

תקציר

---

# בטיחות בעבודות קרינה

---

מאת  
ד"ר דן קדם

ראשי פרקים עיקריים:

- מבנה האטום
- רדיואקטיביות
- קרינה מחומרים רדיואקטיביים
- קרינות אחרות
- אקטיביות
- אינטראקציה של הקרינה עם חומר
- מיסוד קרינה
- השפעת קרינה (ביולוגית)
- יחידות הקרינה
- קרינת הרקע הטבעי
- הגנה מקרינה

## מבנה האטום

ניתן לתאר אטום כיחידה הבנויה מגרעין אשר סביבו נעים אלקטרונים המהווים עם הגרעין יחידה אינטגרלית שלמה. הגרעין עצמו בנוי אף הוא מחלקיקי משנה - פרוטונים, נויטרונים ואלקטרונים. הפרוטון טעון מטען חשמלי חיובי, האלקטרון טעון מטען חשמלי שלילי, והנויטרון נויטרלי מבחינה חשמלית. מספר הפרוטונים והאלקטרונים שווה, ולכן האטום מאוזן מבחינה חשמלית. האלקטרונים משתתפים בתהליכים כימיים שונים, ולכן נהוג להגדיר את תכונותיו הכימיות של אטום מסוים (יסוד) על ידי מספר האלקטרונים שבו.

אטומים שיש להם מספר פרוטונים ואלקטרונים שווה, אך מספר נויטרונים שונה, שייכים לאותו יסוד כימי, אך מסווגים אותם פיזיקלית כאיזוטופים של אותו יסוד, והם בעלי תכונות פיזיקליות שונות. היסוד השכיח הוא היסוד הראשי והאחרים נקראים איזוטופים שלו.

**לדוגמה:**

### היסוד מימן (H)

יסוד זה הוא הראשון בטבלה המחזורית הכימית. המימן הרגיל מכיל פרוטון אחד ואלקטרון אחד. ליסוד זה יש שני איזוטופים:

- דיאוטריום (D) המכיל פרוטון, נויטרון ואלקטרון;

- טריטיום (T) המכיל פרוטון, 2 נויטרונים ואלקטרון.

### היסוד הליום (He)

יסוד זה מכיל 2 פרוטונים, 2 נויטרונים ו-2 אלקטרונים. כאשר הוא מיון פעמיים (כלומר שני האלקטרונים נלקחים ממנו) הוא נקרא חלקיק  $\alpha$ . ליסוד זה איזוטופ אחד המכיל: 2 פרוטונים, 1 נויטרון ו-2 אלקטרונים.

### היסוד חמצן (O)

יסוד זה מכיל 8 פרוטונים, 8 נויטרונים ו-8 אלקטרונים. ליסוד זה יש שני איזוטופים:

• חמצן –  $O^{17}$  המכיל 8 פרוטונים, 9 נויטרונים ו-8 אלקטרונים;

• חמצן –  $O^{18}$  המכיל 8 פרוטונים, 10 נויטרונים ו-8 אלקטרונים.

### יסוד אורניום (U)

היסוד השכיח של האורניום בטבע, מכיל 92 פרוטונים, 146 נויטרונים ו-92 אלקטרונים. ליסוד זה יש שני איזוטופים טבעיים:

• אורניום  $U^{234}$  מכיל: 92 פרוטונים, 142 נויטרונים ו-92 אלקטרונים.

• אורניום  $U^{235}$  מכיל: 92 פרוטונים, 143 נויטרונים ו-92 אלקטרונים.

דוגמאות אלה מראות כי ככל שעולה מספר החלקיקים בגרעין, עולה היחס שבין מספר הנויטרונים למספר הפרוטונים. עבור אורניום  $U^{238}$  היחס הוא:  $146:92 = 1.586$ .

האפקט של הימצאות מספר כה רב של פרוטונים בנפח קטן כמו זה של הגרעין תמוה מבחינה חשמלית, מכיוון שהפרוטונים טעונים במטען חיובי וקיים ביניהם כוח דחיה. הפתרון למצב זה הוא קיומם של הנויטרונים מכיוון שקיימים כוחות משיכה בין הפרוטונים לנויטרונים ובין הפרוטונים לבין עצמם שהם כוחות גרעיניים קצרי טווח. כל עוד מתקיים האיזון בין הכוחות הגרעיניים והחשמליים הגרעין נשאר יציב.

## רדיואקטיביות

לעתים, שיווי המשקל העדין של הכוחות בגרעין מופר. כתוצאה מכך חלים שינויים במבנה הגרעין אשר בעקבותיהם יש פליטת אנרגיה בצורות שונות. לעתים נפלטים חלקיקים נושאי מטען חיובי, לעתים שלילי או בצורת "חבילות" של אנרגיה. כאשר מתקיימת פליטה של חלקיקים (ים) הטעונים חיובית או שלילית, מלווה הדבר בשינוי

התכונות הכימיות של היסוד. כלומר, אנו מקבלים יסוד שונה מזה שעבר את התהליך. התופעה הזו נקראת **רדיואקטיביות**.

