

פרק 9 יסודות תורת היחסות

פיתוח תורת האלקטרודינמיקה הוביל לבדיקה מחודשת של מושגי המרחב והזמן.

בהתאם למושגים הקלאסיים של מרחב וזמן, שבמשך מאות שנים נחשבו כבלתי מעורערים, אין לתנועה כל השפעה על מהלך הזמן (הזמן הוא מוחלט), ומידותיו של הגוף אינן תלויות במצבו, כלומר אם הוא נייח או נמצא בתנועה (מידותיו מוחלטות).

תורת היחסות המיוחדת של **איינשטיין** היא תורת הזמן והמרחב, והיא החליפה את המושגים הישנים והקלאסיים האלה.

§75 חוקי האלקטרודינמיקה ועקרון היחסות

לאחר הפיתוח של תורת האלקטרודינמיקה הופיעו ספקות לגבי יישום עקרון היחסות של **גליליאו** בתופעות האלקטרומגנטיות.

עקרון היחסות במכניקה ובאלקטרודינמיקה

לאחר שבמחצית השנייה של המאה ה-19 ניסח **מקסוול** את החוקים הבסיסיים של האלקטרודינמיקה, נשאלה השאלה: האם עקרון היחסות, הנכון לתופעות המכניות, נכון גם לתופעות האלקטרומגנטיות? במילים אחרות: האם תהליכים אלקטרומגנטיים (פעולות גומלין בין מטענים לזרמים, התקדמות גלים אלקטרומגנטיים וכדומה) מתרחשים באופן זהה בכל מערכות ייחוס אינרציאליות? או אולי תנועה קצובה, שאינה משפיעה על תופעות מכניות, משפיעה השפעה כלשהי על תהליכים אלקטרומגנטיים?

כדי לענות לשאלה זו נחוץ היה לברר אם משתנים חוקי האלקטרודינמיקה הבסיסיים במעבר ממערכת אינרציאלית אחת לאחרת – או, בדומה **לחוקי ניוטון**, נשארים הם ללא שינוי. אם נשארים הם ללא שינוי, ניתן להסיר את הספקות לגבי קיומו של עקרון היחסות באשר לתהליכים אלקטרומגנטיים, ולהתייחס לעיקרון זה כמו לחוק טבע אוניברסלי.

חוקי האלקטרודינמיקה מסובכים, ופתרון מדויק לבעיה זו הוא קשה מאוד.

חוקי האלקטרודינמיקה ועקרון היחסות

בהתאם לחוקי האלקטרודינמיקה, זהה מהירות האור בריק בכל הכיוונים ושווה ל- $c = 3 \cdot 10^8$ m/sec; אולם בהתאם לחוק חיבור המהירויות במכניקה הניוטונית, עשויה המהירות להיות שווה ל- c במערכת ייחוס אחת בלבד. בכל מערכת ייחוס אחרת, הנעה יחסית למערכת הנבחרת במהירות \vec{v} , תהיה מהירות האור שווה ל- $c - \vec{v}$. אם מתקיים חוק חיבור המהירויות, אזי במעבר ממערכת אינרציאלית אחת לאחרת צריכים חוקי האלקטרודינמיקה להשתנות כך, שבמערכת החדשה לא תהיה מהירות האור שווה ל- c , אלא ל- $c - \vec{v}$.

נתגלתה אפוא סתירה בין האלקטרודינמיקה לבין המכניקה הניוטונית, אשר חוקיה תואמים לעקרון היחסות. על הקושי שנוצר ניסו להתגבר בשלוש דרכים שונות.

הדרך הראשונה

לפסול את השימוש בעקרון היחסות לגבי התופעות האלקטרומגנטיות. בדרך זו תמך הפיזיקאי ההולנדי הגדול, מגלה תורת האלקטרונים, ה' לורנץ. עוד מזמנו של פאראדיי נחשבו תופעות אלקטרומגנטיות כתהליכים המתרחשים בתווך מיוחד חודר-כול, הממלא את כל המרחב: "האתר העולמי". מערכת הייחוס הנייחת, היחסית ל"אתר", היא המערכת הנבחרת, ומתקיימים בה חוקי האלקטרודינמיקה של מקסוול, ובה צורתם פשוטה ביותר. במערכת זאת בלבד מהירות האור בריק שווה בכל הכיוונים.

