7	7
112.89	119.5	124.7	128.31	130.12	129.88	127.25	121.85	113.18	100.57	83.201	59.938	29.255	-10.99	-63.88	-134.8	8
140.16	144.73	147.77	149.07	148.44	145.59	140.2	131.86	120.08	104.21	83.439	56.699	22.569	-20.89	-76.38	-147.8	9
164.35	166.92	167.84	166.91	163.91	158.57	150.55	139.45	124.77	105.9	82.038	52.185	15.021	-31.21	-88.89	-161.4	10
185.82	186.43	185.29	182.21	176.94	169.22	158.71	145.01	127.64	105.99	79.316	46.662	6.809	-41.84	-101.4	-174.8	11
204.88	203.58	200.45	195.28	187.84	177.86	164.99	148.85	128.97	104.77	75.516	40.331	-1.92	-52.69	-113.9	-188	12
221.77	218.63	213.58	206.41	196.89	184.75	169.66	151.23	129.01	102.43	70.824	33.343	-11.06	-63.71	-126.3	-201.1	13
236.74	231.82	224.91	215.82	204.31	190.12	172.92	152.34	127.93	99.164	65.389	25.817	-20.52	-74.85	-138.7	-214	14
249.98	243.32	234.63	223.69	210.29	194.15	174.96	152.35	125.91	95.102	59.329	17.845	-30.25	-86.09	-151	-226.9	15
261.64	253.32	242.91	230.21	214.99	197	175.93	151.42	123.06	90.358	52.738	9.4998	-40.2	-97.39	-163.3	-239.6	16
271.89	261.96	249.9	235.5	218.56	198.81	175.95	149.64	119.49	85.025	45.694	0.8403	-50.32	-108.7	-175.6	-252.3	17
280.86	269.37	255.72	239.7	221.11	199.68	175.13	147.13	115.3	79.182	38.26	-8.085	-60.59	-120.1	-187.8	-264.9	18

לאחר שהתלמידים מצאו בעצמם חלק מהגרעינים היציבים הם מתבקשים לעבור לגליון "עמק היציבות, קרינת בטא וטפטוף" שבקובץ האקסל. גליון זה הינו "מבט על" על כל התהליכים הגרעיניים האפשריים ברמת התיאוריה.



גרעינים שיעברו תהליך של טפטוף פרוטון נצבעו בורוד וסומנו באות p , טפטוף נייטרון נצבע בסגול וסומן באות n , קרינת בטא פלוס סומן ב $B+$ ונצבע בכתום וקרינת בטא מינוס סומן ב $B-$ ונצבע בכחול. גרעינים אשר לא יעברו תהליך של דעיכה גרעינית צבועים בירוק בהיר ומסומנים באות s , אלו הם הגרעינים היציבים וזהו המופע של יסודות אלו בטבע.

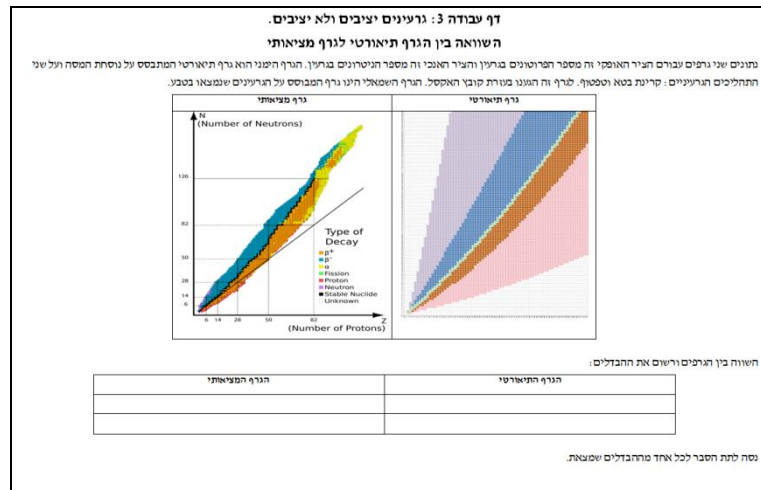
המשבצות הלבנות הן גרעינים שלא יתקיימו לעולם משום שאנרגיית הקשר שלהם שלילית. בשלב זה ניתן להגדיר את מה שמכונה "עמק היציבות": אם נתייחס לטבלה שלנו כגרף שבו הציר האופקי זה מספר הפרוטונים והציר האנכי מספר הניטרונים אז כל הגרעינים היציבים נמצאים לאורך קו עקום המוגדר להיות "עמק היציבות".

שאלה: מדוע עמק היציבות איננו קו ישר?

תשובה: האיברים השונים בנוסחת המסה משפיעים על צורת עמק היציבות. האיבר הקולוני מבטא העדפה לגרעינים עם פחות פרוטונים, מאחר והכוח החשמלי ביניהם פועל לפרק את הגרעין ולהקטין מיציבותו. האנרגיה החשמלית ביניהם גורעת מאנרגיית הקשר. במאבק בין האיבר הקולוני השואף לפחות פרוטונים לבין איבר הסימטריה השואף למספר שווה של פרוטונים

ונייטרונים, גובר בתחילה (בגרעינים קטנים) איבר הסימטריה, התלוי הפוך ב-A ואח"כ הולך וגובר האיבר הקולוני התלוי הפוך ב- $A^{1/3}$.