התהליך הזה איננו תלוי בהשפעות חיצוניות כלשהן, ואף איננו מתרחש בו זמנית בכל האטומים של אותו יסוד (אחרת היסוד האמור היה נעלם מן הטבע). זהו תהליך ספונטני המאופיין ע"י כל יסוד או איזוטופ של אותו יסוד, באם קיימת בו התכונה האמורה. עד לתגליתו של בקרל (Becquerel), חשבי כי כל אטום של יסוד מתקיים ללא שינוי. בשנת 1896, בעת שבחן זהירה של גביש של אורניום סולפט ואשלגן סולפט, מצא בקרל כי לוח צילום שהיה בסביבה הושפע והושחר. בחינה של האפקט גילתה כי אקטיביות האורניום מתבטאת ביינון האוויר סביבו, בדומה לאפקט הנגרם על ידי קרינת X.

מחקר סיסטמטי שבוצע ע"י שמידט ביסודות אחרים, הראה כי גם ליסוד תוריום יש אקטיביות דומה לזו שבאורניום. גברת קירי ובעלה מצאו כי כמה מינרלים המכילים אורניום היו אקטיביים יותר מהאורניום עצמו. באמצעות המסה ושיקועה הם ניסו לרכז ולבודד את החומר בעל האקטיביות הגבוהה. נמצא כי מישקע של היסוד ביסמוט (Bi) היה מאד אקטיבי. באמצעות שיקוע חלקי הוכח כי הביסמוט איננו אקטיבי אבל המישקע שלו הופך יותר ויותר אקטיבי. לכן הניחה הגברת קירי כי קיים יסוד אחר חדש שהוא רדיואקטיבי וקראה לו **פולוניום**. בצורה דומה טופל מישקע הבריום ונתקבל חומר מרוכז בעל אקטיביות גבוהה מאד. גם כאן הניחו שקיים יסוד חדש וניתן לו השם **רדיום**.

## קרינה מחומרים רדיואקטיביים

רתרפורד (Rutherford) בניסיונותיו, גילה שאת הקרינה הנפלטת ניתן לסווג בשלוש קבוצות קרינה, שסימן אותן כך: קרינת  $\alpha$ , קרינת  $\beta$ , וקרינת  $\gamma$ , והמסווגות בהתאם לכוח החדירה שלהם.

קרינה העוברת דרך חומר כלשהו נבלעת לפי חוק גיאומטרי. כלומר אם חומר בעובי מסוים יוריד את עוצמת הקרינה למחצית, עובי זהה נוסף יוריד את העוצמה במחצית נוספת שהיא רבע של העוצמה הראשונית. בניסיון עם מלח של רדיום ושכבות של לוחיות בדיל, מצא רתרפורד כי אחרי מעבר הקרינה דרך הלוח הראשון נפלה העוצמה לעשירית מערכה הראשוני. הכנסת לוח נוסף כמעט לא גרס לשינוי בעוצמת הקרינה. מכאן הסיק שקיימים בקרינה לפחות שני מרכיבים. ואכן, מאוחר יותר, נמצא כי רוב קרינת  $\alpha$  נבלעו ע"י לוח הבדיל הראשון. ע"י המשכת התהליך נמצאה שוב תופעה דומה: הקרינה שעברה את הלוח הראשון מורכבת אף היא משני מרכיבים - קרינת  $\beta$  ו- $\lambda$ . באמצעות ניסיונות אלה ואחרים מצא רתרפורד כי כוח החדירה היחסי בין שלושת סוגי הקרינה:  $\alpha$ ,  $\beta$  ו- $\lambda$  הוא 1:100:1000 בקירוב.

קיימים שינויים נוספים אחרים בין סוגי הקרינה, אך החשוב ביניהם מתבטא בהתנהגותן של קרינות אלה במעבר בשדה מגנטי.

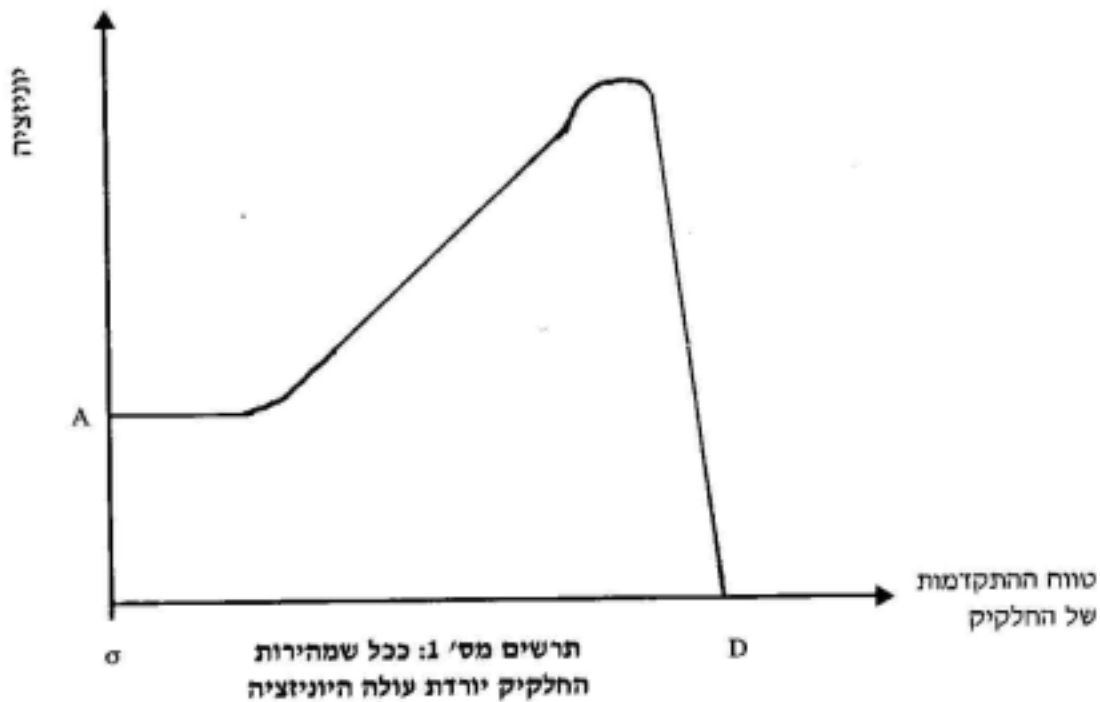
- קרינת  $\alpha$  מוסטת אך מעט ממסלולה המקורי בעת תנועתה בשדה מגנטי ובכיוון המתאים למטען חיובי;
- קרינת  $\beta$  מוסטת ממסלולה בצורה בולטת בכיוון אופייני לחלקיק שלילי, התנהגות המזכירה קרני קטודה,
- קרינת  $\gamma$  אינה מושפעת כלל מהשדה המגנטי.

