

מכון ויצמן למדע  
תכנית רוטשילד ויצמן

## **ביקוע גרעיני**

עבודת גמר תואר שני בהוראת הפיזיקה

**מגישים:** משה ששון ומיכל ארליך

**מנחים:**

פרופסור שמעון לויט, המחלקה לפיזיקה, מכון ויצמן למדע  
ד"ר ירון להבי, המחלקה להוראת המדעים, מכללת דוד ילין

תשרי תשע"ה, אוקטובר 2014

## תוכן

4.....	הקדמה
5.....	המדע והטכנולוגיה של הביקוע הגרעיני
5.....	אנרגיית הקשר הגרעינית/ מקור האנרגיה הגרעינית
5.....	גרעין האטום
6.....	שקילות מסה-אנרגיה
6.....	אנרגיית הקשר
7.....	"שאיפה למינימום אנרגיה"
7.....	הכוחות הפועלים בגרעין
8.....	נוסחת המסה החצי אמפירית של ויצאקר-
9.....	כוח - אנרגיה
9.....	איברי נוסחת המסה - כללי
10.....	איברי נוסחת המסה - איבר הנפח $a_V A$
10.....	איברי נוסחת המסה - איבר שטח הפנים
10.....	איברי נוסחת המסה - איבר קולון
11.....	איברי נוסחת המסה - איבר הסימטריה
14.....	תהליכים גרעיניים ("דעיכה" או "התפרקות")
15.....	עמק היציבות
18.....	גיליון אקסל
19.....	תהליך הביקוע הגרעיני
19.....	הקדמה
19.....	הביקוע הגרעיני כמקור אנרגיה
20.....	השתנות הגרעין במהלך הביקוע
20.....	מרחב המצבים והקשר לאנרגיה העודפת
21.....	התפתחויות אפשריות של הגרעין
22.....	מבט על הכוחות והאנרגיות בתהליך
24.....	תוצרי הביקוע
25.....	נייטרונים איטיים

26.....	יישום התיאוריה המדעית והפן הטכנולוגי
26.....	תגובת שרשרת גרעינית
26.....	מסה קריטית של חומר בקיע
27.....	אורניום מועשר :
29.....	מבנה תחנת הכוח הגרעינית (כור גרעיני)
31.....	הפצצה הגרעינית
32.....	ביבליוגרפיה

## הקדמה

רבים מכירים את האפשרות להפיק אנרגיה מגרעין האטום, בתרבות הפופולארית מדובר על כורים גרעיניים ועל פצצות גרעין, חלק אף יודעים לציין את היסוד אורניום ופלוטוניום כחומר דלק לכורים ופצצות אלו. לחלק יש מושג כלשהו כי מימן יכול לשמש לבניית פצצת גרעין. בעלי ידע פיזיקאלי מסוים אף ידעו להבחין בין פצצת ביקוע ופצצת היתוך, ויכולים אף להצביע על הנוסחה המפורסמת של איינשטיין  $E = Mc^2$  כעל מקור האנרגיה של התהליך, הנובע מהפרשי המאסות בין המגיבים לתוצרים.

בעבודה זאת ננסה לעשות סדר במושגים ונתמקד בתהליך אחד, והוא **תהליך הביקוע הגרעיני**. העבודה מחולקת לשני חלקים: חוברת לימוד המרכזת ידע רלוונטי לנושא ויכולה לשמש בנפרד ללימוד עצמי ולהעשרה או כבסיס להעברת השתלמות בנושא, וכלי הוראה הבנוי על בסיס גיליון אקסל היכול לשמש לתרגול, כבסיס לפעילויות ולחידוד ההבנה בחלק מהנושאים האמורים בחוברת. קהל היעד המרכזי הנו ציבור המורים לפיזיקה אך ניתן לבנות יחידות הוראה שבהן חלקים שונים מיועדים לקהלים בעלי רמות התמחות והכשרה פיסיקלית שונות, החל מהציבור הרחב ועד לפיזיקאים בעלי הכשרה מעמיקה יותר.

הרצון להכשיר מורים להבין לעומק דווקא את נושא ה"ביקוע הגרעיני" נובע מההבנה שמדובר בתחום 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. בנוסף, הסקרנות הטבעית שהנושא מעורר אצל התלמידים מאפשר למורה לפתוח בפני התלמידים אשנב לפיזיקה ברמה גבוהה יותר מהפיזיקה התיכונית. לאור זאת הבנו שקיים צורך לחזק אצל המורים לפיזיקה את הידע סביב נושא הביקוע הגרעיני ובכך להעלות את רמת המקצועיות של המורה.

קריאה מהנה ולימוד פורה

משה

ומיכל.

## המדע והטכנולוגיה של הביקוע הגרעיני

### אנרגית הקשר הגרעינית/ מקור האנרגיה הגרעינית

#### גרעין האטום

האטום הנו החלקיק הקטן ביותר של היסודות הכימיים, כפי הפיזיקה כיום. כמעט כל מאסתו מרוכזת בגרעין קטן וצפוף במרכזו ושאר נפחו של האטום מכיל חומר בצפיפות נמוכה מאד. גודל האטום נמדד ביחידה המכונה אנגסטרם ומסומנת ב- $\text{\AA}$  ( $1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$ ). בחלל סביב לגרעין נמצאים האלקטרונים (כ-1 עד 100) שמטענם החשמלי<sup>1</sup> הוא -1. רדיוס הגרעין כ-1/10000 מרדיוס האטום ושם עיקר ההתרחשות שמעניינת אותנו כאן.

הגרעין כאמור הנו קטן ודחוס מאד ביחס לאטום כולו, גודלו נמדד ביחידות הנקראות פרמי ( $10^{-15}\text{m}$ ), הוא מורכב מחלקיקי גרעין הנקראים נוקלאונים (מהמלה nucleus - גרעין). מסת

נוקלאון בודד היא פי 2000 לערך ממסת האלקטרון. קיימים שני סוגי נוקלאונים: פרוטונים ונייטרונים. קיימים חלקיקים נוספים ואקזוטיים שיתכן שימצאו בגרעין אך מכיוון שאלו נדירים מאד, נתעלם מהם כעת. מסתם של הפרוטונים ושל הנייטרונים דומה, והם נבדלים זה מזה במבנה הפנימי שלהם ובמטענם החשמלי: הפרוטון הנו בעל מטען חשמלי +1 (זהה למטען האלקטרון והפוך ממנו) והנייטרון בעל מטען חשמלי 0.

לפי חוק קולון, בין הפרוטונים בגרעין קיים כוח חשמלי הדוחה אותם זה מזה. העובדה שמדובר בגוף יציב בעל צפיפות גבוהה מחייב קיום שלכוח נוסף בגרעין המתגבר על כוחות הדחייה החשמליים. כוח זה מכונה "הכוח החזק" ועליו נפרט בהמשך.

הכוחות העצומים הפועלים בגרעין גורמים לכך שהוא כמעט ולא מושפע מהמתרחש בשאר חלל האטום. לכן בהתייחסנו לגרעין, וברמת הדיוק של חישובינו, אנו רשאים להתעלם מהשפעת האלקטרונים הנמצאים סביבו.

כל יסוד בטבע מאופיין בטבלה המחזורית של מנדלייב על ידי מספר הפרוטונים הנמצאים בגרעין. מספר זה נקרא המספר האטומי של הגרעין והוא מסומן באות Z. גרעינים בעלי מספר פרוטונים זהה ומספר נייטרונים שונה, נקראים איזוטופים של אותו יסוד. היות שמסת הפרוטונים והנייטרונים כמעט זהה, מספר הנוקלאונים בגרעין קובע את מסת הגרעין, זו הסיבה שמספר זה נקרא מספר המסה של הגרעין והוא מסומן באות A.

מבנהו הפנימי של הגרעין, הכוחות הפועלים בו, סידור החלקיקים הפנימי והחלוקה בין פרוטונים ונייטרונים הנו נושא למחקר ארוך המתמשך מזה כמאה שנים, במהלכו נענו שאלות רבות ושאלות רבות אחרות עדיין ממתונות למענה.

---

<sup>1</sup> ביחידות של יחידת המטען הבסיסית שהנה מטען הפרוטון או האלקטרון. זו כמות המטען הקטנה ביותר בטבע וכל מטען חשמלי שקיים יהיה בכפולה שלמה שלו. גודלה כ-  $1.6 \times 10^{-19}\text{ coulomb}$ .  $q_p = -q_e = 1.6 \times 10^{-19}$ .

## שקילות מסה-אנרגיה

לנוסחת השקילות של איינשטיין  $E = Mc^2$  נהוג להתייחס כנוסחא המפורסמת ביותר בעולם. משמעות הנוסחה היא שלכל דבר בעל מסה יש אנרגיה, ובתנאים מסוימים תתכן התמרה של מאסה לאנרגיה, וכן להיפך. אנרגיה זו מכונה "מסת המנוחה". היחס בין מסת המנוחה של גוף (שכן תורת היחסות אומרת לנו גם כי המסה משתנה עם המהירות) לבין אנרגיית הגוף הנה ריבוע מהירות האור. במילים אחרות, נוסחה זו אומרת לנו שלמעשה מסה ואנרגיה הם ביטויים שונים לאותו הדבר!

בהמשך נבטא את "מסת המנוחה" ביחידת אנרגיה הנקראת "אלקטרון וולט" ומסומנת eV. זו האנרגיה שצובר אלקטרון חופשי העובר במפל פוטנציאל של 1 וולט. בקירוב,  $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{Joul}$ . בשל סדרי הגודל של האנרגיה המעורבת בתהליכים נרבה להשתמש ב-MeV, מוגה (מליון) אלקטרון וולט. כדי לעבור שוב ליחידות מסה של ק"ג, יש לחלק בריבוע מהירות האור. מעבר זה בין יחידות מסה ליחידות אנרגיה הנו מקובל ביותר בפיזיקה ולכן אף אנו נעבור מהצגת מסה להצגת אנרגיה ואף נערבב ביניהם ללא התייחסות מיוחדת וללא ציון המעבר במפורש.

## אנרגיית הקשר

למעשה בגרעין קשור (ואלה הגרעינים בהם נעסוק) עלינו להשקיע אנרגיה על מנת "לפרק" את הגרעין, כלומר, להרחיק את הנוקלאונים (חלקיקי הגרעין) אחד מהשני. אנרגיה זו המכונה "אנרגיית הקשר" של הגרעין הנה האנרגיה המינימאלית שצריך לתת לגרעין על מנת שהגרעין שיתפרק לרכיביו - יהפוך ממערכת "קשורה" של נוקלאונים למערכת "לא קשורה" של נוקלאונים נפרדים. בשל שקילות מסה-אנרגיה, מכיוון שלנוקלאונים אנרגיה גבוהה יותר בנפרד מאשר יחד, מסתם בנפרד הנה גבוהה יותר מאשר בגרעין. את מסת הגרעין נבטא בנוסחא:

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

כאשר:  $(A-Z)$  - מספר הנייטרונים,  $Z$  - מספר הפרוטונים,  $m_p$  - מסת פרוטון חופשי,  $m_n$  - מסת נייטרון חופשי,  $E_B$  אנרגיית הקשר של הגרעין,  $c$  - מהירות האור.

החלק בביטוי המייצג את אנרגיית הקשר, אותו יש להפחית ממסת הנוקלאונים, הנו בעצם ההפרש בין אנרגיית הנוקלאונים במצב לא קשור (כאשר הם רחוקים אחד מהשני ואינם מהווים גרעין) לבין המצב הקשור שלהם.

אנרגיית קשר שלילית, לו הייתה, משמעותה שמסת הגרעין (ואנרגיית הגרעין) גדולה יותר מסכום מסות הנוקלאונים הנמצאים במצב לא קשור. גרעין כזה יתפרק ולכן אין משמעות לאנרגיית קשר שלילית.

ככל שאנרגיית הקשר של הגרעין גדולה, האנרגיה הכוללת של הגרעין תהיה נמוכה יותר (בנוסחה לעיל הדבר מתבטא בסימן "מינוס" לפני איבר אנרגיית הקשר) ולכן הטבע "יעדיף" איזוטופים בעלי אנרגיית קשר גבוהה. כלומר, אם קיימת לגרעין אפשרות לשנות את הרכבו ובכך להגיע לאנרגיית קשר גבוהה יותר, לפלוט נוקלאון למשל, התהליך יתקיים. נדון בתהליכים גרעיניים אלו אחרי שנבין את כל הפרמטרים הבונים את אנרגיית הקשר.