בדף עבודה 3 המופיע בנספח 3, התלמידים נדרשים לבצע השוואה בין הגרף "שלנו" לבין הגרף מהספרות. מה דומה ומה שונה?



חשוב להדפיס דף זה במדפסת צבעונית. אם לא ניתן, אפשר להקרין את הגרפים, ובדף רק לערוך את ההשוואה.

בניגוד לגרף "שלנו" המראה את כל האיזוטופים ברמה התיאורטית, בגרף מהספרות מופיעים רק גרעינים קיימים בטבע או שהצליחו ליצור אותם באופן מלאכותי בניסוי.

לאחר שהתלמידים רשמו לעצמם את כל ההבדלים הם נדרשים לנסות לתת הסברים מדעיים להבדלים אלו.

מומלץ לבצע מטלה זו בשלב ראשון כעבודה יחידנית, לאחר מכן לעבוד בזוגות ולבסוף לקיים דיון כיתתי על המסקנות של התלמידים.

שני ההבדלים שחשוב לנו להדגיש הם:

הגרף המציאותי	הגרף התיאורטי
עמק היציבות מסתיים עבור 82 פרוטונים	עמק היציבות נמשך עד אינסוף
תהליך הטפטוף כמעט ולא קיים	קיים תהליך של טפטוף מכמות גדולה של גרעינים

ההסבר להבדל הראשון זה קרינת אלפא שלא נלקחה בחשבון בגרף שלנו. קרינת אלפא זו הסיבה העיקרית שבגללה הטבלה המחזורית נעצרת בשלב מסוים ולא נמשכת עד אינסוף.

ניתן לפתוח את גליון "קרינת אלפא" בקובץ האקסל ולראות אותה גם בטבלאות שלנו. ההסבר להבדל השני זה הזמן שתהליך הדעיכה מתרחש. ישנם איזוטופים שדועכים בצורה מיידית ולכן הם בכלל לא קיימים בטבע ולא יופיעו בגרף המציאותי. האיזוטופים הלא יציבים שכן קיימים הם איזוטופים שתהליך הדעיכה שלהם מתמשך זמן רב ולכן ניתן למצא אותם בטבע.

איזוטופים אלו מכונים איזוטופים רדיואקטיביים. ואם כבר הזכרנו רדיואקטיביות נדגיש שלא כל הקרינות הרדיואקטיביות מסוכנות לבריאות.

שאלה: מהו הקו האלכסוני המופיע בגרף התיאורטי?

תשובה: קו זה מסמן את הגרעינים שבהם מספר הפרוטונים שווה בדיוק למספר הניטרונים. הגרף הולך ומתרחק מקו זה ככל שהגרעין גדול יותר.

נמשיך בנסיון להשוות בין התוצאה התיאורטית שקיבלנו בקובץ האקסל לגרעינים הקיימים במציאות רק שעשוי נתמקד בגרעינים הנמצאים ב"עמק היציבות":

בשלב זה נעזר בטבלה המחזורית של מנדלייב המופיעה בויקיפדיה.

להלן לשון המשימה:

- בחר יסוד מהטבלה המחזורית ובדוק מהם האיזוטופים שלו הקיימים בטבע (היציבים והלא יציבים) בעזרת: [הטבלה המחזורית של מנדלייב – ויקיפדיה](#). (בשביל שהיפר הקישור יעבוד, צריך לשמור את דף האינטרנט באותה תיקייה שבה שמור קובץ זה).
- השווה לתוצאה שהתקבלה בעמק היציבות שאליו אנחנו הגענו. העזר בגליון האקסל "עמק היציבות, קרינת בטא וטפטוף".
- חזור על הבדיקה עבור מספר יסודות שונים.

שאלה: מה גורם לאי הדיוקים בטבלת האקסל שקיבלנו?

תשובה: המודל בו אנו משתמשים אינו מודל שלם ואינו נותן תמונה מלאה של המצב. למעשה לא קיים עדיין מודל מדויק שמתאר נכונה את כל תופעות הגרעין המוכרות. כמו כן בחרנו להשמיט ולא לדון באיבר אחד מהמודל, וכן יש במודל ובנוסחה קירובים שונים.

השפעת גודל מקדמי נוסחת המסה על עמק היציבות

פעילות זו הינה הרחבה בנושא הכוחות הפועלים בגרעין ומיועדת לכל מי שרוצה להבין את הנושא יותר לעומק. לא מדובר במשהו הכרחי לרצף הלימוד בהקשר של ביקוע גרעיני. לכן, כל מרצה יכול לבחור האם להכניס שלב זה להשתלמות או לא.

נזכיר שוב את הנוסחת המסה הסמי אמפירית של ויצקאר. כל איבר בנוסחה מושפע מכח אחר הפועל בגרעין.

$$E_B(A, Z) = a_V A - a_S A^{2/3} - a_C \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_A \frac{(A-2Z)^2}{A}$$

כפי שמפורט בחוברת הלימוד, האיבר הראשון והשני המכונים איבר הנפח ואיבר שטח הפנים מושפעים מהכח החזק כפי שבא לידי ביטוי במודל הטיפה. האיבר השלישי נקרא האיבר הקולוני היות שהוא מושפע מהכח הקולוני בין הפרוטונים והרביעי מסתמך על שיקולים קוונטים ונקרא איבר הסימטריה. המקדמים של האיברים השונים התגלו באופן אמפרי מתוך השוואה לנתונים שנמצאו בניסויים. מכאן שמה של הנוסחה "חצי אמפירית". המקדמים, למעשה, קובעים את המשקל שיש לכל אחד מהאיברים על התוצאה הסופית.