### קרינת $\alpha$

רתרפורד מצא את המסה של חלקיקי  $\alpha$ , מטענם ומהירותם, באמצעות הטייתם בשדות מגנטיים וחשמליים. מתוך מדידותיו הראשונות נקבע כי חלקיקי ה- $\alpha$  עשויים להיות בעלי יחידת מטען אחת ומסה 2, או 2 יחידות מטען ומסה 4, וכך. כאשר שוכללו אמצעי המנייה (פותח המכשיר הנקרא "מונה גייגר"), נמצא כי 1 גרם של רדיום 226- פולט  $3.7 \times 10^{10}$  חלקיקי  $\alpha$  בשנייה. מכאן נקבע כי המטען על חלקיק  $\alpha$  הוא 2 והמסה 4. כלומר חלקיק ה- $\alpha$  הוא אטום הליום מיון פעמיים.

### יוניזציה הנוצרת ע"י קרינת $\alpha$

עוצמת היוניזציה הנוצרת ע"י קרינת  $\alpha$  ניתנת למדידה באמצעות מיכשור בעל רגישות גבוהה. המסלול של חלקיק ה- $\alpha$  הוא כמעט ישר, מכיוון שהמסה שלו אינה קטנה משמעותית ביחס למסת אטומי הגז עמם הוא מתנגש ויוצר יוניזציה. בדרך כלל מתרחש שינוי בכיוון המסלול לקראת סופו, וזאת עקב ירידה במהירות של חלקיק ה- $\alpha$ . ככל שמהירותו של החלקיק יורדת, היוניזציה עולה עד לנקודה במסלול שבה המהירות נמוכה מדי לשם יצירת היוניזציה (ראה תרשים 1). OD הוא טווח ההתקדמות של החלקיק. במהירויות הגבוהות החלקיק נמצא זמן קצר ליד אטומים שהוא חולף לידם, ולכן נוצרת אינטראקציה קצרה בלבד שבעקבותיה נוצרת יוניזציה מסוימת. כאשר מהירות החלקיק יורדת, סיכויים לאינטראקציה עם האטומים לידם הוא נע גבוהים יותר, ולכן תתקבל עליה ביוניזציה. לחלקיקי  $\alpha$  בעלי אנרגיה שונה, יש צורת מסלול דומה אך באורך שונה.



### קרינת $\beta$

קרינת  $\beta$  היא אלקטרונים בעלי מהירות גבוהה בהרבה מאלה המוכרים לנו בשפופרות וקואום. למעשה, ניתן למצוא קרינת  $\beta$  שמהירותה קרובה מאוד למהירות האור (0.991 ממהירות האור). השינויים במהירות של קרינת  $\beta$  גדולים יחסית למהירות של קרינת  $\alpha$ . קיימות שיטות ניסיוניות המאפשרות למדוד את ספקטרום המהירויות של קרינת  $\beta$ , ואכן נמצא כי ליסוד מקרין מסוים יש קבוצות  $\beta$  בעלות אנרגיות מוגזלות וכן ספקטרום אנרגיה רציף.

עוצמת היוניזציה של קרינת  $\beta$  קטנה בהרבה מזו של קרינת  $\alpha$ . המסלול שלהן מפותל מאד, דבר המצביע על כך שהחלקיק הוא בעל מסה נמוכה ביחס לאטומי הגז דרכם הוא נע. לכן אורך המסלול גדול בהרבה מזה של קרן  $\alpha$  בעלת אותה אנרגיה.

### קיימים שני מקורות לקרינת $\beta$ מהאטום

א. קרינת  $\beta$  מגרעין האטום (קרינת  $\beta$  אלו נקראות "ראשוניות"), כאשר בעת פליטת קרינת ה- $\beta$  נוצר שינוי במספר האטומי של היסוד הפולט. קרינה זו היא רציפה. בכל ספקטרום ה- $\beta$  קיימים אלקטרונים מכל האנרגיות, עד לערך אנרגטי מוגדר.

ב. פליטה של קרינת  $\beta$  מהמעטפת האלקטרונית של האטום. פליטה זו מתקבלת בעת פליטת  $\gamma$  מהגרעין (נקראת "קרינת  $\beta$  שניונית"). ספקטרום קרינת  $\beta$  זו הוא דיסקרטי, והפיזור האנרגטי מסביב לקו האנרגיה הוא קטן מאוד.