### "שאיפה למינימום אנרגיה"

במשך העבודה נשתמש פעמים רבות בביטויים המייחסים לטבע או לחוקי הפיזיקה כוונות, כאילו שיש לטבע איזה רצון או העדפה. זוהי רק צורת ביטוי, המתנייחסת לסבירות שדבר כלשהו יקרה. במילים פיזיקאליות, כאשר אנו מדברים על "העדפה" למצב כלשהו, אנו מתכוונים לכך שמתוך כל המצבים האפשריים של מערכת, מצב זה הנו בעל הסתברות גבוהה יותר באופן מובהק. "שאיפה למינימום אנרגיה" הנה תכונה סטטיסטית של מערכות מסוימות שאומרת כי **קיימת הסתברות גבוהה יותר ל"סידורים" (בשפה פיזיקאלית, "מצבים") שבהם האנרגיה נמוכה יותר.**

### הכוחות הפועלים בגרעין

הפיזיקה כיום מונה מספר כוחות יסודיים, וכן חוקים פיזיקאליים הניתנים לפירוש ככוחות. בגרעין האטום הכוח המושך בין הנוקלאונים הוא **הכוח הגרעיני החזק**. צורת פעולתו המדויקת של **הכוח החזק** אינה ברורה לחלוטין אולם ידועים מספר דברים לגביו: זהו כוח קצר טווח וחזק מאד. במודל הפשטני של הטיפה נתייחס אליו כאל "דבק", הפועל בין חלקיקים סמוכים בלבד ("שכנים"). עוד ידוע על הכוח החזק כי בשילוב עם חוק האיסור של פאולי, כאשר המרחק בין מרכזי הנוקלאונים קטן מ-1 פרמי הכוח ביניהם הופך לכוח דחיה. זו הסיבה שהנוקלאונים לא נדחסים או נמעכים זה לתוך זה. כך, ניתן לראות את הגרעין כצבר של כדורים בקוטר של כ-1.2 פרמי הצמודים זה לזה.

כוח נוסף הקיים בגרעין הינו כוח מוכר המכונה "הכוח הקולוני". נזכיר שמדובר בכוח הפועל בין חלקיקים טעונים ובמקרה שלנו מדובר בפרוטונים. היות שמדובר במטענים בעלי סימן זהה הכוח הינו כוח דוחה, הפועל בניגוד לכיוון הכוח החזק. נוכחותם של הנייטרונים בגרעין מרחיקה במעט את הפרוטונים זה מזה ובכך מקטינה את כוחות הדחייה החשמליים ביניהם. הנייטרון מוסיף כוח משיכה (הכוח החזק) ומקטין כוחות דחייה (הכוח החשמלי).

עוד כוח הפועל בגרעין אך אינו מתבטא בנוסחת המסות להלן הוא **הכוח החלש**. כוח זה חלש בהרבה מהכוחות האחרים והתהליכים שהוא משפיע עליהם איטיים מאד ביחס לאחרים. אנחנו נתייחס אליו בהמשך בהקשר של תהליכים גרעיניים.

ביטוי של כוח הגרביטציה הוא זניח בגרעין האטום כיוון שעצמתו חלשה ביותר בסקלה של כוחות גרעיניים וכוחות קולוניים ואנו יכולים להתעלם ממנו לחלוטין בהקשר של האנרגיות ובהשוואה לעוצמת הכוחות האחרים, לכן לא נזכיר אותו כלל בהמשך.

## נוסחת המסה החצי אמפירית של ויצאקר-

### Weizsäcker's Semi empirical mass formula- SEMF

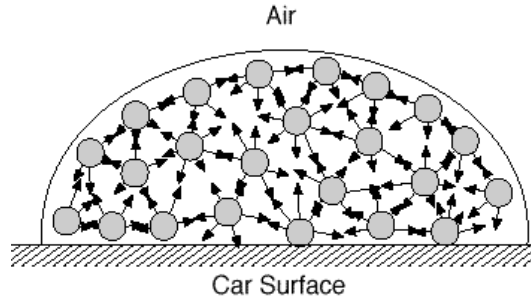
נוסחא זו נקראת נוסחת המסה אך למעשה מדובר בנוסחה שנותנת תלות מתמטית בין אנרגיית הקשר של הגרעין למספר הפרוטונים והנייטרונים הנמצאים בגרעין. בגלל השקילות בין מסה לאנרגיה, השם לא אמור להפתיע אותנו. אם נתרגם את אנרגיית הקשר למסה המתאימה, הרי הנוסחא מתארת את הפרש המסה הקיים בין הנוקלאונים במצב הקשור לבין הנוקלאונים במצב הלא קשור.

לאחר שנים רבות של חקר הגרעין נוצר מסד נתונים גדול למדי של מאות צירופי נוקלאונים שונים. ממסד נתונים זה נבנתה נוסחת המסה של ויצאקר, נוסחה זו הנה נוסחה "חצי אמפירית". הנוסחה מתבססת על כמה הנחות יסוד אשר הן תוצאה של הפיזיקה הידועה היום, כמו תופעת "מתח הפנים", תוצאות של תורת הקוונטים, תורת היחסות והתורה האלקטרומגנטית. באמצעות הנחות אלו יצרו פרמטרים שונים אשר משפיעים על אנרגיית הקשר של הגרעין, אולם את מידת ההשפעה של כל פרמטר מצאו באמצעות שימוש במסד הנתונים שנוצר באופן ניסויי. פרמטרים אלו מופיעים בנוסחה בתור מקדמים של איברי הנוסחה שיפורטו בהמשך. כדי להבין את הכוחות הפועלים בגרעין, נעזר במודל פשוט יחסית אשר ולקוח בחשבון הנחות שונות אשר כל אחת מוסיפה עוד תיקון למודל. מודל זה נקרא **מודל הטיפה**. נתמקד תחילה בהנחות היסודיות ביותר, ובהמשך נסיף תיקונים מסדר גבוה יותר ויותר. מתוך ההנחות שנניח נעריך כיצד אנרגיית הקשר הגרעינית תלויה במספר הנוקלאונים השונים, ונמצא ביטויים מתמטיים לכך. את המקדמים של איברי הנוסחא העריכו באמצעות התאמה לנתונים שנמדדו בניסויים מכאן הכינוי "נוסחא חצי אמפירית".

#### **מודל הטיפה**

מודל הטיפה מתייחס לגרעין כאל טיפה כדורית של חומר גרעיני בלתי דחיס. בטיפת נוזל מצוי קיימים כוחות משיכה פנימיים וכוחות דחייה פנימיים בין המולקולות בדומה לכוחות הפועלים בגרעין. בגלל שהנוקלאונים שומרים על מרחק קבוע אחד מהשני, נפח הגרעין הנו קבוע למספר נוקלאונים מסויים, כמו טיפה המורכבת ממולקולות חומר. הטיפה וכן הגרעין יכולים לשנות את צורתם אך נפחם לא ישתנה. חלקיקים הנמצאים על פני השטח נמשכים כלפי פנים הטיפה ע"י הכוחות הפנימיים ונוצרת תופעה המכונה "מתח פנים" השומרת על צורתה הכדורית. גם בגרעין מתרחשת תופעה דומה (ראו ציור).

קיימים מודלים מדוייקים יותר ממודל הטיפה. **מודל הקליפות** הנו מודל מדוייק יותר המבוסס על פיזיקת הקוונטים.



Molecules inside a water drop are attracted in all directions. Drops on the surface are attracted to the sides and inward.

**מתח הפנים של טיפת מים על פני מכונית, מוסבר באמצעות מודל הטיפה**

**כוח - אנרגיה**

כוח ואנרגיה הם שני מושגים הקשורים אחד בשני באופן ישיר, מכיוון שקיום של אנרגיה פוטנציאלית במערכת מחייב קיומם של כוחות. בשפה פסיקלית  $\vec{F} = -\vec{\nabla}V$ , כאשר  $F$  הוא וקטור הכוח,  $V$  הוא שדה הפוטנציאל (האנרגיה הפוטנציאלית בכל נקודה במרחב), ו  $\nabla$  הוא הסימן לגרדיאנט, כלומר, וקטור של נגזרת בשלושה מימדים. סימן המינוס הוא עניין של הגדרה, לפיה תנועה בניגוד לכיוון הכוח דורשת הגדלת האנרגיה הפוטנציאלית, ותנועה עם כיוון הכוח תקטין את האנרגיה הפוטנציאלית של המערכת. ולהיפך, הכוון שבו האנרגיה הפוטנציאלית יורדת, יהיה כווננו של הכוח.

מכאן שהבנת הפוטנציאל של המערכת (האנרגיה הפוטנציאלית בכל נקודה) משמעותה הבנת הכוחות הפועלים בה ולהיפך.

לכן כאשר נבנה את הנוסחה לאנרגיית הקשר, איברים אשר קושרים את הגרעין יחד ומייצבים אותו יוסיפו לאנרגיית הקשר ויופיעו בסימן חיובי, ואיברים דוחים<sup>2</sup> יפחיתו מאנרגיית הגרעין ויופיעו בסימן שלילי.

**איברי נוסחת המסה - כללי**

נתמקד תחילה בהנחות היסודיות ביותר, ובהמשך נוסיף תיקונים מסדר גבוה יותר ויותר. הביטוי לאנרגיית הקשר של הגרעין מורכב מחמישה רכיבים. נתמקד בארבעה האיברים הראשונים:

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

האיבר הראשון נקרא **איבר הנפח**, השני **איבר השטח**, השלישי- **האיבר הקולוני**, והרביעי- **איבר הסימטריה**.

---

<sup>2</sup>הכוונה "איברים אשר מבטאים שיקול או תופעה פיזיקאלית אשר ביטויים הנו משיכה הדדית בין הנוקלאונים", ו- "איברים אשר מבטאים שיקול או תופעה פיזיקאלית אשר ביטויים הנו דחייה בין חלקיקי הגרעין".

## איברי נוסחת המסה - איבר הנפח $a_V A$

איבר זה מושפע מהכוח החזק המשמש כ"דבק" בין נוקלאונים שכנים. ההנחה הנה כי לכל הנוקלאונים נפח זהה, ולכן מספר הנוקלאונים המבצעים אינטראקציה עם נוקלאון מסוים הנו מספר קבוע לכל הנוקלאונים בגרעין. כלומר, אנרגיית הקשר עבור נוקלאון בודד, בקירוב גס, הנה אנרגיית הקשר עבור זוג נוקלאונים בודד, מוכפלת במספר השכנים של כל נוקלאון (מספר קבוע, ע"פ ההנחה) מוכפלת במספר הנוקלאונים, לחלק לשניים (כדי לא לספור כל אינטראקציה פעמיים). את כל הני"ל נשקלל לכדי מקדם אחד המוכפל במספר הנוקלאונים, מקדם זה נסמן כ-  $a_V$ .

האיבר  $a_V A$  יכונה "איבר הנפח" משום שהוא פרופורציוני לנפח הגרעין - מספר הנוקלאונים הכולל.

איבר זה הוא גודל חיובי משום שהוא מוסיף לאנרגיית הקשר הגרעינית, כלומר, מחזק את גרעין. גודל המקדם כפי שנמצא בניסויים הנו:  $a_V \approx 15.56 \text{ Mev}$

## איברי נוסחת המסה - איבר שטח הפנים $- a_S A^{2/3}$

בדיון שלנו על איבר הנפח ניכרת הזנחה בולטת ביותר - לא לכל הנוקלאונים אותו מספר שכנים. לנוקלאונים הנמצאים על שפת הגרעין מספר שכנים קטן יותר, שהנו כמחצית ממספר השכנים של נוקלאון "פנימי". במקרה של גרעין המורכב מנוקלאון בודד, מדובר באפס שכנים. איבר השטח מכניס את התיקון הנדרש באיבר הנפח.

צורתו של איבר זה מניחה כי מספר הנוקלאונים הנמצאים על השפה פרופורציוני לשטח השפה (הנחה שאינה טריוויאלית כפי שנראית ממבט ראשון). מכיוון ששטח השפה של כדור  $S = 4\pi R^2$  פרופורציוני לריבוע הרדיוס שלו, ומכיוון שאנו יודעים כי הנפח פרופורציוני לחזקה השלישית של הרדיוס, נקבל:

$$R \propto V^{1/3}, S \propto R^2 \Rightarrow S \propto \left(V^{1/3}\right)^2 = V^{2/3}$$

כמו כן כפי שצינו, הנפח הוא פרופורציוני למספר הנוקלאונים  $A$ . אם נשקלל את הני"ל לכדי מקדם אחד שיוכפל בשטח הפנים נקבל איבר מצורת:

$$- a_S A^{2/3}$$

סימן המינוס הוא מכיוון שאת האנרגיה שחישבנו יש להפחית מסך האנרגיה הכוללת משום שלנוקלאונים שעל פני השטח יש פחות שכנים ולהם פחות אנרגיית קשר גרעינית, זו שהערכנו באיבר הראשון. איבר זה יכונה איבר השטח.

