



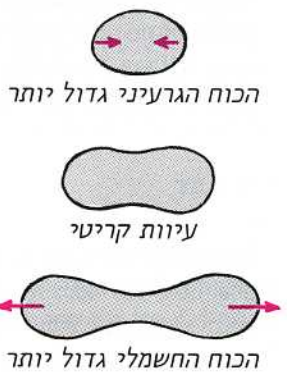
ביקוע גרעיני והיתוך גרעיני

ירי ניסיוני במאיץ של אלומת חלקיקים להיתוך במעבדות הלאומיות סנדיה שבארה"ב.

בשנת 1939 גילו שני פיסיקאים גרמניים, אוטו האן ופריץ שטרסמן, תגלית מקרית ששינתה את פני העולם. תוך כדי הפצת אוראניום בניטרונים במטרה ליצור יסודות חדשים, כבדים יותר, הם גילו להפתעתם עדות כימית להיווצרות פְּרִיז, יסוד שמסתו כמחצית ממסת האוראניום. הם מיאנו להאמין לתוצאותיהם. הידיעות על התגלית הגיעו לאוזניהם של לזיה מייטנר ואוטו פריש, פליטי המשטר הנאצי שעבדו בשוודיה, והם הגו את הרעיון שגרעין האוראניום, ששופעל בהפצת הניטרון, התפצל לשני חלקים. מייטנר קראה לתהליך ביקוע.

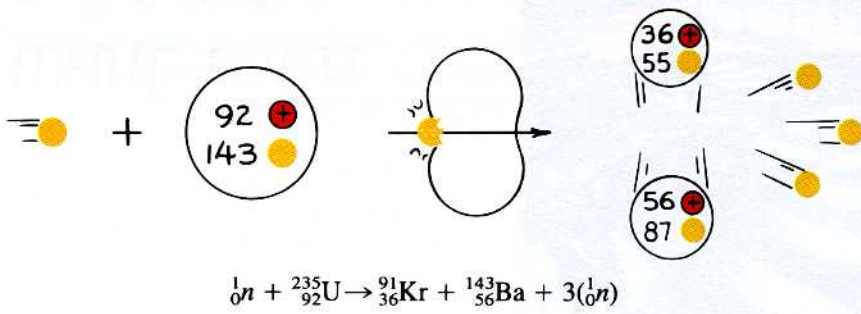
ביקוע גרעיני

הביקוע הגרעיני קשור לאיזון העדין שקיים בגרעין האטום בין המשיכה הגרעינית לבין הדחייה החשמלית בין מטענים. ברוב הגרעינים גובר כוחה של המשיכה הגרעינית, אך באוראניום יתרונה קלוש. אם מותחים את גרעין האוראניום לצורה מוארכת (איור 33.1), הכוחות החשמליים עלולים לדחפו לצורה מוארכת עוד יותר. אם הוא מתארך מעבר למידה גבולית מסוימת, הכוחות החשמליים "מכניעים" את הכוחות הגרעיניים והגרעין מתחלק. זהו ביקוע. נראה שדי בבליעת ניטרון אחד בגרעין האוראניום כדי שתיווצר



איור 33.1
עיוות הגרעין עשוי לגרום לכוחות דחייה חשמליים לגבור על כוחות המשיכה הגרעיניים ובעקבות זאת יתרחש ביקוע.

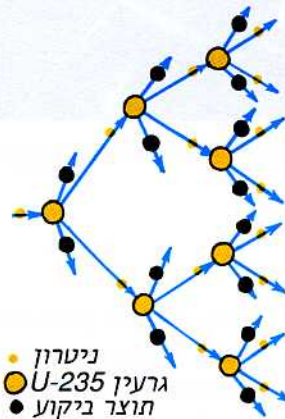
התארכות מעין זו. בתהליך הביקוע עשויים להיווצר מספר הרכבים של גרעינים קטנים. דוגמה אופיינית שנצפתה בתאי בועות היא:



בתגובה זו משתחררים כ-200,000,000 אלקטרון-וולט*. (לשם השוואה, בעת פיצוץ טנייט מתקבלים 30 אלקטרון-וולט מכל מולקולה.) סכום המסות של שברי הגרעין שהתבקע ושל הניטרונים שהשתחררו בביקוע קטן ממסת אטום האוראניום המקורי. הכמות הקטנה של מסה שהפכה לאנרגיה אימתנית זו תואמת את הקשר של איינשטיין $E_0 = mc^2$. אנרגיית הביקוע מופיעה ברובה כאנרגיה קינטית של שברי הגרעין המועפים, חלקה ניתן לניטרונים הנפלטים ויתרתה משתחררת כקרינת גמא.

החדשות בדבר הביקוע הגרעיני חוללו טלטלה בעולם המדע - לא רק בשל כמויות האנרגיה האדירות המשתחררות, אלא גם בגלל הניטרונים הנוספים המשתחררים בתהליך. בתגובת ביקוע אופיינית משתחררים במוצע שניים או שלושה ניטרונים. ניטרונים חדשים אלה מסוגלים לחולל עוד שניים או שלושה ביקועים של גרעיני אטומים אחרים, ולהביא לשחרור אנרגיה נוספת ולפליטת ארבעה עד תשעה ניטרונים. אם כל אחד מהניטרונים הנוצרים יבקע גרעין אחד, ייווצרו בשלב הבא של התהליך בין 8 ל-27 ניטרונים, וכך הלאה. במילים אחרות, נוצרת **תגובת שרשרת** שקצבה מואץ והולך (איור 33.2).

מדוע תגובת שרשרת אינה מתחוללת בטבע במרבצי אוראניום? ** תגובת שרשרת אינה מתרחשת בדרך כלל משום שהאיזוטופ המתבקע הוא האיזוטופ הנדיר U-235, המהווה רק 0.7 אחוז מתכולת האוראניום בגוש אוראניום טהור (איור 33.3). האיזוטופ השכיח U-238 בולע ניטרונים אך אינו מתבקע בדרך כלל, ולכן כל תגובת שרשרת נבלמת במהירות בגרעיני ה-U-238 בולעי הניטרונים. פרט למקרים נדירים, האוראניום הטבעי "מזוהם" מכדי שתגובת שרשרת תתרחש בו ספונטנית.

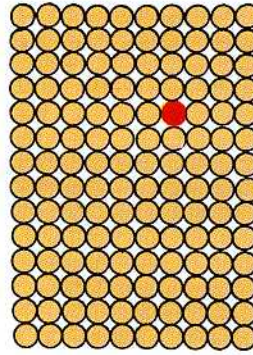


איור 33.2 תגובת שרשרת.

* אלקטרון-וולט מוגדר ככמות האנרגיה המוענקת לאלקטרון המואץ בהפרש פוטנציאלים של 1 וולט.
 ** קיימות הוכחות לכך שבמידה מוגבלת התרחשה תגובת שרשרת אחת בטבע - לפני מיליוני שנים, כאשר שכיחות האיזוטופים היתה שונה משכיחותם כיום - והיא אירעה בנסיבות בלתי רגילות ובמקום שבו הריכוז היה גבוה במידה יוצאת דופן. ראו בכתב העת *Scientific American*, גיליון יולי 1976.

אם תגובת שרשרת החלה בגוש קטן של U-235 טהור, ייתכן שמספר הניטרונים שייפלטו מפני השטח בלא להילכד יהיה כה רב שהתגובה תהיה קצרת מועד. בפרק 11 למדנו שלגופים קטנים יש שטח פנים גדול ביחס לנפחם - ככל ששטח הפנים גדול יותר סיכויי ההימלטות של הניטרונים גדולים יותר. בגוש גדול של חומר בקיע, ששטח הפנים שלו קטן יותר בהשוואה לנפחו, ייתכן פיצוץ. הגודל המינימלי של החומר שתגובת שרשרת יכולה להתקיים בו נקרא הגודל הקריטי, ומסתו נקראת **המסה הקריטית**. אם המסה של חומר בקיע עולה על המסה הקריטית, עלולה להתרחש התפוצצות עזה.

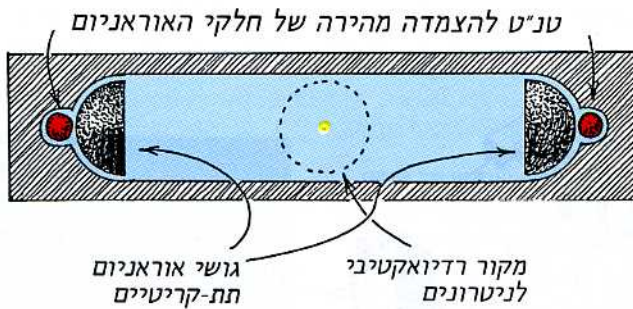
נתבונן בכמות גדולה של U-235 המחולקת לשתי מנות, שכל אחת מהן קטנה מהגודל הקריטי, והן מופרדות במעט זז מזו (איור 33.4). בשל שטח הפנים הגדול יחסית של כל אחת מהיחידות, הניטרונים יכולים להיפלט בקלות ולא תפתח תגובת שרשרת. אך אם לפתע מחברים את שתי היחידות, שטח הפנים יקטן יחסית. אם הדבר נעשה בעיתוי נכון ואם המסה הכוללת עולה על המסה הקריטית, תתרחש התפוצצות אדירה. זוהי פצצת גרעין.



● U-235
● U-238

איור 33.3

רק אחד מבין 140 גרעיני אוראניום בטבע הוא U-235.

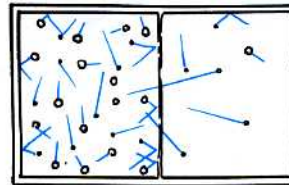


איור 33.4

תרשים של פצצת גרעין פשוטה.

בפצצה שהוטלה על הירושימה היה האוראניום U-235 בכמות שגודלה כגודל כדור טניס. אחת המשימות העיקריות והמסובכות ביותר של תכנית מנהטן הסודית, שהתנהלה במהלך מלחמת העולם השנייה, היתה להפריד מהאוראניום הטבעי כמות מספקת של אוראניום בקיע. מדעני התכנית השתמשו בשתי שיטות להפרדת האיזוטופים. שיטה אחת התבססה על העובדה שבטמפרטורה נתונה U-235 הקל יותר נע בממוצע במהירות גבוהה במקצת מ-U-238. במצב גזי, אטומים של האיזוטופ המהיר יותר עוברים בקצב גבוה יותר דרך קרום דק או דרך פתח צר, ולכן יתקבל בצד השני גז מועשר יותר באיזוטופ זה. השיטה השנייה, היעילה פחות, התבססה על ירי יוני אוראניום אל תוך שדה מגנטי. יוני U-235, שמסתם קטנה יותר, הוטו בשדה המגנטי יותר מיוני U-238 ונאספו, אטום-אטום, דרך חריר שהוצב במקום מתאים לקלטם. לאחר שנים ספורות הופקו, בשתי השיטות, מספר קילוגרמים של U-235.

כיום מצליחים להפריד בין איזוטופי אוראניום בקלות רבה יותר בעזרת סרכוזת (צנטריפוגה) גז. מערבבים אוראניום עם פלואור ומסובבים את גז האוראניום השש-פלואורי בתוך תוף במהירויות עצומות (מסדר הגודל של



איור 33.5

בטמפרטורה שווה מולקולות קלות נעות מהר יותר ממולקולות כבדות וחודרות בקלות רבה יותר דרך קרום דק.

1500 ק"מ (משעה). U-238, הכבד יותר, נע לצדדים - כמו חלב במחבצת חמאה, ואת הגז העשיר ב-U-235, הקל יותר, שואבים מהמרכז. רק לאחרונה הצליחו להתגבר על קשיים הנדסיים שמנעו את השימוש בשיטה זו בתכנית מנהטן.