הדרך השנייה

לשנות את משוואות מקסוול כך, שהן לא תשתנינה במעבר ממערכת אינרציאלית אחת לאחרת (בהתאם למושגי המרחב והזמן הקלאסיים). ניסיון כזה נעשה על-ידי הרץ: על-פי הרץ, נגרר ה"אתר" במלואו על-ידי גופים נעים, ולכן מתרחשות בו התופעות האלקטרומגנטיות בלא שוני, ללא תלות במצב התנועה של גוף, ועקרון היחסות מתקיים.

הדרך השלישית

לשלול את מושגי המרחב והזמן הקלאסיים, כדי לשמור הן את עקרון היחסות הן על משוואות מקסוול. דרך זו מהפכנית ביותר, מכיוון שהיא דורשת בדיקה

חוקי האלקטרודינמיקה ועקרון היחסות

מחדש של כל המושגים הבסיסיים ביותר של הפיזיקה. מנקודת מבט זאת מדויקות תהיינה משוואות השדה האלקטרומגנטי, ובלתי מדויקים יהיו חוקי המכניקה של **ניוטון**, התואמים למושגים הישנים של המרחב והזמן. יש לשנות את חוקי המכניקה – ולא את חוקי האלקטרודינמיקה של **מקסוול**.

האפשרות השלישית היא הנכונה. על-ידי פיתוח עקבי של דרך זו הגיע **איינשטיין** למושגים חדשים של מרחב וזמן. שתי האפשרויות הראשונות נשללו בניסויים מתאימים.

אלברט איינשטיין (1879 - 1955)



הפיזיקאי הגדול של המאה ה-20. הוא פיתח את תורת המרחב והזמן החדשה – היא תורת היחסות המיוחדת. הוא הרחיב את תורת היחסות עבור מערכות ייחוס לא אינרציאליות, ובנה את תורת הכבידה העולמית המודרנית המכונה **תורת היחסות הכללית**. איינשטיין השתמש לראשונה במונח של חלקיק אור: **פוטון**. העבודה של **איינשטיין** על תנועת **בראון** היא שהביאה להכרעה בדבר התורה המולקולרית של החומר.

נסיונותיו של **הרץ** לשנות את משוואותיו של **מקסוול** הראו, שהמשוואות החדשות אינן מסוגלות להסביר כמה עובדות: כך, למשל, בהתאם לרעיון של **הרץ**, צריכים מים זורמים לגרור עמם אור המתקדם בהם, מכיוון שמים גוררים את ה"אתר" שבתוכו מתקדם האור. הניסוי לא אימת השערה זו.

הרעיון של **לורנץ** – לפיו אמורה להתקיים מערכת ייחוס נבחרת הקשורה ל"אתר העולמי" הנמצא במנוחה מוחלטת – גם הוא נשלל על-ידי ניסויים.

אילו היתה מהירות האור שווה ל-300,000 ק"מ/ש' במערכת הקשורה ב"אתר" בלבד, אפשר היה לגלות את עצם התנועה של המערכת יחסית ל"אתר" ואת מהירותה של תנועה זו על-ידי מדידת המהירות במערכת אינרציאלית כלשהי. בדומה לרוח, הנוצרת במערכת הייחוס הנעה יחסית לאוויר, אמורה היתה להתגלות "רוח אתר" במערכת במהלך תנועתה היחסית ל"אתר" (אם כמובן, בכלל קיים ה"אתר"). הניסוי לגילוי של "רוח אתר" נערך ב-1881 על-ידי המדענים האמריקנים **מייקלסון ומורלי** על-פי הרעיון של **מקסוול**, שהגה 12 שנים לפני כן.