אם נשנה את המקדמים של הנוסחה נקבל תוצאות שונות לחלוטין עבור האיזוטופים הקיימים בטבע.

פעילות להבנת השפעת הכוחות בגרעין על עמק היציבות

נפתח את קובץ האקסל- גיליון בשם "סימולציה". בגיליון זה ניתן לשנות או לאפס את קבועי נוסחת המסה ולראות כיצד זה משפיע על עמק היציבות. העמודה האמצעית בעלת הרקע הבהיר היא העמודה שבה ניתן לשנות את המספרים. בעמודה השמאלית מופיעים ערכי הקבועים כפי שהם מופיעים בספרות ולכן כאשר רוצים להחזיר את הנתונים למצבם המקורי צריך להעתיק את המספר המופיע מצד שמאל.

פעילות זו ניתן לבצע בשיטת "נבא צפה הסבר": כל פעם נשנה או נאפס את אחד המקדמים בגיליון "סימולציה", ננסה לנבא כיצד זה ישפיע על צורתו של עמק היציבות, נעבור לגיליון "עמק היציבות, קרינת בטא וטפטוף" ונבדוק את הניבוי אם הוא היה נכון ולסיום, התלמיד יסביר למה עמק היציבות נראה כמו שהוא נראה.

נוסח שלבי המשימה:

- פתח את הגליון בשם "סימולציה"
- שנה את מקדם האיבר הקולוני לאפס ולחץ enter
- נבא ורשום כיצד שינוי זה ישפיע על עמק היציבות.
- עבור לגיליון "עמק היציבות, קרינת בטא וטפטוף" ובדוק אם נבואתך נכונה.
- הסבר מדוע עמק היציבות נראה כמו שהוא נראה.
- חזור לגיליון "סימולציה", החזר את מקדם האיבר הקולוני לערכו המקורי (מופיע בעמודה השמאלית) ושנה איברים אחרים כמו:
 - שנה את מקדם האיבר הקולוני משלילי לחיובי
 - הקטן מעט את גודלו של מקדם איבר הסימטריה
 - הגדל מאד את גודלו של מקדם איבר שטח הפנים (נניח פי עשר)
 - וכדו'...

פרק שני: תהליך הביקוע

בפרק הקודם למדנו על מצבים בהם הרכב נוקלאונים מסוים נמצא באנרגיה מינימאלית אפשרית להרכב זה, שנקרא **מצב היסוד**. אך לא תמיד כך הדבר ויתכן כי גרעין ימצא **במצב מעורר**, כלומר, קיים בגרעין אנרגיה עודפת שהיא "מעל" למצב היסוד שלו.

הנושאים והמושגים העיקריים בפרק זה:

- הביקוע הגרעיני כמקור אנרגיה
- שינוי צורת הגרעין והשפעתו על אנרגיית הקשר
- "מרחב המצבים" והקשר לאנרגיה עודפת.
- מחסום הפוטנציאל לביקוע

הפרק הראשון הנו רקע לפרק זה אך לא ניתן בכלים שנרכשו בפרק הראשון להבין מדוע הגרעין מתבקע כיצד שהוא מתבקע. ההתבקעות אינה סימטרית כמעט לעולם, ומתקבל גרעין קטן יותר וגרעין גדול יותר. הסיבה לכך נעוצה במודל הקליפות אשר לו גרסאות שונות המנבאים בצורה שונה את אנרגיית הקשר הגרעינית, וכל אחד מהם מסביר חלק מתופעות הגרעין בצורה טובה יותר מאחרות. עדיין המודל בו אנו עוסקים נותן הבנה טובה למדי של היבטים שונים בביקוע הגרעין, כמו הרווח האנרגטי, קיומו של מחסום פוטנציאל, הצורך בהגדלת האנרגיה, ועוד.

בפרק זה ישנם רעיונות רבים עליהם אנו "מרפרפים" מבלי להכנס לעומקם, וזאת בשל מורכבותם היחסית. כמו קודם, מרצה הבקיא בנושאים יכול לפרט מעט יותר בהתאם לסוג הקהל.

מושג ה"מצב" בפיזיקה הקוונטית הנו מעט בעייתי לתפיסה למי שאינו רגיל לנושא. בחרנו שלא להתעמק בו. כן קיימת הנחה מובלעת שההסתברות שווה בין כל מצב למצב, הנחה שאינה נכונה אך נותנת תמונה טובה מספיק.

מושג "מרחב המצבים" הנו מושג הלקוח מפיזיקה סטטיסטית. הוא אינו פשוט להבנה, אך ניתן להסבירו בצורה פשטנית ביותר כפי שעשינו בחוברת כבסיס להבנת ההסתברות לביקוע הגרעין.

אנרגיית קשר לנוקלאון והרווח האנרגטי בביקוע

בחוברת נמנענו מלדון בהיתוך גרעיני. אולם מרצה המעוניין בכך יכול להזכיר את הנושא ולהדגים את פוטנציאל הרווח האנרגטי הטמון בתהליך באמצעות גרף "אנרגיה ממוצעת לנוקלאון", שם אנו רואים כי עבור יסודות קלים מברזל אנרגיית הקשר גדלה עם הגדלת הגרעין, ובאופן ספציפי ניתן לראות זאת עבור מימן והליום.