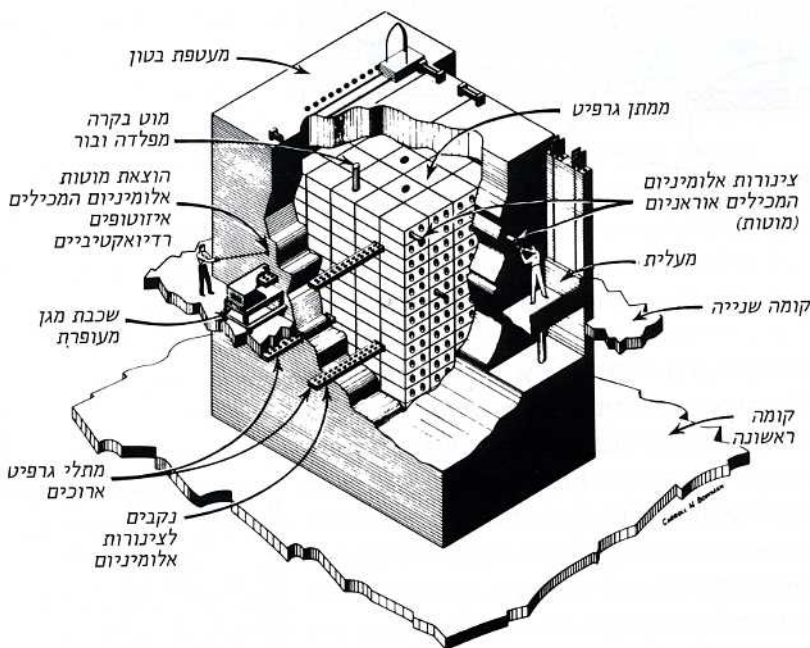
שאלה

מדוע נע U-235 במהירות רבה במקצת מזו של U-238 כאשר הם שרויים בטמפרטורה שווה?

תגובת שרשרת אינה יכולה להתרחש בתנאים רגילים באוראניום טבעי "טהור", מפני שהוא מכיל בעיקר U-238. הניטרונים הנפלטים בביקוע של U-235 הם ניטרונים מהירים, הנלכדים מיד בגרעיני U-238, שאינו מתבקע. עובדה ניסויית מכרעת היא שלניטרונים איטיים סיכויי ההילכדות ב-U-235 גבוהים בהרבה מסיכוייהם להילכד ב-U-238*. לפיכך, אם ניתן להאט את הניטרונים, אפשר להגדיל את הסיכוי שניטרון שישתחרר בביקוע יגרום לביקוע של אטום U-235 אחר, אפילו בתווך שבו מצוי שפע של אטומי U-238 בולעי ניטרונים. גידול זה יכול לאפשר התרחשות תגובת שרשרת.

כורי גרעין

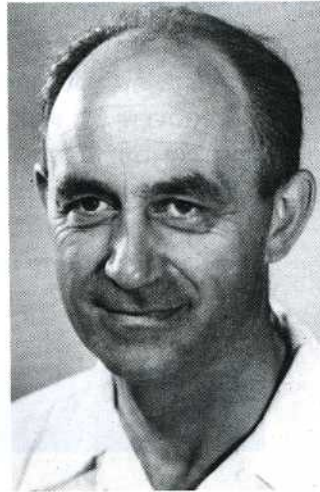
איור 33.6
מראה מפורט של כור גרעין. תגובת שרשרת מבוקרת מתרחשת במוטות האוראניום המשובצים בגרפיט.



תשובה: באתה טמפרטורה יש לשני האיזוטופים אותה אנרגיה קינטית ($\frac{1}{2}mv^2$). לכן האיזוטופ U-235, שמסתו קטנה יותר, חייב לנוע במהירות גדולה יותר.

* הדבר דומה לבליעה הברנית של אור בתדירויות שונות. כשם שקיימות רמות אנרגיה אופייניות לאלקטרונים באטום, כך יש רמות אנרגיה אופייניות בגרעין.

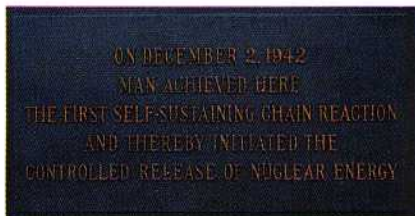
הפיסיקאי האיטלקי אנריקו פרמי טען שתגובת שרשרת תתאפשר במתכת אוראניום רגילה אם האוראניום יפורק לגושים קטנים שביניהם יימצא חומר המאט את הניטרונים. פרמי ועוזריו בנו את הכור הגרעיני הראשון - או בשמו המקורי, הערמה האטומית - במגרשי הטניס של אוניברסיטת שיקגו, מתחת ליציעי הקהל. ב-2 בדצמבר 1942 הם הצליחו לקבל לראשונה תהליך מבוקר המזין את עצמו של הפקת אנרגיה גרעינית. שלוש אפשרויות עומדות בפני ניטרון החולף באוראניום מתכתי רגיל: (א) הוא יכול לגרום לביקוע של אטום U-235; (ב) הוא עלול להימלט מהמתכת לסביבה שאינה ניתנת לביקוע; או (ג) הוא עשוי להיבלע באטום U-238 בלא לגרום לביקוע. כדי להגדיל את סיכויי האפשרות הראשונה, חילקו את האוראניום למנות נפרדות שהונחו במרחקים קבועים בתוך כ-400 טון של גרפיט, צורה מוכרת של פחמן. נבחר בעזרת דוגמה את תפקיד הגרפיט: אם כדור גולף מתנגש בקיר מוצק הוא נרתע, אך גודל מהירותו כמעט שאינו משתנה; אולם אם הוא פוגע בכדור טניס, הוא מאבד חלק ניכר ממהירותו. במקרה של הניטרון מתרחש דבר דומה. אם הניטרון פוגע בגרעין כבד מאוד, כמעט שלא חל שינוי בגודל מהירותו, אולם אם הוא פוגע באטום הפחמן הקל, מהירותו משתנה במידה ניכרת. אומרים שהגרפיט "ממתן" את הניטרונים*. למתקן כולו קראו כור גרעין (איור 33.6).



אנריקו פרמי. במולדתו, איטליה, ספג גינויים משום שלא הצדיע במועל-יד פשיסטי בעת שהוענק לו פרס נובל ב-1938. פרמי מעולם לא שב לאיטליה, וב-1945 התאזרח בארה"ב.

איור 33.7

שלט הארד באיצטדיון של שיקגו שהוצב כמזכרת לתגובת השרשרת ההיסטורית שיצר אנריקו פרמי.



איור 33.8

ציור-אמן המתאר את שהתרחש מתחת ליציעי האיצטדיון באוניברסיטת שיקגו, שם הקימו פרמי וצוותו את הכור הגרעיני הראשון.



* מים כבדים, המורכבים מדויטריום, האיזוטופ הכבד של מימן, הם ממתן יעיל אף יותר. הסיבה לכך היא שהמימן הרגיל בולע מיד את הניטרונים, אך לא כן המימן הכבד.

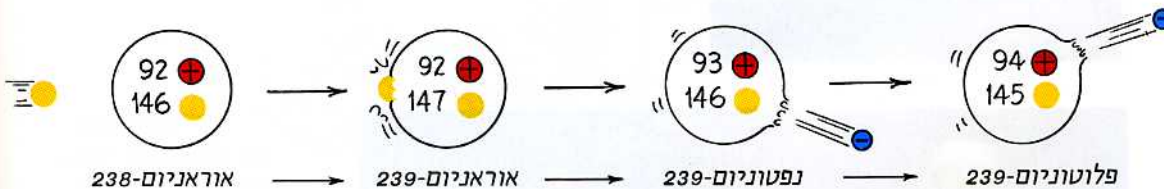
כור בלתי מבוקר אינו כור גרעין אמיתי, אלא תאונה טכנית העלולה להתרחש. ניתן למנוע תגובת שרשרת החורגת משליטה בעזרת מוטות העשויים מהמתכת קדמיום או מהיסוד בור בצורתו המתכתית, מפני שחומרים אלה בולעים ניטרונים בקלות. לצורך שמירה על קצב קבוע של שחרור אנרגיה מוכנסים מוטות הבקרה לכור ובולעים חלק מסוים של הניטרונים. כאשר הם מוחדרים לגמרי לתוך הכור, הם מפסיקים את תגובת השרשרת. אם הם מוצאים לחלוטין, התגובה יכולה להתפתח לרמה העלולה להביא להתכת הכור. אך התפוצצות הדומה לפצצה גרעינית לא תיתכן מפני שהאיזוטופים "באיכות-פצצה" מהולים מאוד ב-U-238.

שאלות

1. מהו תפקיד הממתן בכור גרעיני?
2. מהו תפקיד מוטות הבקרה בכור גרעיני?

פלוטוניום

כאשר גרעין U-238 בולע ניטרון לא מתרחש ביקוע. תחת זאת הגרעין פולט חלקיק בתא והופך ליסוד המלאכותי הראשון שמעבר לאוראניום - היסוד הטרכנסאוראני נפטוניום (הנקרא על שמו של כוכב הלכת הראשון שהתגלה על סמך חוק הכבידה של ניוטון). זמן מחצית החיים של נפטוניום הוא 2.3 יממות בלבד, ולכן הוא פולט עד מהרה חלקיק בתא והופך לפלוטוניום (הנקרא על שם פלוטו, כוכב הלכת השני שנתגלה על סמך חוק הכבידה של ניוטון). זמן מחצית החיים של פלוטוניום הוא 24,000 שנה. בדומה ל-U-235, האיזוטופ Pu-239 יתבקע כאשר ילכוד ניטרון.



השימוש העיקרי בערמה האטומית של פרמי היה ייצור פלוטוניום. מכיוון שהפלוטוניום הוא יסוד שונה מאוראניום, ניתן להפרידו מהאוראניום שבערמה בשיטות כימיות רגילות. לכן, הערמה מאפשרת לקיים תהליך שבו מיוצר חומר בקיע שהפרדתו קלה יותר מהפרדת ה-U-235 מאוראניום טבעי. פצצת האטום שפוצצה מעל נגסקי היתה פצצת פלוטוניום. אף שתיאורטית תהליך הפרדת הפלוטוניום מהאוראניום הוא פשוט, הרי שבפועל התהליך מסובך. זאת משום שנוסף על הפלוטוניום נוצרות בו כמויות גדולות של תוצרי ביקוע רדיואקטיביים. הרדיואקטיביות כה גבוהה שהחומרים בערמה מתחילים להתפרק פיסית. לכן יש להפסיק את פעולת

איור 33.9
לאחר ש-U-238 בולע ניטרון, הוא פולט חלקיק בתא, הנוצר מהפיכת ניטרון לפרוטון. האטום אינו עוד אוראניום אלא נפטוניום. לאחר שאטום הנפטוניום פולט חלקיק בתא, הוא הופך לפלוטוניום.

תשובות:

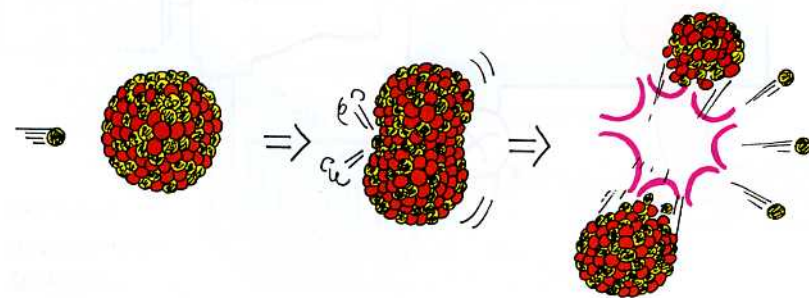
1. הממתן מאט את הניטרונים, המהירים מכדי להיבלע באיזוטופים הניתנים לביקוע.
2. מוטות הבקרה בולעים ניטרונים ובכך מפקחים על שטפם ועל קצב תגובת השרשרת.