חוקי האלקטרודינמיקה ונקרון היחסות

בניסוי זה נמדדה מהירות אור בכיוון תנועת כדור הארץ ובניצב לו. המדידות נערכו בעזרת מערכת מיוחדת ומדויקת מאוד, המכונה **אינטרפרומטר של מייקלסון**. הניסויים נעשו בשעות יום שונות ובעונות שנה שונות, אולם תמיד היתה התוצאה שלילית: תנועת הארץ יחסית ל"אתר" לא התגלתה.

למה הדבר דומה? לנסיעה במכונית במהירות 100 קמ"ש, כשראשך מבצבץ החוצה מהחלון – ואינך חש משב רוח בפניך.

הרעיון של קיום מערכת ייחוס נבחרת לא עמד במבחן הניסוי; הניסוי הוכיח שלא קיים שום תווך מיוחד, "אתר נושא אור", שאפשר היה לקשור בו את המערכת המועדפת כזאת.

הסתבר שאפשר לתאם בין עקרון היחסות לבין משוואת **מקסוול**, רק אם נבטל את המושגים הקלאסיים של מרחב וזמן, שעל-פיהם אין המרחק ומהלך הזמן תלויים במערכת ייחוס.

§76 הנחות היסוד של תורת היחסות

בבסיס תורת היחסות שתי הנחות יסוד.

בעקבות התוצאות השליליות של ניסוי **מייקלסון** ושל ניסויים אחרים, שהיו אמורים לגלות את תנועת כדור הארץ יחסית ל"אתר", הניחו השערות שונות, שבעזרתן ניסו להסביר מדוע לא מצליחים לגלות את אותה מערכת ייחוס נבחרת.

באופן אחר לגמרי ניגש **איינשטיין** לפתרון הבעיה: אין צורך להמציא רעיונות שונים כדי להסביר את התוצאות השליליות של הניסויים, ואין צורך לחפש הבדלים בין מערכות אינרציאליות. חוק הטבע האוניברסלי מעניק שוויון מלא לכל מערכות הייחוס האינרציאליות לא רק לגבי תופעות מכניות, אלא גם לגבי תהליכים אלקטרומגנטיים במצב מנוחה כבמצב תנועה קצובה בקו ישר.

עקרון היחסות הוא הנחת היסוד הראשונה של תורתו של **איינשטיין**, וניתן לנסח אותו כך: **כל תופעות הטבע מתרחשות באופן דומה בכל מערכת ייחוס אינרציאלית.**

משמעו של העיקרון: בכל המערכות האינרציאליות צורה זהה לחוקי הפיזיקה. באופן כזה מתקיים עקרון היחסות של המכניקה הקלאסית עבור כל התהליכים בטבע, כולל התהליכים האלקטרומגנטיים.

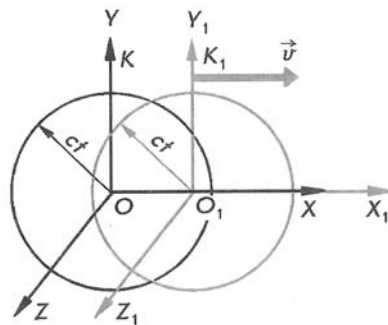
חוקי האלקטרודינמיקה ועקרון היחסות

אולם תורת היחסות מתבססת לא רק על עקרון היחסות; קיימת הנחת יסוד שנייה: **מהירות האור בריק שווה בכל מערכות הייחוס האינרציאליות, ואיננה תלויה במהירותו של מקור האור, אף לא במהירותו של המקלט הקולט את האור.**

למהירות האור אפוא משמעות מיוחדת. יתרה מזאת; כפי שנובע מהנחות היסוד של תורת היחסות, מהירות האור בריק היא המהירות המרבית של העברת פעולות הגומלין בטבע.

כדי לנסח ולפרסם את הנחות היסוד האלה נדרש בזמנו אומץ מדעי רב, מכיוון שהן סתרו את המושגים הקלאסיים של מרחב וזמן, שהיו מקובלים בעת ההיא.

