



גרעין האטום ורדיואקטיביות



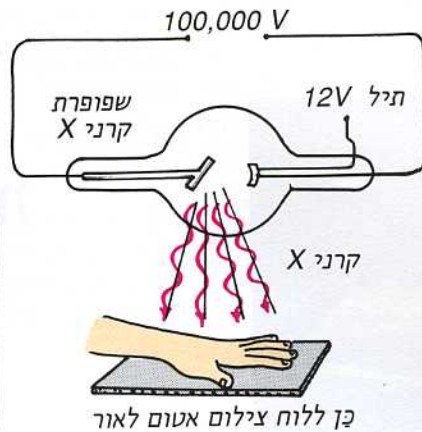
בפרק הקודם עסקנו בהכרת ענני האלקטרונים הבונים את האטום - בתחום הפיסיקה האטומית. בפרק זה נחדור אל מתחת לאלקטרונים, ועמוק אל תוך האטום - אל גרעין האטום. חקר הגרעין קשור לגילוייה המקרי של הרדיואקטיביות ב-1896, ותגלית זו קשורה לגילוי קרינת X, חודשיים לפני כן. נפתח את לימוד הפיסיקה הגרעינית בדיון על קרני X.

בשלהי המאה ה-19 גילה הפיסיקאי הגרמני וילהלם רנטגן "סוג חדש של קרניים" הנוצרת מפגיעת אלומת אלקטרונים במשטח זכוכית. הוא כינה אותן **קרני X** - קרניים שטבען אינו ידוע. רנטגן מצא גם שאם אלומת אלקטרונים פוגעת בלוח מתכתי נוצרות קרני X המסוגלות לחדור דרך חומרים מוצקים. כיום אנו יודעים שקרני X הן קרינה אלקטרומגנטית שתדירותה גבוהה, הנפלטת בדרך כלל כתוצאה מעירור האלקטרונים הפנימיים באטום. לעומת זרם האלקטרונים במנורה פלואורסנטית, המעורר את האלקטרונים החיצוניים באטומים ויוצר פוטונים בתחום העל-סגול ובתחום האור הנראה, אלומת אלקטרונים באנרגיה גבוהה יותר מעוררת את האלקטרונים הפנימיים וגורמת לפליטת פוטונים של קרינת X, שתדירותם גבוהה.

קרני X ורדיואקטיביות

איור 32.1

קרני X הנפלטות מאטומי מתכת מעוררים באלקטרודה עוברות דרך היד ופוגעות בסרט הצילום.



לפוטונים בקרינת X אנרגיה רבה והם מסוגלים לחזור דרך מספר רב של שכבות אטומים בטרם ייבלעו או יפוזרו. כך קורה גם כאשר קרני X עוברות דרך ויוצרות צילום של פנים גופך (איור 32.1).

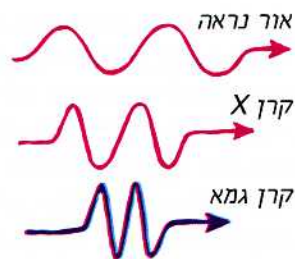
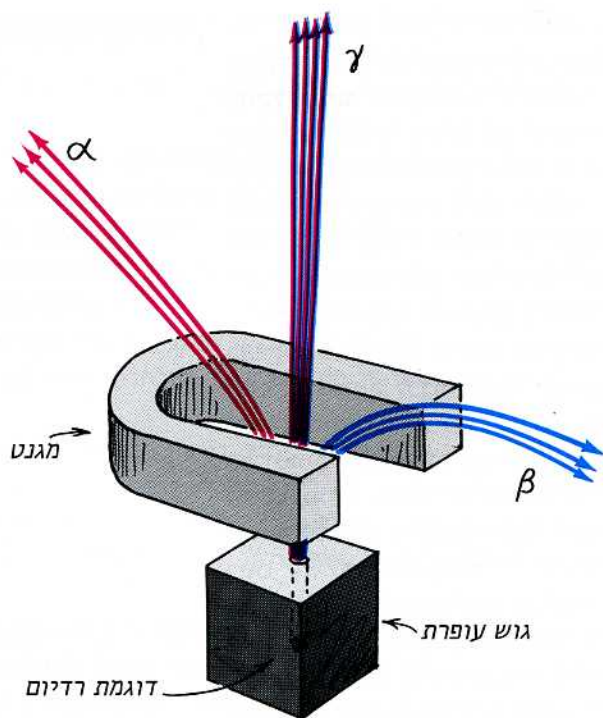
חודשיים לאחר שפרסם רנטגן את תגליתו, ניסה הפיזיקאי הצרפתי אנטואן אנרי בקרל לגלות האם ישנם יסודות הפולטים קרני X מעצמם. לצורך זה הוא עטף לוח צילום בנייר שחור שימנע את פגיעת האור והניח על הלוח העטוף יסודות שונים. בקרל שיער כי אם חומרים אלה פולטים קרינת X, הקרניים יחדרו דרך הנייר וישחירו את לוח הצילום. הוא גילה כי אף שלרוב היסודות לא היתה השפעה על לוח הצילום, היסוד אוראניום אכן פלט קרינה. בתוך פרק זמן קצר התגלה שקרינה דומה נפלטת גם מיסודות אחרים, כמו תוריום, אקטיניום ושני יסודות חדשים שגילו פייר ומארי קירי - פולוניום ורדיום. קרינה זו נפלטת בעקבות שינויים באטום שהם מרחיקי לכת בהרבה מעירורים אטומיים פשוטים. הקרניים הללו אינן תוצאה של שינויים החלים ברמות האנרגיה האלקטרוניות של האטום, אלא שינויים המתרחשים בתוך-תוכו של האטום, בליבתו - בגרעין. קרניים אלו הן תוצאה של התפרקות ספונטנית של גרעין האטום - רדיואקטיביות.



מארי קירי

היסודות הרדיואקטיביים פולטים שלושה סוגים שונים של קרינה, הנקראים בשמן של שלוש האותיות הראשונות באלף-בית היווני, α , β ו- γ . אלפא, בתא וגמא. לקרינת אלפא מטען חשמלי חיובי, לקרינת בתא מטען שלילי וקרינת גמא נעדרת כל מטען חשמלי. ניתן להפריד בין הקרינות באמצעות שדה מגנטי המופעל לאורך מסלולן (איור 32.3). בהמשך המחקר נתגלה שקרינת אלפא היא זרם של גרעיני היסוד הליום ושקרינת בתא היא זרם של אלקטרונים. קרינת גמא היא קרינה אלקטרומגנטית (זרם של פוטונים) שתדירותה גבוהה מתדירות קרני X. לעומת קרינת ה-X, שמקורה בענן האלקטרוניים שמחוץ לגרעין האטום, מקור קרינת הגמא הוא בגרעין. פוטוני הגמא מספקים מידע על מבנה הגרעין כשם שהפוטונים באור הנראה ובתחום קרינת X מספקים מידע על המבנה האלקטרוני של האטום.

קרינת אלפא, בתא וגמא

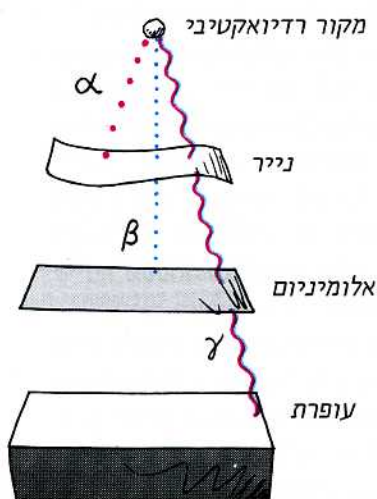


איור 32.2

קרן גמא אינה אלא קרינה אלקטרומגנטית שתדירותה והאנרגיה שלה גבוהות בהרבה מאלה של האור הנראה ושל קרינת X.

איור 32.3

חלק מרכיביה של אלומת קרינה רדיואקטיבית צרה מוטים בשדה מגנטי. מקור האלומה בחומר רדיואקטיבי הממוקם בתחתיתו של נקב שנקדח בגוש עופרת.



איור 32.4

כושר החדירה של חלקיקי אלפא הוא הנמוך ביותר וניתן לעצורם בכמה דפי נייר. חלקיקי בתא יחלפו בקלות דרך נייר, אך לא דרך דף אלומיניום. קרינת גמא תחדור מספר סנטימטרים לתוך גוש עופרת.

הגרעין

כפי שתיארנו בפרקים הקודמים, גרעין האטום תופס רק כמיליונית-מיליארדית של נפח האטום. לכן, האטום הוא ברובו חלל ריק. הגרעין מורכב מ**נוקליאונים**; הנוקליאונים הטעונים חשמלית הם הפרוטונים והנוקליאונים שמטענם החשמלי ניטרלי הם הניטרונים. מסת הניטרון גדולה במקצת ממסת הפרוטון. מסת הנוקליאון גדולה פי 2000 לערך ממסת האלקטרון, ולכן מסת האטום שווה למעשה למסת הגרעין. גודל מטענו החיובי של הפרוטון שווה בדיוק לגודל מטענו השלילי של האלקטרון. בהתפרקות בתא אלקטרון נפלט מהגרעין בעת שניטרון הופך בו לפרוטון.

רדיוסי הגרעין משתנים מ- 10^{-15} מ' במימן ועד רדיוס גדול פי שישה באוראניום. צורתם של רוב הגרעינים אינה כדורית - לעיתים לגרעין צורה מוארכת בדומה לכדור רוגבי, ולעיתים צורתו ככדור פחוס. תנודות של פני השטח וסיבובים של הגרעין כולו יוצרים לעיתים צורות "מעוותות ביותר". הפרוטונים והניטרונים שבגרעין נוטים להתלכד לחלקיקי אלפא וליצור פני שטח גבנוניים. סבורים ש"קליפה" של ניטרונים עוטפת את הגרעינים הכבדים. בדומה לקליפות של מסלולי האלקטרונים באטום, גם בתוך הגרעין יש קליפות. כשם שאלקטרונים העוברים למסלולים נמוכים יותר פולטים פוטונים, כך שינויים ברמות האנרגיה של הגרעין מלווים בפליטת פוטונים של קרינת גמא. את פליטת חלקיקי אלפא ניתן להסביר מנקודת המבט של הפיסיקה הקוונטית. כשם שהאלקטרונים במסלוליהם מהווים ענן הסתברות מסביב לגרעין, כך מהווים חלקיקי אלפא (וחלקיקים אחרים) ענן הסתברות בגרעין הרדיואקטיבי. ההסתברות שחלקיק אלפא יימצא בתוך הגרעין גבוהה מאוד, אך אם גל ההסתברות משתרע גם אל מחוץ לגרעין, קיימת הסתברות מסוימת שחלקיק האלפא יימצא מחוצה לו. בו ברגע שחלקיק אלפא יימצא מחוץ לגרעין, הוא ייהדף בחוזקה ממנו והלאה בשל הדחייה החשמלית.

נוסף על קרינת אלפא, בתא וגמא נתגלו יותר מ-200 חלקיקים שונים הנפלטים מהגרעין כאשר הוא מופצץ בחלקיקים בעלי אנרגיות גבוהות. איננו מניחים שחלקיקים אלו, הנקראים חלקיקי יסוד (חלקיקים אלמנטריים), קיימים בתוך הגרעין ומושלכים ממנו החוצה, ממש כשם שאיננו סבורים שניצוץ חבוי בגפרור לפני הצתתו. החלקיקים הללו נוצרים במהלך התפרקות הגרעין. את החוקיות המתגלה במסותיהם של חלקיקים אלו, כמו גם את המאפיינים הייחודיים של תהליך היווצרותם, ניתן להסביר אם מניחים כי קיימת משפחה מצומצמת של שישה חלקיקים תת-גרעיניים - הקוורקים.