הערמה לאחר שנוצרו גרמים ספורים בלבד של פלוטוניום. הפרדת הפלוטוניום מהאוראניום הייבת להתבצע בבקרה ממרחק כדי להגן על הצוות מהקרינה. היסוד פלוטוניום הוא יסוד רעיל מבחינה כימית, בדומה לעופרת ולאוסן. הוא תוקף את מערכת העצבים ועלול לגרום לשיתוק; במינון גבוה הוא אף עלול לגרום למוות. למרבה המזל, פלוטוניום אינו נותר זמן רב כיסוד אלא מתרכב במהירות עם חמצן ויוצר שלוש תרכובות, PuO , PuO_2 ו- PuO_3 , שכולן אינן פעילות מבחינה כימית. הן אינן מסיסות במים או במערכות ביולוגיות. תרכובות אלה של פלוטוניום אינן פוגעות במערכת העצבים ונמצא כי הן אינן מזיקות למערכות הביולוגיות.

עם זאת, הפלוטוניום לצורותיו מזיק מחמת היותו רדיואקטיבי. הוא מסוכן יותר מאוראניום ופחות מרדיום. פלוטוניום פולט חלקיקי אלפא שטווח חדירתם קצר ואשר מוסרים אנרגיה רבה, הקוטלת את התאים שבהם הם נתקלים אך אינה גורמת בהם למוטציות (שלא כחלקיקי הבתא הנפלטים מרדיום). היות שתאים פגועים - ולא תאים מתים - הם העלולים לגרום לסרטן, הרי שהפלוטוניום נחשב לחומר שאינו מסרטן כמעט. הסכנה הגדולה ביותר הנשקפת למין האנושי מן הפלוטוניום היא השימוש שנעשה בו בפצצות של ביקוע גרעיני. תועלתו היא בכורי דגירה.

ככור שבו $U-238$ מעורב באיזוטופים בקיעים, הניטרונים המשתחררים בביקוע הופכים את האיזוטופ השכיח יחסית $U-238$ לאיזוטופ הבקיע $Pu-239$. בדומה לכך, כאשר $Th-232$ מעורב באיזוטופים בקיעים, הוא הופך לאיזוטופ הבקיע $U-233$. כלומר, נוסף על תפוקת האנרגיה, נולד בתהליך דלק לביקוע מאיזוטופים שאינם בקיעים. כור כזה הוא כור דגירה*.

כורי דגירה



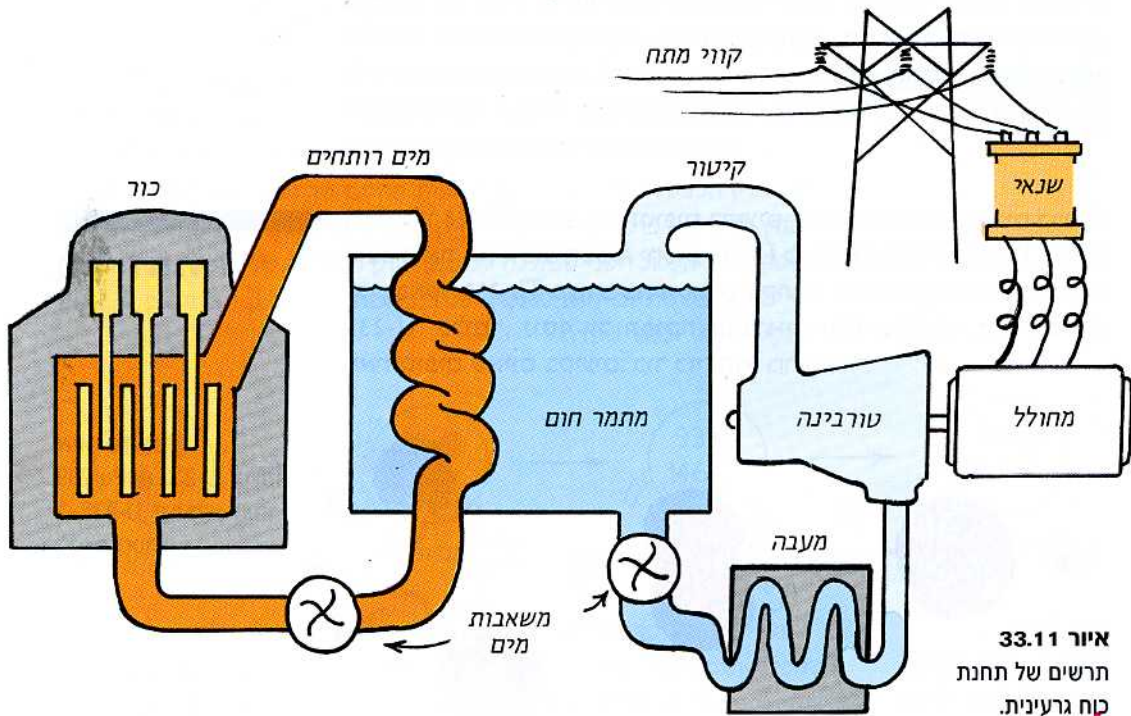
איור 33.10
 $Pu-239$ או $U-233$, בדומה ל- $U-235$, מתבקע לאחר לכידת ניטרון.

כור דגירה יוצר יותר דלק מכפי שהוא צורך**. לכל שני איזוטופים בקיעים המוכנסים לכור נוצרים כשלושה איזוטופים בקיעים. הדבר דומה לנהג המוסיף

* יש המכנים אותו כור תרבית (המתרגי).

** במשך שלוש השנים שבהן נמצא הדלק בליבה של כור רגיל מסוג המים הקלים שאינו כור דגירה, המשמש להפקת חשמל, מספיקה לכידת הניטרונים להמיר כמעט אחוז אחד מהאוראניום הנפוץ $U-238$ לפלוטוניום. ככל שקטן מלאי ה- $U-238$, גדל מלאי ה- $Pu-239$ ולמעשה, לקראת תום התקופה, הוא האחראי לרוב תפוקת האנרגיה. במידה מסוימת, בכל הכורים נוצר דלק בקיע.

מים לדלק שבמכל המכונית ולאחר הנסיעה מוצא גידול בכמות הדלק שבמכל על חשבון המים שהוסיף. פרט להשקעה הראשונית בבניית הכור, זוהי דרך חסכונית ביותר לייצור כמויות עצומות של אנרגיה. בכור דגירה הפועל כתחנת כוח יכולה להתקבל לאחר שנות תפעול אחדות כמות דלק כפולה מהכמות המקורית. כורי גרעין, הן כורים רגילים והן כורי דגירה, משמשים כיום בעיקר להפקת אנרגיה חשמלית. מעניין לציין שכורי הביקוע אינם אלא כבשנים גרעיניים, אשר בדומה לכבשנים של פחמי-אבן, משמשים להרתחת מים היוצרים קיטור להפעלת הטורבינות (איור 33.11). יתרונה של אנרגיית הביקוע הוא בכמויות החשמל העצומות הנוצרות, בשימור מיליארדי טונות של פחם, דלק וגז טבעי שהיה צריך להפכם לחום תוך כדי פליטת עשן ושבטוח הארוך יהיו נחוצים יותר כמקורות של חומר אורגני ולא כמקורות חום, ובמניעת פליטתם לאוויר של מיליוני טונות של תחמוצות גפרית ורעלים אחרים הנוצרים בבעירת דלקים אלה.



איור 33.11
תרשים של תחנת
קח גרעינית.

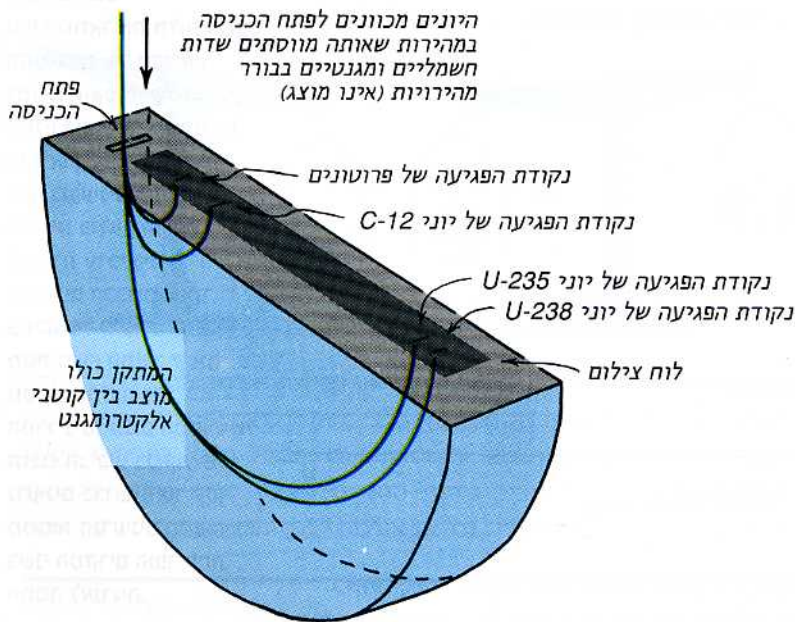
עם החסרונות נמנים בעיות אפסון הפסולת הרדיואקטיבית, ייצור של פלוטוניום וסכנת הרחבתו של מלאי הנשק הגרעיני, פליטת חומרים רדיואקטיביים לאוויר ולמי התהום, והחשוב מכולם - סכנת התרחשותה של תקלה העלולה לשחרר כמויות גדולות של רדיואקטיביות. ההגינות מחייבת להשוות לא רק בין יתרונותיהם של כורי גרעין לחסרונותיהם, אלא גם בין חסרונותיהם ויתרונותיהם לאלה של מקורות אנרגיה חלופיים. מסיבות שונות, במקומות רבים בעולם קיימת בדעת הקהל התנגדות לכורי הגרעין. מספר הכורים האלה הוא כיום במגמת ירידה בעוד מספרן של תחנות הכוח המבוססות על נפט, גז ופחם נמצא במגמת עלייה.

בהסתמך על עקרון השקילות בין מסה לאנרגיה - $E_0 = mc^2$ - שגילה איינשטיין, אפשר לראות במסה אנרגיה "קפואה". ככל שקשורה לחלקיק אנרגיה רבה יותר, כן גדלה מסתו. האם מסתו של נוקליאון הנמצא בתוך הגרעין ומסתו של נוקליאון הנמצא מחוצה לו שוות? כדי להשיב על כך נתבונן בעבודה הנדרשת להפרדת הנוקליאון מהגרעין. זיכרו כי עבודה, שהיא האנרגיה המושקעת, שווה למכפלת הכוח במרחק. עתה חישבו על עוצמת הכוח הנדרש כדי להתגבר על המשיכה הגרעינית ולהרחיק את הנוקליאונים למרחק גדול דיו. העבודה שתושקע במאמץ זה תבוא לידי ביטוי באנרגיה של הפרוטונים והניטרונים. תהיה להם אנרגיה רבה יותר מחוץ לגרעין. תוספת האנרגיה תשווה לאנרגיה או לעבודה שהושקעה בהפרדתם. אנרגיה זו תתבטא במסה. לכן, מסת הנוקליאון שמחוץ לגרעין גדולה ממסת הנוקליאון הכלוא בתוכו. ההוכחה הניסויית למסקנה זו היא אחד מהישגי הפיסיקה המודרנית. ניתן למדוד את מסותיהם של הנוקליאונים ושל איזוטופי היסודות השונים בדיוק של אחד למיליון ואף יותר. אחד ההתקנים המאפשרים זאת הוא ספקטרוגרף המסת (איור 33.13).

השקילות מסה-אנרגיה



איור 33.12
להוצאת נוקליאון מגרעין האטום נדרשת עבודה.