בגרף "אנרגיית קשר ממוצעת לנוקלאון" אנרגיית הקשר הולכת ויורדת החל מהברזל, לכן לכאורה כל יסוד אשר מספר הנוקלאונים שלו הנו פי שניים או יותר מברזל ניתן לחלק לשניים

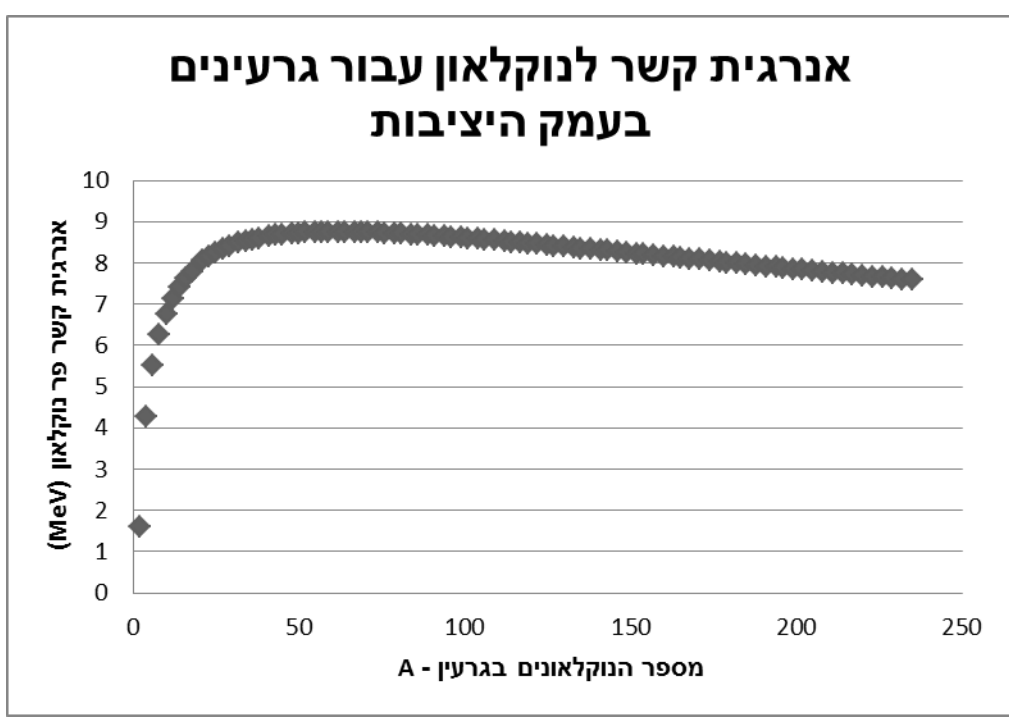
ולהרוויח אנרגיה, אולם יש לקחת בחשבון את העובדה שאנרגיית הקשר בגרף חושבה עבור גרעינים יציבים, אם נחלק גרעין כבד לשני חצאים זהים לא יתקבלו גרעינים יציבים, זאת אומרת שאנרגיית הקשר שלהם תהיה נמוכה יותר מאשר הצרוף היציב של אותו מספר נוקלאונים. למרות זאת ניתן לחשב באופן גס מהי האנרגיה שנקבל לו נחלק את הגרעין לשני חלקים זהים, וכן ניתן לבנות משימה כזו (אנו לא בנינו).

פעילות להבנת נושא "אנרגיית קשר לנוקלאון".

בקובץ האקסל ישנו גליון הנקרא "אנרגיה לנוקלאון". נפתח גליון זה ובו נראה את תוצאת החישוב של אנרגיה ממוצעת לנוקלאון עבור כל איזוטופ תיאורטי. בנוסף, הגליון צבוע בגווני אפור. ככל שהגוון כהה יותר, אנרגיית הקשר לנוקלאון גבוהה יותר. אפשר לשאול את התלמידים אם הם יודעים לאפיין את האזור שבו אנרגיית הקשר לנוקלאון היא הגבוהה ביותר.

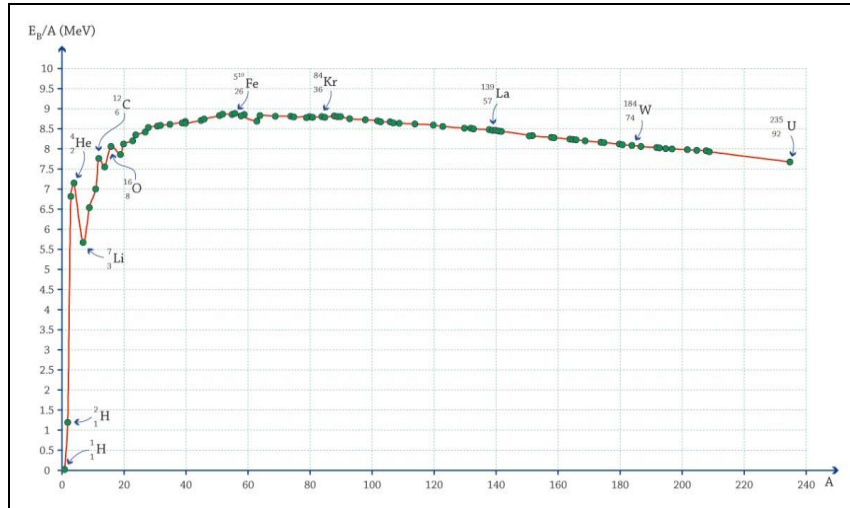
בניית גרף: אנרגיית קשר לנוקלאון עבור הגרעינים הנמצאים בעמק היציבות:

משימה: בעזרת גליון האקסל, עבור על הגרעינים הנמצאים בעמק היציבות ושרטט גרף של אנרגיית קשר לנוקלאון כפונקציה של מספר הנוקלאונים בגרעין. במידה ואין זמן לפעילות זו, ניתן לפתוח את הגליון המכונה "גרף" בקובץ אקסל ולראות את הגרף המדובר לפי הנתונים בגיליונות הקודמים. הגרף המתקבל נראה כך:



שימו לב ששינוי הפרמטרים בגליון "סימולציה" גורם לשינוי במבנה הגרף בגליון "גרף".