גודל המקדם כפי שנמצא בעזרת התאמה למדידות הנו:  $a_S \approx 17.23 \text{ Mev}$

## איברי נוסחת המסה - איבר קולון $- a_C \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}}$

עד כה לא הבחנו בין פרוטונים לנייטרונים, אולם אנו יודעים כי יש הבדל במטען החשמלי שלהם: לנייטרונים מטען אפס, בעוד שהפרוטונים טעונים במטען חיובי. לכן קיים ביניהם כוח חשמלי הדוחה אותם זה מזה. האנרגיה של כדור טעון במטען חשמלי  $Q$  וברדיוס  $R$  הנה פרופורציונית

ל  $\frac{Q^2}{R}$  (זוהי האנרגיה הדרושה לבניית הכדור הטעון, ממטענים אינפיניטיסימלים - קטנים

כרצוננו, הרחוקים זה מזה באינסוף). כמו קודם נחלץ את הרדיוס מנפח הגרעין התלוי במספר הנוקלאונים, נסיף מקדם אשר משקלל בתוכו את הסטייה של אנרגיה אלקטרוסטטית של גרעין מציאותי מכדור אידיאלי טעון, כלומר את התפלגות המטענים בתוך הגרעין (בהנחה שההתפלגות דומה בין גרעין לגרעין). מטען הגרעין תלוי במספר הפרוטונים המסומן באות  $Z$ . היינו מצפים

לאיבר מהצורה  $-a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}}$ , זאת בהנחת מטען רציף, כלומר, שניתן לחלק אותו לחלקים קטנים

כרצוננו, אבל מכיוון שהמטענים המרכיבים את הגרעינים הנם בדידים, האיבר המבטא את אנרגית הקשר החשמלית יראה מעט אחרת:

$$-a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}}$$

סימן המינוס כאן הנו מכיוון שהכוח הנו כוח דחייה, ולכן מפחית מאנרגית הקשר ובעצם מפחית מיציבותו של הגרעין. איבר זה יכונה "איבר קולוני".

גודל המקדם כפי שנמצא מהתאמות למדידות הנו:  $a_c \approx 0.697 \text{ Mev}$

איברי נוסחת המסה - איבר הסימטריה  $-a_A \frac{(A-2Z)^2}{A}$

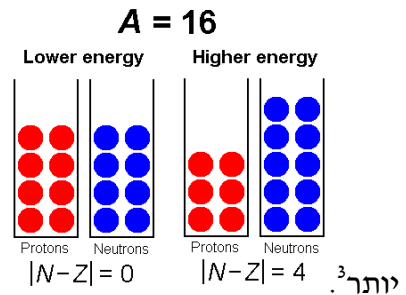
איבר הסימטריה נותן העדפה לגרעינים בהם מספר הפרוטונים קרוב למספר הנייטרונים על פני גרעינים בהם יש הפרש גדול בין המספרים. ישנן מספר תופעות פיזיקליות העומדות אחרי איבר חשוב זה.

הראשונה היא שלפי תורת הקוונטים חלקיקים אינם יכולים להתקיים במנוחה מוחלטת. לכל חלקיק חייבת להיות אנרגיה קינטית כאשר האנרגיות האפשריות שיכולות להיות לחלקיק בגרעין הן מקוונטטות, כלומר קיימים עבורן רק ערכים מסויימים. האנרגיות האפשריות האלה נקראות "רמות אנרגיה". נושא רמות האנרגיה האפשריות צריך להיות מוכר לקורא בהקשר לסידור האלקטרונים באטום, לפי רמות האנרגיה של בוהר. מסתבר שלנוקלאונים בתוך הגרעין יש רמות אנרגיה אפשריות שלפיהן הם מסתדרים.

תוצא נוסף מתורת הקוונטים הנו שרק מספר מסוים של נוקלאונים מכל סוג יכול להימצא בכל רמה. אכלוס הרמות מתחיל מהנמוכה ביותר. לאחר שהרמה הנמוכה ביותר מתמלאת, הנוקלאונים הנוספים צריכים לאכלס רמת אנרגיה גבוהה יותר. נניח שברמה הראשונה יכולים להימצא רק שני פרוטונים, אם יגיע פרוטון שלישי לא יוכל להיות ברמת אנרגיה זאת אלא יאלץ להמצא באנרגיה האפשרית הבאה - הגבוהה יותר. אותו הדבר יקרה גם כשנמלא את הגרעין בנייטרונים.

כך שאם ברמה מסוימת יתכנו שני פרוטונים ושני נייטרונים, אם יהיו בה שני פרוטונים בלבד ויגיע פרוטון שלישי יאלץ לעבור לרמה האפשרית הבאה, הגבוהה יותר ולא יוכל להישאר שם במקום נייטרון שחסר.

לכן, אם יש הפרש בין מספר הפרוטונים והנייטרונים, אז הסוג העודף נאלץ למלא רמות גבוהות יותר ויותר באנרגיות גבוהות יותר ויותר, כאשר השני נמצא ברמות נמוכות. מתיאור זה ברור שבסך הכול האנרגיה של הגרעין כולו גבוהה יותר (אנרגיית הקשר נמוכה יותר) מאשר לו היה מספר שווה של פרוטונים ונייטרונים. במקרה כזה "עדיף" לגרעין להמיר חלקיקים מסוג אחד לחלקיקים מסוג אחר (וקיימים תהליכים כאלה) על מנת להיות באנרגיה נמוכה



קיימת סיבה פיזיקלית נוספת, ואף בעלת תרומה גדולה יותר, ל"העדפה" אנרגטית של גרעינים סימטריים. האינטרקציה הגרעינית הנגזרת מהכוח החזק הרבה יותר חזקה עבור זוג של פרוטון ונייטרון מאשר לזוגות של פרוטון-פרוטון או נייטרון-נייטרון. דוגמא מובהקת להתנהגות זו הנה כי קיים גרעין קשור המורכב מפרוטון ונייטרון (זהו הדאוטרון, הגרעין של אטום דאוטריום), ולא קיימים גרעינים יציבים (קשורים) של שני נייטרונים או שני פרוטונים.

ע"י חישוב המתבסס על תורת הקוונטים ניתן להגיע לביטוי מקורב של תוספת האנרגיה לגרעין (ירידת אנרגיית הקשר) כתלות בהפרש בין מספר הפרוטונים לנייטרונים<sup>4</sup>:

$$-a_A \frac{(N-Z)^2}{A} = -a_A \frac{(A-2Z)^2}{A}$$

תוספת האנרגיה הכוללת לגרעין הנה ריבועית להפרש זה. כמות אנרגיה זו תלויה גם בנפח הגרעין, ויורדת ככל שהגרעין גדול יותר.

כמו קודם, סימן המינוס כאן הנו משום שאנו כותבים ביטוי לאנרגיית הקשר. תוספת רמות אנרגיה, הגדלת כמות האנרגיה של הגרעין תקטין את אנרגיית הקשר.

גודל המקדם כפי שנמצא מהתאמות למדידות הנו:  $a_A \approx 93.14 \text{ Mev}$

**האיבר החמישי נקרא איבר הזיווג או איבר הזוגיות.**

<sup>3</sup> לגרעין כמובן אין העדפות, ה"העדפה" עליה מדובר כאן הנה תכונה סטטיסטית, ישנה הסתברות גבוהה יותר לנוקלאון בגרעין להימצא באנרגיה נמוכה יותר.

<sup>4</sup> איברי הנוסחה כתובים במונחי המספר האטומי Z והמשקל האטומי A, מכיוון ש  $A=N+Z$  ניתן לעבור לצורה הכתובה מימין.

לאיבר זה לא נתייחס בעבודה זו משום שניתן להבין את התמונה הכוללת בצורה טובה גם בלעדיו, אך נאמר רק כי איבר זה מתייחס לתכונה נוספת של חלקיקי הגרעין והיא תכונת ה**ספין**. איבר זה נותן העדפה להרכבים בהם מספר זוגי של חלקיקי גרעין מכל סוג על פני הרכבים אי-זוגיים ומעלה את אנרגיית הקשר עבור מספר זוגי של נוקלאונים מסוג מסוים ולהיפך - מוריד.

## תהליכים גרעיניים ("דעיכה" או "התפרקות")

מנוסחת המסה של ויצאקר אליה הגענו ניתן לחשב את אנרגיית הקשר לכל איזוטופ שנרצה לכל יסוד. אולם ידוע שרק מעטים מאיזוטופים אלה מתקיימים בטבע. מכאן נובעת השאלה מדוע ישנם איזוטופים מסוימים שמתקיימים ואיזוטופים אחרים שלא? בשביל להבין סוגיה זו, כשלב ראשון נצטרך להבין מספר תהליכים המתרחשים בתוך הגרעין: טפטוף, קרינת אלפא, קרינת בטא (פלוס ומינוס), וקרינת גמא<sup>5</sup>. תהליכים אלה הנם גורם למעבר של גרעין נתון לצורה יציבה יותר והם מכונים תהליכי "דעיכה" או "התפרקות". כאשר נאמר על חומר שהוא רדיואקטיבי הכוונה הנה שגרעיני אטומים בתוכו עוברים תהליך דעיכה ופליטה של חלקיקים או קרינה אלקטרומגנטית באנרגיה גבוהה ("קרינה רדיואקטיבית"). מה בעצם קורה? קרינת בטא (מינוס) היא דוגמא טובה וקלה לדין. אנרגיית המסה של הנייטרון גבוהה משל הפרוטון (הוא "כבד" יותר). לכן הוא יכול להתפרק לפרוטון ולתוצרים נוספים. נסיון מלמד שתוצרים אלו הם אלקטרון ונייטרינו (חלקיק קל מאד). מאחר ותהליך זה מקיים את חוקי השימור, כמו שימור אנרגיה ומטען, אין שום איסור על קיומו, והסיכוי להתרחשותו גדול מאפס. חשוב להבין שאין בעצם דרך חזרה מהתפרקות זו, בשל העובדה שהאלקטרון והנייטרינו "בורחים" (נעים הלאה) מהפרוטון ואין כל סיכוי סביר שזוג כזה "יחזור" מהסביבה ויהפוך את הפרוטון חזרה לנייטרון.

**טפטוף:** זהו תהליך של פליטת נוקלאון מהגרעין, התפרקות הגרעין לגרעין חדש בעל נוקלאון אחד פחות ולנוקלאון חופשי, זה שהוחסר מהגרעין.

באנלוגיה להתפרקות בטא, אם קיים תהליך שאינו מפר את שימור האנרגיה, כמו גם את שאר חוקי השימור (כמו שימור המטען) אז קיים סיכוי מסויים גדול מאפס שהוא יתרחש. מה שחשוב שוב הוא שאין "דרך חזרה" מתהליך זה, והסיכוי שהגרעין יחזור שוב לצורתו הקודמת קטן מאד. במילים אחרות: לו האנרגיה של הרכב נוקלאונים מסוים ("גרעין") הנה גדולה מהאנרגיה של הרכב דומה בעל נוקלאון אחד פחות, קיימת הסתברות מסוימת שגדלה ככל שהזמן עובר<sup>6</sup>, כי אכן ייפרד נוקלאון בודד, והגרעין ימשיך את חייו עם נוקלאון אחד פחות. נוקלאון זה יכול להיות פרוטון או נייטרון בהתאם להעדפה האנרגטית.

**קרינת בטא פלוס ומינוס:** בקרינות אלה נוקלאון אחד יכול להפוך לנוקלאון אחר, פרוטון לנייטרון או להיפך. מכיוון שמטעניהם החשמליים שונים (כמו כן תכונות אחרות לגביהן יש חוקי שימור פיזיקאליים) נפלטים בתהליך חלקיקים על מנת ליצור איזון ולדאוג שתכונות אלו ישמרו<sup>7</sup>. כמו שאמרנו קודם, כאשר נייטרון הופך לפרוטון מטען אפס הופך להיות מטען חיובי ועל מנת ליצור איזון נפלט אלקטרון שנוצר בתהליך. כך סך המטען של החלקיקים בסוף התהליך ("התוצרים") הנו אפס, כמו בתחילת התהליך.

כן להיפך, כאשר פרוטון הופך לנייטרון נוצר (יחד עם עוד חלקיק) פוזיטרון, זהו חלקיק דומה לאלקטרון אך עם מטען חיובי.

<sup>5</sup> קיים תהליכים נוספים בהם לא נדון כעת, כמו לכידת אלקטרון ע"י פרוטון.

<sup>6</sup> זו הסתברות קבועה ליחידת זמן.

<sup>7</sup> חוקי שימור פיזיקאליים מחייבים שימור של תכונות מסויימות כמו שימור המטען הכולל.

החלקיקים הנפלטים נקראים קרינת בטא, והיא טעונה חשמלית – קרינה חיובית מעידה על תהליך של הפיכת פרוטון לנייטרון, וקרינה שלילית מעידה על תהליך הפוך, נייטרון הופך לפרוטון. תהליך זה יתרחש כאשר ישנה העדפה אנרגטית להתרחשותו, זאת אומרת, כאשר הרכב גרעין בו נוקלאון אחד מוחלף באחר הנו בעל אנרגיה כוללת נמוכה יותר (אנרגית קשר גבוהה יותר).  
**קרינת אלפא:** חלקיק אלפא הנו חלקיק יציב מאד, בעל שני פרוטונים ושני נייטרונים (זהו בעצם איזוטופ מוכר של הליום:  ${}^4\text{He}$ ), קיים תהליך בו נפלט חלקיק זה. כמו במקרים קודמים תהליך זה יתרחש כאשר ישנה העדפה אנרגטית לכך<sup>8</sup>.