נניח שברגע שמתלכדים מרכזי מערכות הצירים של שתי מערכות ייחוס אינרציאליות, K ו- K_1 , הנעות זו יחסית לזו במהירות \vec{v} , מתרחש הבזק אור בנקודת ראשית הצירים. במשך זמן t תזוזנה המערכות זו יחסית לזו למרחק vt , ומשטח הגל הכדורי יהיה בעל רדיוס ct (ציור 223). המערכות K ו- K_1 שוות בכל המובנים, ומהירות האור בהן שווה. לכן מנקודת המבט של צופה, הקשור במערכת ייחוס K , מרכז הכדור יהיה בנקודה O ; ומנקודת המבט של צופה, הקשור במערכת ייחוס K_1 , יימצא מרכז הכדור בנקודה O_1 . אולם לאותו משטח כדורי לא יכולים להיות שני מרכזים, בנקודות O ו- O_1 ; זוהי סתירה הנובעת מהנחות היסוד של תורת היחסות.



ציור 223

הסתירה אכן קיימת, אך לא בתורת היחסות עצמה; הסתירה היא לגבי המושגים הקלאסיים של מרחב וזמן, שאינם מתקיימים במקרה של תנועה במהירות גבוהה.

יש לזכור את שתי הנחות היסוד של תורת היחסות. בל נשכח את הגדרת **מערכת ייחוס אינרציאלית**: זו מערכת, שיחסית אליה כל גוף חופשי, שאין פועלים עליו כוחות חיצוניים, נע במהירות קבועה.

חוקי האלקטרודינמיקה ועקרון היחסות



1. אילו הנחות מהוות בסיס לתורת היחסות?
2. במה שונה הנחת היסוד הראשונה של תורת היחסות מעקרון היחסות במכניקה?

§77 היחסות של המושג "בו-זמני"

עד לתחילת המאה ה-20 לא היה ספק לאיש: הזמן הוא ערך מוחלט; שני אירועים, שיתרחשו בו-זמנית, ייראו בו-זמנית לתושבי כדור הארץ וליצורי כל ציוויליזציה קוסמית אחרת. פיתוח תורת היחסות הוכיח שאין זה כך.

הסיבה לכשלון המושגים הקלאסיים של מרחב וזמן היא ההנחה השגויה, המכירה באפשרות להעברה מיידית של אותות ופעולות גומלין מנקודת מרחב אחת לאחרת. קיום מהירות סופית וגבולית של העברת פעולות ואותות קורא לשינוי יסודי ומעמיק של מושגי המרחב והזמן, המבוססים על הניסיון היומיומי. מושג הזמן המוחלט, שמהלכו וקצבו קבועים ובלתי תלויים במצב החומר ובתנועתו, התברר כשגוי.

אם נרשה העברה מיידית של אותות, תהיה לטענה – שהאירועים A ו-B בשתי נקודות מרחב שונות התרחשו בו-זמנית – משמעות מוחלטת. אפשר להציב בנקודות A ובנקודה B שעונים ולסנכרן (לתאם) אותם באמצעות אותות מיידיים. אם אות כזה נשלח מ-A בשעה 0 ו-45 דקות, ובאותו רגע הגיע לשעון שבנקודה B, המשמעות היא שהשעונים מראים את אותה השעה, כלומר הם מסונכרנים; ואם תיאום כזה אינו אפשרי, אפשר לסנכרן שעונים בהזזת השעה קדימה בשעון המשגר ברגע שליחת האות.

כל האירועים נחשבים לבו-זמניים, אם הם מתרחשים בקריאות שוות של שעונים מסונכרנים.

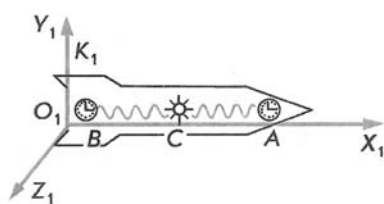
רק במקרה אחד בלבד – כאשר בנקודות A ו-B נמצאים שעונים מסונכרנים – ניתן להחליט אם האירועים, שהתרחשו בנקודות אלה, הם בו-זמניים, או לא.