איור 33.13
ספקטרומטר מסות. היונים מכוונים לתוך ה"תוף" החצי-מעגלי שבו שדה מגנטי חזק מטה אותם למסלולים מעגליים. בשל ההתמדה, יונים כבדים יותר מוטים למסלולים בעלי רדיוס גדול יותר ויונים קלים יותר מוטים למסלולים בעלי רדיוס קטנים יותר. רדיוס המסלול נמצא ביחס ישר למסת היון. שימוש ב-C-12 כאמת מידה מאפשר לקבוע בקלות את מסותיהם של יתר האיזוטופים.

תשובה: Pu-239, שהוא איזוטופ בקיע, מתקבל מ-U-238 שאינו בקיע, או לחלופין U-233 בקיע נוצר מ-Th-232 שאינו בקיע.

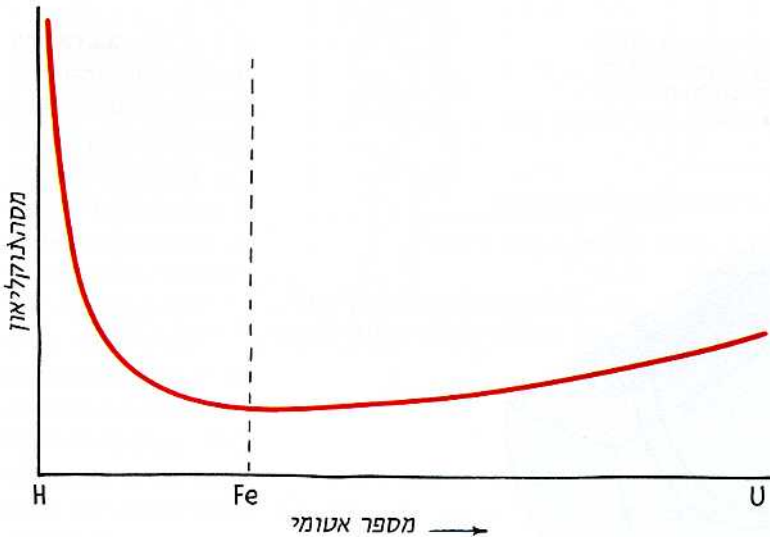
בספקטרוגרף המסות, יונים טעונים מוכנסים לאזור שבו קיים שדה מגנטי המטה אותם למסלולים שצורתם קשתות של מעגלים. ככל שהתמדתו של היון גדולה יותר, התנגדותו להטיה גדולה יותר ורדיוס מסלולו גדול יותר. השדה המגנטי מטה את היונים הכבדים לקשתות גדולות יותר ואת הקלים לקשתות קצרות יותר. ביציאתם מתחום השדה המגנטי עוברים היונים דרך פתחי יציאה שם ניתן לאספם, או שהם פוגעים בלוח צילום המשמש גלאי. אחד האיזוטופים נבחר כאמת מידה ומיקומו על לוח הצילום של ספקטרוגרף המסות משמש נקודת התייחסות. האיזוטופ שנבחר כאמת מידה הוא האיזוטופ השכיח של פחמן, $^{12}_6\text{C}$. למסתו של פחמן-12 ניתן הערך: 12 יחידות מסה אטומית. יחידת מסה אטומית (ימ"א) מוגדרת כאחד חלקי שנים-עשר ממסתו של אטום הפחמן הרגיל - פחמן 12. ביחס אליו נמדדות הימ"א של גרעיני האטומים האחרים. מסות הפרוטון והניטרון החופשיים גדולות ממסותיהם בהיותם בגרעין. מסת הפרוטון היא 1.00728 ימ"א ומסת הניטרון 1.00866 ימ"א.



איור 33.14

גרף המתאר את הגידול במסה הגרעינית עם עליית המספר האטומי.

באיור 33.14 מתוארות המסות הגרעיניות של היסודות ממימן ועד אוראניום. כצפוי, העקום עולה עם עליית המספר האטומי: כאשר המספר האטומי גדל, מסת היסודות גדלה. גרף מעניין יותר מתקבל אם מתארים את המסה הגרעינית לנוקליאון (כלומר מסת הגרעין מחולקת במספר הנוקליאונים) ממימן ועד אוראניום (איור 33.15). טבלה 33.1 מציגה את המסה היחסית ואת המסה היחסית לנוקליאון עבור כמה איזוטופים.



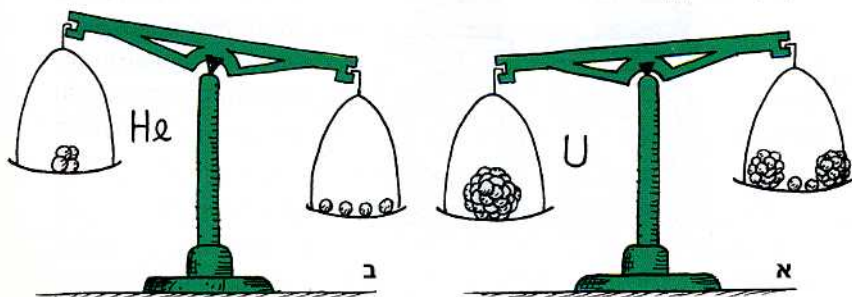
איור 33.15

גרף המתאר את תלות המסה הממוצעת של נוקליאון במספר האטומי של הגרעין שאליו הוא שייך. מסתם של נוקליאונים בודדים גדולה יותר בגרעינים הקלים, מזערית בגרעין הברזל, ומקבלת ערכי ביניים בגרעינים הכבדים ביותר. במיזוג של גרעינים קלים, מסת גרעין התוצר קטנה מסכום המסות של המרכיבים; סכום המסות של תוצרי הביקוע בביקוע של גרעינים כבדים מאוד קטן ממסות הגרעינים המקוריים. בשני המקרים הופך פחת המסה לאנרגיה.

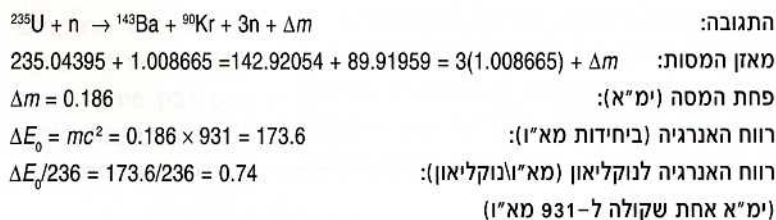
כאמור, כדי לקבל את המסה הגרעינית לנוקליאון מחלקים את המסה הגרעינית במספר הנוקליאונים בגרעין. מתברר שבהרכבים גרעיניים שונים מסותיהם של הפרוטונים והניטרונים שונות. מסת הפרוטון היא הגדולה ביותר בגרעין אטום המימן, והיא הולכת וקטנה עם עליית המספר האטומי. באטום הברזל מסת הפרוטון היא הקטנה ביותר. ביסודות שמעבר לברזל, התהליך מתהפך. מסת הפרוטונים (והניטרונים) הולכת וגדלה עם עליית המספר האטומי, עד לאוראניום ומעבר לו - ביסודות הטרנסאוראניים.

האיזוטופ	סימונו	המסה (ימ"א)	המסה לנוקליאון (ימ"א)
ניטרון	n	1.008665	1.008665
מימן	^1_1H	1.007825	1.007825
דיטריום	^2_1H	2.01410	1.00705
טריטיום	^3_1H	3.01605	1.00535
הליום-4	^4_2He	4.00260	1.00065
פחמן-12	$^{12}_6\text{C}$	12.00000	1.000000
ברזל-58	$^{58}_{26}\text{Fe}$	57.93328	0.99885
נחושת-63	$^{63}_{29}\text{Cu}$	62.92960	0.99888
קריפטון-90	$^{90}_{36}\text{Kr}$	89.91959	0.99911
בריום-143	$^{143}_{56}\text{Ba}$	142.92054	0.99944
אוראניום-235	$^{235}_{92}\text{U}$	235.04395	1.00019

מהתבוננות בגרף (או בטבלה 33.1) ניתן להבין מדוע בביקוע של גרעין האוראניום לגרעינים שמספרם האטומי נמוך יותר משתחררת אנרגיה. המסות של תוצרי הביקוע נמצאות על הצידי האופקי של הגרף, בערך במחצית הדרך בין אוראניום ומימן. חשוב מכך, המסות של הנוקליאונים בתוצרי הביקוע קטנות מהמסות של אותם נוקליאונים בעת הימצאם בגרעין האוראניום. מסת הפרוטונים והניטרונים קטנה. הפרש המסה בא לידי ביטוי באנרגיה הקינטית של תוצרי הביקוע - ב-200,000,000 אלקטרון-וולט בקירוב המתקבלים בכל ביקוע של גרעין אוראניום.



נוכל לראות את עקומת המסה לנוקליאון כבקעת אנרגיה המתחילה בנקודה הגבוהה ביותר (מימין), יורדת בתלילות כלפי מטה לנקודה הנמוכה ביותר (ברזל) ושבה ועולה באופן מתון יותר עד לאוראניום. הברזל נמצא בתחתית בקעת האנרגיה והוא הגרעין היציב ביותר. הוא גם הגרעין החזק ביותר; להוצאת פרוטון או ניטרון מגרעין הברזל נדרשת אנרגיה רבה יותר מאשר בכל גרעין אחר.



טבלה 33.1

המסות היחסיות והמסה לנוקליאון של מספר איזוטופים

איור 33.16

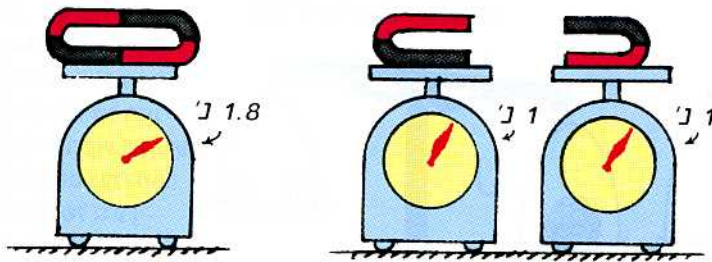
מסת הגרעין אינה שווה לסכום המסות של רכיביו. (א) תוצרי הביקוע של גרעין האוראניום הם בעלי מסה פחותה מזו של גרעין האוראניום. (ב) סכום המסות של שני פרוטונים ושני ניטרונים חופשיים גדול ממסתו של גרעין ההליום שאותו הם מרכיבים.

טבלה 33.2

רווח האנרגיה בביקוע אוראניום

ומה באשר לצידה השמאלי של הבקעה? גם אם מתקדמים מהמימן לעבר הברזל ניתן להפיק אנרגיה. אך כדי לנוע בכיוון זה יש להתיר או למזג גרעינים. זהו היתוך גרעיני. כשם שאנרגיה משתחררת בעת ביקוע יסודות כבדים, כך משתחררת אנרגיה בהיתוך של יסודות קלים. בשני המקרים המסה לנוקליאון קטנה, וכמות אדירה של אנרגיה משתחררת. בגרף ניתן לראות שכל אטום משמאלו ומימינו של הברזל הוא מקור אפשרי לאנרגיה. ככל שנימצא גבוה יותר משמאלה או מימינה של הבקעה וככל שנתגלגל יותר במורד, כך תגדל כמות האנרגיה המופקת. מגרעין הברזל לא תשתחרר אנרגיה. אם נפצלו, המסה הכוללת של החלקים תעלה על מסת הברזל לפני הפיצול. אם נמזג שני גרעיני ברזל, מסת גרעין התוצר תעלה על סכום המסות שלפני ההיתוך. במקרה מיוחד זה, נצטרך להשקיע אנרגיה הן בביקוע והן בהיתוך של הברזל; כל אנרגיה לא תשתחרר. אנו רואים מהגרף שאם ימוזגו היסודות שמעבר לברזל, לא תשתחרר אנרגיה. מסת הגרעין של תוצר ההיתוך תהיה גדולה מסכום המסות שלפני ההיתוך. התהליך יצרוך אנרגיה ולא ישחרר אנרגיה. בדומה לכך, היסודות שלפני הברזל לא יספקו אנרגיה בביקוע. סכום המסות של תוצרי הביקוע יעלה על מסתו של הגרעין המקורי, ושוב, בתהליך תידרש - ולא תשתחרר - אנרגיה. אנרגיה משתחררת רק כאשר המסה קטנה.