למיטב הבנתנו כיום, **הקוורקים** הם אבני הבניין היסודיות של כל הנוקליאונים. התכונה הבלתי-שגרתית של הקוורקים היא היותם בעלי מטען חשמלי שערכו הוא שבר של מטען הפרוטון. לסוג אחד, הקוורק שכינינו מעלה, מטען שהוא $+\frac{2}{3}$ ממטען האלקטרון, ולסוג אחר, הקוורק מטה, מטען שהוא $-\frac{1}{3}$ ממטען האלקטרון. (הפיסיקאי מארי גל-מן, שהציע לראשונה את קיומם של הקוורקים, בחר את שמותיהם ב-1963, בהשראת ציטוט מספרו של גיימס ג'ויס משתה האשכבה של פינגו.) כנגד כל קוורק קיים אנטי-קוורק בעל מטען חשמלי מנוגד. הפרוטון בנוי מהרכב הקוורקים מעלה-מעה-מטה, והניטרון ממעה-מטה-מטה. מלבד במצבים בעלי אנרגיה עצומה, שלושת הקוורקים הבונים את הפרוטון והניטרון קשורים יחד בחוזקה, ולכן הפיסיקאים רואים

בפרוטון ובניטרון, שהם בעצם חלקיקים של החומר. בדומה לקטבים המגנטיים, בנפרד, ורוב החוקרים סוברים שטבע הקוורקים נרחיב את הדיון בטבעם של הקוורקים.

קיימים חלקיקים קלים יותר מהאלקטרונים, וחלקיקים הקלים אף מהם קבוצה בת שישה חלקיקים הנקראים לֵפְטוֹן מקוורקים. כיום, ששת הקוורקים וששת הלפטונים נחשבים לחלקיקי היסוד האמיתיים מישויות יסודיות יותר ומהווים את אבני היסוד נמצא בימינו בחזית המחקר המדעי.

הגרעין של אטום המימן מורכב מפרוטון בלתיים שלושה, וכן הלאה. לכל יסוד בטבע מספר הפרוטונים של היסוד הקודם לו. בגרעין שווה למספר האלקטרונים שמחוץ מספרו האטומי של היסוד.

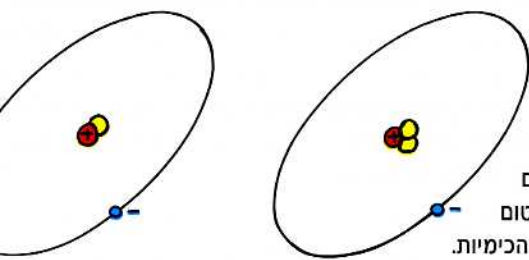
מספר הניטרונים בגרעין של יסוד נתון לכל אטום כלור 17 פרוטונים ולכן גם 17 נייטרונים כימיות ייצור יסוד זה. אך מספר אטומים בעלי מספר שווה של פרוטונים ונייטרונים מסתם של שני האיזוטופים העיקריים מ- ^{35}Cl ו- ^{37}Cl מסתמים אותם ב- $^{35.5}\text{Cl}$ המספר האטומי ואת מספר המסה (השורש מספר המסה שווה למספר הכולל של

האיזוטופים של היסוד כלור 17 מהנוקליאידים הקל יותר $18 = 35 - 17$ נייטרונים ולכבד האיזוטופים הללו מעורבים ביחס של ^{37}Cl , ולכן המסה האטומית הממוצעת של רק אחד מבין יסודות רבים המצויים בטבע או יותר. אפילו למימן, היסוד הקל ביותר ^2H (32.5). איזוטופ המימן שמסתו כפולה, ^3H השם הניתן ל- H_2O שבו H אחד אָו שני אֵו

איזוטופים

איור 32.5

שלושה איזוטופים של מימן. בכל גרעין פרוטון אחד, ואלקטרון אחד הנע סביבו במסלול אטומי וקובע את התכונות הכימיות של האטום. המספר השונה של הניטרונים משנה את מסת האטום אך לא את תכונותיו הכימיות.



ום תופס רק כמיליונית-ובו חלל ריק. הגרעין מורכב הפרוטונים והנוקליאונים יטרון גדולה במקצת ממסת מסת האלקטרון, ולכן מסת החיובי של הפרוטון שווה פרוטון נפלט

ועד רדיוס גדול פי שישה ית - לעיתים לגרעין צורה דור פחוס. תנודות של פני צורות "מעוותות ביותר". לחלקיקי אלפא וליצור פני אטם את הגרעינים הכבדים. גם בתוך הגרעין יש קליפות. יותר פולטים פוטונים, כך ת פוטונים של קרינת גמא. דת המבט של הפיסיקה וים ענן הסתברות מסביב רים) ענן הסתברות בגרעין בתוך הגרעין גבוהה מאוד, קיימת הסתברות מסוימת לקק אלפא יימצא מחוץ יה החשמלית.

מ-200 חלקיקים שונים עלי אנרגיות גבוהות. אינו (חלקיקים אלמנטריים), מש כשם שאיננו סבורים נוצרים במהלך התפרקות לקיקים אלו, כמו גם את ן להסביר אם מניחים כי גרעיניים - הקוורקים.

הבניין היסודיות של כל ם היא היותם בעלי מטען זד, הקוורק שכינויו מעלה, וורק מטה, מטען שהוא $-\frac{1}{3}$: לראשונה את קיומם של ציטוט מספרו של גיימס ם אנטי-קוורק בעל מטען עלה-מעלה-מטה, והניטרון צומה, שלושת הקוורקים , ולכן הפיסיקאים רואים

בפרוטון ובניטרון, שהם בעצם חלקיקים מורכבים, את אבני הבניין היסודיות של החומר. בדומה לקטבים המגנטיים, גם הקוורקים לא בודדו ולא נצפו בנפרד, ורוב החוקרים סוברים שטבע הקוורקים אינו מאפשר לבדדם. כאן לא נרחיב את הדיון בטבעם של הקוורקים.

קיימים חלקיקים קלים יותר מהנוקליאונים, כמו המואונים והאלקטרונים, וחלקיקים הקלים אף מהם הקרויים נְיִטְרִינִים. יחדיו הם מהווים קבוצה בת שישה חלקיקים הנקראים לֵפְטוֹנִים - חלקיקים שאינם מורכבים מקוורקים. כיום, ששת הקוורקים וששת הלפטונים (יחד עם האנטי-חלקיקים שלהם) נחשבים לחלקיקי היסוד האמיתיים - חלקיקים שאינם מורכבים מישויות יסודיות יותר ומהווים את אבני הבניין של החומר כולו. חקר חלקיקי היסוד נמצא בימינו בחזית המחקר המדעי ומעורר התלהבות ועניין רב.

הגרעין של אטום המימן מורכב מפרוטון יחיד. בגרעין ההליום שני פרוטונים, בליתיום שלושה, וכן הלאה. לכל יסוד בטבלה המחזורית פרוטון אחד נוסף על מספר הפרוטונים של היסוד הקודם לו. באטומים ניטרליים, מספר הפרוטונים בגרעין שווה למספר האלקטרונים שמחוצה לו. מספר הפרוטונים בגרעין הוא מספרו האטומי של היסוד.

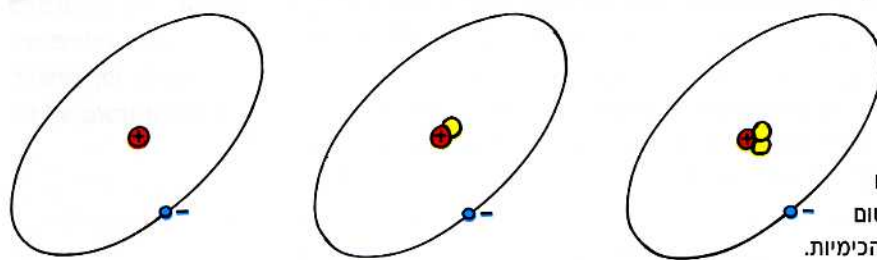
מספר הניטרונים בגרעין של יסוד נתון עשוי להשתנות במידת-מה. למשל, לכל אטום כלור 17 פרוטונים ולכן גם 17 אלקטרוני-מסלול הקובעים אילו תרכובות כימיות ייצור יסוד זה. אך מספר הניטרונים בגרעין עשוי להשתנות. אטומים בעלי מספר שווה של פרוטונים ומספר שונה של ניטרונים נקראים **איזוטופים**. מסתם של שני האיזוטופים העיקריים של הכלור היא פי 35 ופי 37 ממסת נוקליאון בודד. מסמנים אותם ב- $^{35}_{17}\text{Cl}$ ו- $^{37}_{17}\text{Cl}$, והמספרים מציינים את **המספר האטומי** ואת **מספר המסה** (השווה בקירוב למסה האטומית).

מספר המסה שווה למספר הכולל של הנוקליאונים בגרעין. מאחר שבשני האיזוטופים של היסוד כלור 17 מהנוקליאונים הם פרוטונים, הרי שלאיזוטופ הקל יותר $18=35-17$ ניטרונים ולכבד יותר $20=37-17$ ניטרונים. בטבע, האיזוטופים הללו מעורבים ביחס של שלושה אטומי $^{35}_{17}\text{Cl}$ על כל אטום של $^{37}_{17}\text{Cl}$, ולכן המסה האטומית הממוצעת של הכלור בטבע היא 35.5. כלור הוא רק אחד מבין יסודות רבים המצויים בטבע אשר כוללים שני איזוטופים יציבים או יותר. אפילו למימן, היסוד הקל ביותר, מוכרים שלושה איזוטופים (איור 32.5). איזוטופ המימן שמסתו כפולה, ^2_1H , נקרא דֵיּוֹטֵריום. "מים כבדים" הוא השם הניתן ל- H_2O שבו H אחד או שני אטומי ה-H הם אטומי דיטריום. בכל

איזוטופים

איור 32.5

שלושה איזוטופים של מימן. בכל גרעין פרוטון אחד, ואלקטרון אחד הנע סביבו במסלול אטומי וקובע את התכונות הכימיות של האטום. המספר השונה של הניטרונים משנה את מסת האטום אך לא את תכונותיו הכימיות.



תרכובות המימן המצויות בטבע, כמו המימן הגזי והמים, יש אטום אחד של דיטריום לכ-6000 אטומים של מימן "רגיל". איזוטופ המימן בעל המסה המשולשת, ${}^3_1\text{H}$, שאינו יציב אך משך חייו ארוך דיו והוא מהווה מרכיב מוכר של המים באטמוספירה, נקרא טריטיום. טריטיום נמצא בטבע בכמויות זעירות ביותר - פחות מאטום אחד לכל 10^{17} אטומים של מימן רגיל.

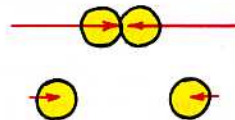
שלושה איזוטופים של אוראניום קיימים באופן טבעי בקליפת כדור הארץ; הנפוץ שבהם הוא ${}^{238}_{92}\text{U}$. בסימון מקוצר נוכל להשמיט את המספר האטומי ולומר U-238. (בפרק הבא נראה שהאיזוטופ U-235 הוא האיזוטופ שגרעינו מתבקע.) מבין 83 היסודות שקיימים על פני כדור הארץ בכמויות משמעותיות, ל-20 יסודות יש איזוטופ יציב אחד. לאחרים יש בין 2 ל-10 איזוטופים יציבים. מספר האיזוטופים הידועים, אם נביא בחשבון גם את האיזוטופים הרדיואקטיביים, הוא מעל 2000.

שאלה

מהו מספר הפרוטונים והניטרונים בכל אחד מהגרעינים הבאים: ${}^1_1\text{H}$, ${}^{14}_6\text{C}$, ${}^{235}_{92}\text{U}$?