אולם כיצד אפשר לתאם שעונים, הנמצאים במרחק כלשהו זה מזה, אם מהירות האותות אינה אינסופית?

חוקי האלקטרודינמיקה מעקרון היחסות

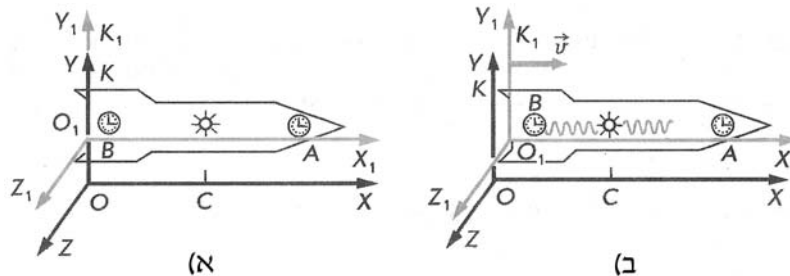
כדי לתאם (לסנכרן) שעונים טבעי להשתמש באותות אור או באותות אלקטרומגנטיים אחרים, מכיוון שמהירות הגלים האלקטרומגנטיים בריק קבועה.

זו בדיוק השיטה, שבה משתמשים לתיאום השעונים ברדיו. אותות הזמן מאפשרים לכם לסנכרן את שעונכם עם שעון תקן מדויק. אם ידוע המרחק מתחנת הרדיו לבית, ניתן לחשב את שגיאת איחור האותות. שגיאה זו קטנה מאוד, ובחיי היומיום אינה משמעותית; אולם עבור מרחקים קוסמיים היא עשויה להיות משמעותית ביותר.



ציור 224

נסתכל ביתר פירוט בשיטה פשוטה לתיאום שעונים, שאינה דורשת חישובים. נניח שטייס בחללית מעוניין לדעת אם מתואמים השעונים A ו-B, המוצבים בקצוות הנגדיים של החללית (ציור 224). כדי לעשות זאת הוא מדליק פנס, הנמצא באמצעה של החללית. האור היוצא מהפנס מגיע בו-זמנית לשני השעונים. אם קריאות השעונים ברגע זה זהות, אזי השעונים מסונכרנים.



ציור 225

כך יקרה במערכת ייחוס אחת בלבד K_1 , הקשורה בחללית. אבל במערכת ייחוס K , שיחסית אליה טסה החללית, המצב שונה: השעון, הנמצא באף החללית, מתרחק מהמקום שבו נדלק הפנס (הנקודה בעלת הקואורדינטה OC), וכדי להגיע לשעון A צריך האור לעבור מרחק גדול יותר ממחצית החללית (ציור 225א, ב). לעומת זאת השעון B, הנמצא באחורי החללית, מתקרב אל מקום ההבוק, והמרחק

חוקי האלקטרודינמיקה ומקרון היחסות

שעובר אות האור קצר ממחצית החללית. בציר 225 א שוות הקואורדינטות x ו- x_1 ברגע ההבזק, ובציר 225 ב מתואר מקום מערכת הייחוס כאשר האור מגיע לשעון B. לכן צופה, הנמצא במערכת K, יגיע למסקנה הבאה: האותות לא יגיעו לשני השעונים בו-זמנית.

כל שני אירועים בנקודות A ו-B, שהם בו-זמניים במערכת K_1 , אינם בו-זמניים במערכת K; אולם בהתאם לעקרון היחסות, המערכות K ו- K_1 שוות-ערך הן, ואף אחת מהן אינה מועדפת על-פני האחרת. לכן חייבים אנו להגיע למסקנה: **בו-זמניות של אירועים נפרדים במרחב היא יחסית.**

כפי שלמדנו, הסיבה לכך היא המהירות הסופית של האותות.