### קרינת $\gamma$

הפליטה של קרינת  $\gamma$  מלווה בפליטה של קרינת  $\beta$  וקרינת  $\alpha$ , בעיקר זה של קרינת  $\beta$ . כל התכונות המוכרות לנו מקרינת X באות לידי ביטוי בקרינת  $\gamma$ . ההבדל היחיד הוא בכך שקרינות  $\gamma$  הן "קשות" יותר, בעלות אנרגיה גבוהה יותר ולכן בעלות חדירות גבוהה יותר. אורך הגל של קרינות  $\gamma$  נמצא בין  $10^{-9}$  ל- $10^{-6}$  ס"מ ( $100-0.1 \text{ \AA}$ ), בעוד של קרינת  $\gamma$  הקצרים ביותר אורך גל של  $10^{-11}$  ס"מ לערך ( $0.001 \text{ \AA}$ ).

היוניזציה הנוצרת ע"י קרינת  $\gamma$  בגזים מתבטאת בשחרור אלקטרונים בעלי אנרגיה גבוהה מאטומי הגז. אלקטרונים נפלטים אלה הם למעשה קרינת  $\beta$  ולכן יש להם מסלולים בלתי רגולריים בגז.

## קרינות אחרות

בין סוגי הקרינה הנכללים במושג רדיואקטיביות, קיימות קרינות שונות נוספות שמקורן בתהליך עצמו, כגון: ביקוע ספונטני (fission); וכן רדיואקטיביות "מלאכותית" או "מאולצת" (Induced or Artificial Radioactivity). קיימים גם יסודות שאינם יציבים מבחינה אנרגטית, כגון: קליפורניום-252, העוברים ביקוע ספונטני שבעקבותיו מתקבלים יסודות חדשים וגם קרינה.

בין סוגי הקרינה הנפלטת קיימת קרינה המוכרת לנו מהתיאור לעיל, וגם קרינה אחרת המאופיינת ע"י קרינת נייטרונים (n). הנייטרונים הנפלטים הם חסרי מטען ובעלי מהירות גבוהה מאד. גם בתהליך של רדיואקטיביות מאולצת מתקבלים יסודות חדשים וסוגי קרינה המוכרים לנו, ובתוכם גם **קרינת נייטרונים**. את "הרדיואקטיביות המאולצת" מקבלים ע"י הפצצה של יסוד מסוים באמצעות פרוטונים, נייטרונים או יסוד אחר. גם היסודות החדשים המתקבלים בתהליך זה עשויים להיווצר עם אנרגיה קינטית גבוהה ובחלקם רדיואקטיביים בעצמם, אך היות והם בעלי מסה, טווח פעילותם נמוך. בנוסף לכך הריאקציות האמורות מתרחשות במערך סגור ואין בעיה של יציאת הפרגמנטים אלא בקרינה שהם פולטים:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , ונייטרונים. יש לתת תשומת לב לפרגמנטים שהם גזיים, שעלולים להשתחרר לאטמוספירה.

## אקטיביות

יסוד רדיואקטיבי יכול להיות נקי מיסודות אחרים או מעורב בהם, ולכן הוא יופיע בצורת תערובת, תרכובת, מסג וצורות אחרות. כפי שכבר הוזכר, התנאים החיצוניים אינם משפיעים על תכונתו כחומר רדיואקטיבי. לקצב ההתפרקות (מספר התפרקויות ביחידת זמן) של חומר רדיואקטיבי קוראים בשם אקטיביות. בעבר נהגו לקרוא ליחידה המאפיינת את האקטיביות בשם קירי (Ci). גודל זה מאפיין כמות של חומר רדיואקטיבי (אקוויוולנטי ל-1 גרם רדיום-226), אשר בו מתקיימים  $3.7 \times 10^{10}$  התפרקויות בשנייה. כיום, מושג זה מיושן והאקטיביות מבוטאת באמצעות הבקרל (Bequerel):

$$1 \text{ Bq} = 2.7 \times 10^{-11} \text{ Ci} \quad \text{או} \quad 1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

והיא מייצגת את כמות החומר הרדיואקטיבי בו מתרחשת התפרקות אחת בשנייה. במערכת יחידות זו של רדיואקטיביות נהוג להשתמש בערכים שהם - אלפית (m) מיליונית ( $\mu$ ) וביליונית (n) של הערך המוגדר:

$$1 \text{ mCi} = 3.7 \times 10^7 \text{ Bq}$$

$$1 \mu\text{Ci} = 3.7 \times 10^4 \text{ Bq}$$

$$1 \text{ nCi} = 37 \text{ Bq}$$

כל אשר נאמר כאן מתייחס לחומר רדיואקטיבי. אך מקור קרינה זה אינו היחיד. מוכרת לנו היטב קרינת ה-X (קרני רנטגן) המקובלת כשיטה לאבחון ברפואה ובתעשייה. קרינה זו מתקבלת מתהליך האינטראקציה של קרינת  $\beta$  עם חומר (ראה בהמשך).

