

פרק ח - תגובות גרעיניות

1. א. על פי חוק שימור המטען: המגיבים (${}^2_1\text{H}$ ו- ${}^{23}_{11}\text{Na}$) כוללים $1 + 11 = 12$ יחידות מטען בסיסי (e), והתוצר ${}^{24}_{12}\text{Mg}$ מורכב גם הוא מ-12 יחידות מטען בסיסי, לכן לחלקיק הלא ידוע אין מטען חשמלי.
 על פי שימור מספר הנוקלאונים: המגיבים (${}^2_1\text{H}$ ו- ${}^{23}_{11}\text{Na}$) מורכבים מ- $2 + 23 = 25$ נוקלאונים, התוצר Mg מורכב מ-24 נוקלאונים, לכן לחלקיק הלא ידוע נוקלאון אחד. מכאן שהחלקיק הוא נויטרון - ${}^1_0\text{n}$.
 ב. מאותם שיקולים כמו בתשובה א לעיל, החלקיק הנעלם הוא פרוטון - ${}^1_1\text{p}$.
2. א. משיקולים דומים לאלה שבתשובה א נובע שהחלקיק הלא ידוע הוא דויטרון - ${}^2_1\text{H}$.
 ב. משיקולים דומים לאלה שבתשובה א נובע שהחלקיק הלא ידוע הוא נויטרון - ${}^1_0\text{n}$.
 ג. החלקיק הלא ידוע הוא פרוטון - ${}^1_1\text{p}$.
3. בתגובה גרעינית זו, מהשיקולים המפורטים בתשובה א, נובע כי נוצר גם פרוטון - ${}^1_1\text{p}$. לכן האפשרות הנכונה היא (4).

4. א. מסת אטום הליום-4 היא: 4.00260 u
 מסת אטום מימן-3 (טריטיום) היא: 3.016054 u
 מסת פרוטון היא: 1.007276 u
 מסת אלקטרון היא: 0.000549 u
 נחשב את מסת חלקיק ה- α :

$$m({}^4_2\text{H}) = M({}^4_2\text{H}) - 2m_e = 4.00260 - 2 \cdot 0.000549 = 4.001502 \text{ u}$$

מסת הטריטון היא:

$$m({}^3_1\text{H}) = M({}^3_1\text{H}) - m_e = 3.016054 - 0.000549 = 3.015505 \text{ u}$$

שינוי המסה בתגובה הגרעינית:

$$\begin{aligned} \Delta m &= m({}^3_1\text{H}) + m({}^1_1\text{H}) - m({}^4_2\text{H}) = \\ &= 3.015505 + 1.007276 - 4.001502 = 0.021279 \text{ u} \end{aligned}$$

המסה של התוצרים גדולה מזו של חלקיק ה- α , במילים אחרות האנרגיה של התוצרים גדולה מהאנרגיה של חלקיקי ה- α . אנרגיית הפוטון צריכה להיות שווה לפער זה באנרגיה (בהנחה שהתוצרים לא רכשו אנרגיה קינטית).

נחשב את האנרגיה השקולה להפרש במסה:

$$\Delta E (\text{MeV}) = \Delta m (\text{u}) \cdot 931.4943261 \frac{\text{MeV}}{\text{u}} = 0.021279 \cdot 931.49433 \text{ MeV} \approx 19.8 \text{ MeV}$$

$$\lambda (\text{nm}) = \frac{1240}{\Delta E (\text{eV})} = \frac{1240}{19.8 \cdot 10^6} = \mathbf{6.3 \cdot 10^{-5} \text{ nm}}$$

ב. הפוטון שייך לתחום קרינת γ .

5. נחשב תחילה את המהירות של פרוטון בסוף ההאצה:

$$Bev = \frac{mv^2}{2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2Bev}{m}}$$

$$v = \frac{1.3 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 0.48}{1.67 \cdot 10^{-27}} \approx 6 \cdot 10^7 \text{ m/s}$$

עתה נחשב את האנרגיה הקינטית הסופית של פרוטון:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{1.67 \cdot 10^{-27} \cdot (6 \cdot 10^7)^2}{2} \text{ J} = \frac{1.67 \cdot 10^{-27} \cdot (6 \cdot 10^7)^2}{2 \cdot (1.6 \cdot 10^{-19})} \text{ eV}$$

$$E_k = 18.8 \text{ MeV}$$

6. א. משוואת התגובה הגרעינית: ${}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{144}_{56}\text{Ba} + {}^{90}_{36}\text{Kr} + 2{}^1_0\text{n}$

ב. תגובה גרעינית מסוג זה נקראת **ביקוע גרעיני**.