דווקא ביחסיות של המושג **בו-זמני** טמון פתרון הפרדוקס של גלי אור כדוריים, שעליו שוחחנו בסעיף 76: מנקודת מבטו של צופה, הנמצא במנוחה יחסית למערכת K, מגיע אור בו-זמנית לנקודות המשטח הכדורי, שמרכזו בנקודה O; אבל מנקודת מבטו של צופה, הקשור למערכת K_1 , מגיע האור לנקודות אלה ברגעי זמן שונים.

מתקיים גם ההפך: במערכת K מגיע האור לנקודות שעל פני הכדור, שמרכזו ב- O_1 , ברגעי זמן שונים – ולא בו-זמנית, כפי שהדבר נראה לצופה, הקשור למערכת K_1 .

מכאן נובעת המסקנה, שלמעשה אין שום סתירה.

המושג **בו-זמני** הוא יחסי. איננו מסוגלים "לחוש" בכך, משום שמהירות האור גדולה בהרבה מהמהירויות שבהן אנו נעים.

?

1. לאילו אירועים מתייחסים כמתרחשים בו-זמנית?

§78 המסקנות העיקריות מהנחות היסוד של תורת היחסות

מהנחות היסוד של תורת היחסות נובעת שורה של מסקנות חשובות ביותר על אודות התכונות של המרחב והזמן. לא נתעכב על ההוכחות המסובכות של המסקנות הללו, אלא נמנה אותן בקצרה.

היחסיות של המרחקים

המרחק איננו גודל מוחלט, אלא תלוי במהירות תנועת הגוף יחסית למערכת ייחוס נתונה.

נסמן באמצעות l_0 את אורך המוט במערכת הייחוס K , שיחסית אליה הוא נמצא במנוחה. האורך l של אותו המוט במערכת הייחוס K_1 , שיחסית אליה נע המוט במהירות \vec{v} , מוגדר על-פי הנוסחה:

$$(9.1) \quad l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

כפי שרואים מהנוסחה, $l < l_0$.

זו המשמעות של הקטנת מידות הגוף (התכווצות) במערכת ייחוס, הנעה במהירות גבוהה.

היחסיות של פרקי הזמן

נניח שפרק הזמן בין שני אירועים, המתרחשים באותה נקודה במערכת ייחוס אינרציאלית K , שווה ל- τ_0 . אירועים אלה עשויים להיות, לדוגמה, שתי הקשות של מטרונום הסופר שניות.

פרק הזמן τ במערכת הייחוס K_1 , הנעה יחסית למערכת K במהירות \vec{v} ,

$$(9.2) \quad \tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

שווה:

ברור ש- $\tau > \tau_0$. זו המשמעות של האטת הזמן במערכות ייחוס נעות.

אם $v \ll c$, אפשר להזניח את הגודל $\frac{v^2}{c^2}$ בנוסחאות (9.1) ו-(9.2), ואזי

המסקנות העיקריות של תורת היחסות

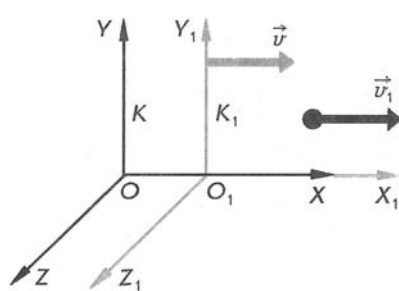
$l \approx l_0$ ו- $\tau \approx \tau_0$, כלומר אין צורך להתייחס להקטנת המידות ולהאטת הזמן במערכת הייחוס הנעה.

חוק חיבור המהירויות

למושגים החדשים של מרחב וזמן תואם חוק חדש של חיבור מהירויות, מאחר שהחוק הקלאסי הישן של חיבור מהירויות אינו יכול להתקיים, מכיוון שהוא מנוגד לטענה של קביעות המהירות של האור בריק.

אם רכבת נעה במהירות v , ובקרון מתקדם גל אור בכיוון התנועה, תהיה מהירותו יחסית לקרקע $c - v$ ולא $c + v$. חוק חיבור המהירויות החדש אמור לתת את התוצאה הנדרשת.