הן בתגובות הביקוע והן בתגובות ההיתוך, פחות מעשירית האחוז של המסה הופכת לאנרגיה, בין שהתהליך מתרחש בפצצות גרעין ובין שהוא מתרחש בכוכבים.

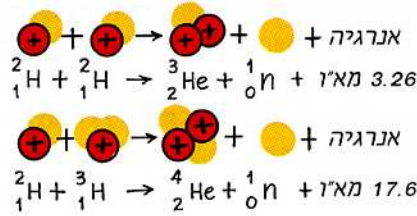


איור 33.17
דוגמה דמיונית: משקלם של "מגנטי המימן" כשהם נפרדים גדול ממשקלם כאשר הם מחוברים.

בתהליך ההיתוך של איזוטופי מימן להליום, תהליך ההיתוך הגרעיני, ניתן להפיק אנרגיה בשיעור של עד 26,700,000 אלקטרון-וולט "צמצום" המסה של הנוקליאונים המעורבים. פחת המסה בהיתוך איזוטופי המימן מתבטא באנרגיה קינטית, הנישאת ברובה על ידי הניטרונים הנפלטים בתגובה במהירות הקרובה לחמישית ממהירות האור. כאשר הניטרונים נבלמים ונלכדים, אנרגיית ההיתוך הופכת לחום, לאנרגיה חשמלית או לצורות אחרות של אנרגיה.

אף שאנרגיית ההיתוך הנפלטת בתגובה בודדת של אטומי מימן נמוכה מזו המשתחררת בביקוע יחיד של אטום אוראניום, כאשר בודקים את כמות האנרגיה המשתחררת לכל גרם של מגיבים מתברר שהאנרגיה הנוצרת בהיתוך רבה מזו הנוצרת בביקוע. הסיבה לכך היא שמספר האטומים בגרם מימן גדול ממספר אטומי האוראניום - הכבדים מאטומי המימן - בגרם של אוראניום.

היתוך גרעיני



איור 33.18 תגובות היתוך גרעיני.

${}^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + \text{n} + \Delta m$	תגובה:
$2.01410 + 3.01605 = 4.00260 + 1.008665 + \Delta m$	מאזן המסות:
$\Delta m = 0.01888$	פחת המסה (ימ"א):
$\Delta E_0 = \Delta mc^2 = 0.01888 \times 931 = 17.6$	רווח האנרגיה (מא"ו):
$\Delta E_0/5 = 17.6/5 = 3.5$	רווח האנרגיה לנוקליאון (מא"ו/נוקליאון):

גם היסודות הכבדים מהמימן וקלים מהברזל משחררים אנרגיה בהיתוך, אולם בשיעור קטן יותר מאשר בהיתוך מימן. היתוך יסודות כבדים יותר מתרחש בכוכבים בשלבים מתקדמים של התפתחותם. כמות האנרגיה הכוללת המשתחררת לכל גרם בשלבי ההיתוך השונים מהליום ועד ברזל שווה רק לכחמישית מכמות האנרגיה המשתחררת לגרם בהיתוך המימן להליום. מימן, בעיקר בצורת דיטריום, הוא הדלק העדיף להיתוך.

כדי שתתרחש תגובת היתוך, הגרעינים המתנגשים חייבים לנוע במהירויות גבוהות, כדי להתגבר על הדחייה החשמלית ביניהם. המהירויות הנדרשות מתאימות לטמפרטורות הגבוהות מאוד השוררות בשמש ובכוכבים. התגובות המתחוללות בשמש ובכוכבים אחרים נקראות לכן **תגובות תרמו-גרעיניות** - כלומר, היתוך גרעיני האטומים בטמפרטורות גבוהות. בטמפרטורות הגבוהות השוררות בשמש, 657 מיליוני טונות של מימן הופכים בכל שנייה ל-653 מיליוני טונות של תערובת הליום וניטרונים. ארבעת מיליוני הטונות של המסה החסרה מעניקים אנרגיה קינטית להליום ולניטרונים. האנרגיה הקינטית מחממת את השמש. תגובות אלה הן למעשה בעירה גרעינית. תגובות תרמו-גרעיניות דומות לשריפה כימית רגילה. בשני המקרים, הן בבעירה הכימית והן בהיתוך הגרעיני, טמפרטורות גבוהות מציתות את התגובה ושחרור האנרגיה בתהליך מביא לקיומן של הטמפרטורות הגבוהות הגורמות להתפשטות הבעירה. תוצאת התגובה הכימית היא התרכבות של אטומים למולקולות שהקשרים בהן חזקים יותר. בבעירה הגרעינית, הטמפרטורה הגבוהה מציתה תגובה או שרשרת תגובות שתוצאתן היא יצירת גרעינים קשורים בחוזקה רבה יותר. ההבדל בין הבעירה הכימית לבעירה הגרעינית הוא בעיקר בסדר הגודל.

בטרם פותחה פצצת הגרעין לא ניתן היה להגיע על פני כדור הארץ לטמפרטורות הנחוצות להצתת היתוך גרעיני. אולם, משגילו החוקרים שהטמפרטורות בתוך פצצת אטום מתפוצצת גבוהות פי ארבעה או פי חמישה מהטמפרטורה בליבה של השמש, רק כפסע הפריד בינם לבין פיתוח פצצה תרמו-גרעינית. פצצת המימן הראשונה פוצצה ב-1952. שלא כפצצת ביקוע ("פצצה אטומית") שגודלה מוגבל בשל המסה הקריטית של החומרים

טבלה 33.3

רווח האנרגיה בהיתוך מימן



איור 33.19

פצצת ביקוע ופצצת היתוך.

הבקיעים, פצצת היתוך (פצצה תרמו-גרעינית או "פצצת מימן") אינה מוגבלת בגודלה. כשם שאין כל מגבלה על גודלו של מאגר דלק, אין כל מגבלה תיאורטית על גודלה של פצצת היתוך. כשם שמאחסנים דלק במאגר, כך ניתן לאחסן בבטחה כל כמות של דלק להיתוך גרעיני עד להצתתו. ואף שדי בגפרור אחד להצתת מאגר דלק שלם, דרושה לפחות פצצת ביקוע להצתת פצצה תרמו-גרעינית. המסקנה היא כי לא קיימת פצצת מימן "ננסית". עוצמתה אינה יכולה להיות פחותה מפצצת הביקוע ששימשה לה מרעום.

פצצת המימן היא עוד דוגמה לתגלית חדשה שיושמה למטרות הרס ולא למטרות מועילות. הצד החיובי של העניין הוא האפשרות להפיק באופן מבוקר כמויות עצומות של אנרגיה בשיטה שאינה גורמת לזיהום.

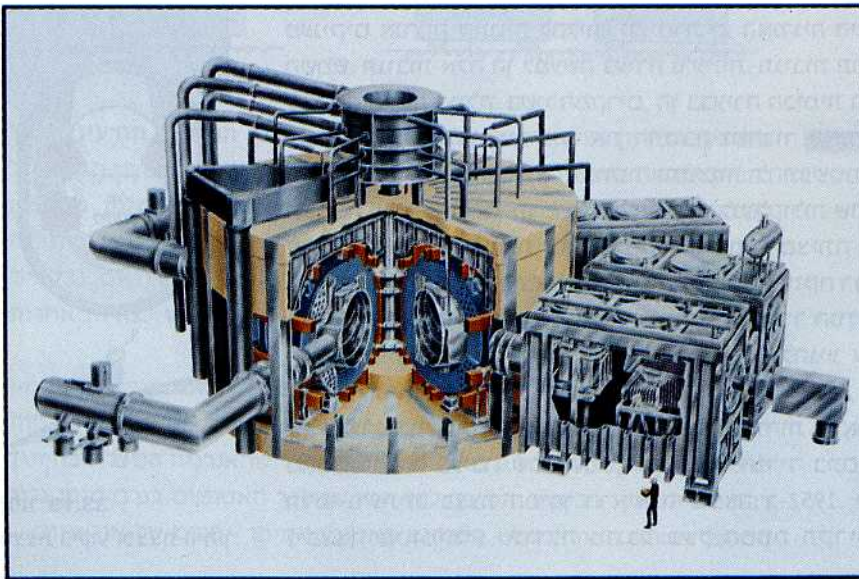
היתוך מבוקר

קיומה של תגובת היתוך בתנאים מבוקרים מחייב בדרך כלל טמפרטורות של מיליוני מעלות. מאמצי מחקר עצומים הושקעו ומושקעים בהשגת טמפרטורות גבוהות כאלה ובשמירתן. טמפרטורות גבוהות מתקבלות בקשתות חשמליות שבהן הגזים המוזרקים מיוננים והופכים לפלסמה. חימום נוסף מתקבל בשיטות של תהודה אלקטרומגנטית ודחיסה מגנטית.

הבעיה היא מציאת חומר שיכול לשמש לכליאת הפלסמה. כל החומרים המוכרים מותכים ומתאיידים בטמפרטורה נמוכה מ-4000 מעלות צלסיוס, ואילו להיתוך נדרשות טמפרטורות העולות על 100 מיליון מעלות. אולם המצב אינו חסר תקווה. שדה מגנטי, שאינו דבר חומרי, יכול להתקיים בכל טמפרטורה ולהפעיל כוחות אדירים על חלקיקים טעונים המצויים בתנועה. "קירות מגנטיים" חזקים דיים עוצבו לכליאת פלסמות במעין כתונת משוגעים

איור 33.20

שדות מגנטיים משמשים לכליאת הפלסמה בתא הריק של מתקן ההיתוך טוקמאק.



מגנטית (איור 33.20). ניתן לווסת את השדות המגנטיים לצורך דחיסת הפלסמה ויצירת הטמפרטורות הנדרשות להיתוך. הפלסמה לא תתיך את דפנות האלקטרומגנטיים גם אם הטמפרטורה שלה תעלה למיליארד מעלות, כי בשל צפיפותה הזעומה תכולת החום הכוללת שלה נמוכה מאוד. כדי ליצור כור היתוך מבוקר ולא פצצה שומרים על צפיפות פלסמה הקטנה פי 10,000 לערך מהצפיפות האטמוספירית. יש למנוע מגע של הפלסמה בקירות, לא מחשש שיותכו אלא מפני שהמגע עלול להאט את היונים ולגרום לצינון הפלסמה.

חלק מהיונים בטמפרטורה של מיליון מעלות נעים במהירות שדי בה להתגבר על הדחייה החשמלית ולהתחבר תוך כדי התנגשות רבת עוצמה, אולם פליטת האנרגיה מתגובות היתוך אלה נמוכה בהשוואה לאנרגיה הנדרשת לחימום הפלסמה. גם ב-100 מיליון מעלות, האנרגיה הנדרשת לחימום הפלסמה רבה יותר מזו המשתחררת בהיתוך. בטמפרטורה של 350 מיליון מעלות תיצור תגובת ההיתוך די אנרגיה לאיזון צריכת האנרגיה. בטמפרטורת ההצתה הזו תפוקת האנרגיה של הבעירה הגרעינית תספיק לקיום הבעירה ללא צורך בתוספת אנרגיה. כל שנדרש ליצירת אנרגיה באופן רציף הוא הוספת איזוטופי מימן בקצב קבוע.