נשווה את הגרף שלנו לגרף מהספרות :



שאלות לדיון - ניתוח הגרף :

מהו היסוד היציב ביותר?

מה קורה ליציבות הגרעין ככל שמספר הנוקלאונים גדל?

מדוע אנחנו עוברים לדון באנרגיית קשר ממוצעת לנוקלאון ולא באנרגיית הקשר הכוללת

של הגרעין?

תשובה :

מגרף רואים שיסוד הברזל הוא היסוד היציב ביותר ($A=56$). בנוסף, ניתן לראות שעבור היסודות הקלים הגרף עולה בתלילות (כלומר, הגרעינים יציבים יותר). עליה זו הולכת ומתמתנת עד לברזל. עובדה זו נובעת מכך שאיבר שטח הפנים הנו משמעותי ביותר בגרעינים קטנים והוא מקטין מאוד את אנרגיית הקשר (פחות שכנים צמודים).

אחרי הברזל, הוספת נוקלאון תשפיע פחות על שטח הפנים אך לעומת זאת תקטין את אנרגיית הקשר ע"י הגדלת האנרגיה החשמלית – במקרה של הוספת פרוטון, או אכלוס רמות אנרגיה גבוהות יותר, במקרה של הוספת נייטרון (האיבר הקולוני ואיבר הסימטריה). לכן הגרף יורד באזור זה.

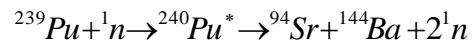
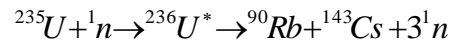
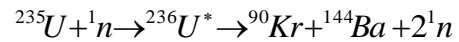
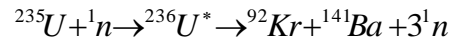
לגרף הזה יש חשיבות מעשית משום שבביקוע מספר הנוקלאונים הכולל נשאר קבוע, ואנרגיית הקשר הממוצעת לנוקלאון מבטאת למעשה את הפרש האנרגיה בין המגיבים לתוצרים.

נשים לב לשתי קפיצות בגרף עבור הליום 4 ופחמן 12. זה נובע מאיבר הזיווג שבו לא נתעמק (האיבר החמישי בנוסחת המסה) וממודלים מורכבים המתייחסים לגרעין כבנוי מקליפות.

פעילות לחישוב הרווח האנרגטי מתהליכי ביקוע

בדף העבודה המוצג להלן נעמוד על הפער בין אנרגיית הקשר של הגרעין המקורי לבין אנרגיית הקשר ששל תוצרי הביקוע.

בדף עבודה 4 המופיע בנספח 4 התלמידים מתבקשים לפתוח את קובץ האקסל, בגליון "אנרגיית קשר" ובעזרתו לחשב את הרווח האנרגטי המושג בתהליכי ביקוע הבאים :



לאחר מכן, התלמידים נדרשים לבדוק בעזרת גליון "עמק היציבות, קרינת בטא וטפטוף" וגליון "קרינת אלפא" האם תוצרי הביקוע המתקבלים הינם איזוטופים יציבים או רדיואקטיביים.

דף עבודה 4: חישוב רווח אנרגטי מתהליכי ביקוע

נתונים להלן ארבעה תהליכי ביקוע אפשריים:

1. $^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{236}_{92}\text{U}^* \rightarrow ^{92}_{36}\text{Kr} + ^{141}_{56}\text{Ba} + 3^1_0\text{n}$
2. $^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{236}_{92}\text{U}^* \rightarrow ^{90}_{36}\text{Kr} + ^{144}_{56}\text{Ba} + 2^1_0\text{n}$
3. $^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{236}_{92}\text{U}^* \rightarrow ^{90}_{37}\text{Rb} + ^{143}_{55}\text{Cs} + 3^1_0\text{n}$
4. $^{239}_{94}\text{Pu} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{240}_{94}\text{Pu}^* \rightarrow ^{94}_{38}\text{Sr} + ^{144}_{56}\text{Ba} + 2^1_0\text{n}$

א. בעזרת קובץ האקסל, **נלוו** "אנרגיית קשר", חשב עבור כל אחד מהתהליכים את אנרגיית הקשר של הגרעין לפני הביקוע, ואת אנרגיית הקשר של תוצרי הביקוע.
שימו לב: לארבעה פרטונים, לקריפטון 36, לבריום 56, לרובידיום 37, לצסוניום 55, לפלוטוניום 94, לטורוניום 38.

ב. מהו הרווח האנרגטי המתקבל עבור כל אחד מהתהליכים הנ"ל?

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.