**הסתברות לתהליכים שונים:** כאמור בגרעין פועלים כוחות שונים, הכוח החזק, הכוח האלקטרומגנטי והכוח החלש. הכוחות האלה הם המשפיעים על הבדלים באנרגית הקשר בין צירופי גרעין שונים. בהשפעתם גם מתרחשים תהליכי הדעיכה וההתפרקות השונים. הכוח העיקרי המשפיע על תהליכי טפטוף הנו הכוח החזק, לכן תהליכים אלו הם אנרגטיים ומהירים מאד, לעיתים כמעט מידיים. דעיכות אלפא ובטא הם בהסתברות נמוכה הרבה יותר, ולכן איטיים הרבה יותר ויכולים לקחת אלפי ואף מיליוני שנים. דעיכת בטא מושפעת מן הכוח החלש, ודעיכת אלפא מושפעת מאיזון בין הכוח החזק לכוח האלקטרומגנטי, ודורשת התרחשות תהליך קוונטי של מנהור (קפיצה בין מצבי אנרגיה נמוכים יחסית, אשר ביניהם קיימים מצבי אנרגיה גבוהים יותר שאינם אפשריים). לכן כאשר יתכנו כמה תהליכים, סדר הקדימויות הנו מהתהליך האנרגטי יותר לפחות אנרגטי – טפטוף, ואח"כ דעיכת בטא או אלפא.

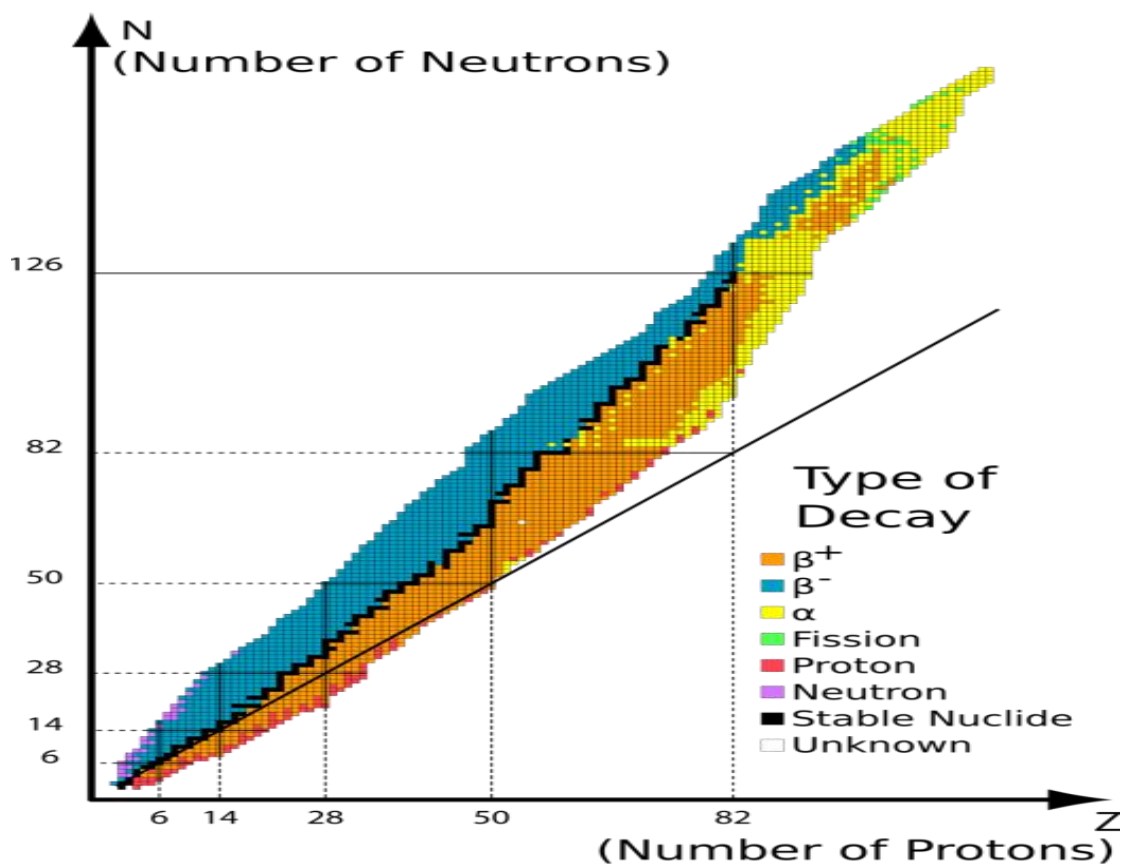
### עמק היציבות

לאחר היכרותנו עם התהליכים הגרעיניים נוכל למצוא מהם הגרעינים שיכולים להתקיים בטבע באופן יציב. הגרעינים היציבים הם כאלו אשר אנרגיית הקשר הכוללת שלהם תהיה גבוהה יותר (כלומר, אנרגיית הגרעין נמוכה יותר) מאשר של צירופי הנוקלאונים שהיו מתקבלים לו עבר הגרעין כל אחד מתהליכי הדעיכה לעיל, לכן לא יתקיימו בהם תהליכי דעיכה אלו. ניתן בעזרת חישוב (שביסודו נמצאת נוסחת המסות) למצוא ולסמן עבור כל יסוד (כלומר, עבור כל  $Z$ ) את האיזוטופ או האיזוטופים היציבים. אם נסמנם כגרף על פני תרשים בו ציר אחד יהיה מספר הפרוטונים וציר שני יהיה מספר הנייטרונים יתקבל קו עקום המכונה "עמק היציבות". כל האיזוטופים היציבים הקיימים בטבע נמצאים ב"עמק היציבות". שאר האיזוטופים הקיימים אינם יציבים והם עוברים תהליכים גרעיניים (פליטת נוקלאונים) שיכולים לקחת בין אלפיות השנייה ואף פחות עד למאות אלפי שנים ויותר, תהליכים אלו מביאים את הגרעין ליציבות מרבית. גרעין שעבר תהליכים אלה והגיע לעמק היציבות אין לו יותר לאן להתקדם ותהליך הדעיכה או ההתפרקות הגרעינית נעצר.

עבור יסודות קלים, כלומר, עד בערך  $Z=15$ , ניתן לראות שהאיזוטופים היציבים ביותר הם אלו שבהם מספר הפרוטונים שווה בערך למספר הנייטרונים. עמק היציבות נראה באזור זה כקו אלכסוני. ככל שהיסוד גדל, ניתן לראות שעמק היציבות "מתעקם", כלומר, האיזוטופים היציבים

<sup>8</sup> זאת אומרת, כאשר אנרגית הקשר של הגרעין המקורי נמוכה יותר מאנרגית הקשר הכוללת של התוצרים – הגרעין המתקבל וחלקיק האלפא.

הם דווקא אלה שיש להם יותר נייטרונים מפרוטונים. ניתן לראות עובדה זו כתוצאה מתמטית של נוסחת המסה, וכן באופן אינטואיטיבי: בין הפרוטונים בגרעין קיימת דחייה חשמלית, הגדלת מספר הנייטרונים תגדיל את המרחק ביניהם ותקטין את האנרגיה החשמלית של הגרעין (תגדיל את אנרגיית הקשר). לעומת זאת הפרש גדול בין מספר הפרוטונים והנייטרונים יאלץ את הנייטרונים לאכלס רמות אנרגיה גבוהות (וגם כאן, להקטין את אנרגיית הקשר). בעצם ניתן לראות זאת כמאבק בין איבר הסימטריה, ששואף ליישר את הגרף כך שמספר הנוקלאונים יהיה שווה משני הסוגים לאיבר הקולוני ששואף "לעקם" את הגרף ולהגדיל את עודף הנייטרונים. בגרעינים עם מעט פרוטונים איבר הסימטריה מתגבר, וככל שגדל מספר הפרוטונים האיבר הקולוני נהיה משמעותי יותר.



בשחור- האיזוטופים היציבים הקיימים בטבע (עמק היציבות)  
 הצבעים האחרים הם האיזוטופים הלא יציבים המוכרים לנו (יסודות רדיואקטיביים)

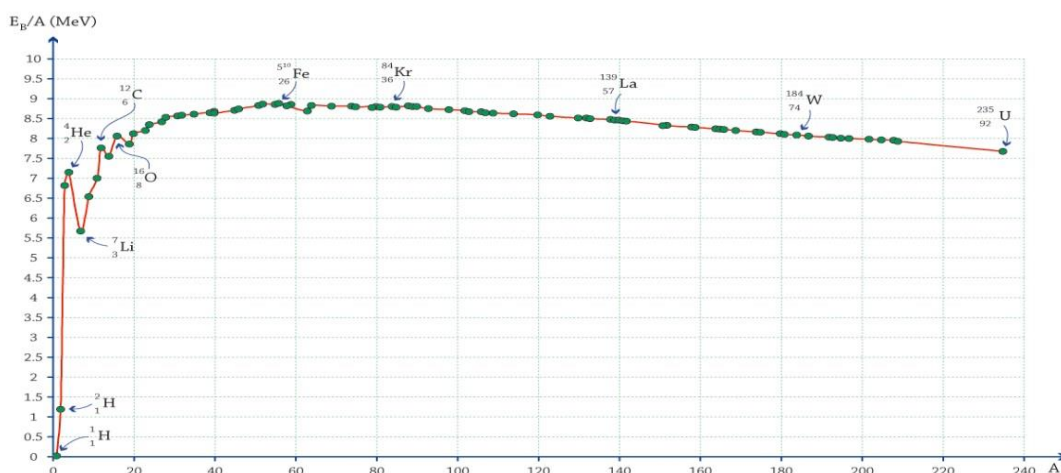
בתרשים לעיל ממופים גרעינים אפשריים שנוצרו באמצעים מלאכותיים וניסויים. רק מעט מאד מהם הנם יציבים, שאר הגרעינים דועכים בסוגי דעיכה שונים עד שהם מגיעים למצב יציב. בתרשים (הפוך במאשר בטבלת האקסל להלן) הציר האופקי הנו מספר הפרוטונים, והציר האנכי הנו מספר הנייטרונים. כל משבצת מייצגת גרעין אפשרי. טפטוף פרוטון יראה בתרשים זה כמעבר ממשבצת מסוימת למשבצת הסמוכה לה משמאל. טפטוף נייטרון יראה כמעבר למשבצת הסמוכה מלמטה.

דעיכת בטא תראה כתנועה באלכסון למשבצת למטה מימין (בטא מינוס) או למעלה משמאל (בטא פלוס).

פליטת אלפא בתרשים זה תראה כתנועה שתי משבצות שמאלה ושתי משבצות למטה. נציין כי גרעינים גדולים מעבר לאורניום יעדיפו לפלוט חלקיק אלפא, וזו הסיבה שאינם קיימים. פליטת אלפא מגבילה את מספר היסודות היכולים להתקיים בטבע, לולא תהליך זה יתכן כי היו יסודות כבדים הרבה יותר.

### אנרגיית קשר לנוקלאון

אם ניקח את כל האיזוטופים המופיעים בעמק היציבות, נחלק את אנרגיית הקשר של כל אחד מהם במספר הנוקלאונים שלו ונציב בגרף המתאר אנרגיית קשר ממוצעת לנוקלאון כפונקציה של מספר הנוקלאונים בגרעין (מספר המסה) נגיע לגרף הנראה כך:



### גרף ניסויי של אנרגיית קשר לנוקלאון בעמק היציבות

### הציר האופקי הנו מספר הנוקלאונים בגרעין והאנכי אנרגיה ב-MeV

מהגרף ניתן לראות שעבור היסודות הקלים הגרף עולה בתלילות. עובדה זו נובעת מכך שאיבר שטח הפנים הנו משמעותי ביותר בגרעינים קטנים והוא מקטין מאוד את אנרגיית הקשר (פחות שכנים צמודים). עליה זו הולכת ומתמתנת עד לברזל, שהוא היסוד היציב ביותר הקיים. 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.

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

לגרף הזה יש חשיבות מעשית משום שממנו ניתן ללמוד אם פרוק של גרעינים יגרום לנו "להרוויח" אנרגיה או להפסיד.<sup>9</sup>

<sup>9</sup> נחזור לגרף זה כאשר נדון בתהליך הביקוע.

## גיליון אקסל

בגיליון המצורף מחושבת אנרגיית הקשר 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.

בעזרת הטבלה ניתן לבדוק אם תהליך מסוים יתכן: 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.

בגיליון טפטוף פרוטון הנו מעבר למשבצת הסמוכה מימין. פליטת בטא פלוס או בטא מינוס הנו מעבר למשבצת הסמוכה מימין למטה או משמאל למעלה, ופליטת אלפא הנה מעבר שתי משבצות למעלה ושתיים ימינה. כל אחד מהתהליכים יקרה לו האנרגיה המחושבת במשבצת ה"מיועדת" גדולה יותר מאשר במקורית.