בכמה מתקנים כבר הצליחו החוקרים והמהנדסים להשיג היתוך, אולם אי-יציביות בזרם הפלסמה מונעות עדיין תגובה מתמשכת. אחת הבעיות הקשות ביותר היא יצירת מערכת שתשמור על הפלסמה במצב יציב למשך זמן שיאפשר מיזוג של יונים במספרים גדולים. מתקנים שונים לכליאה מגנטית הם כיום נושא למחקר נרחב.

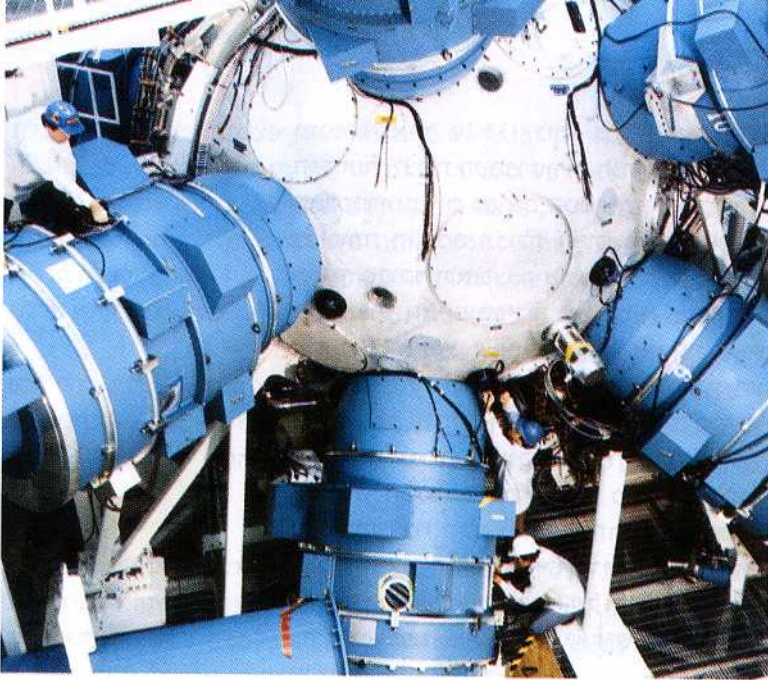
גישה אחרת מנצלת לייזרים באנרגיות גבוהות כדי לעקוף את בעיית הכליאה המגנטית. אחת השיטות היא לכוון מספר אלומות לייזר לנקודה אחת ולהשליך כדוריות מוצקות של מימן אל מוקד "האש הצולבת" (איור 33.21). האנרגיה של מקבץ האלומות דוחסת את דלק הדיטריום-טריטיום לצפיפות הגדולה פי 20 ויותר מצפיפותה של עופרת מתכתית. "מבער" ההיתוך מעכל את רוב המימן ויוצר גרעיני הליום וניטרונים שעפים לצדדים באנרגיות קינטיות השוות לאובדן המסה בתגובת ההיתוך. התנועה כלפי חוץ מתרחשת בתוך כעשירית-מיליארדית השנייה ויוצרת אנרגיה העולה מאות מונים על האנרגיה שסיפקו אלומות הלייזר לדחיסת הכדוריות ולהצתתן. כשם שסדרת ההתפוצצויות הקטנות של תערובת האוויר והדלק בתאי מנוע המכונית הופכת לזרימה רציפה של אנרגיה מכנית, כך יכולות ההצתות העוקבות של הכדוריות הנופלות למתקן ההיתוך ליצור זרימה מתמדת של אנרגיה חשמלית*. הצלחת התהליך הזה תלויה בתזמון מדויק ביותר, מפני שהדחיסה חייבת להתרחש לפני שגל ההלם גורם להתפזרות הכדורית. שיפור המתקנים מחייב גם פיתוח לייזרים יעילים יותר, כך שכמות האנרגיה החשמלית המופקת תעלה על כמות האנרגיה הנדרשת להפעלת הלייזר.



איור 33.21

היתוך באמצעות אלומות לייזר. כדוריות מוקפאות של דיטריום מוטלות בקצב קבוע אל "האש הצולבת" המתואמת של הלייזר. החום שנוצר מועבר על ידי ליתיום מותך ליצירת קיטור.

* בתחנת כוח הנמצאת בשלבי תכנון בארה"ב, קצב ההיתוך המתוכנן הוא חמש כדוריות בשנייה (לשם השוואה, במכונית הנוסעת בכביש מהיר מתרחשות בכל אחד מהגלילים כ-20 התפוצצויות בשנייה). תחנת כוח כזאת יכולה ליצור חשמל בהספק של מיליארד וואט, הספק המתאים לצריכת החשמל של עיר בת 600,000 תושבים. הספקם של חמישה מחזורי היתוך כאלה בשנייה הוא בקירוב כמו ההספק של שריפת 60 ליטר של דלק נוזלי או 70 ק"ג של פחם בשנייה בתחנת כוח רגילה.



איור 33.22

תא הכדוריות במעבדות לורנס ליוורמור בארה"ב. מתקן הלייזר הוא נובה, הלייזר בעל העוצמה הגדולה ביותר בעולם, המכוון 10 אלומות לאזור המטרה.

קיימות שיטות אחרות להפגזת כדורי הדלק לא באור לייזר אלא באלומות של אלקטרונים, של יונים קלים או של יונים כבדים. בשיטה החדשה ביותר מחליפים את האלקטרונים באטום המימן במואונים, המנטרלים בעילות את מטען הפרוטון (על כך בסעיף הבא). תהא השיטה אשר תהיה, כולנו עדיין מצפים ליום הגדול - יום האיזון - שבו נקבל, באחת מהדרכים, תפוקת אנרגיה השווה לפחות לאנרגיה הנדרשת להתחלת התהליך. התוצאה תהיה כנראה הפתרון לבעיה של יצירת האנרגיה בעולם. זה יהיה מצב אידיאלי, מפני שלמרות היות התא הפנימי של מתקן ההיתוך רדיואקטיבי בשל הניטרונים המהירים שבתוכו, רמת הרדיואקטיביות תהיה נמוכה - עם זמן מחצית חיים הנמדד בימים ובשנים, בהשוואה לעשרות אלפי השנים של התוצרים הרדיואקטיביים בתגובות הביקוע. היתוך יוצר הליום נקי, לא רדיואקטיבי (המתאים לבלוני ילדים). בכורי היתוך לא תיתכן, עקרונית, תאונת "איבוד שליטה", מפני שבהיתוך לא נדרשת מסה קריטית. נוסף על כך, אין זיהום אוויר, כי אין שריפה. את בעיית זיהום החום, האופיינית לתחנות רגילות בעלות טורבינות קיטור, ניתן למנוע בדרך של ייצור החשמל ישירות בגנרטורים מגנטו-הידרו-דינמיים או בשיטות דומות המנצלות מעגלי דלק מטען-חלקיק להמרת אנרגיה ישירה.

הדלק המשמש להיתוך גרעיני הוא המימן, היסוד הנפוץ ביותר ביקום. התגובה הפשוטה ביותר היא ההיתוך של איזוטופי המימן דטריום (${}^2_1\text{H}$) וטריטיום (${}^3_1\text{H}$), ושניהם מצויים במים רגילים. ב-30 ליטר של מי-ים, למשל, יש 1 גרם של דטריום, אשר בהיתוכו משחרר כמות אנרגיה השווה לאנרגיה המשתחררת מ-10,000 ליטר של נפט או מ-80 טון טני"ט. טריטיום טבעי נדיר יותר, אך בהיתוך כמות מספקת בתחילת התהליך, הרי שכור תרמו-גרעיני מבוקר ייצור כמות גדולה דיה של טריטיום מדיטריום במהלך פעולתו. בשל שפע הדלק הזמין להיתוך, כמות האנרגיה שנוכל להפיק בצורה מבוקרת היא, למעשה, בלתי מוגבלת.

שאלות

1. ביקוע והיתוך הם תהליכים הפוכים ובכל זאת בשניהם משתחררת אנרגיה. האין סתירה בדבר?
2. האם תצפו שהטמפרטורה בליבת כוכב תעלה או תרד כתוצאה מהיתוך של יסודות בינוניים ליצירת יסודות כבדים?

היתוך גרעיני קר

בהיתוך גרעיני של איזוטופי מימן ניתן לעקוף את הצורך בטמפרטורה גבוהה. היתוך שאינו תרמו-גרעיני ניתן לבצע אם מנטרלים באופן יעיל את מטענו החיובי של הגרעין בעזרת חלקיק קרוב אליו שמטענו שלילי - אך אינו אלקטרון. באטום המימן, האלקטרון נע סביב הגרעין במרחק גדול יחסית, שאותו מכתוב אורך הגל הגדול יחסית של גל החומר של האלקטרון הזעיר. אם מחליפים את האלקטרון במואון, חלקיק יסוד שמטענו השלילי שווה למטען האלקטרון אך מסתו גדולה פי 200 ויותר ממסת האלקטרון, הרי שאורך גל החומר שלו, הקטן יחסית, מאפשר לקרבו אל הפרוטון למרחק קטן פי 200. מסלול המואון הצמוד לגרעין יוצר גרסה מוקטנת של אטום המימן, "האטום המואוני". באטום המואוני מסלולי המואון כה קרובים לגרעין, שהמואון והגרעין "נראים" לפרוטונים רחוקים כחלקיק ניטרלי אחד. לכן אין דחייה חשמלית בין האטום המואוני לבין גרעין המימן או בינו לבין כל חלקיק טעון אחר. האח! לאטומים מואוניים אלה מספיקה תנועה תרמית רגילה כדי להתנגש עם גרעיני מימן, ליצור מולקולה קצרת-חיים ולהתמזג. זה היתוך גרעיני קר, הידוע גם בשם היתוך מזורז-מואונים*.

רוב האנרגיה המשתחררת בהיתוך מזורז-מואונים היא אנרגיה קינטית - בעיקר של הניטרונים הנפלטים בתגובה. התחכום בהיתוך כזה הוא שברוב התגובות נפלטים גם המואונים, אשר עוברים לשמש זקזים בתגובות היתוך נוספות. האטומים הסובבים אינם מושפעים מהאנרגיה הקינטית הגבוהה של הניטרונים, פרט לעליית הטמפרטורה. יש מספר דרכים שבהן ניתן לרתום את האנרגיה הקינטית של הניטרונים לצרכינו, והפשוטה שבהן היא הפיכתה לחום שיניע טורבינות לייצור חשמל.

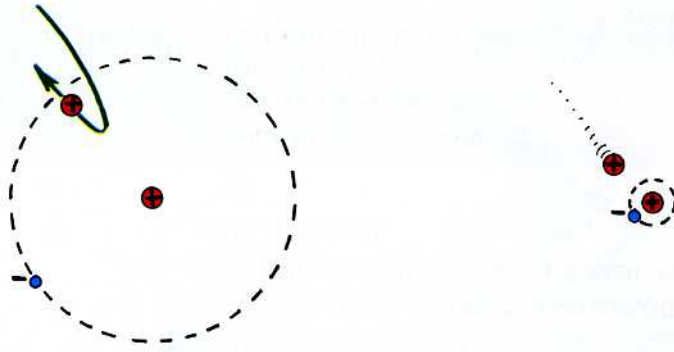
תשובות:

1. לא ולא! אילו היה מדובר באותו יסוד המשחרר אנרגיה בשני התהליכים, הן בביקוע והן בהיתוך, היתה סתירה בדבר. אך רק בהיתוך של יסודות קלים ובביקוע של יסודות כבדים יש פחת במסת הנוקליאון ועימו שחרור אנרגיה.
2. בשלבים מאוחרים אלה בהתפתחות הכוכב נבלעת אנרגיה וליבת הכוכב נוטה להתקרר. אולם הדבר גורם לקריסת הכוכב, שכרוכה עימה היווצרות טמפרטורה גבוהה עוד יותר.