כוחות הדחייה החשמלית בין הפרוטונים הטעונים חיובית והארזונים בצפיפות בגרעין הם עצומים. מדוע אין הדחייה הזאת גורמת להם להתרחק זה מזה? הסיבה לכך היא שבתוך הגרעין קיים כוח אדיר יותר - הכוח הגרעיני. הכוח הפרוטוני והן הניטרונים נמשכים זה לזה בכוח המשיכה העצום הזה. הכוח הגרעיני הוא כוח מורכב יותר מהכוח החשמלי ורק עתה מפוענחת התנהגותו. החלק העיקרי שבו, האחראי על שמירת הגרעין כיחידה אחת, נקרא הכוח החזק*. הכוח החזק הוא כוח משיכה הפועל בין פרוטונים, ניטרונים וחלקיקים הנקראים מזונים, המהווים יחד קבוצה הנקראת קדרונים. הכוח החזק פועל רק בטווחים קצרים מאוד (איור 32.6). עוצמתו גדולה ביותר בין נוקליאונים שמרחקם זה מזה קטן מרדיוס הפרוטון (10^{-15} מ'), אך היא קרובה לאפס במרחקים גדולים יותר. כלומר, הכוח החזק הוא כוח קצר-טווח. לעומת זאת, הכוח החשמלי נחלש ביחס הפוך לריבוע המרחק ולכן הינו כוח ארוך-טווח יחסית. לפיכך, כל עוד הפרוטונים קרובים זה לזה, כמו בגרעינים קטנים, הכוח הגרעיני גובר בקלות על כוח הדחייה החשמלי. אבל עבור פרוטונים המרוחקים זה מזה, למשל כאלה הנמצאים משני צידיו של גרעין גדול, כוח המשיכה הגרעיני עלול להיות חלש מכוח הדחייה החשמלית. מכאן שגרעין גדול לא יהיה כה יציב כגרעין קטן.

מדוע האטומים רדיואקטיביים



איור 32.6

הכוח הגרעיני החזק הוא כוח קצר-טווח ביותר. הכוח בין נוקליאונים הקרובים זה לזה או נוגעים זה בזה חזק מאוד, אך יורד לאפס כשהמרחק בין הנוקליאונים עולה על מספר קטרים של נוקליאון.

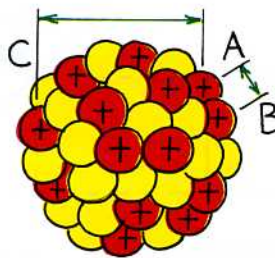
תשובה:

ב- ${}^1_1\text{H}$ יש פרוטון אחד ואין ניטרונים; ב- ${}^{14}_6\text{C}$ יש 6 פרוטונים ו-8 ניטרונים וב- ${}^{235}_{92}\text{U}$ - 92 פרוטונים ו-143 ניטרונים.

* כוח הצבע (שאינו דבר וחצי דבר עם הצבעים שאנו רואים) הוא כוח יסודי יותר מהכוח החזק. כוח זה פועל בין קוורקים ומחברם זה לזה תוך כדי החלפת "גלואונים". תוכלו לקרוא על כך בספרו של ה' פייגלס, הצופן הקוסמי: פיסיקת הקוונטים כשפת הטבע (עם עובד, 1991).

גם לנוכחות הניטרונים תפקיד בקביעת יציבות הגרעין. בעוד הפרוטונים מושכים וגם דוחים זה את זה, הרי שהניטרונים רק מושכים את הפרוטונים ואת הניטרונים האחרים, ולכן ניתן לראות בהם דבק גרעיני. מבין 20 היסודות הראשונים בטבלה המחזורית, רובם בעלי מספר שווה של פרוטונים ושל ניטרונים.

הגרעינים הכבדים זקוקים לתוספת של דבק גרעיני. למעשה, הניטרונים הם המהווים את רוב המסה של היסודות הכבדים. ב-U-238, למשל, יש 92 פרוטונים ו-146 (92=146) ניטרונים. אילו היה בגרעין האוראניום מספר שווה של פרוטונים וניטרונים - 92 פרוטונים ו-92 ניטרונים, הוא היה מתפרק מיידית בשל כוחות הדחייה החשמלית. יציבות חלקית מתקבלת רק הודות לכ-54 ניטרונים נוספים. מספר גדול זה של ניטרונים נועד לפצות על הדחייה שקיימת בין הפרוטונים המרוחקים. עם זאת, בשל הדחייה החשמלית, U-238 אינו יציב.



איור 32.7

פרוטון A מושך (בכוח גרעיני) וגם דוחה (בכוח חשמלי) את פרוטון B, אך את פרוטון C הוא בעיקר דוחה (כיוון שהמשיכה הגרעינית נחלשת מאוד במרחקים גדולים). בשל דחייה זו, יציבות הגרעין קטנה ככל שהמרחק בין A ו-C גדל. (החלקיקים הצהובים הם ניטרונים).

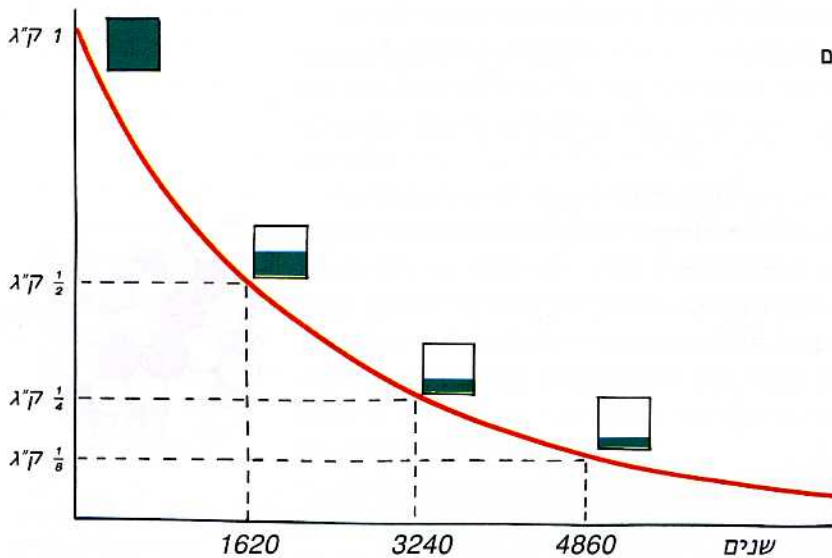
נציג זאת בצורה שונה: הדחייה החשמלית קיימת בין כל פרוטונים בגרעין, אך המשיכה הגרעינית אינה חזקה דיה עבור כל זוג (איור 32.7). כל פרוטון בגרעין האוראניום מפעיל כוח דחייה על כל אחד מ-91 הפרוטונים הנותרים - הקרובים והרחוקים כאחד. אולם, כל פרוטון (וכל ניטרון) מפעיל כוח משיכה גרעיני של ממש רק על הנוקליאונים המזדמנים לקרבתו. גילינו שכל הגרעינים שמספר הפרוטונים בהם עולה על 92 אינם יציבים. בסביבה לא יציבה זו מתרחשות התפרקויות אלפא ובתא. כוח גרעיני השונה מהכוח החזק אחראי להתפרקות בתא. כוח גרעיני זה, שהינו חלש מהכוח החזק, נקרא הכוח החלש ומשפיע בעיקר על חלקיקים קלים יותר כמו האלקטרונים ועל חלקיקים קלים אף מהם הנקראים ג'יטונים. כל אלה שייכים לקבוצת החלקיקים הקרויים לֶפְטוֹנִים. המנגנון לפליטת לֶפְטוֹנִים אינו תלוי רק בדחייה החשמלית והסברתו מצריכה דיון במכניקת הקוונטים, דיון החורג מתחומי ספר זה.

קצב ההתפרקות הרדיואקטיבית של יסוד נקבע במונחים של זמן אופייני, **זמן מחצית החיים**. זמן מחצית החיים של איזוטופ רדיואקטיבי הוא הזמן שבו תתפרק מחצית מכמות נתונה של גרעינים. למשל, זמן מחצית החיים של רדיום-226 הוא 1620 שנה (איור 32.8). פירוש הדבר הוא, שמחצית מכל כמות נתונה של רדיום-226 תהפוך ליסוד אחר בחלוף 1620 שנה. ב-1620 השנים הבאות תתפרק מחצית מכמות הרדיום שנותרה, ותיוותר רק רבע הכמות ההתחלתית של אטומי הרדיום. בסדרת ההתפרקויות, הרדיום מתפרק בסופו של דבר לעופרת. לאחר 20 פרקי זמן של מחצית החיים תקטן כמות האטומים ההתחלתית של הרדיום למיליונית מערכה ההתחלתית. זמן מחצית החיים של איזוטופים של יסודות מסוימים קטן ממיליונית השנייה, ואילו זמן מחצית החיים של אוראניום-238, למשל, הוא 4.5 מיליארד שנה. לכל איזוטופ של כל יסוד רדיואקטיבי זמן מחצית חיים האופייני לו.

זמן מחצית החיים

איור 32.8

כל 1620 שנה כמות הרדיום
קטנה במחצית.



הניטרון שבתוך הגרעין יציב, אך בהיותו חופשי הוא מתפרק וזמן מחצית החיים שלו הוא 12 דקות. זמן מחצית החיים של חלקיקי יסוד רבים קצר אף יותר. למואון, קרוב משפחה של האלקטרון הנוצר מפגיעת קרינה קוסמית בשכבות העליונות של האטמוספירה, זמן מחצית חיים השווה לשתי מיליוניות השנייה (2×10^{-6} שנייה)*. זמן מחצית החיים הקצר ביותר של חלקיקים אלמנטריים הוא מסדר גודל של 10^{-23} שניות, משך הזמן שבו האור עובר מרחק השווה לקוטר הגרעין.

ראויה לציון העובדה שזמן מחצית החיים של היסודות הרדיואקטיביים ושל חלקיקי היסוד הוא גודל קבוע, וקצב ההתפרקות הרדיואקטיביות אינו משתנה גם כשחלים שינויים קיצוניים בתנאים החיצוניים. בקצב ההתפרקות של יסוד נתון לא חל כל שינוי גם בתחום רחב של טמפרטורות, בהשפעת לחצים קיצוניים או שדות חשמליים ומגנטיים חזקים, ואף לא בתהליכים כימיים עזים. כל אחד מהשינויים הללו, קיצוני ככל שיהיה לפי אמות המידה המקובלות, הוא חלש מכדי להשפיע על הגרעין, הנמצא עמוק בתוך האטום. כיצד נמדד זמן מחצית החיים? אם זמן החיים ארוך לא נוכל לקחת דוגמת חומר ולחכות שמחציתה תתפרק. זמן מחצית החיים של יסוד רדיואקטיבי קשור קשר אמיץ לקצב ההתפרקות. ככל שזמן מחצית החיים קצר יותר, קצב ההתפרקות מהיר יותר והיסוד פעיל יותר. ניתן לקבוע את זמן מחצית החיים על סמך קצב ההתפרקות, שאותו ניתן למדוד במעבדה. על ידי שימוש במכניקת הקוונטים ניתן להעריך את זמן מחצית החיים. על סמך האנרגיה הקינטית של חלקיק האלפא הנפלט אפשר לחשב את אורך הגל שלו, ומכאן את ההסתברות ליציאתו מהגרעין. מידע זה מאפשר לנבא בהצלחה מסוימת את זמן מחצית החיים של גרעין האב.

* כיום מעורר המואון את התעניינות הפיזיקאים, בשל יכולתו לשמש, בטמפרטורות רגילות, זרז בתהליך ההיתוך הגרעיני של איזוטופי מימן. נשוב לדון בו בפרק הבא, כשנלמד על ההיתוך הגרעיני.

אנרגיית התנועה התרמית של האטומים בגז או בנוזל קטנה מכדי לשחרר אלקטרון מהאטומים, ועל כן האטומים נותרים במצב ניטרלי מבחינה חשמלית. אך כאשר חלקיק בעל אנרגיה גבוהה, כמו חלקיק אלפא או בתא, חולף דרך החומר, אלקטרונים לאורך מסלולו מתנתקים מהאטומים, ונוצר שובל של אלקטרונים חופשיים ויונים טעונים חיובית. תהליך היינון הזה הוא הגורם להשפעות המזיקות של קרינה באנרגיה גבוהה על התא החי. אך תהליך זה גם מאפשר לעקוב בקלות יחסית אחר מסלוליהם של חלקיקים בעלי אנרגיה גבוהה. נסקור בקצרה חמישה גלאי קרינה.