## אינטראקציה של הקרינה עם חומר

כאשר חלקיקים בעלי מטען כגון  $\alpha$  (חיובי),  $\beta$  (שלילי) הינם בעלי מהירות מספקת ונעים בתוך תווך של אטומים, קיים סיכוי שהם יעברו אינטראקציה עם חלק מהאטומים. ככל שצפיפות האטומים גדולה יותר, הסיכוי לאינטראקציה גדול יותר.

בעת האינטראקציה מעביר החלקיק חלק מן האנרגיה הקינטית שלו לאטום עמו הוא עובר אינטראקציה, מהירותו פוחתת, והאנרגיה העודפת מועברת לאלקטרונים של האטום, והם ניתקים ממקומם. במידה והאנרגיה שנתקבלה גבוהה מספיק, הם יצאו מאיזור כוח ההשפעה של גרעין האטום המחזיק בהם, ואנו מגדירים מצב זה כ**יוניזציה**. כאשר חלקיק כזה עובר מספר רב של אינטראקציות, ובכל אחת הוא מפסיד חלק מן האנרגיה הקינטית שלו, מהירותו פוחתת עד למצב שבו מהירותו אינה מאפשרת יותר העברת אנרגיה, וכך הוא מגיע לקצה מסלולו. עובדה זו מסבירה מדוע המסלול של חלקיק בעל מהירות מסוימת, יהיה קצר יותר במוצק לעומת מהירות בגז. מכיוון שהתהליך הוא בעל אופי של פעילות חלקיק טעון בשדה חשמלי, זמן השהות בשדה קובע את הסיכוי לאינטראקציה. לכן, ככל שמהירותו של החלקיק גדולה יותר השהות קטנה יותר, האינטראקציה נמוכה יותר ומתקיימת פחות יוניזציה (ראה תרשים 1).

## קרנית $\gamma$

קרנית  $\gamma$  (קרניה ללא מטען חשמלי וללא מסה) עוברת גם היא אינטראקציה עם האלקטרונים בחומר. כאן תיתכן אפשרות שכל האנרגיה של חלקיק ה- $\gamma$  תועבר בזמן האינטראקציה לאלקטרון והוא יועף ממקומו, או תתרחש התנגשות שבה יפסיד חלקיק ה- $\gamma$  חלק מהאנרגיה הקינטית שלו, והאלקטרון עימו התרחשה האינטראקציה - יועף ממקומו וינוע עם אנרגיה גבוהה למדי, כשהוא עצמו משמש כחלקיק  $\beta$  העובר אינטראקציה. חלקיק ה- $\gamma$  יסטה אז מכיוון תנועתו וימשיך בתהליך כשהוא בעל אנרגיה נמוכה יותר.

נויטרונים, שהם חלקיקים לא טעונים, אינם עוברים אינטראקציה עם האלקטרונים באטום אלא עם גרעין האטום. כאן רמת האינטראקציה תלויה בסוג הגרעין. באינטראקציה זו עלולה להתרחש בליעה או פיזור. בכל מקרה הנויטרון מפסיד אנרגיה. לכן, חומרים שיש להם אינטראקציה גבוהה לפיזור, נחשבים לחומרים מאיטים של נויטרונים. בעת ההתנגשות, במיוחד כאשר האנרגיה של הנויטרון גבוהה, הוא עלול לגרום נזק בחומר בגלל העתקת הגרעין ממקומו.

## מיסוד קרינה

סוג האינטראקציה וסוג החלקיק הם אשר קובעים במידה רבה את דרכי המיסוך כנגד הקרינה. שני פרמטרים קובעים את טיב הממסך: צפיפות חומר הממסך וכמות האלקטרונים באטומים הממסכים. ככל שהמספר האטומי של החומר גבוה יותר (יסודות כבדים יותר) קיימים בכל אטום יותר אלקטרונים, וסיכויי האינטראקציה עבור יחידת מסלול של הקרן הנכנסת - עולים. במקרים של קרינת  $\alpha$  או קרינת  $\beta$  באנרגיה נמוכה, המסלול בחומר עם ממסך בעל מספר אטומי גבוה (נניח עופרת המקובלת כממסך זול ויעיל) יהיה קצר מאד, לפיכך ניתן להשתמש גם בחומרים קלים יותר ( $Z$  נמוך יותר) ונוחים לשימוש. עבור קרינת  $\beta$  במהירויות גבוהות וקרינת  $\gamma$  שבהן מסלולי האינטראקציה ארוכים יותר - רצוי להשתמש בחומרים עם מספר אטומי גבוה (עופרת, אורניום וכו'). העובי הכולל של המיסוך, תלוי בחומר בו עושים שימוש, בסוג הקרינה ובאנרגיה של הקרינה. המטרה - לבלוע את הקרינה העוברת עד למכסימום.

כפי שראינו קודם לכן, קרינת  $\gamma$  חדירה הרבה יותר מהקרינות האחרות ( $\alpha$  ו- $\beta$ ). מרחק החדירה בחומר כלשהו תלוי באנרגיית קרינת  $\gamma$  וסוג החומר הממסך. נוהגים לאפיין את יכולת החדירה של קרינת  $\gamma$  בחומר על ידי הגודל; **עובי המחצית** (half value layer). גודל זה מוגדר כעובי החומר המפחית עוצמת קרינת  $\gamma$  למחצית מערכה הראשית. באם עובי החומר הממסך הוא בעל שתי מחציות עובי, תרד עוצמת הקרינה העוברת לרבע מעוצמתה הראשונית.