ג. בעזרת קובץ האקסל, **נלוו** "עמק היציבות, קרינת בטא וטפטוף" ו**נלוו** "קרינת אלפא", בדוק עבור כל אחד מתוצרי הביקועים הנ"ל האם מדובר ביסודות יציבים או רדיואקטיביים.

תשובה :

הרווח האנרגטי מכל תהליך לעיל הנו :

$$1943-1788=155\text{Mev}$$

$$1956-1788=168\text{Mev}$$

$$1944-1788=156\text{Mev}$$

$$1985-1811=174\text{Mev}$$

כל הגרעינים המתקבלים הנם רדיואקטיביים וצפויים לדעוך דעיכת בטא מינוס.

סיכום בעזרת סרטון

הסרטון הבא מתאר ומסכם בצורה יפה מה שלמדנו עד כה :

<http://www.youtube.com/watch?v=rfGqSsTGhFo>

צפה עד הדקה 35: 4.

החלק השני של הסרטון דן ב"היתוך גרעיני". אנחנו בחרנו שלא להתעסק בנושא זה בחוברת הלימוד שכתבנו אך המעוניינים יכולים להעזר בקובץ האקסל שפיתחנו כדי ללמד גם נושא זה.

בחוברת הלימוד פרטנו הרבה יותר על תהליך הביקוע: דנו בהסתברות להתרחשות ביקוע, במחסום הפוטנציאל ובתהליך השתנות הגרעין במהלך ביקוע גרעיני. נושאים אלו מבוססים על פיזיקה ברמה גבוהה יותר ממה שדנו בו עד עכשיו ולדעתנו ניתן ללמד את נושא הביקוע גם בלי להיכנס לעומק הדברים הללו. בכל מקרה, הרוצה להעמיק מוזמן לפתוח את חוברת הלימוד וללמוד את הדברים מתוכה.

פרק שלישי: יישום התיאוריה המדעית והפן הטכנולוגי

פרק זה, המופיע בחוברת הלימוד, עוסק בדרכים שבהם ניתן לנצל את האנרגיה שמשתחררת כתוצאה מתהליך הביקוע. כיום משתמשים באנרגיה זו בעיקר לצורך ייצור חשמל בתחנות כח גרעיניות וכן, לבניית פצצות בעלות עוצמה גדולה במיוחד - "פצצות אטום".

לפרק זה אופי "סיפורי" ו"אנקדוטי" יותר, והמידע המופיע בו הנו מילולי. כלי ההוראה שפיתחנו אינו יכול לשמש כעזר בחלק זה. מטרתו העיקרית של חלק זה הנה ליצור "סגירה" לנושא, ולסיים בסקירה כללית, על קצה המזלג של שימושי התיאוריה, וכן להציג תוך הסבר כללי בלבד מושגים ומילים אשר נשמעות בהקשר זה בחדשות באמצעי התקשורת. ככזה לא בנינו פעילויות המתייחסות לפרק.

מרצה המעוניין בכך יכול לפתח בעצמו דיונים בעלי אופי אתי, טכני או פוליטי כרצונו, או בחרנו שלא לפתח כאלה בעצמנו.

קטע בעל אופי פיזיקלי חישובי יותר הנו העוסק בתגובת השרשרת ובמסה הקריטית הדרושה על מנת להגיע אליה. בעזרת ההסברים המופיעים בחוברת ניתן להבין מדוע מתקיימת תכונה זו, אך אין במודל שבנינו דרך למצוא את הערכים של גודלי המסות הקריטיות עבור חומרים שונים. גם מעט ההסבר המדעי המופיע בנושא בחוברת הנו שטחי בלבד ובחרנו שלא להתעמק בכך. לדעתנו די בכך שתלמיד ההשתלמות יבין כי מדובר בצירוף של גורמים סטטיסטיים שונים, הנותנים בסופו של דבר את הסיכוי כי נייטרון הנפלט מביקוע גרעין אחד יגרום לביקוע גרעין אחר. אם נכפיל הסתברות זו במספר הנייטרונים הממוצע הנפלט מביקוע נקבל את תוחלת מספר הגרעינים שיתבקעו כתוצאה מביקוע קודם.

תרגיל:

הראה כי "תוחלת מספר הגרעינים המתבקעים כתוצאה מביקוע אחד" שווה זהותית לגורם הכפלת הנייטרון האפקטיבי.

תשובה:

נסמן ב-M את מספר הנייטרונים הממוצע הנפלטים בביקוע בודד. את התוחלת הנ"ל נסמן באות N. נחשב את גורם הכפלת הנייטרון: מגרעין בודד נקבל M נייטרונים, ומ-N גרעינים שבוקעו

כתוצאה מהאחד נקבל $N \times M$. הרי גורם הכפלת הנייטרון הוא: $k = \frac{N \times M}{M} = N$.

סיכון מול רווח ושאלות אתיות

כפי שצוין קודם, אנו בחוברת בחרנו לא להכנס לנושא זה. אולם כמו בחלקים אחרים בעבודתנו, עבור מרצה הבקיא בנושא ומעוניין בכך, יכולה להיות זו אפשרות להתחיל דיון על השאלות האתיות הנובעות מהביקוע הגרעיני. ניתן לסקור את האסונות והגודל הסכנות שבשימוש באנרגיה גרעינית, את כמות האנרגיה המופקת מגרעין בעולם. ניתן לסקור את עתודות האנרגיה של האנושות ולהעריך את קצת ההדללות שלהן ועוד. נתונים אלו אינם מופיעים בחוברת, אנו מביאים זאת כהצעה ומרצה המעוניין לפתח את נושא הביקוע לכוון זה ידרש לאסוף את הנתונים ולבנות דיונים ופעילויות בהתאם.