בטבלאות הבאות בגיליון חושבו אפשרויות אלו, וכל משבצת סומנה בהתאם לתהליך שתעבור: האם טפטוף, או קרינת בטא, ונצבעה בצבע שונה. משבצות (צירופי נוקלאונים) אשר לא יעברו תהליך מסומנות בלבן, והן "עמק היציבות" צירופים אלו הנם יציבים וזהו המופע של יסודות אלו בטבע.

בטבלה אחרת ניתן לראות מהם הצירופים שעשויים לעבור תהליך פליטת אלפא. בטבלה נוספת נצבעו המשבצות בגווני אפור לפי האנרגיה לנוקלאון בגרעין, מבהיר לאנרגיה נמוכה עד לכהה ביותר לאנרגיה גבוהה.

בגיליון ניתן לעקוב אחרי צירוף נוקלאונים ולראות כיצד ישנה, ועל איזה יסוד יתייצב בסופו של דבר.

ניתן לשנות את ערכם המספרי של המקדמים בנוסחת המסה ולראות כיצד השינוי ישפיע על התמונה הכוללת (איפוס המקדם הקולוני למשל יגרום לעמק היציבות להראות כקו אלכסוני ישר, הגדלת המקדם הקולוני תגרום לעמק היציבות להראות מעוקם כלפי מטה).

## תהליך הביקוע הגרעיני

### הקדמה

בפרק הקודם למדנו על מבנה הגרעין, הכוחות הפועלים בו, אנרגיית הקשר הגרעינית, הסיבה לקיומם של איזוטופים, אילו איזוטופים קיימים בטבע ולמה.

בפרק הזה נדון במקרה שבו יש לגרעין אנרגיה עודפת ביחס למצב עם אנרגיה מינימלית שלו (לרוב בעקבות כניסת נייטרון עודף לגרעין<sup>10</sup>), מצב זה נקרא **מצב מעורר**, ומה יכול להתרחש החל מאותו הרגע.

בגרעינים כבדים מספיק, נראה שבעקבות תוספת הנייטרון קיימת הסתברות מסוימת לביקוע גרעיני, כלומר, לפרוק הגרעין למספר חלקים. כתוצאה מהביקוע מתקבלים יסודות חדשים שחלקם יציבים וחלקם אינם יציבים (רדיואקטיביים). כתוצאה מהביקוע משתחררת גם אנרגיית קשר גרעינית בצורה של אנרגיה קינטית של תוצרי הביקוע וקרנית גמא (קרנה אלקטרומגנטית באורך גל קצר מאד, כלומר, באנרגיה גבוהה).

בפרק הקודם קיימנו דיון במצבים בהם הרכב נוקלאונים מסוים נמצא באנרגיה מינימלית אפשרית להרכב זה, שנקרא מצב היסוד. אך לא תמיד כך הדבר ויתכן כי גרעין ימצא במצב מעורר ולא ברמת היסוד שלו. כדי להבין בדיוק את המתרחש במקרה זה יש צורך במודל מורכב יותר ממודל הטיפה המתבסס בצורה מקיפה יותר על תורת הקוונטים, זהו **מודל הקליפות**. בדומה למבנה האלקטרונים באטום גם בגרעין ישנן רמות אנרגיה אפשריות הניתנות לתיאור כ"קליפות" המרכיבות את הגרעין. הדינאמיקה שמשתמעת ממודל זה הנה מורכבת יותר ולא ניכנס אליה לפרטים, אלה רק נדון באופן פשטני ביותר בתוצאות המשתמעות ממנה.

אנו נבחן את תהליך הביקוע בגישות שונות: נסתכל עליו כעל מעבר בין **מצבים שונים** של הגרעין בעלי הסתברויות שונות. נסתכל עליו **במונחי אנרגיה**, כעל שינוי רציף בהתפלגות האנרגיה של הגרעין בין אנרגיה פנימית (בדומה לחום) לבין אנרגיית השטח ואנרגיה קולונית. נראה איך שינוי זה של ההתפלגות בין שלושת צורות האנרגיה עובר דרך נקודה קריטית מסויימת בה הגרעין דומה לטיפה מעוותת. ונראה כיצד בסוף התהליך הוא מגיע משם לשני תוצרים עם סכום אנרגיות יותר נמוך מאשר הגרעין המקורי. עודף האנרגיה הולך לאנרגיה קינטית של התוצרים ורסיסים נוספים כמו נייטרונים. וכן נבחן את **הכוחות** הפועלים בתהליך ומהי דינאמיקת הכוחות המאפשרת את הביקוע.

### הביקוע הגרעיני כמקור אנרגיה

בפרק הקודם ראינו כי עם הגדלת הגרעין, עבור גרעינים בעמק היציבות, אנרגיית הקשר הממוצעת לנוקלאון משתנה. בהתחלה היא הולכת וגדלה, עד גרעין הברזל ( $A=56$ ) ולאחר מכן הולכת וקטנה. לכן אנרגיית הקשר של גרעין כבד מספיק (שמאסתו כפולה לפחות ממאסת הברזל) קטנה יותר מאנרגיית הקשר הכוללת של שני גרעינים קלים שמספר הנוקלאונים בכל אחד מהם הוא מחצית מאשר בגרעין הכבד (באופן שהרכב הנוקלאונים בגרעין הכבד זהה להרכב בשני הגרעינים

<sup>10</sup> מדובר בעצם ביצירה של איזוטופ חדש.

הקלים יחד). כלומר, גרעין כבד מספיק יכול מבחינה אנרגטית להתחלק לשני גרעינים קלים יותר.<sup>11</sup>

כפי שהוסבר כבר, הסיבה לכך היא שהאיברים השונים בנוסחת המאסה מושפעים אחרת מגידול במשקל האטומי A. האיבר הקולוני (שהנו שלילי) הנו ריבועי למספר הפרוטונים Z, שעבור אטומים יציבים תלוי מונוטונית ב-A, ותלוי הפוך בשורש שלישי של A. לכן איבר זה תלוי בקירוב ב-A בחזקת 5/3. זהו האיבר שבו השינוי הנו המשמעותי ביותר לאנרגיית הקשר בגרעינים גדולים (לשינויים קטנים במספר הנוקלאונים של גרעין גדול). לכן לגרעין בעמק היציבות עם מספר נוקלאונים A ומספר פרוטונים Z יש יותר אנרגיה חשמלית (פחות אנרגיית קשר) מאשר שני גרעינים עם מחצית הנוקלאונים לכל אחד.

### השתנות הגרעין במהלך הביקוע

**שינוי צורה:** כדי שגרעין יתחלק לשני גרעינים קטנים יותר (יתבקע) עליו לעבור שינוי צורה מסוים. עליו להתארך ולהימתח עד ששני חלקי הגרעין יתנתקו אחד מהשני. בתהליך זה גדל שטח הפנים של הגרעין באופן ניכר. הגדלת שטח הפנים דורשת אנרגיה (להזכיר, איבר שטח הפנים הנו בסימן מינוס, הגדלת שטח הפנים מקטינה את אנרגיית הקשר, זאת אומרת, מגדילה את האנרגיה של הגרעין). פרוש הדבר שקיים מחסום אנרגטי לביקוע. עבור רוב הגרעינים הקיימים שיכולים להתבקע הדרך היחידה לעשות זאת ממצב היסוד שלהם היא בעזרת "מנהור" קוונטי, ביקוע כזה נקרא ביקוע ספונטאני, ותוצאותיו לרוב הן פליטת חלקיק אלפא. ככלל ההסתברות לביקוע ספונטאני נמוכה מאד. המדד המקובל לאפיין הסתברות זאת הוא זמן מחצית החיים. פרמטר זה יכול להגיע למיליארדי שנים, זמן מחצית החיים של אורניום 238 למשל, הוא כ-4 מיליארד שנים. אם מספקים אנרגיה עודפת (מעררים את הגרעין), מעל גובה המחסום, אז סיכויי הביקוע עולים בצורה דרמטית, ביקוע כזה נקרא ביקוע מאולץ. לתיאורו משתמשים בשיקולים שנלקחו מעולם של מכניקה סטטיסטית.

### מרחב המצבים והקשר לאנרגיה העודפת

לצורך הסבר חלק זה נעשה שימוש במספר מושגים מופשטים שמקורם בתורת הקוונטים ובפיזיקה סטטיסטית. פיזיקה סטטיסטית הנה תורה פיזיקלית העוסקת במערכות "גדולות" להן יש מצבים רבים אפשריים, ואשר עושה שימוש בכלים סטטיסטיים על מנת להעריך את ההסתברות להתפתחויות אפשריות של המערכת. הצידוק לשימוש בכלים מתורה זו הוא שאנרגיית העירור (אנרגיה עודפת) הטיפוסית הגבוהה ממחסום ביקוע, עבור גרעינים מתבקעים בהם נתעניין היא כה גבוהה (7-8 Mev כתוצאה ניסויית) שלגרעין יהיה מספר עצום של מצבים בהם הוא יוכל להמצא. בהנחה של סיכויים שווים להמצא בכל אחד מהמצבים האלה (כפי שכתבנו לעיל) אנחנו מוצאים אנלוגיה ברורה למה שקורה עם מערכות סטטיסטיות רבות חלקיקים בשווי משקל תרמי.

---

<sup>11</sup> יש לקחת בחשבון את העובדה שאנרגיית הקשר 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.

**מצב:** עד כה השתמשנו במושג זה מבלי לפרט מה הוא מתאר בדיוק, נחدد עתה את המושג. "מצב" של מערכת בפיזיקה קלאסית, הנו "סט" המפרט את מיקומו ומהירותו של כל חלקיק במערכת. במערכות רבות חלקיקים (כמו גרעין מתבקע טיפוס) מספר מצבים כאלה, מספר הסטים האפשריים, עבור אנרגיה פנימית נתונה הוא גדול מאוד, וגדל באופן מעריכי עם גידול האנרגיה הפנימית. את המושג של מצב ניתן להכליל גם לפיזיקה קוונטית. כאן הסט יכול פרמטרים קוונטים של כל החלקיקים, וגם כאן מספר המצבים הוא גדול וגדל מעריכית למערכות גדולות.

**"מרחב המצבים":** אלו הם כל המצבים האפשריים עבור מערכת עבור אנרגיה פנימית נתונה. ככל שהאנרגיה ה"עודפת" הפנימית של המערכת גבוהה יותר, ישנם יותר מצבים אנרגטיים אפשריים לכל חלקיק, וכך סך הכול מרחב המצבים גדול יותר.

**השפעת שינוי הצורה על מרחב המצבים:** כאשר צורתו של גרעין משתנה, משתנה גם שטח הפנים שלו, ולכך נדרשת אנרגיה<sup>12</sup>. עבור אנרגיה כוללת נתונה שינוי זה יכול לבוא רק על חשבון שינוי שווה הפוך של האנרגיה הפנימית. הגדלת שטח הפנים תוביל להקטנת האנרגיה העודפת הפנימית של הגרעין. וכפי שנבאר בהמשך מרחב המצבים הפנימיים יקטן מעריכית. באנלוגיה של מערכות סטטיסטיות: הקטנה של מרחב המצבים תקטין את הסיכוי שהמערכת תהיה בצורה זאת. ניתן להסתכל על זה גם כך: לגרעין ישנם הרבה יותר אפשרויות להיות בצורה כדורית או קרובה לכדורית כלשהיא, לעומת מספר האפשרויות שיש לו להיות בצורה מוארכת או פחוטה, שאלו הצורות שעליו לעבור בדרך לביקוע. ככל שצורת הגרעין יותר מוארכת כך ישנם פחות מצבים אפשריים עבורו. לכן ההסתברות שימשיך בכיוון זה ויגיע עד לביקוע קטנה. כמובן שההסתברות אינה יורדת לאפס, אחרת לעולם לא היינו מקבלים ביקוע (אם נזניח מהאפשרות של מנהור).