נושא המיסוך עבור נויטרונים מסובך יותר. אין חומרים הבולעים נויטרונים מהירים באופן המניח את הדעת שיכולים להיות ממסך. לכן משתמשים בחומרים מפזרים, כלומר: חומרים עם הרבה מימן ו/או ברזל, שיש להם סיכוי רב ליצירת אינטראקציה של פיזור. הנויטרון מפסיד בעת הפיזור אנרגיה, וכך ע"י מספר ניכר של פיזורים הוא יורד במהירות לאנרגיות נמוכות (טרמיות - 0,025 eV). במהירויות אלה כבר קיימים חומרים בולעים טובים של נויטרונים, כך שהמטרה מושגת. גם במפזרים יש תשובות לצפיפות האטומים המפזרים, וככל שצפיפות החומר עולה, עובי הממסך יכול לרדת (לאותה רמת מיסוך).

יש להקפיד שהמעטה החיצוני של ממסך לנויטרונים יהיה ממסך טוב לקרינת  $\gamma$ , כיוון שבדרך כלל בליעה סופית של הנויטרונים יוצרת ריאקציה של רדיואקטיביות מאולצת וצפויה פליטה של קרינת  $\gamma$ .

העובי הכולל של מיסוך, תלוי בחומר בו עושים שימוש, בסוג הקרינה ובאנרגיה של הקרינה. המטרה - לבלוע את הקרניים העוברות עד מכסימום באמצעות המיסוך.

## השפעת קרינה (ביולוגית)

בפרקים הקודמים העלינו את הנושא של אינטראקציה של קרינה וחומר. גוף ביולוגי מורכב מחומרים ממינים שונים, ולכן גם מאטומים של יסודות שונים. לפיכך, גם התאים בגוף החי עוברים אינטראקציה עם קרינה (יינון). השינויים בתא החי עשויים להתבטא בהיווצרות שינויים ביופיזיים וביוכימיים, הגורמים לתפקוד לקוי של התא החי או להפסקת פעולתו. כאשר עוצמות הקרינה נמוכות, או זמן החשיפה קצר, כמות התאים הנפגעים בגוף החי אינה גדולה והגוף מתגבר על ההפרעה. כאשר כמויות הקרינה עולות, הנזקים לגוף החי גדלים. ברמות קרינה מסוימות אף נגרמים לגוף החי נזקים כה גבוהים, שהגוף אינו מסוגל להתגבר עליהם והתוצאה - מוות.

**יש לזכור!** אדם הנמצא בשדה קרינה, אינו חש בקרינה (על כל צורתיה) והאפקט מתבטא מאוחר יותר. בכמויות קרינה גבוהות יכול האפקט להופיע כעבור מחצית השעה בהרגשה כללית רעה, הקאות וכו', ומאוחר יותר - יופיעו כוויות ודימומים.

**יש לזכור!** בחלק מהמקרים, כאשר כמות הקרינה הנספגת בגוף אינה טרמינלית, עלולים להתפתח לאורך השנים אפקטים שונים כתוצאה ממוטאציות של תאי הגוף. לפיכך, נחוץ מאד להכיר את יחידות הקרינה ואת האמצעים למדידתם.

**דוזימטריה של קרינה מטפלת** בהגדרת הגדלים הכמותיים ובטכניקות המדידה של הקרינה, ומכאן גם חשיבותה הרבה בתחום ההגנה מקרינה. קיימים מספר גדלים בתחום זה אשר ידיעתם הכרחית לצורך עריכת מאזן הנזק העלול להיגרם ע"י הקרינה. שלושה גורמים מתוכם הם מנדטורים (ועל פי דרישות החוק הם מחייבים):

א. עוצמת שדה הקרינה הנוצר סביב מקור קרינה כלשהו (מכונות קרינה, מקורות רדיואקטיביים, מקור; ניוטרונים);

ב. כמות האנרגיה הנבלעת ע"י תווך כלשהו הנמצא בשדה קרינה;

ג. הנזק הביולוגי הכמותי הנגרם ע"י קרינה לסוגיה.

## יחידות הקרינה

היחידות המאפיינות את שלושת הגורמים שהובאו לעיל הם:

### א. עוצמת שדה קרינה: רנטגן - ROENTGEN

מוגדרת כעוצמת הקרינה הגורמת ליצירת כמות מטען השווה ליחידה אלקטרוסטטית אחת בסנטימטר מעוקב של אוויר יבש ובתנאים סטנדרטיים (לחץ - 1 אטמוספירה, טמפרטורה - 25°C).

מכיוון שערכה של יחידה אלקטרוסטטית אחת היא  $3.34 \times 10^{-10}$  coulomb, ומשקל מ"ק אוויר בתנאים סטנדרטיים שווה ל- 1.29 Kg, ניתן לרשום את הרנטגן כאקוויולנטי ליצירת מטען של  $1 R = 2.58 \times 10^{-4}$  coulomb/Kg.