דף עבודה 1: חישוב אנרגיית הקשר הגרעינית עבור גרעינים שונים

לפינך טבלה שמציגה צירופי נוקלאונים תיאורטיים, חלקם אפשריים וחלקם לא. בכל עמודה בטבלה יש מספר קבוע של פרוטונים בגרעין (Z) ובכל שורה, מספר קבוע של נייטרונים (N).

- חשב את אנרגיית הקשר של גרעין בעל 5 פרוטונים ו-41 נייטרונים על ידי הצבת הנתונים המתאימים בנוסחת המסה של ויצקאר:

$$E_B(A, Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_A \frac{(A-2Z)^2}{A}$$

$$a_v \approx 15.56 \text{ Mev}$$

$$a_s \approx 17.23 \text{ Mev}$$

$$a_c \approx 0.697 \text{ Mev}$$

$$a_A \approx 93.14 \text{ Mev}$$

- אתר שני גרעינים נוספים אשר אנרגיית הקשר המחושבת עבורם הנה חיובית, ושניים עבורם מחושבת אנרגיית קשר שלילית.
- נסה לחשוב מה המשמעות של אנרגיית קשר שלילית.

12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	Z / N
													0
													1
													2
													3
													4
													5
													6
													7
													8
													9
													10
													11
													12
													13
													14
													15
													16
													17
													18

דף עבודה 2 : מציאת עמק היציבות

לפניך טבלה שמציגה את אנרגיית הקשר ביחידות של MeV, עבור צירופי נוקלאונים תיאורטיים, חלקם אפשריים וחלקם לא. הטבלה בנויה בדיוק כמו הטבלה בדף עבודה 1.

1. בחר מהטבלה גרעין באופן שרירותי ובדוק האם תהליך של טפטוף (פרוטון או נייטרון) יגרום לו להפוך לגרעין יציב יותר. אם כן, עבור לגרעין היותר יציב וחזור על התהליך. אם לא, עבור לשלב הבא.

2. בדוק האם קרינת בטא (חיובית או שלילית) תגרום לגרעין להגיע למצב יציב יותר. אם כן, עבור לגרעין היותר יציב וחזור על התהליך. אם לא, סמן את הגרעין שאליו הגעת ועבור לשלב הבא.

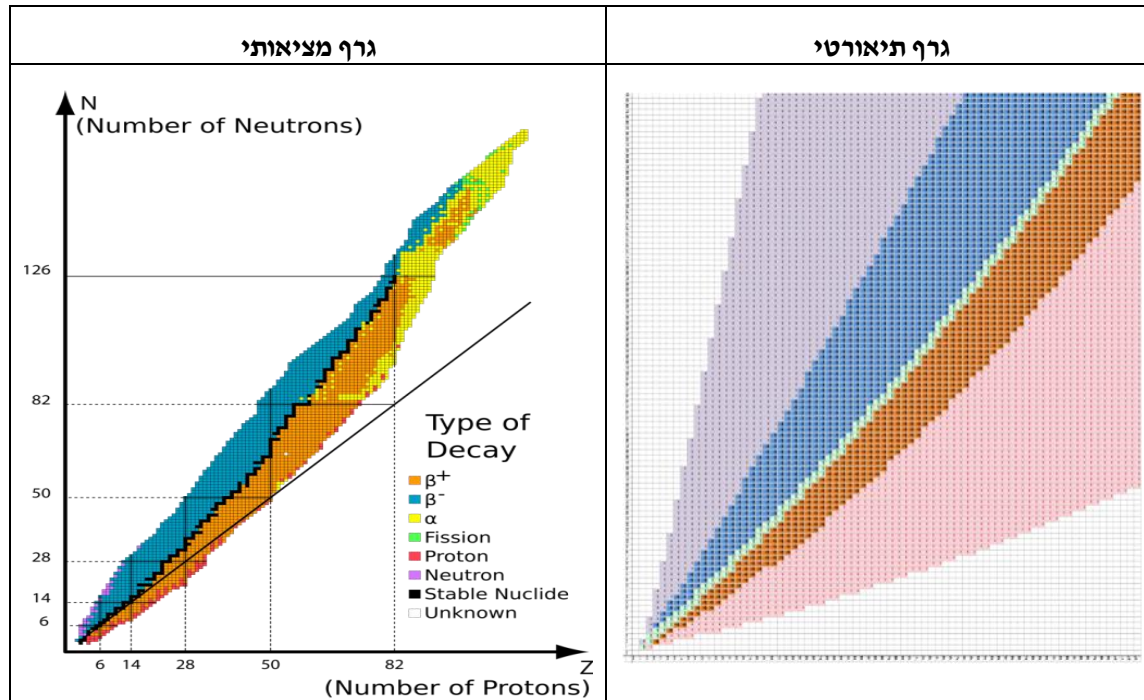
3. חזור על התהליך מספר פעמים.

האם הגרעיניים המסומנים יכולים להמשיך לדעוך בתהליכים הגרעיניים הנ"ל? כיצד קבעת זאת?