* אין לבלבל בין ההיתוך מזורז-מואונים, רעיון שהגו כבר בסוף שנות ה-40 פי פרנק ואנדריי די סחרוב, לבין הניסויים השגויים ככל הנראה של פונס ופליישמן, שנערכו בשנת 1989 באוניברסיטת יוטה. כעשור לאחר שהוצע ההיתוך מזורז-מואונים, מצאו לואיס ו' אלורוז וצוותו מאוניברסיטת ברקלי בקליפורניה עדות להיתוך כזה בעקבות שגילו בתאי בועות. גילוי זה עורר התרגשות רבה; אך ההתלהבות שככה כשהוברר שרוב המואונים שימשו זרזים בהיתוך אחד בלבד לפני דעיכתם, וכי הם יצרו אנרגיה מעטה מדי ופחות מדי מואונים שימשו לתגובות נוספות. קבוצתו של אלורוז חקרה תגובות שכללו רק מימן רגיל ודיטריום. במחקרים חדשים יותר שנערכו בתערובת של דיטריום וטריטיום התקבלו תוצאות מבטיחות יותר. ניתן לקרוא על כך במאמר היתוך גרעיני קר מאת יוהן רפלסקי וסטיוון גינס בחוברת יולי 1987 של כתב העת למדע *Scientific American*.

איור 33.23

(משמאל) באטום רגיל של מימן, פרוטון החודר לענן האלקטרונים נדחה בכוח החשמלי שמפעיל עליו הגרעין החיובי. דרושות טמפרטורות גבוהות ביותר כדי לגרום לפרוטונים לפגוע זה בזה. (מימין) כאשר מואון ממלא את מקום האלקטרון באטום המימן, מתקבלת גרסה מצומצמת בהרבה של מימן – אטום מואוני. פרוטון החודר לענן המואון כבר נמצא בקרבה מספקת לגרעין החיובי כדי שהכוח הגרעיני החזק יוכל לפעול עליו. במקום דחיה חשמלית מתרחש היתוך. (למעשה, האטום המואוני חודר לענני האלקטרונים של מולקולות הדיטריום והטריטיום.)



חסרונו של תהליך היתוך זה הוא זמן מחצית החיים הקצר של המואונים והעובדה שקשה להשיגם. מואונים מצויים בטבע בקרינה הקוסמית המשנית, הנוצרת מפגיעת הקרינה הקוסמית הראשונית בשכבות האטמוספירה העליונות. ניתן ליצור מואונים בהתנגשויות של יונים עתירי אנרגיה שהואצו במאיץ חלקיקים בחומר רגיל כמו פחמן. בהתנגשויות נוצרים חלקיקים הנקראים פיונים, המתפרקים במהירות הן למואונים חיוביים והן למואונים שליליים בתהליך הדומה לזה המתרחש בפגיעת הקרינה הקוסמית באטמוספירה. המואונים עצמם אינם יציבים וזמן מחצית החיים שלהם הוא כ-2 מיליוניות השנייה. אם ההיתוך מזורז-מואונים אמור ליצור אנרגיה בכמויות מסחריות, הרי שהמואון צריך להספיק לזרז מספר תגובות שתשחררנה יותר אנרגיה מזו הנדרשת למאיץ החלקיקים כדי ליצור את המואון.

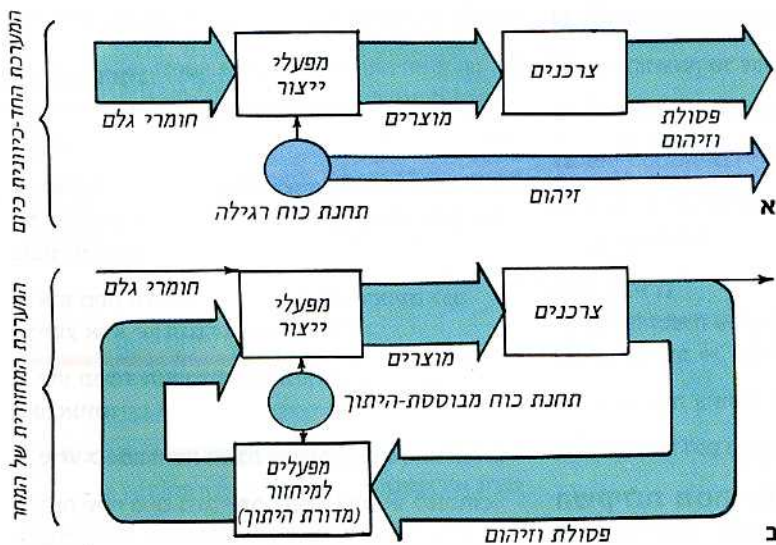
ניסויים שנערכו לאחרונה נותנים מקום לתקווה. מואונים טעונים שלילית נורים לתוך תערובת גזית של מולקולות דיטריום וטריטיום; הם מתנגשים במולקולות אלה ומחליפים בהן את אלקטרוני המסלול. כאשר מואון חודר למסלולו הצמוד באחד האיזוטופים הללו, המולקולה מתפרקת ונותר אטום מואוני הנע באיטיות, שיכול לחדור בקלות לגרעין במולקולת דיטריום או טריטיום שיפגוש בדרכו. מתרחש היתוך, והמואון המשתחרר יכול להתחיל את התהליך בשנית. כדי להגדיל את מספר התגובות יש להתאים את הטמפרטורה של הגז כך שתיווצר תהודה בין האנרגיה הנבלעת במולקולות לבין אנרגיות המצבים התנודתיים שלהן. אחדים מהחוקרים דיווחו על התרחשותה של תהודה כזאת בטמפרטורה של כ- 900° צלסיוס, מצב שבו מתרחשים יותר מ-100 היתוכים לכל מואון. בטמפרטורות גבוהות יותר מספר התגובות מתמעט, ולכן אין חשש שכור היתוך מזורז-מואונים יצא מכלל שליטה או יגיע למצב של התכה. בכל מקרה, תגובת ההיתוך המזורז על ידי מואון אינה תגובת שרשרת כבכורי ביקוע, מפני שבתגובה זו לא נוצרים מואונים רבים יותר מאלו הנכנסים לתהליך. כאשר המואון מתפרק, התגובה נפסקת. בשל הטמפרטורה הנמוכה ותכולת ההספק הקטנה של ההיתוך מזורז-מואונים, הוא לא יוכל לשמש לייצור נשק מלחמתי. גם התחזיות האופטימיות ביותר ליצירת מואונים אינן צופות מספר גדול דיו של תגובות בו-זמניות המסוגלות לייצר כמויות אנרגיה המתאימות לפצצה.

נושא ההיתוך הגרעיני הקר, הנוצר באמצעות מואונים או חלקיקים אחרים, נמצא כיום במוקד העניין והמחקר המדעי. טכנולוגיה זאת היא מועמדת רצינית להיות שיטה כלכלית חדשה ויעילה לייצור אנרגיה.

מדורת היתוך ומיחזור

שימוש מרתק בשפע האנרגיה שמספק היתוך מסוג כלשהו הוא מדורת היתוך, להבה שחומה כחום כוכב או פלסמה בטמפרטורה גבוהה, שלתוכה ניתן להשליך את כל חומרי הפסולת - שפכים נוזליים או פסולת תעשייתית מוצקה. באזור בעל הטמפרטורה הגבוהה יתפרקו החומרים לאטומים המרכיבים אותם ויופרדו במכשיר הדומה לספקטרוגרף מסות למכלים שונים, ממימן ועד אוראניום. בדרך זו, מתקן היתוך יחיד יאפשר, עקרונית, לא רק להיפטר מאלפי טונות של פסולת ביום אלא גם לספק באופן מתמיד חומרי גלם טריים - ובכך לסגור את המעגל משימוש למיחזור.

זו תהיה נקודת מפנה חשובה בכלכלת החומרים (איור 33.24). בתהליך זה או בדומים לו יגיע עיסוקנו הנוכחי בחומרים ממוחזרים לפסגת הישגיו, מפני שיהיה זה המיחזור בה"א הידיעה! במקום לחפש בנבכי כדור הארץ אחר חומרי גלם, נוכל למחזר את המלאי הקיים שוב ושוב, והוספת חומרים חדשים תידרש רק כדי למלא את מקום הפחת המועט. באנרגיית היתוך נוכל לספק שפע של אנרגיה חשמלית, להתפיל מי-ים, לנקות את עולמנו מן הזיהום ומן הפסולת ולמחזר את החומרים, ובכך להכשיר את הקרקע לעולם טוב יותר - לאו דווקא בעתיד הרחוק, אלא אולי אף בזמננו. אם וכאשר יהיו מתקני היתוך למציאות יומיומית, השפעתם על החברה האנושית עשויה להיות גדולה מההשפעה שהיתה להכנסת האנרגיה האלקטרומגנטית לשימוש במאה הקודמת. אם נעמיק לחשוב על התפתחותנו העתידית, ניווכח לדעת שהיקום מותאם כהלכה לחיים בעתיד. אם יום אחד יוכלו בני אדם לנוע ביקום כפי שאנו יכולים לטוס כיום על פני כדור הארץ, מלאי הדלק שלהם מובטח. הדלק להיתוך מצוי



איור 33.24

בעזרת מדורת היתוך ניתן לקבל כלכלת חומרים סגורה. בניגוד למערכות העכשוויות (א) המבוססות על כלכלה חד-כיוונית ובזבזנית של חומרים, תיווצר מערכת עמידה (ב) שתוכל למחזר את המקורות המוגבלים, ובכך תפתור את רוב בעיות הזיהום הסביבתי הנובעות מהשיטות הנוכחיות של שימוש באנרגיה. (עפ"י "The Prospects of Fusion Power" מאת ו' גאף וב' איסטלונד. Scientific American, Inc. 1971.)

בכל מקום ביקום, לא רק בכוכבים אלא גם בחלל שביניהם. מעריכים שכ-91 אחוזים מהאטומים ביקום הם אטומי מימן. אספקת חומרי הגלם מובטחת לאנשים בעתיד; כל היסודות נוצרים מהיתוך של עוד ועוד גרעיני מימן. אם נציג זאת בפשטות, הרי שמהיתוך של 8 גרעיני דיטריום מתקבל חמצן, מ-26 מתקבל ברזל, וכן הלאה. בעתיד יוכלו האנשים לבנות לעצמם את היסודות הדרושים להם ובאותו תהליך עצמו ליצור אנרגיה, בדיוק כמו הכוכבים. ביום מן הימים יוכלו בני האדם לנסוע לכוכבים בספינות חלל מתודלקות באותו מקור אנרגיה שבזכותו הכוכבים מאירים.

7. למה שטח פנים גדול יותר, לשני גושים נפרדים של אוראניום או לגוש אחד שהורכב משניהם?

8. מהיכן יצאו ניטרונים רבים יותר, משני גושים נפרדים של אוראניום או מגוש אחד שהורכב משניהם?

9. האם הסיכוי להתרחשותה של תגובת שרשרת תוך כדי שחרור אנרגיה גדול יותר בשני גושים נפרדים של אוראניום או בגוש אחד שהורכב משניהם?

10. מה היו שתי השיטות ששימשו בתכנית מנהטן להפרדת U-235 מ-U-238?

כורי גרעין

11. מה היה תפקיד הגרפיט בכור האטומי הראשון?

12. מהן שתי הדרכים לבקרה של תגובת השרשרת בכור גרעין?

פלוטוניום

13. מהי התוצאה של בליעת ניטרון ב-U-238?

14. מהי התוצאה של פליטת חלקיק בתא מ-U-239?

15. מהי התוצאה של פליטת חלקיק בתא מ-Np-239?

16. מה משותף ל-U-235 ול-Pu-239?

17. מתי הפלוטוניום רעיל כימית ומתי לא?