1. מונה גייגר מורכב מתיל הנמצא במרכזו של גליל מתכתי חלול המלא בגז. מתח חשמלי מופעל בין התיל לדפנות הגליל באופן שהתיל שרוי בפוטנציאל חשמלי גבוה יותר. אם חודרת לגליל קרינה ומייננת בו אטום, האלקטרון המשתחרר נמשך אל התיל הטעון חיובית. הוא מואץ לעבר התיל, מתנגש



ב



א

בדרכו באטומים נוספים ומשחרר מהם עוד אלקטרונים, גם אלקטרונים אלה מתנגשים במהלך תנועתם לעבר התיל ומשחררים אלקטרונים נוספים, וכך הלאה. כך נוצר פרץ של זרם חשמלי קצר, המפעיל מכשיר מנייה המחובר לשפופרת. הגברת הזרם הזה יוצרת את הצליל המוכר לנו מגלאי קרינה. 2. תא ערפל מראה את מסלולה של הקרינה המייננת באמצעות שובל ערפל. המכשיר מורכב מתא זכוכית גלילי הסגור בצידו העליון בחלון זכוכית ובצידו התחתון בבוכנה ניידת. בהתאמת מקום הבוכנה מביאים את אדי המים או הכוהל שבתא למצב של רוויה.

מניחים את הדוגמה הרדיואקטיבית בתוך התא, כמתואר באיור 32.10, או מחוץ לחלון הזכוכית הדק. כאשר חולפת הקרינה דרך התא, נוצרים לאורך מסלולה יונים. הזאת הבוכנה גורמת להצטננות מהירה של האוויר בתא, ואז מתעבות טיפות נוזל זעירות סביב היונים הללו ונוצרים שובלי אדים החושפים את מסלולי הקרינה. זוהי הגרסה האטומית של שובלי גבישי הקרח שיוצרים מטוסי סילון בשמים.

פשוט עוד יותר הוא תא הערפל הרציף. בתא זה קיים מצב הקבוע של אדים ברוויית יתר, מפני שהתא מונח על גוש של קרח יבש כך שקיים מפל טמפרטורות - מטמפרטורת החדר בקירוב בחלקו העליון של התא ועד

גלאי קרינה

איור 32.9

גלאי קרינה. (א) במונה גייגר מגלים את הקרינה החודרת לפי השפעתה המייננת על גז הכלוא בשפופרת. (ב) במונה נצנצים מגלים את הקרינה החודרת לפי נצנצי אור הנוצרים כאשר חלקיקים טעונים או קרני גמא עוברים דרך המכשיר.



איור 32.10

תא ערפל.

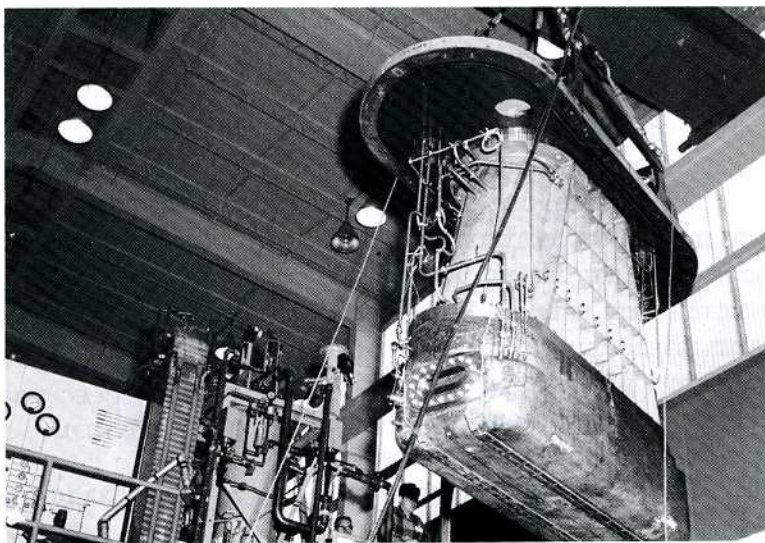
לטמפרטורה נמוכה מאוד בחלקו התחתון. בכל תאי הערפל לסוגיהם מאירים את מסלולי הערפל הנוצרים באמצעות מנורה, כך שניתן לראותם או לצלמם דרך המכסה העליון העשוי זכוכית. ניתן להניח את התא בשדה חשמלי או בשדה מגנטי חזק המטה את מסלולי החלקיקים, וכך מתקבל מידע על מטענם, על מסתם ועל התנע של חלקיקי הקרינה. חלקיקים חיוביים ושליילים יסטו בכיוונים מנוגדים.

3. שובלי החלקיקים הנראים בתא בוועות הם בוועות זעירות של גז במימן נוזלי (איור 32.11). המימן הנוזלי, המוחזק בלחץ בתא זכוכית ופלדת אל-חלד, מחומם כמעט עד לנקודת הרתיחה. אם ברגע חדירת חלקיק מיון לתא משחררים את הלחץ, נוצר שובל צר של בוועות לאורך מסלול החלקיק. את השובל קצר החיים של החלקיק מצלמים מספר אלפיות השנייה לפני שכל הנוזל מתחיל לרתוח (איור 32.12). גם כאן, כמו בתא ערפל, ניתן לגלות את מטענם ומסתם של החלקיקים הנחקרים בעזרת שדה מגנטי. בעשורים האחרונים הרבו החוקרים להשתמש בתאי הבועות, אך לאחרונה הם מעדיפים את תאי הניצוצות.

4. תא ניצוצות הוא מכשיר מנייה המורכב משורה של לוחות מקבילים שביניהם מרווחים קטנים; הלוחות מוארים לסירוגין, ואלה שביניהם מחוברים למתח גבוה (כ-10,000 וולט). כאשר עוברים חלקיקים טעונים דרך התא נוצרים יונים בגז שבין הלוחות. התפרקות חשמלית לאורך המסלול היוני יוצרת ניצוץ בין צמדי הלוחות. שובל הניצוצות הרבים חושף את מסלולו של החלקיק הפוגע. בגרסה אחרת, הנקראת תא התפרקות, המכשיר מורכב משני לוחות בלבד; הלוחות מרוחקים מאוד זה מזה, וביניהם מתרחשת התפרקות חשמלית דמוית אלומה העוקבת בקירוב אחר מסלולו של החלקיק הטעון. יתרונם העיקרי של תא הניצוצות ושל תא ההתפרקות בהשוואה לתא הבועות הוא שניתן לצפות באמצעותם במספר רב יותר של אירועים בזמן נתון.

איור 32.11

תא הבועות המימני בן 72 האינצ'ים במעבדת הקרינה ע"ש לורנס. מימן נוזלי ממלא את תחתית התא. הקרניים הנחקרות חודרות לתא דרך חלון.



איור 32.12

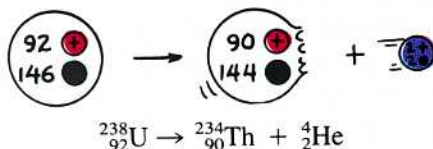
עקבות של חלקיקי יסוד בתא
בועות. בנקודות שמהן
מתחילים המסלולים
הספירליים נהרסו,
בהתנגשות, שני חלקיקים,
ונוצרו ארבעה חלקיקים
אחרים.

5. פעילותו של מונה נצנצים מבוססת על העובדה שחומרים מסוימים מעוררים בקלות ופולטים אור כאשר חלקיקים טעונים או קרינת גמא עוברים דרכם. את ההבזקים הקצרצרים של אור - הנצנצים - הופכים לאותות חשמליים באמצעות שפופרות מכפילות-אור מיוחדות. מונה נצנצים רגיש לקרינת גמא יותר ממונה גייגר, והוא מסוגל גם למדוד את האנרגיה של החלקיקים הטעונים או של קרני הגמא הנבלעים בגלאי.

שאלות

1. זמן מחצית החיים של דוגמת איזוטופים רדיואקטיביים הוא יום אחד. איזה חלק מהכמות ההתחלתית ייוותר בתום היום השני? בתום היום השלישי?
2. עבור איזה חומר יתקבל בגלאי קרינה קצב מנייה גבוה יותר - חומר רדיואקטיבי שזמן מחצית החיים שלו קצר או חומר רדיואקטיבי שזמן מחצית החיים שלו ארוך?

כאשר גרעין פולט חלקיק אלפא או בתא, נוצר יסוד אחר. התהליך שבו יסוד אחד משתנה ליסוד אחר נקרא **טרנסמוטציה**. נתבונן למשל באוראניום. לאוראניום-238 92 פרוטונים ו-146 נייטרונים. כאשר נפלט ממנו חלקיק אלפא, הרכב הגרעין קטן בשני פרוטונים ובשני נייטרונים (חלקיק אלפא הוא גרעין של הליום המורכב משני פרוטונים ומשני נייטרונים). 90 הפרוטונים ו-144 הנייטרונים הנותרים הם גרעין של יסוד חדש. יסוד זה הוא תוריום. נוכל לבטא התפרקות זו כ-

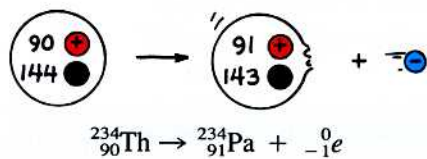


טרנסמוטציה של יסודות

תשובות:

1. בתום היום השני תיוותר רבע מהכמות המקורית - שלושה רבעים של הכמות שהתפרקה הפכו לחומר אחר. בתום שלושה ימים תיוותר שמינית מהכמות ההתחלתית.
2. חומר שזמן מחצית החיים שלו קצר יותר הוא חומר פעיל יותר, ולכן קצב המנייה שיתקבל עבורו בגלאי הקרינה יהיה גבוה יותר.

החץ נועד להראות ש- $^{238}_{92}\text{U}$ מתפרק ליסודות אחרים. כאשר מתרחשת ההתפרקות משתחררת אנרגיה, חלקה כקרינת גמא, חלקה באנרגיה הקינטית של חלקיק האלפא (^4_2He) וחלקה באנרגיה הקינטית של אטום התוריום. במשוואה זו ובדומות לה מתאזנים הן מספרי המסה המופיעים בחלק העליון (238=234+4) והן המספרים האטומיים המופיעים בחלק התחתון (92=90+2). גם התוריום-234, תוצר ההתפרקות, הוא רדיואקטיבי. בהתפרקותו הוא פולט חלקיק בתא. זיכרו כי חלקיק בתא הוא אלקטרון - לא אלקטרון מהמסלול האטומי אלא אלקטרון מהגרעין - מאחד הניטרונים. נוח לחשוב על הניטרון כעל חלקיק המורכב מפרוטון ומאלקטרון (אף שאין זה כך), מפני שבזמן שהניטרון פולט אלקטרון הוא הופך לפרוטון. הניטרון הנמצא בגרעין הוא בדרך כלל חלקיק יציב, אך ניטרון חופשי הוא רדיואקטיבי וזמן מחצית החיים שלו כ-12 דקות. הוא מתפרק לפרוטון ולחלקיק בתא*. אם כך, לאחר שהתוריום, המכיל 90 פרוטונים, התפרק בהתפרקות בתא, נותר גרעין שמספר הניטרונים בו פחת באחד ושנוסף בו פרוטון אחד. לגרעין החדש 91 פרוטונים והוא אינו תוריום אלא פרוטאקטניום. אף שבתהליך זה המספר האטומי גדל ב-1, מספר המסה (פרוטונים+ניטרונים) אינו משתנה. המשוואה הגרעינית היא



ציינו את האלקטרון כ- $^0_{-1}e$. ה-0 מציינ שם מסת האלקטרון זניחה בהשוואה למסת הפרוטונים והניטרונים, שהם התורמים הבלעדיים למספר המסה. ה-1- הוא מטען האלקטרון. זיכרו שאלקטרון זה הוא חלקיק בתא מהגרעין ולא אלקטרון מענן האלקטרונים האופף את הגרעין.