ג. (1) השינוי באנרגיה הוא ההפרש בין מינוס אנרגיית הקשר של התוצרים, לבין מינוס אנרגיית הקשר של המגיבים.

$$\Delta E = (-90 \cdot 8.5 - 144 \cdot 8.5) - (-235 \cdot 7.5)$$

$$\Delta E = -226.5 \text{ MeV}$$

כלומר האנרגיה קטנה ב- 226.5 MeV.

(2) האנרגיה יכולה להיות מומרת:

- לאנרגיה קינטית של התוצרים החומריים.
- לפוטון

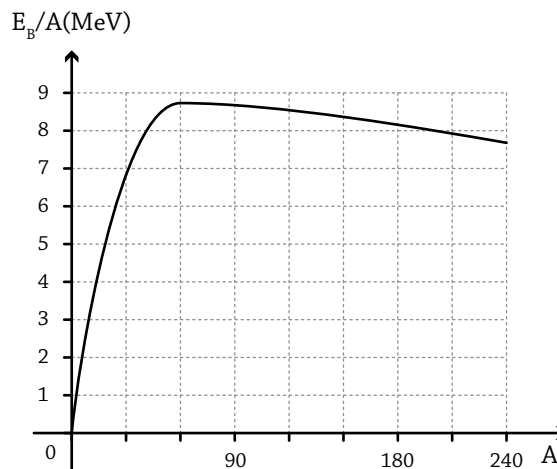
7. כאשר אורניום מתבקע - מתקבלים שני גרעינים קלים יותר. ככל שגרעין קל יותר - מספר הנייטרונים מסך כל הנוקלאונים הוא קטן יותר. לכן כאשר אורניום מתבקע יש נייטרונים "מיותרים", אשר נפלטים בתהליך.

8. א. "מסה קריטית" היא המסה המינימלית של חומר בקיע, הדרושה כדי שתתרחש תגובת שרשרת.

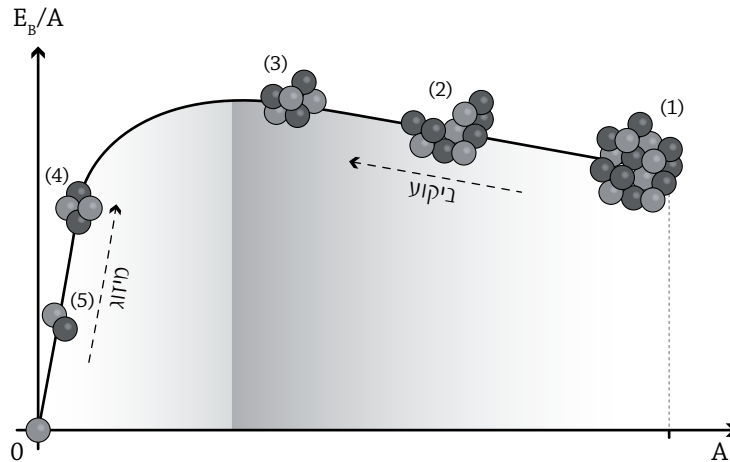
ב. המסה הקריטית תלויה בסוג החומר הבקיע, בצורתו ובצפיפותו.

9. המשפט הנכון הוא (3), כי לתוצר אנרגיית קשר גדולה יותר מאשר למגיבים, כלומר הוא יציב יותר.

10. א. הגרף מתאר את אנרגיית הקשר הממוצעת לנוקלאון כפונקציה של מספר המסה הגרעינית.



ב. ביקוע גרעיני הוא תגובה גרעינית שבה גרעין כבד מתבקע לשני גרעינים קלים יותר. מיזוג גרעיני הוא תגובה גרעינית שבה שני גרעינים קלים מתמזגים לגרעין כבד יותר.
כדי להבין מדוע בביקוע גרעיני משתחררת אנרגיה נתבונן בתרשים הבא, בו גרעין (1) מתבקע לגרעין (2) ולגרעין (3).