18. האם רעילותו הרדיואקטיבית של פלוטוניום גדולה מזו של אוראניום?

כורי דגירה

19. מהי ההשפעה של ערבוב כמויות קטנות של Pu-239 בכמויות גדולות של U-238?

20. מנו שלושה איזוטופים בקיעים.

21. כיצד נוצר דלק גרעיני בכור דגירה?

השקילות מסה-אנרגיה

22. האם יש לבצע עבודה כדי לשחרר נוקליאון מגרעין

תקציר מונחים

ביקוע גרעיני התחלקות הגרעין של אטום כבד, כמו U-235, לשני חלקים עיקריים, המלווה בשחרור אנרגיה רבה.

תגובת שרשרת תגובה המקיימת את עצמה; תגובה שמרגע שהחלה, היא מספקת בהתמדה את האנרגיה והחומר הדרושים להמשכה.

מסה קריטית המסה המינימלית של חומר בקיע המאפשרת קיום תגובת שרשרת.

היתוך גרעיני מיזוגם של גרעיני אטומים קלים ליצירת גרעין כבד יותר, תהליך שבו משתחררת אנרגיה רבה.

היתוך תרמו-גרעיני היתוך גרעיני הנוצר בטמפרטורה גבוהה.

שאלות חזרה

ביקוע גרעיני

1. מהו התפקיד שממלאים הכוחות החשמליים בביקוע גרעיני?

2. השוו בין האנרגיה המשתחררת בביקוע של אטום אחד של אוראניום לאנרגיה המשתחררת ממולקולה אחת בעת פיצוץ של טניט.

3. איזו מסה גדולה יותר, זו של גרעין אוראניום לפני הביקוע או זו של תוצרי הביקוע, לאחריו?

4. מהו תפקיד הניטרונים המשתחררים בביקוע גרעין האוראניום?

5. מדוע לא מתרחשת תגובת שרשרת במכרות אוראניום?

6. למה שטח פנים גדול יותר, לתפוח שלם או לשני חצאי התפוח?

- מפרוטון ומאלקטרון או אטום המורכב מפרוטון וממאון?
 41. מהו המטען הכולל של אטום המורכב מפרוטון בגרעין וממאון?
 42. לאיזה גרעין יכול פרוטון תועה להתקרב יותר, לגרעין של מימן רגיל או לגרעין של מימן מואוני? מדוע?
 43. מה קורה כאשר פרוטון תועה מתקרב מאוד לגרעין של אטום מואוני?
 44. כיצד נוצרים מואונים?

מדורת היתוך ומיחזור

45. אם ממקמים להבה שחומה כחום הכוכבים בין צמד לוחות גדולים הטעונים חשמלית, האחד טעון במטען חיובי והאחר במטען שלילי, ומשליכים לתוכה חומרים המתפרקים לגרעינים ולאלקטרונים, לאן ינועו הגרעינים? לאן ינועו האלקטרונים?
 46. הניחו שבלוח הטעון שלילית יש נקב וגרעיני האטומים הנעים לעברו עוברים דרכו ויוצרים אלומה. הניחו גם שהאלומה מכוונת אל בין קוטבי אלקטרומגנט רב-עוצמה. האם תמשיך אלומת הגרעינים הטעונים לנוע בקו ישר או שמא תסטה ממסלולה?
 47. בהנחה שהאלומה סוטה, האם יסטו כל הגרעינים, הקלים והכבדים, במידה שווה? (האם שמתם לב לכך שהמתקן שתיארנו הוא גרסה של ספקטרומטר המסות, וכן הוא יכול להפריד ביעילות בין גרעיני האטומים?)
 48. בדלי מלא ממי-יש יש כמות זעירה של זהב. אי אפשר להפרידו מהמים בעזרת מגנט רגיל, אך אם משליכים את הדלי לתוך מדורת ההיתוך שתיארנו, המגנט יוכל להפריד ביניהם. מהו מספר התא של הזהב אם אטומי מימן נאספים לתא מס' 1 ואטומי אוראניום לתא מס' 92?
 49. מה תהיה התוצאה של השלכת פסולת ושפכים למדורת היתוך במקום השלכתם לאוקיינוס או הטמנתם במעמקי האדמה?
 50. מהו הדלק בהיתוך גרעיני? איזה אטום משמש אבן בניין ראשונית לכל האטומים האחרים? מהו היסוד הנפוץ ביותר ביקום? מדוע לא ייווצר מחסור באנרגיה ובחומרים "בעידן המימן"?

תרגילים

1. מדוע לא מתרחשת התפוצצות ספונטנית במרבצים של עפרת אוראניום?
 2. מדוע לא ישתמשו, כנראה, בביקוע גרעיני להנעת מכוניות?

- האטום! האם לנוקליאון מחוץ לגרעין אנרגיה פוטנציאלית גדולה יותר משיש לו בתוכו? האם לנוקליאון בעל אנרגיה גבוהה יותר מסה גדולה יותר?
 23. היכן מסתו של הנוקליאון גדולה יותר, מחוץ לגרעין האטום או בתוכו?
 24. האם בגרעינים שונים שווה ההפרש בין מסת הנוקליאון מחוץ לגרעין האטום לבין מסתו בתוך הגרעין?
 25. מהו ההבדל העיקרי בין הגרפים שבאיורים 33.14 ו-33.15?
 26. באיזה גרעין מסת הפרוטון מרבית? באיזה גרעין היא מזערית?
 27. השוו בין מסות הנוקליאוניים באוראניום למסות הנוקליאוניים בתוצרי הביקוע של האוראניום.
 28. מה קורה לפחת המסה?
 29. גרעינו של איזה אטום הוא בעל הקשר החזק ביותר?
 30. אילו היה גרעין הברזל מתבקע, האם היתה לתוצרי הביקוע מסה גדולה יותר לכל נוקליאון או מסה קטנה יותר לכל נוקליאון?
 31. אילו התמזגו שני גרעיני ברזל, האם היתה לגרעין התוצר מסה גדולה יותר לכל נוקליאון, או קטנה יותר?

היתוך גרעיני

32. באיזה תהליך משתחררת אנרגיה רבה יותר, בביקוע גרעין אוראניום או בהיתוך זוג גרעיני מימן? באיזה תהליך משתחררת אנרגיה רבה יותר, בביקוע האטומים בגרם אחד של אוראניום או בהיתוך האטומים בגרם אחד של מימן? מדוע שונות התשובות?
 33. האם לנוקליאוניים בגרעין הנוצר מהיתוך זוג איזוטופי מימן מסה גדולה יותר או קטנה יותר מזו שיש להם באטום המימן?
 34. כדי להפיק אנרגיה מהליום, האם יש לבקעו או למזגו?
 35. הסבירו במדויק מהו היתוך תרמו-גרעיני.
 36. במה דומה בעירה גרעינית לבעירה כימית?

היתוך מבוקר

37. באיזה סוג של מכלים משתמשים לכליאת פלסמה במיליון מעלות?
 38. כיצד מבצעים היתוך בעזרת לייזר?
 39. במה נבדלים החלקיקים הנוצרים בתגובת היתוך מהחלקיקים הנוצרים בתגובת ביקוע?

היתוך גרעיני קר

40. גודלו של איזה אטום קטן יותר, אטום המורכב

3. במה דומה בעירה כימית לתגובת שרשרת גרעינית?
4. מדוע הניטרון הוא קליע גרעיני טוב יותר מהפרוטון או מהאלקטרון?
5. מדוע תהיה בריחת הניטרונים מגוש גדול של חומר גרעיני בקיע פחותה יחסית לבריחתם מגוש קטן?
6. באיזו צורה גיאומטרית המסה הקריטית הנדרשת גדולה יותר, בקובייה או בכדור? נמקו.
7. האם שטח הפנים הכולל גדל או קטן כשמספר גושים של חומר בקיע מתחברים לגוש אחד? האם החיבור מגדיל את סיכויי ההתפוצצות או מפחית אותם?
8. $U-235$ פולט בממוצע 2.5 ניטרונים לכל ביקוע, ואילו $Pu-239$ פולט בממוצע 2.7 ניטרונים. אם כך, לאיזה מיסודות אלה אמורה להיות מסה קריטית קטנה יותר?
9. היכן צפויה תגובת שרשרת מהירה יותר, ב- $U-235$ או ב- $Pu-239$?
10. מדוע לא נמצא פלוטוניום בכמויות של ממש בעפרות בטבע?
11. דונו בזיהום האוויר של תחנות כוח המופעלות בדלק מחצבי ובה של תחנות כוח גרעיניות, והשוו ביניהם.
12. המים העוברים בליבת הכור אינם נכנסים לטורבינות. החום מועבר לצנרת מים נפרדת, חיצונית לכור. מדוע נעשה הדבר?
13. האם מסתו של גרעין גדולה מסכום המסות של הנוקליאונים המרכיבים אותו או קטנה ממנו?
14. שחרור האנרגיה בביקוע גרעיני קשור לעובדה שהמשקל לנוקליאון של הגרעינים הכבדים ביותר גדול בכ-0.1 אחוז מהמשקל לנוקליאון של הגרעינים הנמצאים בסביבות אמצע הטבלה המחזורית. מה היתה ההשפעה על פליטת האנרגיה אילו היה ההפרש אחוז אחד?
15. הסבירו כיצד משתמש הפיסיקאי בעקום שבאיור 33.15 או בטבלת המסות הגרעיניות כדי להעריך את האנרגיה הנפלטת בתגובת ביקוע או היתוך.
16. באיזה תהליך תיפלט אנרגיה מזהב, בביקוע או בהיתוך? ומה באשר לפחמן? וברזל?
17. האם כמות האנרגיה שהיתה משתחררת בביקוע אוראניום לשלושה חלקים שווי גודל היתה גדולה יותר או קטנה יותר מאשר בביקועו לשניים? נמקו את תשובתכם על סמך איור 33.15.
18. הניחו שצורת העקום באיור 33.15 היתה כצורת העקום באיור 33.14. האם היתה נפלטת אנרגיה בתגובת ביקוע? האם היתה נפלטת אנרגיה בתגובת היתוך? נמקו את תשובתכם.
19. משקל "מגנטי המימן" שבאיור 33.17 גדול יותר כשהם נפרדים מאשר כשהם מחוברים. איזה הבדל עקרוני היתה מציגה דוגמה דמיונית זו אם המגנטים היו "מגנטי אוראניום"?
20. באיזה תהליך נוצרת כמות גדולה יותר של אנרגיה, בביקוע של אטום אוראניום בודד או בהיתוך של זוג אטומי דיטריום? בביקוע של גרם אוראניום או בהיתוך של גרם דיטריום? (מדוע שונות התשובות?)
21. בניגוד לדלק גרעיני לביקוע, אין מגבלה על כמות הדלק להיתוך גרעיני שניתן לאחסן בבטחה במקום אחד. מדוע?
22. פצצת מימן גורמת לנשורת רדיואקטיבית רבה, אף שבתגובת היתוך לא נוצרת כמות משמעותית של איזוטופים רדיואקטיביים. מדוע?
23. מנו לפחות שני יתרונות ליצירת אנרגיה בהיתוך במקום בביקוע.
24. היתוך גרעיני הוא מקור של תקווה לשפע אנרגיה בעתיד, אבל האנרגיה המקיימת אותנו מאז ומעולם היא אנרגיה של היתוך גרעיני. הסבירו.
25. כיצד עשויה תעשיית המכרות להיות מושפעת מסילוק פסולת עירונית במדורת היתוך הצמודה לספקטרוטר מסות?
26. העולם השתנה פלאים מאז גילוי ההשראה האלקטרומגנטית ושימושיה למנועים חשמליים ולמחוללים. נסו לחשוב על כמה שינויים העתידים לחול בעולם בעקבות פיתוח כורי היתוך יעילים.