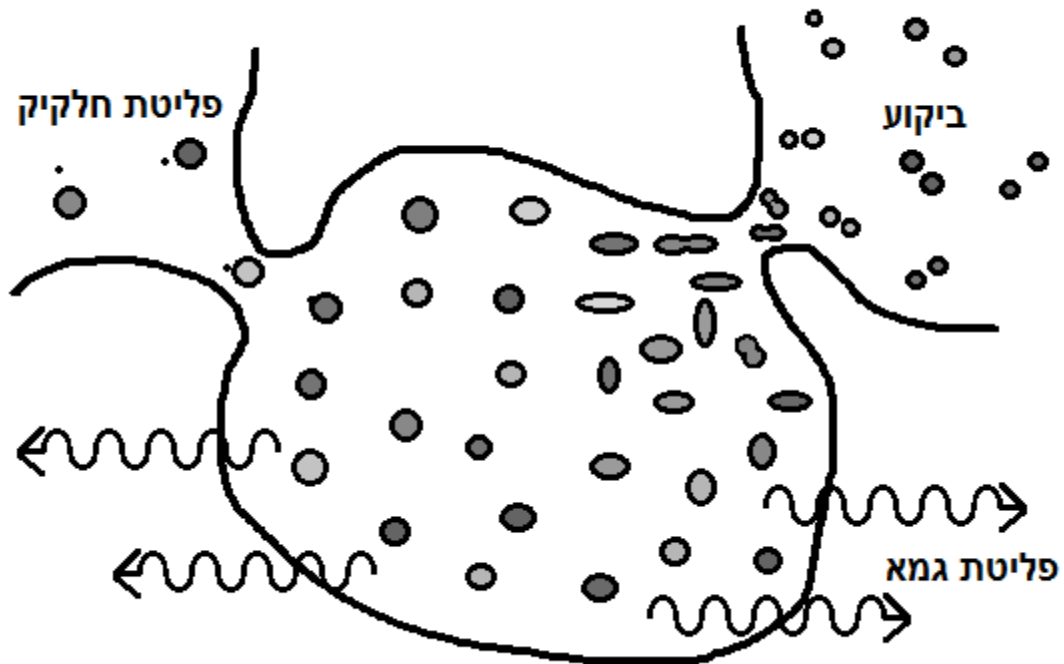
### התפתחויות אפשריות של הגרעין

כאמור לצורך תהליך הביקוע עלינו "לערר" את הגרעין, להעניק לו אנרגיה עודפת מעבר לאנרגיה המינימאלית הדרושה לקיומו. אנרגיה זו מתפזרת בין חלקיקי הגרעין. הם "מתנגשים" אחד בשני ומעבירים את האנרגיה מאחד לשני באופן אקראי, כך יתכן כי אנרגיה זו תהיה מחולקת באופן שווה פחות או יותר בין החלקיקים, או שמספר מועט של חלקיקים יקבל את רוב האנרגיה, וקיים אפילו סיכוי שכמעט כל האנרגיה העודפת תעבור לחלקיק בודד אחד בגרעין. מהן התוצאות האפשריות? באופן תיאורטי ישנן אין ספור אפשרויות, ביניהן אפשרויות ביקוע שונות ואפשרויות לפליטת חלקיקים. אולם מסתבר באופן ניסויי כי ישנן כמה אפשרויות שסבירותם גבוהה.

---

<sup>12</sup> צורת כדור הנה הצורה בה שטח הפנים הנו הקטן ביותר האפשרי עבור נפח נתון. ב"איבר שטח הפנים" חישבנו את אנרגית הקשר עבור גרעין כדורי. כל שינוי מצורה כדורית מחייב הגדלה של שטח הפנים.

## מרחב המצבים



באיור לעיל מתואר מרחב המצבים כשטח שבתוכו יתכנו מצבים אפשריים לגרעין. העיגולים והאליפסות מייצגות מצבים אפשריים שונים של הגרעין. הקו התוחם מייצג את מגבלת האנרגיה, ישנם גם מצבים מחוצה לו, אולם הם אינם אפשריים משום שקיומם דורש אנרגיה רבה יותר. מתוך כל מצבי הגרעין האפשריים ישנם מצבים מועטים יחסית שיכולים להוביל לביקוע הגרעין, נוצר מעין "צוואר בקבוק" הנראה באיור בין האזור בו הגרעין עדיין שלם לבין האזור בו הגרעין מבוקע.

באיור גם מתוארות אפשרויות נוספות להפטר מהאנרגיה העודפת הפנימית, הן פליטת חלקיק, נייטרון, בעל אנרגיה קינטית גבוהה למדי, או פליטת קרינת גמא. כפי שמודגם באיור גם כדי לפלוט חלקיק על הגרעין לעבור דרך מצבים מסוימים. אך פליטת גמא תתכן ממצבים אפשריים רבים. מה שמגביל את הסתברותה של פליטת גמא הנה עוצמתה הנמוכה יחסית של האינטרקציה האלקטרומגנטית לעומת האינטרקציה הגרעינית.

קיימות עוד אפשרויות להפטר מעודף האנרגיה, אולם לא הוספנו אותן באיור משום שהן בהסתברות נמוכה יותר.

### מבט על הכוחות והאנרגיות בתהליך

**הכוחות הפועלים:** ראשית נבחין בין הכוחות הפועלים להחזיק את הגרעין יחד לבין הכוחות הפועלים לפרק אותו.

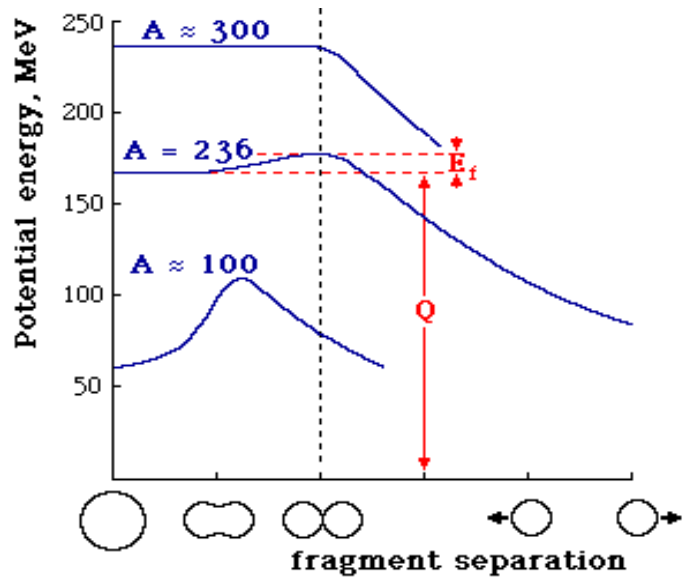
כאמור, הכוח המחזיק את הנוקלאונים יחד בגרעין הנו הכוח החזק. עוצמתו גדולה בהרבה ביחס לכוחות האחרים (ובאופן ספציפי, ביחס לכוח החשמלי) אך הוא קצר טווח מאד - עוצמתו יורדת בצורה משמעותית מאד עם המרחק. נוכל בקירוב טוב להתייחס אליו כ"דבק" המשפיע רק על שני נוקלאונים הצמודים אחד לשני. למעשה עד שנוקלאון לא מגיע לטווח מגע ממש עם הגרעין לא

יוכל להילכד" ולהתחבר לגרעין. מרגע שזה קרה יהיה צורך באנרגיה רבה על מנת לנתק אותו מהגרעין. נוכל לתאר זאת בצורה ציורית כ"בור" אשר נוקלאון הנמצא על שפתו עדיין יכול להתרחק ולנוע הלאה מהבור, אולם מרגע שנפל פנימה (איבד אנרגיה) עלינו להשקיע אנרגיה על מנת להעלות אותו ו"לנתק" אותו מהבור. מצב זה מכונה בפיזיקה "בור פוטנציאל". הנוקלאונים בגרעין יציב נמצאים ב"בור פוטנציאל" שכזה.

אולם קיים כוח אחר אשר פועל להרחיק נוקלאונים אחד מהשני, זהו הכוח החשמלי הפועל על הפרוטונים בעלי המטען החיובי. מאבק בין שני כוחות אלו מכתוב את התפתחות תהליך הביקוע. **שינוי האנרגיה במהלך הביקוע:** כאשר הגרעין משנה את צורתו בדרכו לביקוע ומתארך, גדל שטח הפנים של הגרעין, והאנרגיה שלו (איבר שטח הפנים בנוסחת המסה) גדלה. אולם מאידך, הצורה החדשה של הגרעין מאפשרת לחלקיקים נושאי המטען החשמלי (פרוטונים) להתרחק אחד מהשני ולהסתדר בצורה שתקטין את האנרגיה החשמלית. כך מצד שני אנו מרוויחים אנרגיה קולונית. היחס בין האנרגיות תלוי בהרכב וגודל הגרעין. עבור גרעינים בסדר גודל של האורניום, כל זמן שהגרעין עדיין לא התבקע האנרגיה הנדרשת על מנת להגדיל את שטח הפנים גדולה מהאנרגיה המתקבלת מהרחקת המטענים. לכן ככל שהגרעין מתקרב לביקוע האנרגיה של שטח הפנים של הגרעין עולה, כדי להגיע לביקוע עליו לטפס במעין "מדרון פוטנציאל" שרק לאחר שיגיע לפסגתו יתחיל לרדת שוב וירוויח את האנרגיה שאבדה לו, ועוד. פסגה זו מכונה "מחסום הפוטנציאל" וגובהו תלוי בעיקר בגודל הגרעין.

**מחסום הפוטנציאל:** כדי להגיע לביקוע של הגרעין, עליו לשנות את צורתו ולהעלות את אנרגיית הפנים (הצורה) מעבר לאנרגיה מסוימת המכונה מחסום פוטנציאל, לגרעין אמנם יש את האנרגיה הכוללת הדרושה על מנת לבצע זאת, אולם ככל שהאנרגיית הצורה של הגרעין גדולה יותר, נותרת לו פחות אנרגיה פנימית עודפת, ולכן מספר המצבים האפשריים שלו קטן וההסתברות של הגרעין להגיע למצב זה קטנה. הגרעין "מעדיף" להיות באנרגיות נמוכות יותר, ו"קשה לו" לטפס במעלה מחסום הפוטנציאל.

בגרף הבא הציר האופקי מתאר באופן שרירותי שלבים שונים בהפרדות הגרעין לשניים. בצד השמאלי ביותר הגרעין קרוב ביותר לכדור, וככל שנעים ימינה על הציר האופקי הגרעין הולך ומשנה את צורתו עד להפרדות הגרעין לשניים והמשך התרחקות החלקים אחד מהשני. הציר האנכי מתאר את האנרגיה הכוללת של הגרעין עבור שלבים שונים (צורות שונות) בביקוע הגרעין.



בגרף שלוש עקומות עבור שלושה גדלים שונים של גרעין. אנו רואים שמיקום מחסום הפוטנציאל (נקודת השיא) וכן גובה המחסום ביחס לאנרגיה במצב ההתחלתי שונה מגרעין לגרעין. באופן כללי בגרעינים קטנים יותר נקודת השיא של מחסום הפוטנציאל תופיע מוקדם יותר בתהליך הביקוע, ותהיה גבוהה יותר. עבור גרעינים גדולים מספיק אין כלל מחסום פוטנציאל ולכן גרעינים כאלו אם ייווצרו, יתבקעו מייד באופן ספונטני ולא יהיו קיימים בטבע.

**גובה מחסום הפוטנציאל:** עבור גרעינים בסדר הגודל של גרעין האורניום האנרגיה הנדרשת להגדלת השטח בתהליך הביקוע גדולה מהאנרגיה החשמלית המורווחת מהגדלת המרחק בין המטענים. לכן ככל שמתקרבים לביקוע נדרשת אנרגיה גדולה יותר ויותר. מרגע שהגרעין נפרד לשני חלקים (נתייחס אליהם כשני כדורים) שטח הפנים לא גדל יותר, גודל זה נשאר קבוע עבור שני החלקים ומענה ככל שיתרחקו זה מזה האנרגיה החשמלית המשותפת שלהם תרד. וכך האנרגיה הכוללת שלהם.

ניתן בקירוב לחשב את האנרגיה במצב זה אם נתייחס לכל כדור כמטען נקודתי ונחשב את האנרגיה החשמלית ביניהם. נחשב ונוסיף לכך את האנרגיה של כל כדור בנפרד מחושבת לפי נוסחת המסה. זוהי האנרגיה הכוללת ברגע ההפרדות.

אם נפחית ממנה את האנרגיה הכוללת של הגרעין ככדור אחד (המצב המקורי), נקבל את גובה מחסום הפוטנציאל.

### תוצרי הביקוע

כאשר נייטרון פוגע בגרעין אטום כבד וגורם לביקוע, הגרעין "נשבר" למספר גרעינים קלים שסכום המסות שלהם לא שווה למסה המקורית. גרעינים חדשים אלו מכונים "תוצרי הביקוע". הפרש המסות בא לידי ביטוי באנרגיית קשר שנפלטת וכן בצורת נייטרונים המשתחררים במהירויות מאוד גבוהות. כאן בא לידי ביטוי נושא שקילות מסה- אנרגיה, שעליה דיברנו בפרק הראשון.

בעזרת נוסחת המסה ניתן לחשב את אנרגיית הקשר של גרעין אורניום 235 לאחר שנוסף לו נייטרון (הופך ל-236)<sup>13</sup>. צורה שכיחה הנה ביקוע לגרעין קריפטון 92 וגרעין באריום 141 ועוד שלושה נייטרונים. אם נחשב את אנרגיית הקשר של שני הגרעינים שמתקבלים נקבל סכום שהוא גדול משל האורניום (אנרגיית קשר גדולה יותר = אנרגיה כללית קטנה יותר). הפרש זה הנו האנרגיה אותה אנו מרוויחים והיא נפלטת כאנרגיה קינטית של התוצרים וכקרינת גמא.