אנרגיית הקשר הגרעינית הממוצעת לנוקלאון, גם של הגרעין המסומן ב- (2) וגם של גרעין (3) גדולה מזו של גרעין (1). מכאן נובע שסכום אנרגיות הקשר הגרעיניות של גרעינים (2) ו- (3) גדול מאנרגיית הקשר של גרעין (1). בתהליך הביקוע מתקבלים תוצרים עם אנרגיית קשר גדולה יותר, כלומר אנרגיית הנוקלאונים (שהיא שלילית יחסית לרמת ייחוס ב- ∞) נמוכה יותר, לכן משתחררת אנרגיה.
כדי להבין מדוע במיזוג גרעיני משתחררת אנרגיה, נתבונן בתרשים שלמעלה: נניח כי 2 גרעינים המסומנים ב- (5) מתמזגים לגרעין (4). אנרגיית הקשר הממוצעת לנוקלאון של גרעין (4) גדולה מזו של גרעין (5). מכאן נובע שאנרגיית הקשר של גרעין (4), גדולה מזו של שני גרעינים מסוג (5). כלומר בתהליך מיזוג גרעיני מתקבל תוצר עם אנרגיית קשר גדולה יותר, כלומר אנרגיית הנוקלאונים של התוצר (כולל הסימן האלגברי) נמוכה יותר, לכן משתחררת אנרגיה.
גם בביקוע גרעיני וגם במיזוג גרעיני לתוצרים אנרגיית קשר גדולה מאשר למגיבים.

11. תהליך שבו גרעיני מימן מתמזגים לגרעין הליום מכונה תהליך תרמו-גרעיני, והוא מתרחש בליבת השמש. לכן אפשרות (4) היא הנכונה.

12. נחשב את השינוי במסה בתהליך הגרעיני. נתעלם ממסות האלקטרונים, שמספרם במגיבים ובתוצרים שווה.

$$\Delta m = M(^{17}_8\text{O}) + M(^1_1\text{H}) - M(^4_2\text{He}) - M(^{14}_7\text{N})$$

$$\Delta m = 16.999131 + 1.007825 - 4.00260 - 14.003074$$

$$\Delta m = 0.001282 \text{ u}$$

$$\Delta E (\text{MeV}) = \Delta m(\text{u}) \cdot 931.4943261 \frac{\text{MeV}}{\text{u}} = 0.001282 \cdot 931.4943261$$

$$\Delta E = 1.194 \text{ MeV}$$

כלומר האנרגיה השקולה למסת התוצרים גדולה מזו השקולה למסת המגיבים ב- 1.194 MeV. אם לוקחים

בחשבון את האנרגיה הקינטית של המגיבים - 1.12 MeV , פער האנרגיה הוא $1.12 - 1.194 = 0.074 \text{ MeV}$ לאנרגיה המזערית שצריכה להיות לחלקיק ה- α היא 0.074 MeV . במצב זה התגובה הגרעינית תתרחש, אבל לתוצרים לא תהיה אנרגיה קינטית. אם אנרגיית חלקיק ה- α גדולה מ- 0.074 MeV תהיה לתוצרים אנרגיה קינטית. ואם אנרגיית חלקיקי ה- α תהיה קטנה מערך זה התגובה הגרעינית לא תתרחש.

13. נחשב את השינוי במסה בתהליך הגרעיני. נתעלם ממסות האלקטרונים, שמספרם במגיבים ובתוצרים שווה.

$$\Delta m = M(^{13}_6\text{C}) + M(^4_2\text{He}) - m(^1_0\text{n}) - M(^{16}_8\text{O})$$

$$\Delta m = 13.003355 + 4.00260 - 1.008665 - 15.994915$$

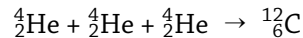
$$\Delta m = 0.002375 \text{ u}$$

נחשב את האנרגיה השקולה להפרש זה במסה:

$$\Delta E (\text{MeV}) = \Delta m (\text{u}) \cdot 931.4943261 \frac{\text{MeV}}{\text{u}} = 0.002375 \cdot 931.4943261$$

$$\Delta E = 2.21 \text{ MeV}$$

כלומר האנרגיה השקולה למסת התוצרים גדולה מזו השקולה למסת המגיבים ב- 2.21 MeV . אם לוקחים בחשבון את האנרגיה הקינטית של המגיבים - 2.14 MeV , פער האנרגיה הוא $2.14 - 2.21 = 0.07 \text{ MeV}$. במצב זה לתוצרים לא תהיה אנרגיה קינטית.



14. משוואת התהליך הגרעיני:

$$M(^4_2\text{He}) = 4.00260 \text{ u}$$

מסת אטום הליום-4:

$$M(^{12}_6\text{C}) = 12 \text{ u}$$

מסת אטום פחמן-12:

מסת שלושה אטומים של הליום-4: $4.00260 \cdot 3 = 12.0078 \text{ u}$ כלומר כאשר שלושה חלקיקי α מתמזגים לגרעין $^{12}_6\text{C}$ המסה קטנה, מכאן שהאנרגיה קטנה, לכן משתחררת אנרגיה. נחשב את האנרגיה המשתחררת. נתעלם ממסות האלקטרונים שמספרם שווה במגיבים ובתוצר.

$$\Delta m = M(^{12}_6\text{C}) - 3M(^4_2\text{He}) = 12 - 12.0078 = -0.0078 \text{ u}$$

הפחת באנרגיה השקולה לפחת במסה:

$$\Delta E (\text{MeV}) = \Delta m (\text{u}) \cdot 931.4943261 \frac{\text{MeV}}{\text{u}} = -0.0078 \cdot 931.4943261$$

$$\Delta E \approx -7.265655 \text{ MeV}$$

כלומר בתהליך הגרעיני נפלטת אנרגיה בת כ- **7.3 MeV**.