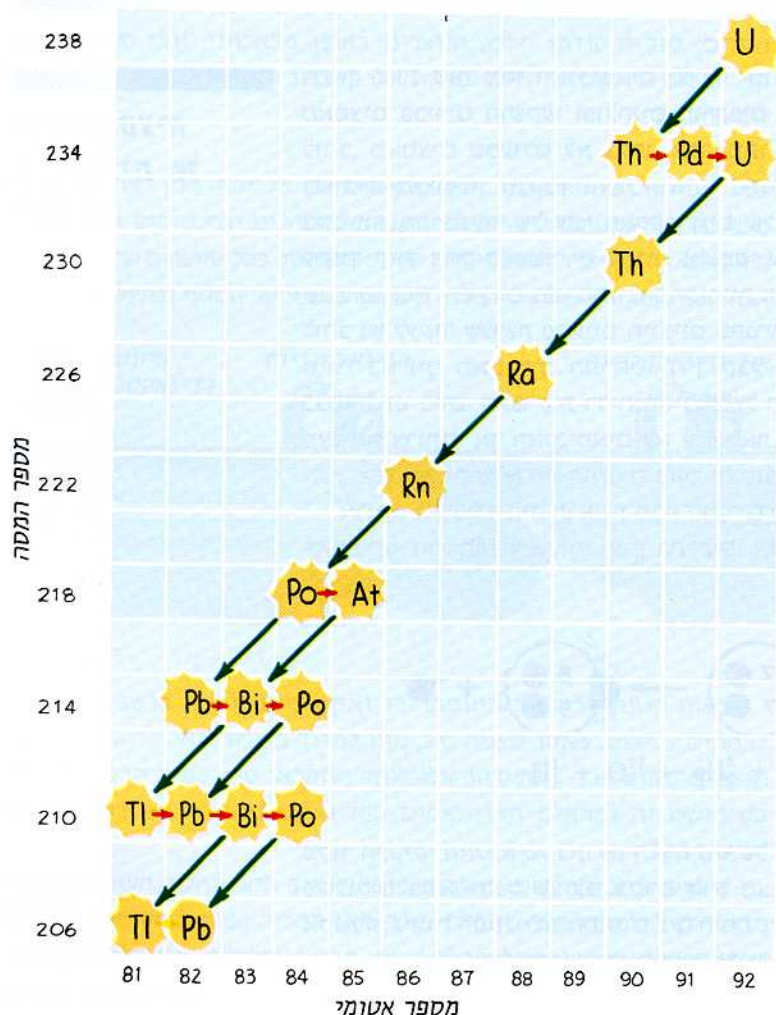
משתי הדוגמאות הקודמות ניתן ללמוד, שאם יסוד פולט מגרעינו חלקיק אלפא, מספר המסה של התוצר קטן ב-4 והמספר האטומי קטן ב-2. אטום התוצר מתאים ליסוד הנמצא בטבלה המחזורית שני מקומות לפני הגרעין שהתפרק (התבוננו בצידה הפנימי של הכריכה הקדמית). כאשר יסוד פולט קרינת בתא

* התפרקות בתא מלווה תמיד בפליטת ניטרינו, חלקיק ניטרלי שמסתו קרובה לאפס, הנע במהירות הקרובה למהירות אור. את קיום הניטרינו ("הניטרלי הזעיר") חזה ב-1930, משיקולים עיוניים, הפיזיקאי האוסטרי וולפגאנג פאולי, והוא נתגלה ב-1956. קשה לגלות את הניטרינים, מפני שתגובת הגומלין בינם לבין החומר חלשה מאוד. קשה מאוד ללכוד ניטרינו. בעוד גוש עופרת שעוביו מספר סנטימטרים יכול לעצור את רוב קרינת הגמא ממקור רדיום, נזדקק לגוש עופרת שעוביו כ-8 שנות-אור כדי לעצור מחצית מהניטרינים הנוצרים בהתפרקות גרעיניות רגילות. הואיל והיקום מלא בניטרינים, אלפי ניטרינים עוברים דרך בכל שנייה, יום-יום. רק לעיתים, פעם או פעמיים בשנה, מתחוללת תגובה בין ניטרינו כזה לבין גופך.

בזמן כתיבת ספר זה, עדיין לא ידוע אם לחלקיקי הניטרינו יש מסה או לא. כיום משערים שאם אכן יש לניטרינים מסה, אזי בשל מספרם העצום הם עשויים להיות כ-90% ממסת היקום - מסה שהיא גדולה דיה כדי לבלום את התפשטות היקום העכשווית ובסופו של דבר לסגור את המעגל מהמפץ הגדול לקריסה הגדולה. ייתכן שהניטרינים הם ה"דבק" המחזיק את היקום.

(אלקטרון), מסת האטום למעשה אינה משתנה ולכן לא חל שינוי במספר המסה, אך מספרו האטומי גדל ביחידה. אטום התוצר מתאים ליסוד הנמצא במקום העוקב בטבלה המחזורית. פליטת גמא אינה מלווה בשינויים במספר המסה או במספר האטומי. מכאן אנו למדים שמאטום הפולט חלקיק אלפא או בתא נוצר אטום שונה בטבלה המחזורית. פליטת אלפא מקטינה את המספר האטומי ופליטת בתא מגדילה אותו. אנו רואים איפוא שיסודות רדיואקטיביים עשויים להתפרק ליסודות שנמצאים לפנייהם או אחריהם בטבלה המחזורית*.

באיור 32.13 מתוארת ההתפרקות הרדיואקטיבית של $^{238}_{92}\text{U}$ ל- $^{206}_{82}\text{Pb}$, איזוטופ של עופרת. השלבים של תהליך ההתפרקות מוצגים בתרשים וכל גרעין



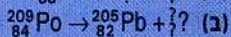
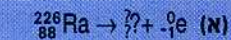
איור 32.13
אוראניום-238 מתפרק לעופרת-206 בשרשרת של התפרקויות אלפא ובתא.

* לעיתים גרעין פולט פוזיטרון, שהוא ה"אנטי-חלקיק" של האלקטרון. במקרה זה פרוטון הופך לנייטרון, והמספר האטומי קטן.

הנוטל חלק פעיל בסדרה מתואר כעיגול מתפוצץ. הצייר האנכי מציג את מספר המסה והצייר האופקי - את המספר האטומי. כל חץ הפונה באלכסון שמאלה ומטה מייצג התפרקות אלפא וכל חץ הפונה ימינה מייצג התפרקות בטא. שימו לב לכך שחלק מהגרעינים מסוגלים להתפרק בשני האופנים. זוהי אחת מכמה סדרות דומות של התפרקויות המתרחשות בטבע.

שאלות

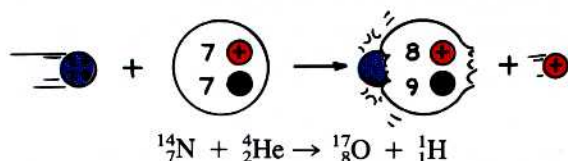
1. השלימו את החסר בתגובות הבאות:



2. מה קורה בסופו של דבר לכל האוראניום המתפרק התפרקות רדיואקטיבית?

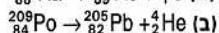
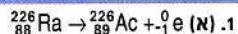
טרנסמוטציה מלאכותית של יסודות

במשך 2000 שנה ניסו האלכימאים להפוך יסוד אחד למשנהו - אך ללא מוצלח. מאמצים כבירים הושקעו ופולחנים מורכבים נערכו בניסיון לשנות עופרת לזהב, מאמצים שמעולם לא צלחו. אכן, ניתן להפוך עופרת לזהב, אך לא בשיטות הכימיות שנקטו האלכימאים. בתגובות כימיות חלים שינויים בקליפות החיצוניות של ענני האלקטרונים של האטומים והמולקולות. כדי להפוך יסוד אחד למשנהו יש לחדור למעמקי ענני האלקטרונים, אל הגרעין שבמרכז, אשר חסין גם בפני התגובות הכימיות העזות ביותר. כדי לשנות עופרת לזהב יש לעקור שלושה מטענים חיוביים מהגרעין. למרבה האירוניה, תהליכי שינוי בגרעיני האטומים התרחשו דרך קבע בסביבת האלכימאים, ממש כבסביבתנו כיום. התפרקות רדיואקטיבית של המחצבים שבסלעים מתרחשת מאז היווצרותם. אך האלכימאים לא ידעו זאת, וגם אילו היו מגלים קרינת אלפא, סביר להניח שלא היו חושפים מהם האטומים המשתנים. ארנסט רתרפורד היה הראשון מבין חוקרים רבים שהצליח, ב-1919, לשנות יסוד כימי. הוא הפציץ אטומי חנקן בחלקיקי אלפא והצליח להפוך את החנקן לחמצן:



מקור חלקיקי האלפא של רתרפורד היה גוש של עפרת מתכת. מבין רבע מיליון מסלולים בתא ערפל שצילם בסרט הוא מצא שבעה מקרים של תמורה אטומית. ניתוח המסלולים המוטים בשדה מגנטי חיצוני הראה שכאשר חלקיק אלפא מתנגש באטום חנקן, ניתן החוצה פרוטון והאטום הכבד נרתע קמעא.

תשובות:

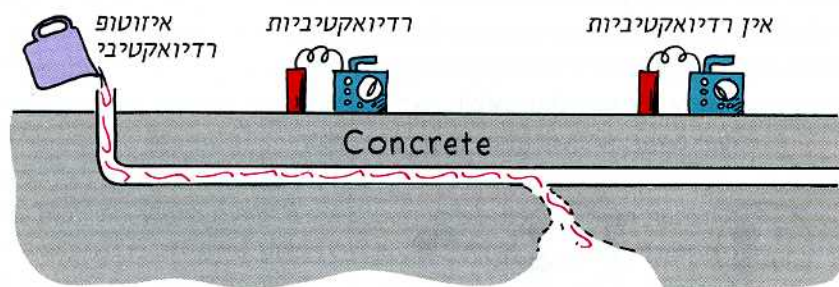


2. כל האוראניום יתפוך בסופו של דבר לעופרת. בדרכו להיפך לעופרת, הוא יתקיים בכל מצבי הביניים שבסדרה, כמתואר באיור 32.13.

חלקיק האלפא נעלם. זה התהליך שבו חלקיק האלפא נבלע ואטום החנקן משתנה לחמצן, זו טרנסמוטציה מלאכותית.

מאז פרסום תגליתו של רתרפורד ב-1919 יצרנו תגובות גרעיניות רבות כאלה, בתחילה באמצעות הפצצה בקליעים טבעיים מעפרות רדיואקטיביות, ובהמשך באמצעות קליעים בעלי אנרגיה רבה יותר - פרוטונים ואלקטרונים - שהואצו במאיצי חלקיקים ענקיים. טרנסמוטציה מלאכותית שימשה ליצירת היסודות שמספריהם האטומיים הם מ-93 ועד 109; אחד-עשר הראשונים שבהם נקראים נפטוניום, פלוטוניום, אמריקיום, קוריום, ברקליום, קליפורניום, איינשטייניום, פרמיום, מנדלביום, נובליום ולורנציום. החוקרים הטוענים לגילויים של היסודות 104 ו-105 המליצו לקרוא ליסוד 104 רתרפורדיום (Rf) וליסוד 105 האניום (Ha). חוקרים רוסיים, שאף הם טוענים לגילוי יסודות אלו, הציעו שמות אחרים. לכל היסודות הללו, הנוצרים באופן מלאכותי, זמני מחצית-חיים קצרים. אם אי-פעם התקיימו יסודות אלו כשכדור הארץ נוצר, הם כבר הספיקו להתפרק מזמן.

לכל היסודות יש איזוטופים. חלק מהאיזוטופים של יסוד נתון הם יציבים אך מרביתם רדיואקטיביים. באמצעות הפצצה בניטרונים ובחלקיקים אחרים יצרו החוקרים איזוטופים רדיואקטיביים של כל היסודות. ככל שייצורם של איזוטופים אלה הפך מצוי וזול התרבו להפליא שימושיהם במחקר המדעי ובתעשייה.



איזוטופים רדיואקטיביים

איור 32.14

שימוש באיזוטופים רדיואקטיביים לגילוי דליפות מצנרת.