כתוצאה ניסויית נראה כי סדר הגודל של האנרגיה המשתחררת בביקוע בודד הוא 200MeV. נוכל להשוות זאת לאנרגיה המשתחררת מבעירת דלק רגיל, כ- 50KeV מאינטראקציה של מולקולה בודדת. תכולת האנרגיה לפי מאסה הנה כ- 80TJ ( $8 \times 10^{13}$  ג'אול) לקילוגרם אורניום העובר ביקוע<sup>14</sup>, לעומת כ- 44MJ לקילוגרם בנזין בשריפה כימית, פי 2 מליון. הסיבה לצורת ביקוע זאת ולעובדה שמתקבלים שני גרעינים שונים כגודלם מקורה במודל הקליפות המבוסס על תורת הקוונטים.

אם נחזור ונסתכל על הגרף המתאר את האנרגיה לנוקלאון עבור גרעינים שונים נראה כי אנו יכולים להרוויח אנרגיה בביקוע גרעינים הגדולים מברזל. בכל אלה נרוויח אנרגיית קשר כאשר נעבור לגרעין קטן יותר. בגרעינים הקטנים מברזל נרוויח אנרגיית קשר אם נגדיל את הגרעין. זהו התהליך ההפוך הנקרא "היתוך גרעיני" ולא נעסוק בו כעת, אולם ניתן להבין את ההיגיון העומד מאחוריו בעזרת אותם הכלים. למעשה אנו רואים כי גרעין היסוד ברזל הנו הגרעין היציב ביותר הקיים (אנרגיית הקשר הגבוה ביותר). הסיבות בגללן משתמשים דווקא באורניום לביקוע הן מורכבות ונוגעות לסיכוי של נייטרון "להיתפס" ע"י הגרעין, וכן לגובה מחסום הפוטנציאל משפיע על אפשרות הביקוע והסיכוי לביקוע.

## נייטרונים איטיים

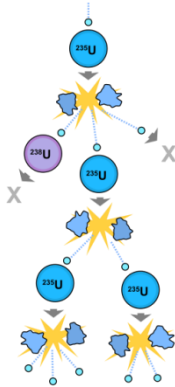
מסיבות סטטיסטיות (שלא נכנס אליהן) יש מהירות מסוימת עבורה גדל הסיכוי כי נייטרון חופשי ייקלט בגרעין. נייטרונים מהירים מדי יפוזרו ולא יקלטו וכן איטיים מדי. אם נתרגם זאת לדיאגרמת מרחב המצבים, "צוואר הבקבוק" במקרה של נייטרון מהיר יהיה רחב יותר באפשרות של פליטת נייטרון (מצד שמאל באיור הקודם) וההסתברות לתוצאה המבוקשת, ביקוע, תקטן.

<sup>13</sup> מצוין כאן המשקל האטומי, סך כל הנוקלאונים בגרעין. ההבדל בין איזוטופים כאמור, הוא מספר הנייטרונים.

<sup>14</sup> קיימים סוגי כורים המסוגלים לנצל כמעט 100% מהאורניום הטבעי כדלק, כך שפליטת הנייטרונים כתוצאה מהביקוע יוצר איזוטופים בקיעים נוספים.

## יישום התיאוריה המדעית והפן הטכנולוגי

### תגובת שרשרת גרעינית



- 1 נייטרונים שנפלטו מביקוע של אטום בודד נעים בחופשיות ויכולים להתנגש (בסבירות גבוהה) בגרעינים כבדים נוספים שנמצאים בחומר. ככל שיש יותר נייטרונים הנעים במערכת הסבירות לביקועים נוספים גדלה ומכל ביקוע נוצרים עוד נייטרונים שיכולים לגרום לעוד ביקועים וכן הלאה. תהליך זה מכונה "תגובת שרשרת גרעינית".
- 2 בתרשים ניתן לראות דוגמא לתגובת שרשרת גרעינית:  
שלב 1: נייטרון מבקע אורניום 235, האורניום מתבקע לשני גרעינים (כמו למשל, קריפטון 92 ובאריום 141) ובנוסף נפלטים 3 נייטרונים.

שלב 2: אחד משלושת הנייטרונים מצליח לבקע עוד גרעין של אורניום 235 רק שהפעם תוצרי הביקוע הם 2 נייטרונים ושני יסודות (אופציה אפשרית היא קריפטון 90 ובאריום 144).  
שלב 3: שני הנייטרונים שנפלטו בשלב 2 מצליחים ליצור ביקועים נוספים.

תגובת שרשרת גרעינית יכולה להתרחש רק בחומר המוגדר כ"חומר בקיע". בחומר זה, קיימת הסתברות לביקוע גם כאשר פוגע בגרעין נייטרון עם אנרגיה קינטית אפסית ולכן לא כל חומר שניתן לבקע נחשב ל"חומר בקיע". למשל, אורניום 238 איננו חומר בקיע משום שהוא מתבקע רק כאשר פוגע בו נייטרון במהירות גבוהה.  
החומר הבקיע הקיים בטבע בכמויות יחסית גדולות הוא אורניום 235. גם פלוטוניום 239 הוא חומר בקיע נפוץ, מייצרים אותו בצורה מלאכותית מאורניום 238.  
חומרים בקיעים נוספים הקיימים בטבע בכמויות קטנות הם אורניום 233 (מופק באופן מלאכותי מתוריום), פלוטוניום 241 ונפטוניום 237.

### מסה קריטית של חומר בקיע

בגוש אורניום ישנם המון אטומי אורניום, סדר הגודל הוא מספר אבוגדרו ( $\sim 6 \times 10^{23}$ ). לכן תמיד יתקיימו בחומר ביקועים ספונטניים הנובעים מתופעת המנהור. בכל ביקוע כזה נפלט מספר נייטרונים, נסמן מספר זה ב-M. נייטרונים אלו יכולים להיקלט לגרעין אורניום אחר ואז יתכן שיגרם ביקוע נוסף מאולץ, אם נייטרון מגיע לקצה גוש החומר הבקיע, הוא יכול להיפלט החוצה מהגוש או להיקלט ע"י חומר אחר. אם ההסתברות שנייטרון ייקלט בגרעין אחר קטנה מאחד חלקי מספר הנייטרונים הנפלטים ( $1/M$ ) מספר הנייטרונים יקטן והתגובה תדעך. אם ההסתברות גדולה מכך, התגובה תגדל באופן מעריכי (אקספוננציאלי) ותתרחש תגובת שרשרת. ההסתברות עבור נייטרון להיקלט בגרעין אחר או להיפלט החוצה תלויה בכמות החומר הבקיע "גודל הגוש". בחומר בקיע יכולה להתרחש תגובת שרשרת גרעינית רק אם כמות החומר הבקיע שווה או גדול מהמסה הקריטית של אותו החומר. כלומר, המסה הקריטית זו כמות החומר המינימאלי הדרוש ליצירת תגובת שרשרת גרעינית. אם המסה של החומר הבקיע קטנה מהמסה

הקריטית, תגובת השרשרת הגרעינית תדעך. אם המסה גדולה מכך, ההתבקעויות הספונטניות יתחילו מייד תגובת שרשרת.

מעבר לכמות החומר, המסה הקריטית תלויה גם בצורת החומר, בטוהר שלו, בצפיפות, בטמפרטורה ובסביבתו, כלומר, האם הוא מוקף בחומר שקולט נייטרונים או בחומר שמחזיר נייטרונים.

המסה של החומר הבקיע יכולה להימצא בשלושה מצבים אפשריים: מסה תת קריטית, מסה קריטית ומסה על קריטית. מצבים אלו מנוסחים באופן מתמטי ע"י "גורם הכפלת הנייטרון האפקטיבי" המסומן באות K. גורם זה מגדיר את אוכלוסיית הנייטרונים הממוצעת הנמצאת בחומר ויכולה לגרום לביקוע. באופן מתמטי מספר הנייטרונים הקיימים במערכת ברגע נתון

$$g = e^{\frac{k-1}{\lambda} t}$$

הוא "זמן הקיום הממוצע של נייטרון" כלומר הזמן שעובר (בממוצע) מפליטת נייטרון כתוצאה מביקוע גרעיני ועד ללכידתו באטום כבד אחר הנמצא במערכת. כאמור, לא כל לכידה של נייטרון בהכרח גורמת לביקוע, אלה ישנה הסתברות מסוימת שיתרחש ביקוע כפי שהוסבר בפרק הקודם.

מהביטוי המתמטי ניתן לראות שכאשר  $K=1$  אוכלוסיית הנייטרונים נמצאת במצב קבוע. מצב זה מוגדר להיות המצב הקריטי ובו מספר הביקועים הממוצע ביחידת זמן הוא קבוע. אם  $K>1$  מספר הנייטרונים הממוצע במערכת שיכול לגרום לביקועים נוספים גדל ואיתו גדלים מספר הביקועים המתרחשים בו זמנית. מצב זה הוא המצב ה"על קריטי". במקרה זה, תגובת השרשרת הגרעינית גדלה באופן אקספוננציאלי. כאשר  $K<1$  מספר הנייטרונים במערכת קטן ותגובת השרשרת הגרעינית דועכת במהירות. המסה של החומר במצב זה מוגדרת כ"תת קריטית".

חשוב לציין שא יורד ככל שכמות החומר הבקיע שנשאר במערכת יורד. לכן, כל מסה "על קריטית" בשלב מסוים הופכת ל"תת קריטית" ותגובת השרשרת הגרעינית דועכת.

המצב הקריטי ( $k=1$ ) הוא המצב היציב שאליו שואפים להגיע בכורים גרעיניים וזאת כדי להצליח לשלוט בכמות האנרגיה הנוצרת ביחידת זמן.

במקרה של פצצות אטום, ישנו רצון שתגובת השרשרת הגרעינית תגדל בצורה אקספוננציאלית אבל רק במקום הפיצוץ ולא במקום שבו יוצרים את הפצצה... לכן, ישנו צורך לגרום לכך שברגע הפיצוץ החומר יבצע מעבר מהיר מאוד ממצב תת-קריטי למצב העל-קריטי.

על הדרכים ליצור מצב יציב בכורים גרעיניים וליצור מעבר מהיר ממסה תת קריטית לעל קריטית נלמד בהמשך הפרק.

## אורניום מועשר :

אורניום נחשב ליסוד הכבד ביותר המצוי בצורה טבעית בכדור"א. חתיכת אורניום שמוצאים במחצבות מורכבת בד"כ משלושה איזוטופים. האיזוטופ השכיח ביותר הוא אורניום 238 שאחוז השכיחות היחסית שלו היא כ- 99.28%, אורניום 235 לעומתו נמצא בשכיחות יחסית של כ- 0.72%, האיזוטופ השלישי הוא אורניום 234 הנמצא בשכיחות יחסית של כ 0.0054%.

רק האיזוטופ אורניום 235 נחשב לחומר בקיע. אבל, הריכוז שלו נמוך מדי מכדי שיהיה אפשר ליצור מאורניום טבעי את המסה הקריטית הנדרשת לקיום תגובת שרשרת שלא דועכת ולכן יש צורך להגדיל את אחוז השכיחות שלו בחומר. התהליך שבו מפיקים תערובת עם שכיחות גבוהה של אורניום 235 נקרא "העשרת אורניום". בסוף התהליך מתקבל "אורניום מועשר".

#### איך מעשירים אורניום?

המטרה היא להפריד בין האיזוטופים אורניום 235 ואורניום 238 ולהגיע לשכיחות יחסית גבוהה של אורניום 235. ההבדל בין האיזוטופים הללו בא לידי ביטוי בעיקר במסה של הגרעין. היות שגם הבדל זה הוא קטן ביותר, אפשר להגיע רק להפרדה סטטיסטית. ישנם שיטות העשרה שונות, שיטת ה"צנטריפוגות גז" היא השיטה היעילה ביותר מבחינה אנרגטית. העיקרון הפיזיקלי העומד מאחורי השיטה היא שקיים קשר בין הצטברות החומר בדפנות לבין מסת החלקיקים. עם סיבוב הצנטריפוגה, החלקיקים הכבדים יותר (במקרה שלנו, אורניום 238) יהיו בעלי ייצוג גבוהה יותר בסמוך לדפנות. ככל שמתרחקים מהדופן לכיוון המרכז, הגז יהיה עשיר יותר בחלקיקים הקלים יותר, כלומר אורניום 235. בגלל הבדלי המסה הכל כך קטנים, אנו נדרשים למהירויות סיבוב מאוד גבוהות ומדובר באתגר טכנולוגי לא פשוט. רק בשנות ה-60 הצליחו להתגבר על הקושי הטכנולוגי ושיטת הצנטריפוגות הפכה לרווחת.