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	z / n
-290.5	-270.7	-251.2	-231.8	-212.7	-193.7	-175	-156.3	-137.9	-119.5	-101.3	-83	-64.61	-45.84	-26.07		0
-213	-193.8	-174.9	-156.3	-137.9	-119.9	-102.3	-84.99	-68.17	-51.89	-36.32	-21.76	-8.829	1.0071	3.2159	-25.37	1
-146	-128	-110.3	-93.18	-76.52	-60.44	-45.02	-30.4	-16.76	-4.386	6.2897	14.531	19.011	17.067	2.4569	-43.63	2
-87.7	-71.21	-55.31	-40.07	-25.58	-11.95	0.6494	12.018	21.853	29.727	34.998	36.655	33.016	21.049	-5.316	-60.26	3
-36.75	-22.05	-8.13	4.9253	16.987	27.892	37.432	45.325	51.191	54.499	54.48	49.984	39.205	19.133	-15.65	-75.98	4
7.9735	20.723	32.526	43.258	52.762	60.842	67.244	71.64	73.592	72.502	67.537	57.495	40.574	13.941	-27.12	-91.08	5
47.354	58.08	67.691	76.042	82.952	88.196	91.491	92.475	90.671	85.449	75.949	60.969	38.774	6.766	-39.14	-105.7	6
82.126	90.795	98.193	104.16	108.49	110.95	111.23	108.94	103.58	94.525	80.898	61.534	34.794	-1.684	-51.44	-120	7
112.89	119.5	124.7	128.31	130.12	129.88	127.25	121.85	113.18	100.57	83.201	59.938	29.255	-10.99	-63.88	-134	8
140.16	144.73	147.77	149.07	148.44	145.59	140.2	131.86	120.08	104.21	83.439	56.699	22.569	-20.89	-76.38	-147.8	9
164.35	166.92	167.84	166.91	163.91	158.57	150.55	139.45	124.77	105.9	82.038	52.185	15.021	-31.21	-88.89	-161.4	10
185.82	186.43	185.29	182.21	176.94	169.22	158.71	145.01	127.64	105.99	79.316	46.662	6.809	-41.84	-101.4	-174.8	11
204.88	203.58	200.45	195.28	187.84	177.86	164.99	148.85	128.97	104.77	75.516	40.331	-1.92	-52.69	-113.9	-188	12
221.77	218.63	213.58	206.41	196.89	184.75	169.66	151.23	129.01	102.43	70.824	33.343	-11.06	-63.71	-126.3	-201.1	13
236.74	231.82	224.91	215.82	204.31	190.12	172.92	152.34	127.93	99.164	65.389	25.817	-20.52	-74.85	-138.7	-214	14
249.98	243.32	234.63	223.69	210.29	194.15	174.96	152.35	125.91	95.102	59.329	17.845	-30.25	-86.09	-151	-226.9	15
261.64	253.32	242.91	230.21	214.99	197	175.93	151.42	123.06	90.358	52.738	9.4998	-40.2	-97.39	-163.3	-239.6	16
271.89	261.96	249.9	235.5	218.56	198.81	175.95	149.64	119.49	85.025	45.694	0.8403	-50.32	-108.7	-175.6	-252.3	17
280.86	269.37	255.72	239.7	221.11	199.68	175.13	147.13	115.3	79.182	38.26	-8.085	-60.59	-120.1	-187.8	-264.9	18

דף עבודה 3: גרעינים יציבים ולא יציבים. השוואה בין הגרף תיאורטי לגרף מציאותי

נתונים שני גרפים עבורם הציר האופקי זה מספר הפרוטונים בגרעין והציר האנכי זה מספר הניטרונים בגרעין. הגרף הימני הוא גרף תיאורטי המתבסס על נוסחת המסה ועל שני התהליכים הגרעיניים: קרינת בטא וטפטוף. לגרף זה הגענו בעזרת קובץ האקסל. הגרף השמאלי הינו גרף המבוסס על הגרעינים שנמצאו בטבע.



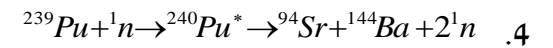
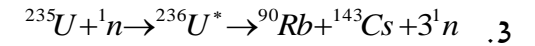
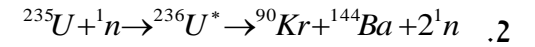
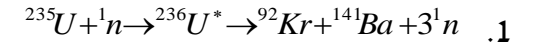
השווה בין הגרפים ורשום את ההבדלים:

הגרף המציאותי	הגרף התיאורטי

נסה לתת הסבר לכל אחד מההבדלים שמצאת.

דף עבודה 4: חישוב רווח אנרגטי מתהליכי ביקוע

נתונים להלן ארבעה תהליכי ביקוע אפשריים:



א. בעזרת קובץ האקסל, גליון "אנרגיית קשר", חשב עבור כל אחד מהתהליכים את אנרגיית הקשר של הגרעין לפני הביקוע, ואת אנרגיית הקשר של תוצרי הביקוע.

שימו לב: לאורניום 92 פרוטונים, לקריפטון 36, לבאריום 56, לרובידיום 37, לצסיום 55, לפלוטוניום 94, לסטרוניום 38.

ב. מהו הרווח האנרגטי המתקבל עבור כל אחד מהתהליכים הנ"ל?

1.

2.

3.

4.

ג. בעזרת קובץ האקסל, גליון "עמק היציבות, קרינת בטא וטפטוף" וגליון "קרינת אלפא", בדוק עבור כל אחד מתוצרי הביקועים הנ"ל האם מדובר ביסודות יציבים או רדיואקטיבים.