15. א. שימור מספר הנוקלאונים: מספר הנוקלאונים במגיבים הוא $27 + 4 = 31$. מספר הנוקלאונים בתוצרים הוא

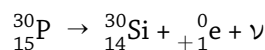
$$31 = 30 + 1. \text{ כלומר מספר הנוקלאונים נשמר בתהליך הגרעיני.}$$

שימור המטען: המטען הכולל של המגיבים (ביחידות e) הוא: $13 + 2 = 15$. המטען הכולל של התוצרים:

$$15 + 0 = 15$$

ב. (1) "רדיואקטיבי" - הגרעין פולט קרינה.

(2) משוואת התהליך:



ג. כעבור 200 שניות יישארו 50% ממדגם הזרחן, כעבור 400 שניות (200 שניות נוספות) יישארו 25%, וכעבור 600 שניות יישארו 12.5%. במילים אחרות, אחרי זמן הגדול פי 3 מזמן מחצית החיים, מספר הגרעינים יקטן פי 2^3 , כלומר פי 8.

ד. (1) הפוזיטרון והאלקטרון נכחדים, ומסתם שקולה לאנרגיה, אנרגיה זו מומרת ליצירת שני פוטונים, שלכל אחד מהם יש אנרגיה.

(2) נחשב את האנרגיה השקולה למסת פוזיטרון (או אלקטרון):

$$\Delta E \text{ (MeV)} = \Delta m \text{ (u)} \cdot 931.4943261 \frac{\text{MeV}}{\text{u}} = 0.000549 \cdot 931.4943261$$

$$\Delta E \approx 0.511 \text{ MeV}$$

מכאן שלכל אחד משני הפוטונים אנרגיה **0.511 MeV**.

16. א. משמעות הקשר: כמות האנרגיה, ΔE , השקולה למסה, Δm , נתונה על ידי הקשר הנדון.
ב. בתחנת ההספק מומרת בכל שנייה אנרגיה חשמלית של $4.6 \cdot 10^9$ ג'ול. מכאן שכמות האנרגיה החשמלית המומרת במשך שנה היא:

$$E_{\text{חשמלית}} = 4.6 \cdot 10^9 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 365 = 1.45 \cdot 10^{17} \text{ J}$$

כמות האנרגיה הגרעינית המומרת לחשמלית בתחנת ההספק במשך שנה:

$$\Delta E_{\text{גרעינית}} = \frac{1.45 \cdot 10^{17} \cdot 100}{38} = 3.82 \cdot 10^{17} \text{ J}$$

נחשב את הפחת במסה, Δm , במשך שנה, הנדרש כדי לייצר כמות אנרגיה זו:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 \Rightarrow \Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}$$

$$\Delta m = \frac{3.82 \cdot 10^{17}}{(3 \cdot 10^8)^2} = 4.24 \text{ kg}$$

ג. (1) "ביקוע גרעיני" הוא תגובה גרעינית שבה גרעין של אטום מתבקע לשני חלקים.
(2) אי אפשר לגלות נייטרונים ישירות באמצעות מונה גייגר רגיל, כי קרינה זו אינה גורמת ליינון, ופעולתו של מונה גייגר רגיל מבוססת על כך שהקרינה גורמת ליינון האוויר.



(4) גודל פיזיקלי נוסף שנשמר בתגובה גרעינית הוא התנע הכולל של המערכת.

ד. דוגמה להתנגשות אלסטית: התנגשות בין שתי קרונות שביניהן קפיץ. כדי להבטיח שההתנגשות תהיה אלסטית נבחר קפיץ אלסטי מפלדה.

דוגמה להתנגשות לא אלסטית: התנגשות בין שתי קרונות העשויות מעץ.

17. א. (1) כאשר גרעין פולט חלקיק α מספר הפרוטונים קטן ב-2 ומספר הנייטרונים קטן ב-2.

(2) כאשר גרעין פולט חלקיק β^- מספר הפרוטונים גדל ב-1, ומספר הנייטרונים קטן ב-1.

(3) כאשר גרעין פולט חלקיק γ אין שינויים במספרי הפרוטונים והנייטרונים.