כמות קטנה של חומר איזוטופי רדיואקטיבי מעורבת בדשנים הניתנים לצמחים צעירים. כאשר הצמח גדל, ניתן למדוד בעזרת גלאי קרינה את כמות הדשנים שהוא צרך. ממדידות אלו לומד החקלאי מהי כמות הדשן הרצויה. בשימוש זה נקראים האיזוטופים הרדיואקטיביים עוקבים רדיואקטיביים (איור 32.15).

שימוש נרחב בעוקבים נעשה ברפואה לצורך חקר תהליך העיכול ותנועת החומרים הכימיים בגוף. הנבדק אוכל מזון המכיל כמות זעירה של איזוטופ רדיואקטיבי, ובאמצעות גלאי קרינה ניתן לעקוב אחר תנועתו של המזון בגוף. בדרך דומה ניתן לבדוק את זרימת הדם. לצורך טיפול בסרטן בלוטת התריס משתמשים בכמויות גדולות של יוד רדיואקטיבי. מכיוון שהיוד נוטה להצטבר בבלוטת התריס, האיזוטופים הרדיואקטיביים מתמקמים באזור שבו יוכלו להרוס את התאים הממאירים. האיזוטופים הרדיואקטיביים הם מכשיר רב עוצמה במחקר הביולוגי והפיסיקלי.



איור 32.15

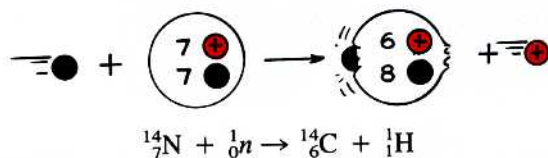
איזוטופים רדיואקטיביים משמשים לבדיקת פעולת דשנים בצמחים ולחקר תהליך עיכול המזון בדם.

מהנדסים יכולים לחקור כיצד מתבלים חלקי מנוע המכונית במהלך פעולתו באמצעות הוספת חומרים רדיואקטיביים לדפנות הצילינדרים בעת יציקתם. כאשר המנוע פועל, טבעות הבוכנה מתחככות בדפנות הצילינדר. חלקיקי מתכת רדיואקטיבית זעירים שנשחקו עוברים לשמן הסיכה, ושם ניתן לגלותם בעזרת גלאי קרינה. כאשר חוזרים ועורכים ניסוי זה בשמנים שונים, ניתן לקבוע איזהו השמן הגורם למנוע בלאי קטן יותר ומעניק לו זמן חיים ארוך יותר.

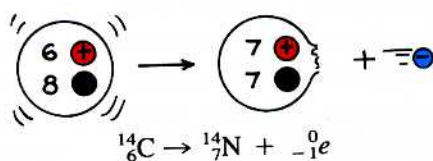
גם יצרני צמיגים משתמשים באיזוטופים רדיואקטיביים. אם כוללים בצמיגים כמות ידועה של אטומי פחמן רדיואקטיבי, אזי ניתן למדוד - בעזרת מניית האטומים הרדיואקטיביים - את כמות הגומי הנותרת על הכביש בעת שהמכונית בולמת.

יש מאות דוגמאות נוספות לשימוש באיזוטופים רדיואקטיביים. העובדה החשובה היא שבדרך זו ניתן לחקור אטומים ולמנותם בדגימות של חומרים שלא ניתן לראותם במיקרוסקופ.

הפגיעה המתמדת של קרינה קוסמית באטמוספירת כדור הארץ גורמת לטרנסמוטציה של אטומים רבים בשכבות הגבוהות של האטמוספירה. פרוטונים וניטרונים מתפזרים באטמוספירה כולה. רוב הפרוטונים לוכדים במהירות אלקטרונים תועים והופכים לאטומי מימן באטמוספירה העליונה, אך הניטרונים ממשיכים לנוע כברת דרך ארוכה, כי בהיותם חסרי מטען הם אינם נוטלים חלק בפעולת גומלין חשמלית עם החומר. במקדם או במאווחר רבים מהם מתנגשים בגרעיני אטומים בשכבות הנמוכות של האטמוספירה. התגובה הבאה, למשל, מתרחשת כאשר הניטרונים פוגעים בגרעין של אטום חנקן:

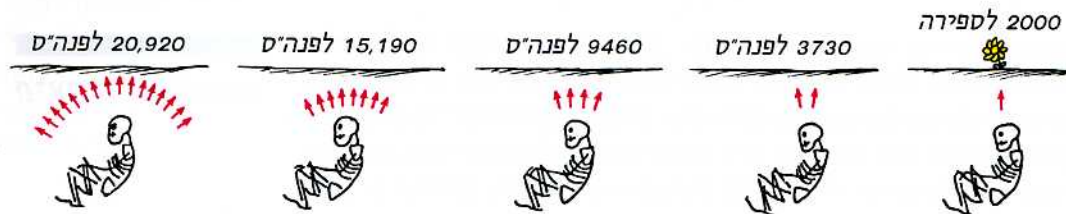


חלק מהחנקן שבאטמוספירה הופך איפוא לפחמן ולמימן. רובו של הפחמן קיים במצב היציב פחמן-12, ${}^{12}_6\text{C}$. עקב פגיעת הקרינה הקוסמית, מיליונית האחוז של הפחמן שבאטמוספירה היא פחמן-14. שני האיזוטופים הללו מתרכבים עם חמצן ויוצרים פחמן דו-חמצני, הנקלט בצמחים. לכן, בכל צמח יש כמות זעומה של פחמן-14. כל היצורים החיים מכילים מעט פחמן-14. פחמן-14 פולט קרינת בתא ושב ומתפרק בכך לחנקן בתהליך הבא:



תיארוך בפחמן רדיואקטיבי

כלומר, ביצורים החיים פחמן-14 הופך לחנקן יציב. כיוון שהיצורים החיים נושמים, התפרקות זו מלווה בחידוש מלאי הפחמן-14 ונוצר מצב של שיווי-משקל רדיואקטיבי עבור יחס מסוים בין האיזוטופים פחמן-14 לפחמן-12. כאשר הצמח או בעל החיים מתים, תהליך ההתחדשות נפסק. אחוז הפחמן-14 קטן בהדרגה, בקצב ידוע. ככל שחולף זמן רב יותר נותר פחות פחמן-14.* זמן מחצית החיים של פחמן-14 הוא 5730 שנה בקירוב, כלומר, מחצית אטומי הפחמן-14 הנמצאים בגוף מתפרקים בפרק זמן זה. מחצית אטומי הפחמן-14 הנותרים מתפרקים ב-5730 השנים הבאות, וכך הלאה. לפיכך, הרדיואקטיביות של יצורים חיים קטנה בהדרגה לאחר מותם (איור 32.16).



ניתן למדוד את הרדיואקטיביות של צמחים וחיות בני זמננו ולהשוותה לרדיואקטיביות של חומר אורגני קדמון. אם, למשל, ניטול כמות פחמן קטנה, אך מדויקת, מידית של גרזן עץ עתיק ונגלה ששיעור הרדיואקטיביות בה הוא מחצית משיעור הרדיואקטיביות בכמות שווה של פחמן שהוצאה מעץ חי, נוכל להסיק שהעץ הישן מקורו בעץ שנחטב ומת לפני 5730 שנה. בדרך זו ניתן לבחון את העבר ולתארך את זמנם של עצמים עד כ-50,000 שנה לפני זמננו. כך אפשר לגלות, למשל, את גילן של תרבויות קדומות.

התיארוך בעזרת פחמן יכול היה להיות פשוט יותר ומדויק יותר אילו היתה כמות הפחמן הרדיואקטיבי באטמוספירה קבועה במהלך התקופות. אך לא כך הדבר. תנודות בשדה המגנטי של השמש ושינויים בעוצמת השדה המגנטי של כדור הארץ גורמים לשינויים בעוצמת הקרינה הקוסמית באטמוספירה, והיא משפיעה על ייצור הפחמן-14. שינויים באקלים כדור הארץ משפיעים גם הם על כמות הפחמן הדו-פחמני שבאטמוספירה. כאשר האוקיינוסים קרים, כמות הפחמן הדו-חמצני המשתחררת מהם קטנה יותר מאשר בהיותם חמים. סיבוכים אלו מחייבים מהלכי תיקון מורכבים לצורך התיארוך המדויק של חומר אורגני קדום. למרות זאת, הודות לכיול מחדש ולשיטות חישוב משופרות התיארוך בפחמן הוא השיטה הגמישה ביותר העומדת כיום לרשותנו לקביעת גילם של חומרים קדומים. כעת, מקווים ששיטות עכשוויות, המבוססות על העשרה בלייזר של דגימות המכילות מיליגרמים בודדים בלבד של פחמן, תאפשרנה להכפיל את הטווח הנוכחי של

איור 32.16

כמות האיזוטופים של הפחמן הרדיואקטיבי בשלד פוחתת למחציתם כל 5730 שנה.

* בדגימה המכילה גרם אחד של פחמן בן זמננו יש כ- 5×10^{22} אטומים, מהם 6.5×10^{10} הם אטומי פחמן-14, וקצב ההתפרקות הוא 13.5 התפרקויות בדקה.

50,000 שנה. תוצאות דומות ניתן להשיג כיום בשיטה שאינה מצריכה מדידה רדיואקטיבית. שיטה זו מבוססת על ספקטרומטר-מסות המודד ישירות וביעילות את היחס בין פחמן-14 לפחמן-12. קיימות כמובן גם שיטות אחרות לקביעת גילם של שרידים מן העבר.

שאלה

הניחו שארכיאולוג מוציא גרם אחד של פחמן מקת של גרזן ומגלה שפעילות הרדיואקטיבית היא רבע מפעילותו הרדיואקטיבית של גרם פחמן שהוצא מענף עץ שזה עתה נכרת. מהו גילה של קת הגרזן?

תיארוך באוראניום

התיארוך של עצמים עתיקים יותר, שאינם מהחי, נעשה בעזרת מחצבים רדיואקטיביים, כמו אוראניום. האיזוטופים המופיעים בטבע אוראניום-238 ואוראניום-235 מתפרקים באיטיות רבה והופכים בסופו של דבר לאיזוטופים של עופרת - אך לא לאיזוטופ הנפוץ עופרת-208. אוראניום-238, למשל, מתפרק בשלבים אחדים והופך לבסוף לעופרת-206, ואילו אוראניום-235 הופך לעופרת-207. חלק מאיזוטופי העופרת הקיימים כיום 206 ו-207 היו בעבר אוראניום. ככל שהסלע המכיל אוראניום קדום יותר, אחוז האיזוטופים השורייים הללו גבוה יותר. אנו יודעים מהו זמן מחצית החיים של איזוטופי האוראניום ויכולים לקבוע בדגימת סלע איזה אחוז מכל איזוטופ עופרת מקורו רדיואקטיבי, כך שביכולתנו לחשב את משך ההתפרקות של האוראניום בסלע. בדרך זו גילו שגיל הסלעים על פני כדור הארץ מגיע ל-3.7 מיליארד שנה. דגימות מהירח, שבו הסלע הקדמון השתנה פחות מאשר בכדור הארץ, תוארכו בכ-4.2 מיליארד שנה, משך זמן הקרוב ל-4.6 מיליארד שנה, שהוא הגיל שמקובל ליחס לכדור הארץ ולמערכת השמש.

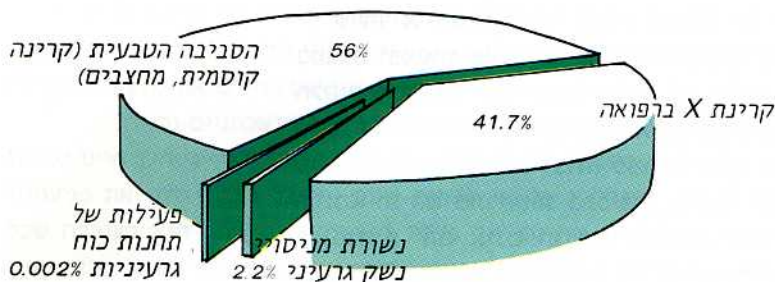
השפעות הקרינה על האדם

רבים טועים לחשוב כי הרדיואקטיביות היא תופעה חדשה במקומותינו. אך הרדיואקטיביות התקיימה עוד בטרם היות האדם. היא חלק מסביבתנו בדיוק כמו השמש והגשם. היא המחממת את פנים כדור הארץ ומתיכה אותו. למעשה, ההתפרקות הרדיואקטיבית היא המחממת את המים הפורצים מגיזר או ממעינות מים חמים. אף ההליום בבלון של הילד בגן השעשועים אינו אלא חלקיקי אלפא שנוצרו בהתפרקות רדיואקטיבית.