**קצב החשיפה - (Exposure rate)** נמדד ביחידות של עוצמת שדה ליחידת זמן R/min, R/h רכוי.

### ב. נפוח אנרגיה נבלעת (Dose) -

מוגדרת באמצעות היחידה Grey ומסומנת Gy, בעבר נהגו לסמן יחידה זו כ-Rad). בהגדרתו, הגריי אקוויולנטי לקליטת אנרגיה של ג'אול אחד לק"ג חומר:

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ Joule/Kg}$$

הקשר שבין ה-Gy וה-Rad קיים ביחס:

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ Rad}$$

**קצב המנה (Dose rate)** - נמדד ביחידות של אנרגיה נבלעת ליחידת זמן Gy/min, Gy/h וכו'.

### ג. יחידת המנה האקוויולנטית (Dose equivalent) מוגדרת

באמצעות היחידה Sievert ומסומנת Sv. בעבר נהגו לסמן יחידה זו כ-Rem. יחידה זו קשורה בנזק הביולוגי הנגרם ע"י קרינות לסוגיהן השונים.

הנזק הביולוגי הנוצר ע"י סוג קרינה מסויים הינו יחסי למנת האנרגיה שנבלעה בנפח מסויים. בליעה של מנת אנרגיה זהה ע"י נפח מסויים ביולוגי מסוגים שונים של קרינות, אינו גורם לאותו נזק ביולוגי. ככל שקצב מסירת האנרגיה ליחידת אורך של הקרינה המייננת גדול יותר כן גדול יותר הנזק הביולוגי. בפרק הדין בנושא האינטראקציה של קרינה עם חומר, ראינו כי חלקיקי  $\alpha$  גורמים לצפיפות יוניזציה גבוהה יותר מאשר חלקיקי  $\beta$  ו/או קרינת גמא, ולכן כפועל יוצא, גם הנזק הביולוגי של קרינת  $\alpha$  יהיה גבוה יותר מאשר של  $\beta$  ו/או  $\gamma$  עבור אותה מנת אנרגיה נבלעת. לפיכך, כדי לאפשר התאמה בין סוגי הקרינה השונים והנזק הביולוגי, הוכנס גורם הנקרא גורם איכות - Factor Quality (QF) - המאפשר לקשור בין כמות האנרגיה הנבלעת Gy ומנת יחידת המנה האקוויולנטית.

$$Sv = QF \times Gy$$

בטבלה מס' 1 ניתן לראות ערכי QF

סוג קרינה	QF
גמא, קרני X	1
ביתא	1
נויטרונים טרמיים	3 - 6
נויטרונים מהירים	20
אלפא	20

טבלה מס' 1: ערכי איכות QF

איברים שונים בגוף רגישים במידה שונה לנזקי קרינה. לכן, נקבעו ע"י הוועדה הבינלאומית להגנה רדיולוגית מנות הקרינה השנתית המירביות המותרות לאוכלוסיה ולעובדי קרינה - ראה טבלה מס' 2.

מנה מירבית עובד קרינה mSv	מנה מירבית אוכלוסיה mSv	חלקי גוף
50	1	הגוף כולו
150	3	עיניים
200	4	אברי מין
250	8	מח עצמות
250	8	שדיים
250	8	ריאות
500	16	בלוטת התריס
500	16	עצמות

טבלה מס' 2: מנות קרינה שנתית מירביות מותרות לאוכלוסיה ולעובדי קרינה

קיימים מצבים שבהם יש צורך בקביעה שונה (אחרת) של המנות המירביות, לדוגמה: חשיפת חירום - מנה אקוויולנטית כל גופית של 100 mSv, עם הגבלה של 250 mSv לתקופת חיים. נשים בהריון - מנה מירבית שלא תעלה על 10 mSv לכל תקופת ההריון עם קצב מנה של 1 mSv לחודש.

## קרינת הרקע הטבעי

קרינת הרקע הטבעי היא תופעה אשר אין אנו שולטים בה אלא חשופים אליה, בנוסף לכל סוגי הקרינה האחרות אותן אנו מייצרים בעצמנו, או גורמים להגברת ריכוזן בצורת החיים שבנינו לעצמנו (ראה גז רדון בהמשך). לקרינת רקע זו שלושה מקורות עיקריים:

א. **קרינה קוסמית** - מקורה בחלל החיצון, והיא מורכבת בעיקר מפרוטונים (גרעין מימן) באנרגיה גבוהה מאוד. בחדירתה לאטמוספירה עובר חלק מן הקרינה אינטראקציה ונוצרת קרינה משנית הן ע"י יוניזציה והן ע"י אינטראקציות גרעיניות. קרינה משנית זו, אף היא בעלת אנרגיה גבוהה ומכילה חלקיקים מסוגים שונים, ביניהם נויטרונים, אלקטרונים, וקרינה אלקטרומגנטית. כיוון שמנת החשיפה משתנה כפונקציה של הגובה מעל פני הים והמיקום על פני כדור הארץ (תלוי בשדה המגנטי על פני כדור הארץ), לכן נקבעה מנת חשיפה ממוצעת מקרינה זו, שערכה 0.35 mSv לשנה.

ב. **קרינה פנימית (גוף האדם)** - גוף האדם מכיל יסודות שונים לצורך בנייתו וקיומו. בין יסודות אלה יכולים להיות גם יסודות רדיואקטיביים. הגורם הדומיננטי הוא האיזוטופ של האשלגן K-40 שהוא איזוטופ רדיואקטיבי. גם האיזוטופ של המימן (T) והפחמן C-14 מצויים בגוף. בנוסף ניתן למצוא איזוטופים רדיואקטיביים נוספים בכמויות נמוכות כתוצאה מאכילה, נשימה וכו'. סך הכל מנת הקרינה הממוצעת בגופנו היא כ- 0.2 mSv לשנה.