ב. (1) ${}^{13}_6\text{C}$ מסמן גרעין של איזוטופ היסוד C, המורכב מ-6 פרוטונים ומ-7 נייטרונים.

(2) נחשב תחילה את אנרגיית הקשר של המגיבים. נתעלם ממסות האלקטרונים, כי מספרם במגיבים ובתוצרים שווה.

נניח שמפרקים את ${}^9_4\text{Be}$ ואת ${}^4_2\text{He}$ למרכיביהם.
השינוי במסה יהיה:

$$\begin{aligned}\Delta m &= 6m_p + 7m_n - m({}^9_4\text{Be}) - m({}^4_2\text{He}) \\ E_B^{\text{מגיבים}} &= \Delta m \cdot 931.4943261 \\ E_B^{\text{מגיבים}} &= (6m_p + 7m_n - m({}^9_4\text{Be}) - m({}^4_2\text{He})) \cdot 931.4943261 \\ E_B^{\text{מגיבים}} &= (6 \cdot 1.007276 + 7 \cdot 1.008665 - 9.012182 - 4.00260) \cdot 931.4943261 \\ E_B^{\text{מגיבים}} &= +83.395756 \text{ MeV}\end{aligned}$$

נבחר את רמת האפס של האנרגיה במצב שבו כל המרכיבים הגרעיניים מופרדים זה מזה, ואז אנרגיית המגיבים:

$$E^{\text{מגיבים}} = -83.395756 \text{ MeV}$$

נוסיף את האנרגיה של $8 \cdot 10^{-13} \text{ J} = 5 \text{ MeV}$ שמעניקים למגיבים:

$$\begin{aligned}E^{\text{מגיבים}} &= -83.395756 + 5 = -78.395756 \text{ MeV} \\ &\text{נחשב באופן דומה את אנרגיית הקשר של התוצר } (6m_p + 7m_n - m({}^{13}_6\text{C})): \\ E_B^{\text{תוצר}} &= (6 \cdot 1.007276 + 7 \cdot 1.008665 - 13.003355) \cdot 931.4943261 \\ E_B^{\text{תוצר}} &= +94.039941 \text{ MeV}\end{aligned}$$

האנרגיה של התוצר, יחסית לרמת האפס של האנרגיה הנבחרת כאשר המרכיבים מופרדים:

$$E^{\text{תוצר}} = -94.039941 \text{ MeV}$$

כאשר לוקחים בחשבון שאנרגיית ה- γ היא לפחות $55 \text{ MeV} = 8.8 \cdot 10^{-12} \text{ J}$, אזי אנרגיית התוצרים:

$$E_B^{\text{תוצרים}} \geq -94.039941 + 55 = -35.373274 \text{ MeV}$$

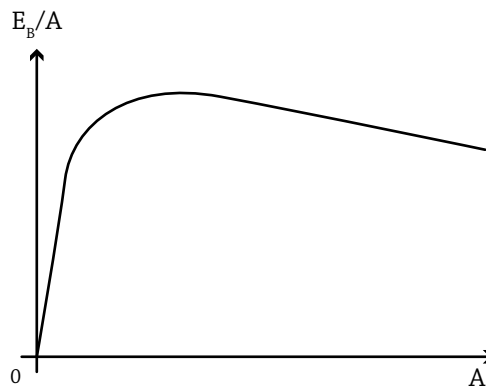
מצאנו, אם כן, שבתגובה גרעינית (1) מתקיים:

$$E^{\text{מגיבים}} < E^{\text{תוצרים}}$$

לכן, תגובה גרעינית (1) אינה יכולה להתרחש.

ג. (1) "אנרגיית קשר ממוצעת לנוקלאון" היא האנרגיה הדרושה לפרק גרעין למרכיביו, מחולקת במספר הנוקלאונים שבגרעין.

(2) גרף המתאר את אנרגיית הקשר הממוצעת לנוקלאון כפונקציה של מספר הנוקלאונים:



(3) כאשר לגרעין המתבקע יש מסה גדולה (בגרף המתואר בסעיף (2) לעיל הוא נמצא בחלק הימני של העקומה) הגרעין מתבקע לשני גרעינים שסכום אנרגיות הקשר שלהם גדול מאנרגיית הקשר של הגרעין המתבקע, כלומר מימין למקסימום של הגרף המתואר בסעיף (2) לעיל.

אם מסת הגרעין המתבקע אינה גדולה, אחד מתוצרי הביקוע עלול להיות משמאל למקסימום של הגרף, כך שסכום אנרגיות הקשר של שני התוצרים יהיה קטן מאנרגיית הקשר של הגרעין המתבקע.