כפי שניתן לראות באיור 32.17, רוב הקרינה שאנו נחשפים אליה מקורה בסביבתנו הטבעית. הקרינה מגיעה מהאדמה שעליה אנו עומדים, מהלבנים ומהאבנים בבניינים המקיפים אותנו. הקרינה ממקורות טבעיים התקיימה עוד לפני הופעת האדם. אלמלא היה גופנו מסוגל לשאת אותה, לא היינו קיימים. בשל הקרינה הקוסמית, גם האוויר המטוהר ביותר שנשום יהיה רדיואקטיבי במידת-מה. בגובה פני הים ההשפעה הממסכת של האטמוספירה מקטינה את

תשובה:

בהנחה שהיחס פחמן-14/פחמן-12 עתה שווה ליחס שהיה ביניהם כשנוצר הגרזן, אזי גילה של הידית הוא שני זמני מחצית חיים של פחמן-14 - בערך 11,460 שנה.



איור 32.17

מקורות החשיפה לקרינה
לאדם ממוצע בעולם
המערבי.

עוצמת הקרינה, ולעומת זאת בגובה רב עוצמת הקרינה גדולה יותר. בעיר שגובהה כ-1800 מטרים מעל פני הים עוצמת הקרינה שאדם נחשף לה בשל הקרינה הקוסמית גדולה פי שניים ויותר מעוצמת הקרינה בגובה פני הים. כמה טיסות הלוך ושוב מישראל ללונדון חושפות אותנו למנת קרינה הדומה לצילום חזה בקרינת X. זמן הפעילות האווירית של צוותי מטוסים מוגבל בשל כמות הקרינה הגדולה שהם נחשפים לה.

רצוי להימנע מחשיפה לקרינה בשיעור העולה על שיעור קרינת הרקע הטבעית, בשל הנזק העלול להיגרם מכך. תאי הגוף החי בנויים ממולקולות מורכבות הנמצאות בסביבה מימית עשירה ביונים. כאשר קרינת X או קרינה גרעינית פוגעת בתמיסה מסודרת להפליא זו, היא יוצרת תווה ובוהו ברמה האטומית. חלקיק בתא העובר דרך חומר חי פוגע באחוז קטן של המולקולות ומותיר אחריו שובל אקראי של מולקולות שפורקו או השתנו, כמו גם יונים פעילים ורדיקלים כימיים חופשיים חדשים שנוצרו. רדיקלים חופשיים הם אטומים או חלקי מולקולות בלתי קשורים, ניטרליים חשמלית, הפעילים מאוד מבחינה כימית. היונים והרדיקלים החופשיים מסוגלים לפרק עוד קשרים מולקולריים או ליצור במהירות קשרים חזקים חדשים שיבנו מולקולות שאינן שימושיות או אף מזיקות לתא. לקרינת גמא השפעה דומה. כאשר פוטון רב-אנרגיה של קרינת גמא עובר בחומר הוא עלול לפגוע באלקטרון ולהעניק לו אנרגיה קינטית גבוהה. האלקטרון עלול לחלוף ברקמה ולזרוע הרס בסביבתו בדרך שתיארנו. כל סוגי הקרינה באנרגיה גבוהה מפרקים חלק מהמולקולות או משנים את מבנהן, ויוצרים תנאים ליצירת מולקולות אחרות המסוכנות לתהליכי החיים.

אם הקרינה אינה עזה, התאים מסוגלים לתקן את רוב הנזקים המולקולריים. תא יוכל לשרוד לאחר חשיפה למנה קטלנית של קרינה אם פרק זמן החשיפה הוא ארוך, כך שנותרים רווחי זמן שבהם מתאפשר ריפוי. כאשר קרינה ממיתה תא, תאים חדשים ימלאו את מקומו. יוצאים מכלל זה הם תאי עצב, שאינם מתחדשים. לעיתים יוסיף תא להתקיים גם עם דנ"א פגוע. כאשר התא יתחלק, יימסר מידע גנטי משובש ותתרחש מוטציה. לעיתים הדבר חסר חשיבות, אך במקרים מסוימים התאים הנוצרים עלולים שלא לתפקד היטב כמו התא המקורי. במקרים נדירים ייתכן שיפור בתפקוד התא. שינוי גנטי כזה עלול להוות מרכיב במכלול הגורמים להתפתחות סרטן ברקמה בשלב מאוחר יותר.

שיעור אי-הסדר הנוצר לאורך מסלולו של החלקיק תלוי באנרגיה שלו, במטענו ובמסתו. פוטוני קרינת גמא וחלקיקי בתא גורמים נזק מועט ביותר. חלקיק מסוג זה חודר עמוק ומגיב עם חלקיקי החומר במרווחים גדולים בלבד, בדומה לכדור מרובה אוויר הנורה בסופת ברד. חלקיקים איטיים בעלי מסה גדולה, שמטענם גבוה, כמו חלקיקי אלפא, הם הרסניים ביותר. התנגשויותיהם מתרחשות בתכיפות, בדומה לפר המסתער על עדר כבשים מנומנמות. הם אינם חודרים לעומק, מפני שהאנרגיה שלהם נבלעת בהתנגשויות הרבות המתרחשות בזו אחר זו. חלקיקים מסוכנים במיוחד מסוג זה הם אותם גרעינים (הנקראים ראשוניים כבדים) הנפלטים מהשמש בהתפרצויות שמש. הם כוללים את כל היסודות המצויים בכדור הארץ. החלקיקים המתקרבים לכדור הארץ דקות מספר לאחר יציאתם מהשמש נלכדים בחלקם בשדה המגנטי המקיף את הארץ. אחרים נבלעים בהתנגשויותיהם באטמוספירה, כך שלמעשה אינם מגיעים לאדמה. אנו מוגנים חלקית מפגיעתם המסוכנת בזכות אותה תכונה ההופכת אותם למסוכנים - נטייתם להתנגש התנגשויות סמוכות זו לזו. לאסטרונוטים בחלל אין אטמוספירה ושדה מגנטי המגינים עליהם, והם סופגים כמויות גדולות של קרינה במהלך שהותם שם. אחת לכמה עשרות שנים מתרחשת התפרצות שמש חזקה במיוחד, שכמעט בוודאות היתה הורגת כל אסטרונוט המצויד במיגון רגיל בלבד אילו נמצא הרחק מכדור הארץ, במקום שבו השדה המגנטי והאטמוספירה אינם מגינים עליו.

בדרך כלל נמדד מינון הקרינה ביחידות ראד (קיצור המילה "קרינה" באנגלית), שהיא יחידת אנרגיה נבלעת של קרינה מייננת. מספר הראדים מייצג את כמות אנרגיית הקרינה הנבלעת בגרם של החומר הנחשף. עם זאת, כאשר דנים ביכולת הקרינה להשפיע על האדם, מודדים אותה ביחידות רם (ראשי תיבות של המשפט באנגלית: "שקול רנטגן לאדם"). לצורך חישוב המינון ברמים, מכפילים את מספר הראדים בגורם המבטא את ההשפעות הבריאותיות השונות שיש לסוגי קרינה שונים. למשל, לראד אחד של קרינת אלפא איטית יש השפעה ביולוגית השווה לזו של 10 ראד של אלקטרונים מהירים.

אדם ממוצע בארה"ב נחשף לכ-0.2 רם בשנה. המקורות הם מתוך הגוף עצמו, מהקרע, מבניינים, מקרינה קוסמית, מקרינת X באבחון רפואי, מהטלוויזיה וכן הלאה. כמות זו משתנה במידה ניכרת ממקום למקום על פני כדור הארץ, אך בקרבת הקטבים, שבהם השדה המגנטי הארצי אינו פועל כמגן, היא הגדולה ביותר. היא גדולה יותר גם במקומות גבוהים, שבהם האטמוספירה מספקת הגנה פחותה.

מנה קטלנית של קרינה היא מסדר גודל של 500 רם; כלומר, לאדם הסופג מנה כזו של קרינה בפרק זמן קצר יש סיכוי של 50 אחוז להינצל ממוות. בריפוי באמצעות הקרנות - שבו משתמשים בקרינה לקטילת תאים סרטניים - החולה עשוי לספוג בהקרנה מקומית מינון העולה על 200 רם בכל יום במשך שבועות. צילום חזה שגרתי חושף את האדם ל-5 עד 30 מילירמים, פחות מאחד חלקי עשרת-אלפים מהמינון הקטלני. אולם, בשל מוטציות ברקמות הגוף, גם מנות קטנות של קרינה עלולות להיות בעלות השפעות ארוכות-טווח. חלק מסוים מכל קרינת X הפוגעת בגופנו מגיע לאיברי המין ולעיתים מביא למוטציות

בתאי מין, שבחלקן מועברות לדור הבא. השפעתה של קרינת X המשמשת ברפואה לאבחון ולריפוי על התורשה גדולה מזו של כל מקור קרינה מלאכותי אחר. עם זאת רצוי לזכור, לשם איזון, שבתנאים רגילים אנו נחשפים לקרינה ממחצבים יותר מאשר לקרינה מכל המקורות המלאכותיים גם יחד.

אם נביא בחשבון את כל הגורמים, הרי שרובנו ניחשף במהלך חיינו לפחות מ-20 רם, שיתחלקו על פני עשרות שנים, והדבר מגביר מעט את פגיעותנו לסרטן ולמחלות אחרות. אך בעלת חשיבות רבה יותר היא העובדה שכל היצורים החיים ספגו תמיד קרינה טבעית, וזו נקלטה בין השאר בתאי המין וחוללה שינויים גנטיים בכל המינים דור אחר דור. ייתכן שמוטציות זעירות ותהליך הברירה הטבעית הנלווה אליהן במהלך מיליארדי שנים הצמיחו באיטיות יצורים מעניינים - אותנו, למשל.



איור 32.18

הסימון הבינלאומי למקום שבו מייצרים חומרים רדיואקטיביים או עוסקים בהם.

זמן מחצית החיים הזמן הנדרש להתפרקות מחצית האטומים של חומר רדיואקטיבי.

טרנסמוטציה הפיכת גרעין האטום של יסוד אחד לגרעין האטום של יסוד אחר בהקטנת מספר הפרוטונים או בהגדלתו.

לקריאה נוספת

אשרי, ד'. פיסיקה גרעינית. האוניברסיטה המשודרת, משרד הביטחון-ההוצאה לאור, 1979.

נאמן, י', וקירש, י'. צידי החלקיקים. מסדה, 1984.

סגרה, א'. מקרני רנטגן ועד קוורקים. כתר, 1986.

פייגלס, ה'. הצופן הקוסמי: פיסיקת הקוונטים כשפת הטבע. עם עובד, 1991.

שאלות חזרה

קרינת X ורדיואקטיביות

- מהו ההבדל העיקרי בין אלומת קרני X לאלומת אור?
- מה גילה הפיסיקאי רנטגן על אלומת אלקטרונים הפוגעת במשטח זכוכית?
- מה גילה הפיסיקאי בקרל על אוראניום?
- מהם שני היסודות שגילו פייר ומארי קירי?

קרני אלפא, בתא וגמא

- מהו ההבדל בין המטענים החשמליים של קרני אלפא, בתא וגמא?

מילון מונחים

קרינת X קרינה אלקטרומגנטית שתדירותה גבוהה מתדירות העל-סגול, אשר נפלטת מאלקטרונים פנימיים המעוררים באטומים.

קרינת אלפא זרם של גרעיני הליום הנפלט מגרעינים רדיואקטיביים מסוימים.

קרינת בטא זרם של חלקיקי בתא הנפלט מגרעינים רדיואקטיביים מסוימים.