#### לאיזו רמת העשרה צריך להגיע?

בפצצות גרעיניות בד"כ האורניום מורכב מ-85% של האיזוטופ אורניום 235. ניתן להשתמש ברמת העשרה נמוכה יותר בתנאי שהמסה הקריטית של האורניום גבוהה יותר. עבור דרגת העשרה של 50% : המסה הקריטית היא 25 ק"ג  
עבור דרגת העשרה של 20% : 50 ק"ג  
עבור דרגת העשרה של 10% : 100 ק"ג  
לצורך השוואה נציין שעבור אורניום 235 טהור (העשרה של 100%) המסה הקריטית היא 15 ק"ג. בכל המקרים מדובר במסה בצורת כדור ומוקפת במחזיר ניטרונים. מתחת ל-10% המסה הקריטית עולה בצורה חדה כך שלמעשה, לא ניתן להשתמש בה לצרכי פיצוץ גרעיני.

הסוכנות לאנרגיה אטומית קבעה שמעל רמת העשרה של 20% נחשב האורניום למועשר ברמת העשרה גבוהה HEU- Highly enriched uranium. במקרה זה, החומר בהכרח משמש לצרכי פיצוץ (ולא לכורים גרעיניים), ואמור להיות עליו פיקוח קפדני. מתחת ל-20% העשרה, החומר נחשב למועשר ברמת העשרה נמוכה LEU.

בתחנות כוח גרעיניות משתמשים ברמות שונות של אורניום מועשר בהתאם לסוג הכור. בכורי מים כבדים משתמשים בדרגה של 2% ואפילו פחות.

## מבנה תחנת הכוח הגרעינית (כור גרעיני)

כאשר מדברים בציבור הרחב על **כור גרעיני**, האסוציאציה הראשונה שעולה זה פיצוץ גדול ומסוכן או האסונות הגרעיניים אבל למעשה רוב השימוש בכורים גרעיניים בעולם זה לצורך הפקת חשמל או במילים אחרות- תחנות כוח גרעיניות.

ההבדל בין תחנת כוח גרעינית לתחנת כוח אחרת זה מקור האנרגיה שיוצר קיטור ומסובב את הטורבינה. בארץ מקור האנרגיה הוא לרוב פחם, בתחנות רוח מדובר ברוח ובתחנת כוח גרעינית מדובר באנרגיה המשתחררת כתוצאה מביקוע גרעיני.

הסיבה העיקרית לשימוש בכורים גרעיניים להפקת חשמל זה יעילותם האנרגטית. ניתן להפיק כמות גדולה מאוד (באופן יחסי) של אנרגיה חשמלית ממעט מאוד "דלק".

ה"דלק הגרעיני" שבו משתמשים ברוב תחנות הכוח הגרעיניות הוא האורניום 235. מעט כורים משתמשים בפלוטוניום (שנוצר מאורניום 238). חומרים אלו נמצאים ב**ליבת הכור** בתוך מוטות המכונים "**מוטות דלק**".

בליבת הכור מתרחשת תגובת השרשרת הגרעינית אך בניגוד לפצצות גרעיניות, כאן התהליך מבוקר. בין מוטות הדלק ישנם **מוטות בקרה** העשויים מחומר שקולט נויטרונים וכך הוא מסוגל להאט את תגובת השרשרת ומסוגל אפילו לעצור אותה לגמרי. מידת הבליעה של הניטרונים נקבעת על ידי קביעת מידת החדירה של מוטות הבקרה לעומק ליבת הכור.

בנוסף למוטות הבקרה הנמצאים בליבת הכור, בין מוטות הדלק זורמים **מים כבדים**. השימוש במים כבדים נועד למלא שתי מטרות:

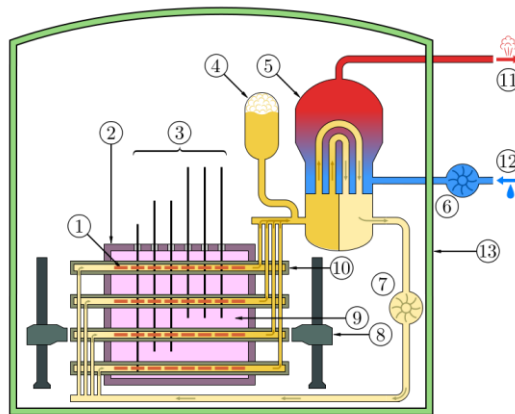
המטרה הראשונה היא האטת מהירות הניטרונים. כדי להגדיל את ההסתברות לביקוע צריך שהנייטרון יפגע בגרעין האורניום במהירות שהיא לא מידי גדולה. כדי להאט את מהירות הניטרונים המשתחררים מהביקוע צריך שהם יתקלו בחלקיק בעל מסה זהה. כלומר, בפרוטון שהוא למעשה גרעין אטום המימן. הבעיה היא שמימן יבלע את הנייטרון וכך במקום להאט אותו, נאבד אותו. לכן משתמשים בדאוטריום (איזוטופ כבד של מימן) שהגרעין שלו מורכב מפרוטון אחד ונייטרון אחד. מולקולה רגילה של מים מורכבת משני מימנים וחמצן אחד H<sub>2</sub>O במים כבדים במקום H מופיע D. הסיבה לכך שמימן רגיל יבלע את הנייטרון ומימן כבד יחזיר אותו נובעת משיקולי אנרגיה הקשר של הגרעין שעליהם דיברנו באריכות בפרק הראשון.

מטרה נוספת שממלאים המים הכבדים זה **קירור ליבת הקור והסעת האנרגיה** שנוצרת בליבה אל מחוץ לליבה. במילים אחרות, חומר מתווך. כתוצאה מתגובת השרשרת הגרעינית, בתוך ליבת הכור נוצרת אנרגיה גדולה מאוד שמחממת את מוטות הדלק. החום הרב עובר אל המים הכבדים וכך הליבה מתקררת והמים מתחממים ויכולים להסיע את האנרגיה. המים הכבדים החמים יוצאים מהליבה ומחממים את המיכל של המים הרגילים וכך נוצר הקיטור שמניע את הטורבינה ויוצר חשמל. כתוצאה מחימום המים הרגילים, המים הכבדים מתקררים ואז הם חוזרים לליבת הכור ומתחממים שוב בין מוטות הדלק. המים הכבדים מוחזקים בלחץ גבוהה כדי למנוע את רתיחתם. ישנם תחנות כוח שבהם משתמשים ב**נוזל קירור** מסוג אחר ולא מים כבדים. נוזל הקירור זורם במעגל סגור והוא רדיואקטיבי ביותר. קיימים מנגנוני הגנה רבים למניעת דליפה של הנוזל אל מחוץ למעגל הסגור. דליפה זו מכונה "דליפה גרעינית".

המים הכבדים נמצאים בטבע באחוזים נמוכים מאוד. על כל 20 מיליון מולקולות מים קיימת מולקולה אחת של מים כבדים. בעזרת תהליך של זיקוק מפרידים את מולקולות המים הכבדים מהמים הרגילים.

ליבת הכור היא אזור אטום שמוגנת על ידי שכבת עופרת ושכבת בטון עבה. פגיעה באטימות הליבה יכולה לגרום לפליטה של תוצרי הביקוע לסביבה. תוצרי הביקוע הינם חומרים רדיואקטיביים מסוכנים. הסיבה העיקרית שבגללה לא משתמשים בארץ בתחנות כוח גרעיניות זה החשש מפגיעה בליבת הכור על ידי גורמי טרור. פגיעה שיכולה לגרום לאסון בסדרי גודל גבוהים מאוד.

להלן תרשים סכמתי של כור גרעיני מסוג "קנדו":



מעגל הקירור של המים הכבדים מופיע בצהוב בהיר וכהה, המעגל של המים הרגילים מופיע בכחול ואדום. המים הכבדים הפושרים בדוד הליבה מופיעים בוורוד.

מפתח המספרים:

- |                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| 1. מוטות הדלק                       | 8. מכונת תדלק                                |
| 2. דוד ליבת הכור                    | 9. מים כבדים המאטים נייטרונים בין מוטות הדלק |
| 3. מוטות בקרה וכיבוי (הוכנסו חלקית) | 10. צינורות לחץ                              |
| 4. מאגר מים כבדים בלחץ גבוה         | 11. קיטור                                    |
| 5. דוד הקיטור                       | 12. מים קרים                                 |
| 6. משאבת מים רגילים                 | 13. מבנה הכור העשוי בטון מזוין               |
| 7. משאבת מים כבדים                  |  |

החסרונות העיקריים של כור גרעיני הן הסכנה בהובלת הדלק אל הכור והטיפול בו אחרי השימוש. דלק גרעיני נשאר רדיואקטיבי למשך מאות שנים, ועדיין לא נמצא פתרון טוב וזול לטיפול בשאריות. דבר נוסף זה שתקלה בליבת הכור יכולה לגרום לאסון בכנה מידה לאומי.

ניתן ללמוד עוד על תחנת הכוח הגרעינית בעזרת הסרטון המופיע בקישור הבא:

[http://www.youtube.com/watch?v=mYspTMnATbE&feature=player\\_detailpage](http://www.youtube.com/watch?v=mYspTMnATbE&feature=player_detailpage)

## הפצצה הגרעינית

הנזק שיוצרת פצצת הביקוע הגרעיני הוא נזק כפול, גם בתווך הקצר וגם בתווך הארוך. בתווך הקצר, כלומר, ברגע הפיצוץ, בגלל האנרגיה הרבה האצורה בפצצה, נוצר פיצוץ וגל הדף בסדר גודל אדיר המשפיע על שטח מאוד גדול. בתווך הארוך, תוצרי הביקוע ממשיכים לקרוך עשרות שנים לאחר הפיצוץ מה שמבטיח שאזור הפיצוץ יישאר אזור מוכה אסון גם שנים רבות לאחר הפיצוץ.

בפצצה הגרעינית אין צורך במנגנון השולט בתגובת השרשרת הגרעינית. להפך, כאן יש רצון שתגובת השרשרת תגדל באופן אקספוננציאלי. האתגר ההנדסי העומד בפני המהנדסים לאחר שהם הצליחו להעשיר אורניום לרמה של "מסה על קריטית" הוא איך לגרום לכך שתגובת השרשרת הגרעינית תתחיל רק במקום הפיצוץ ולא במקום שבו יוצרים את הפצצה.

הפצצות המוכרות לנו הן הפצצות שהופלו במלחמת העולם השנייה על הירושימה ונגסאקי. בפצצות אלו התגברו על הקושי ההנדסי הנ"ל בשתי שיטות:

בפצצת "ילד קטן" שהופלה על הירושימה פיצלו את המסה העל קריטית לשתי מסות תת קריטיות בצורה של קליע ומטרה. המסות נמצאות בקנה ירי וברגע שהקליע נורה אל המטרה, המסות מתאחדות למסה על קריטית אחת ומתחילה תגובת השרשרת הגרעינית. זה מנגנון מאוד לא בטיחותי וכמעט כל פגיעה מקרית בפצצה יכולה לגרום למנגנון לפעול.

בפצצת "איש שמן" שהוטלה על נגסאקי השתמשו בשיטת "מנגנון קריסה" המבוסס על הרעיון של דחיסה של מסה תת-קריטית עד למצב שבו היא הופכת לעל קריטית. תהליך הדחיסה נדרש להיות סימטרי באופן מדויק וזה מה שהופך אותו ליותר בטיחותי ממנגנון היירי מפני שפגיעה מקרית לא יכולה להפעיל אותו.

## ביבליוגרפיה

- Freedman, R.; Young, H. (2004). Sears and Zemansky's University Physics with Modern Physics (11th ed).
- Krane, K. (1988). Introductory Nuclear Physics. John Wiley & Sons.
- Bailey, D. "Semi-empirical Nuclear Mass Formula". PHY357: Strings & Binding Energy. University of Toronto
- Choppin, G.; Liljezin, J.-O.; Rydberg, J. (2002). "Nuclear Mass and Stability"
- Isaac Asimov, Atom: Journey Across the Sub-Atomic Cosmos, New York:1992 Plume
- "Decay and Half Life". Retrieved 2009-12-14.
- M. G. Arora and M. Singh (1994). Nuclear Chemistry. Anmol Publications.
- DOE Fundamentals Handbook: Nuclear Physics and Reactor Theory
- "Frequently Asked Questions #1". Radiation Effects Research Foundation. Retrieved September 18, 2007.
- Wapstra, A. H. (1958). "Atomic Masses of Nuclides". External Properties of Atomic Nuclei. Springer.
- Rohlf, J. W. (1994). Modern Physics from  $\alpha$  to Z0. John Wiley & Sons
- C.M. Lederer, J.M. Hollander, I. Perlman (1968). Table of Isotopes (6th ed.). New York: John Wiley & Sons
- Journal of Petroleum Engineering and Technology"Journal of Petroleum Engineering and Technology". JoPET. Retrieved 2011-03-20.
- B. R. Martin (2006). Nuclear and Particle Physics. John Wiley & Sons, Ltd. ISBN 0-470-01999-9.
- "The Particle Adventure" Particle Data Group, Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Dr. Rod Nave of the Department of Physics and Astronomy (July 2010). "Nuclear Binding Energy". Hyperphysics - a free web resource from GSU. Georgia State University. Retrieved 2010-07-11.