ג. **קרינה מן הקרקע** - הקרקע מכילה במידה גבוהה או פחותה, גם איזוטופים רדיואקטיביים, כגון: תוריום, אורניום, אשלגן - הכל בהתאם לאיזור.

מכיוון שכך, יש לצפות שאם קרקע כזאת משמשת לתעשייה, יועברו האיזוטופים הרדיואקטיביים גם לאיזורים מיושבים (בנייה) וכן גם באוויר - בצורת אבק. קיימים איזורים שבהם ריכוז המרבצים של איזוטופים אלה גבוה



(לדוגמה: איזור המכיל פוספטים), ולכן גם מנת הקרינה הממוצעת הינה גבוהה בהרבה מאשר במקומות אחרים. מנת הקרינה הממוצעת לחשיפה זו היא כ- 0.5 mSv לשנה.

סיכום של שלושת המקורות שנמנו, מורה על מנת חשיפה ממוצעת של 1 mSv, שהיא המנה המירבית השנתית המותרת לגוף כולו (ראה טבלה 2).

במנת חשיפה זו לא נלקח בחשבון גז הרדון ונגזרותיו, אשר בעייתיותו הועלתה גם בארץ. באיזורים שבהם קיימים פוספטים בקרקע עלולים להיפלט כמויות גבוהות יחסית של גז רדון.

מנת הקרינה הממוצעת המותרת לחשיפה כזאת היא כ- 0.8 mSv לשנה, כלומר מנה כללית של כ- 2 mSv לשנה לאוכלוסיה.

## הגנה מקרינה

כל מקור רדיואקטיבי נושא בחובו דרגת סיכון התלויה למצב הצבירה שבו הוא נתון. מבחינת שדה קרינה אין כל הבדל בין מצבי הצבירה כאשר הם ממוקמים בנקודה אחת (מיכל גז, מקור קרינה במצב מוצק סגור, תרכובת או נוזל בכלי חוסם וכו'). ההגנה הטובה ביותר במצב כזה הוא המרחק מן המקור. עוצמת שדה הקרינה יורדת בעוצמתה ביחס לריבוע המרחק. כלומר, אם עוצמת שדה קרינה הוא 1 R במרחק 1 מטר מהמקור, אזי במרחק 2 מטר ממנו תרד העוצמה לרבע –  $(1/2)^2$ ; וכאשר מתקרבים לחצי מטר מהמקור עולה העוצמה לפי  $4 - (2)^2$ . מכאן נראה שכאשר מתקרבים מאוד למקור, עולה במהירות עוצמת שדה הקרינה, ולכן עוצמת השדה המכסימלית תהיה בעת מגע עם המקור. דרך אחרת להגנה תלויה בזמן החשיפה. קצב החשיפה R/h הוא פונקציה של זמן. לפיכך, רצוי לשהות זמן קצר ככל האפשר בשדה קרינה.

דרך נוספת להגנה (שכבר הוזכרה) היא ע"י מיסוך. יש לוודא שהמיסוך יהיה קרוב עד כמה שאפשר למקור. לכן רצוי לפעול באמצעות מלקחיים או כל אמצעי אחר, אשר בו יועבר המקור מבלי שהמטפל ייחשף לשדה הקרינה עקב מרחק.

למרות שההמלצות הן למנוע מצב בו ייווצר זיהום קרינה פנימי בגוף, קורה לעתים - בגלל הזנחה, חוסר ידע או מעבדה בלתי כשרה - מצב שבו העובד מזדהם. בדרך כלל העובד אינו מודע לכך (שום דבר לא כואב), אך הסכנה הממשית היא גדולה, מכיוון שהעובד נפגע מקרינה באברים פנימיים, כאשר קיימות נקודות שבהן המרחקים בין החומר המקרין לגוף המוקרן הוא אפס. קיימים חומרים אשר חוזרים ומתבייטים בגוף (בעצמות) וזמן שהייתם שם ארוך מאוד (מחצית חיים ביולוגית), ואחרים (כמו יוד) הנספגים לבלוטת התריס אך עוזבים את הגוף תוך זמן סביר.

**מומלץ:** לפעול עם מקורות קרינה בהם קיימת סכנה מסוג זה, רק לאחר קבלת אישור של המוסדות המבקרים המוסמכים ולאחר שנתקבל אישור הסמכה למעבדה ולעובדים.

זיהום מסוג אחר הוא זיהום חיצוני - כלומר זיהום על פני עור הגוף, ידיים, פנים וחלקים אחרים. במקרה כזה יש להפשיט את העובד, לשטוף אותו במקלחת ולקרצפו עם מברשות קשות כדי להבטיח סילוק החומר הרדיואקטיבי מעליו.

ניתן לקבוע קיום או אי-קיום חומר רדיואקטיבי, קרינה וכו', רק באמצעות מיכשור מתאים. לעתים, מיכשור המונה את הקרינה ישירות אינו מספיק, ולכן יש צורך בבדיקות מימרח כדי לאשר את נקיון המערכת.

בנוגע לזיהומים פנימיים, כאשר קיים החשד הקל ביותר לזיהום כזה, מומלץ לבדוק באופן רוטיני, (בדיקה שיגרתית), אחת לשנה, את הקרינה הנפלטת מהגוף באמצעות מיכשור מיוחד (Total body counting), אשר מודד את כמויות הקרינה ומזהה את היסודות מהם היא נפלטת.