קרינת גמא קרינה אלקטרומגנטית שתדירותה גבוהה ביותר, הנפלטת מגרעינים של אטומים רדיואקטיביים.

חלקיק אלפא גרעינו של אטום הליום, המורכב משני ניטרונים ומשני פרוטונים, אשר נפלט מיסודות רדיואקטיביים מסוימים.

חלקיק בתא אלקטרון (או פוזיטרון) הנפלט במהלך התפרקות רדיואקטיבית של גרעינים מסוימים.

נוקליאון פרוטון או ניטרון בגרעין; שם משותף לכל אחד מהם ולשניהם גם יחד.

קוורקים החלקיקים היסודיים המרכיבים את אבני הבניין של החומר הגרעיני.

איזוטופים אטומים שלגרעיניהם מספר שווה של פרוטונים ומספרים שונים של ניטרונים.

מספר אטומי מספר המיוחס לאטום ושווה למספר הפרוטונים בגרעין או למספר האלקטרונים בענן האלקטרונים של האטום הניטרלי.

מספר המסה מספר המיוחס לאטום ושווה למספר הנוקליאונים שבגרעין.

6. מהו ההבדל בין המקורות לאלומת קרני גמא ובין אלה של אלומת קרני X?

הגרעין

7. צינו שתי דוגמאות לנוקליאון.

8. השוו בין מסתו של נוקליאון למסתו של אלקטרון.

9. מהו השינוי שחל בגרעין האטום כאשר מתרחשת התפרקות בתא?

10. במה דומה פליטת קרני גמא מהגרעין לפליטת אור מהאטום?

11. מדוע גבוהה מהירותו של חלקיק אלפא בצאתו מהגרעין?

12. מהם קוורקים?

איזוטופים

13. מהו ההבדל בין איזוטופ ליון?

14. מהו ההבדל בין מספר אטומי למספר מסה?

15. מהו ההבדל בין דיטריום לטריטיום?

מדוע האטומים רדיואקטיביים

16. מדוע כוח הדחייה החשמלי בין הפרוטונים בגרעין אינו גורם לפרוטונים להינתק ממנו?

17. מדוע יש סיכוי גדול יותר שהדחייה החשמלית תגרום לפרוטונים בגרעין גדול להינתק ממנו?

18. מדוע גרעין קטן בדרך כלל יציב יותר מגרעין גדול?

19. מהו ההבדל בין הדרון לבין לפטון?

זמן מחצית החיים

20. למה הכוונה במונח זמן מחצית החיים?

21. מהו זמן מחצית החיים של ^{226}Ra ? של מואון?

גלאי קרינה

22. איזה שובל נוצר כאשר חלקיק בעל אנרגיה גבוהה חולף דרך חומר?

23. אילו גלאי קרינה מבוססים בעיקר על חישת השובלים שיוצר חלקיק בעל אנרגיה גבוהה החולף דרך חומר?

טרנסמוטציה טבעית של יסודות

24. הסבירו במדויק מהי טרנסמוטציה.

25. מהו המספר האטומי של הגרעין שנוצר כאשר תוריום, שמספרו האטומי 90, מתפרק התפרקות אלפא?

26. מהו המספר האטומי של הגרעין שנוצר כאשר תוריום, שמספרו האטומי 90, מתפרק התפרקות בתא?

27. כיצד משתנה מספר המסה בכל אחת משתי ההתפרקות הנ"ל?

28. כיצד משפיעה פליטת חלקיק אלפא על מבנה הגרעין? פליטת חלקיק בתא? פליטת קרן גמא?

29. בטווח הארוך, מה יהיה גורלם של כל אטומי האוראניום שבעולם?

טרנסמוטציה מלאכותית של היסודות

30. בעבר האמינו האלכימאים שניתן לשנות את היסודות ליסודות אחרים. האם צדקו? האם הצליחו לעשות זאת? מדוע?

31. מתי בוצעה לראשונה במכוון טרנסמוטציה מוצלחת של יסוד?

איזוטופים רדיואקטיביים

32. כיצד יוצרים איזוטופים רדיואקטיביים?

33. מהו עוקב רדיואקטיבי?

תיארוך בפחמן רדיואקטיבי

34. מהו האיזוטופ הרדיואקטיבי, פחמן-12 או פחמן-14?

35. מדוע בעצם חדשה יש יותר פחמן-14 מאשר בעצם עתיקה?

36. מדוע שיטת התיארוך בפחמן מתאימה לתיארוך פיסות בד ישנות אך לא לתיארוך מטבעות עתיקים?

תיארוך באוראניום

37. מדוע יש עופרת בכל עפרות האוראניום?

השפעות הקרינה על האדם

38. מהו מקורה של רוב הקרינה הרדיואקטיבית הפוגעת בנו?

39. מה גרוע יותר: הימצאותם בגוף של תאים שניזוקו מהקרינה או של תאים שהומתו על ידה?

40. האם הרדיואקטיביות היא תופעה חדשה-יחסית בעולם? נמקו את תשובתכם.

מטלת בית

יש שעונים שהמחוגים בהם מאירים באופן קבוע. יש בהם כמויות זעירות של רדיום ברומי מעורב באבץ גפרי (בשעונים בטוחים יותר משתמשים באור במקום בהתפרקות רדיואקטיבית כאמצעי לעירור, ולכן הם הולכים ומתעמעמים בעת שהייה בחושך). אם ברשותכם שעון כזה, קחו אותו עימכם לחדר חשך ביותר ולאחר

- קריאת המונה היא 10 מניות בדקה. מהו זמן מחצית החיים של החומר?
15. עוצמת הקרינה ממקור נקודתי יורדת עם ריבוע המרחק. אם קריאתו של מונה גייגר הנמצא במרחק של 1 מ' מדוגמה קטנה היא 360 מניות בדקה, מה תהיה קריאת המונה אם יימצא במרחק של 2 מ' 3 מ'?
16. מדוע נעים החלקיקים הטעונים בתאי בועות במסלולים ספירליים ולא במסלולים מעגליים או בורגיים כצפוי במקרה האידיאלי?
17. על סמך איור 32.13, קיבעו כמה התפרקויות אלפא וכמה התפרקויות בתא מתרחשות בהתפרקות הרדיואקטיבית של גרעין U-238 ל-Pb-206.
18. מהו המספר האטומי של גרעין התוצר המתקבל בהתפרקות אלפא של $^{226}_{88}\text{Ra}$? מהו מספר המסה של גרעין התוצר?
19. כאשר $^{218}_{84}\text{Po}$ מתפרק בהתפרקות בתא הוא הופך ליסוד אחר. מהם המספר האטומי ומספר המסה של יסוד חדש זה? מה היו המספר האטומי ומספר המסה של יסוד חדש זה אילו היה הפולוניום פולט חלקיק אלפא?
20. קיבעו את מספר הפרוטונים והניטרונים בכל אחד מהגרעינים הבאים: $^{238}_{92}\text{U}$, $^{90}_{38}\text{Sr}$, $^{197}_{79}\text{Au}$, $^{56}_{26}\text{Fe}$, $^{12}_6\text{C}$, ^1_1H .
21. כיצד ייתכן שיסוד מתפרק "קדימה" בטבלה המחזורית - כלומר, מתפרק לאטום בעל מספר אטומי גבוה יותר?
22. כאשר זרחן רדיואקטיבי (P) מתפרק, הוא פולט פוזיטרון. האם גרעין התוצר אף הוא איזוטופ של זרחן? אם לא, מהו?
23. כיצד יכול פיסיקאי לבדוק את אמיתות הטענה "סטרונציום 90 הוא מקור טהור של קרינת בתא"?
24. יסודות שמקומם בטבלה המחזורית הוא לאחר האוראניום אינם קיימים בטבע בכמויות, מפני שזמני מחצית החיים שלהם קצרים. אולם קיימים בטבע בכמויות ניכרות כמה יסודות הנמצאים בטבלה המחזורית לפני האוראניום, שגם להם זמני מחצית חיים קצרים. כיצד תוכלו להסביר זאת?
25. חברך, הפוחד לחיות בקרבתו של כור כוח גרעיני, מעוניין לנסוע להרים גבוהים כדי לברוח מהקרינה, וללון בלילה על סלעי גרניט. מה דעתך?
26. חברה אחרת שרצתה להתחמק מהשפעות הרדיואקטיביות נסעה למרגלות ההרים. תוך כדי רחצה במעיין מים חמים תהתה בקול מהו מקור החום של המעיין. מה תאמרו לה?

שעיניכם יסתגלו לחשיכה, התבוננו במחוגים המאירים דרך זכוכית מגדלת חזקה או דרך עדשת העינית של מיקרוסקופ או טלסקופ. תוכלו להבחין בהבזקי אור זעירים נפרדים, שיחדיו נראים לעין הבלתי מצוידת כמקור אור רציף. כל הבזק מתרחש כאשר חלקיק אלפא הנפלט מגרעין הרדיום פוגע במולקולה של אבץ גפרי.

תרגילים

- למה דומות קרני X, לקרני אלפא, בתא או גמא?
- מדוע דוגמה של חומר רדיואקטיבי כמה יותר מסביבתה?
- יש אנשים שטוענים שהכול אפשרי. האם ייתכן שגרעין מימן יפלוט חלקיק אלפא? נמקו את תשובתכם.
- מדוע מוסטים חלקיקי אלפא ובתא בשדה מגנטי בכיוונים מנוגדים? מדוע קרני גמא אינן מוסטות כלל?
- לחלקיק אלפא מטען כפול מלחלקיק בתא אך סטייתו בשדה מגנטי פחותה מזו של חלקיק בתא. מדוע?
- השוו בין מסלוליהן של קרני אלפא, בתא וגמא בשדה חשמלי.
- איזו קרינה - אלפא, בתא או גמא - גורמת לשינוי הגדול ביותר במספר המסה? במספר האטומי?
- איזו קרינה - אלפא, בתא או גמא - גורמת לשינוי הקטן ביותר במספר המסה? במספר האטומי?
- אם רוצים להפצץ גרעיני אטומים ב"קליעי" פרוטונים, יש להאיץ את הפרוטונים לאנרגיות גבוהות כדי שייצור מגע עם גרעיני המטרה. מדוע?
- מדוע צפוי שחלקיקי אלפא יהיו מסוגלים לחדור לתוך החומר פחות מחלקיקי בתא בעלי אותה אנרגיה?
- איזה כוח הפועל בתוך גרעין האטום שואף להחזיקו קשור ואיזה כוח שואף לפרקו?
- איזו עובדה תומכת בטענה שהכוח הגרעיני החזק, חזק יותר מהכוח החשמלי במרחקים תוך-גרעיניים קצרים?
- אם זמן מחצית החיים של איזוטופ רדיואקטיבי הוא שנה אחת, איזה חלק מהכמות המקורית ייוותר בסוף השנה השנייה? בסוף השנה השלישית? בסוף השנה הרביעית?
- דוגמת חומר רדיואקטיבי מונחת ליד מונה גייגר וקריאתו היא 160 מניות בדקה. לאחר שמונה שעות

מהמקום שבו נמצא המונה ופונה אליכם בבקשת עצה. מה תאמרו?

29. מדוע שיטת התיארוך בפחמן אינה מדויקת לתיארוך חומרים שגילם עולה על 50,000 שנה?

30. גילן של מגילות ים המלח נקבע בשיטת התיארוך באמצעות פחמן. האם היתה השיטה פועלת לו נחקקו המגילות בלוחות אבן? הסבירו.

27. פחם מכיל כמויות זעירות של חומרים רדיואקטיביים, אך כמות הקרינה בקרבת תחנת כוח המופעלת בפחם גדולה יותר מאשר בסביבת תחנת כוח גרעינית. מה מלמד הדבר על המיגון המקיף תחנות כוח גרעיניות?

28. חבר הביא מונה גייגר כדי למדוד את קרינת הרקע המקומית. המכשיר תקתק. חבר אחר, שבדרך כלל פוחד מאוד מהדברים הפחות מובנים לו, מנסה להתרחק