נרשום את חוק חיבור המהירויות עבור מקרה פרטי: גוף נע לאורך ציר X_1 של מערכת הייחוס K_1 , שבעצמה נעה במהירות v יחסית למערכת הייחוס K , כך שצירי הקואורדינטות Ox ו- Ox_1 מתלכדים כל הזמן, וצירי הקואורדינטות Oy ו- Oy_1 ו- Oz ו- Oz_1 נשארים מקבילים, בהתאמה (ציור 226).



ציור 226

נסמן את מהירות הגוף יחסית ל- K_1 באמצעות v_1 , ואת המהירות של אותו גוף יחסית ל- K באמצעות v_2 . חוק חיבור המהירויות החדש יהיה:

$$(9.3) \quad v_2 = \frac{v_1 + v}{1 + \frac{v_1 v}{c^2}}$$

אם $v \ll c$ ו- $v_1 \ll c$ אפשר להזניח את הגודל $\frac{v_1 v}{c^2}$ שבמכנה, ובמקום (9.3) נקבל את החוק הקלאסי של חיבור המהירויות:

$$v_2 = v_1 + v$$

כאשר $v_1 = c$, שווה גם המהירות v_2 ל- c , כפי שדורשת הנחת היסוד השנייה של תורת היחסות, שהרי על-פי הנוסחה:

המסקנות העיקריות של תורת היחסות

$$v_2 = \frac{c + v}{1 + \frac{cv}{c^2}} = c \frac{c + v}{c + v} = c$$

התכונה הנפלאה של החוק החדש היא העובדה, שעבור מהירויות כלשהן v_1 ו- v (ששתייהן, כמובן, אינן גדולות מ- c), התוצאה v_2 אינה גדולה מ- c .

חוק חיבור המהירויות בתורת היחסות מתקיים תמיד, אולם אינו מוחשי. תארו לעצמכם טיל חלל ענק, הנע יחסית לכדור הארץ במהירות הקרובה למהירות האור c . משגרים ממנו טיל קטן, שכעבור זמן-מה מגיע למהירות הקרובה ל- c יחסית לטיל-האם; אולם מהירות הטיל הקטן יחסית לכדור הארץ תשווה אך ורק, וכמעט, למהירותו של טיל-האם.

?

1. עבור אילו מהירויות תנועה הופך חוק חיבור המהירויות החדש לחוק הקלאסי (חוק גליליאו)?
2. מה השוני העקרוני בין מהירות האור לבין מהירויות התנועה של גופים אחרים?

§79 תלות ערך המסה במהירות חוקי הדינמיקה של תורת היחסות

בדומה לחוק חיבור המהירויות, גם חוקי המכניקה של ניוטון אינם תואמים את מושגי המרחב והזמן החדשים של תורת היחסות. רק עבור מהירויות תנועה נמוכות, כאשר אפשר להשתמש במושגים הקלאסיים של מרחב וזמן, החוק השני של ניוטון:

$$(9.4) \quad m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \vec{F}$$

אינו משנה את צורתו במעבר ממערכת אינרציאלית אחת לאחרת (עקרון היחסות).

אולם עבור מהירויות גבוהות אין חוק זה בצורתו הרגילה (הקלאסית) מתקיים.

על-פי החוק השני של ניוטון (9.4) עשוי כוח קבוע, הפועל על גוף למשך זמן ממושך, להקנות לגוף מהירות גבוהה כלשהי; אולם במציאות מהירות האור בריק

המסקנות העיקריות של תורת היחסות

היא מהירות גבולית, ובשום תנאי לא ינוע גוף במהירות הגבוהה ממנה. דרוש תיקון קטן של המשוואה, כדי שתתקיים גם עבור מהירויות תנועה גבוהות.

נעבור לצורת המשוואה של החוק השני, שבה השתמש **ניוטון** עצמו:

$$(9.5) \quad \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}$$

כאשר: $\vec{p} = m\vec{v}$ התנע של הגוף. במשוואה זו אין ערך המסה תלוי במהירות.

מפליא שגם במהירויות גבוהות אין המשוואה (9.5) משתנה, והשינוי נוגע לערך המסה בלבד. ככל שהמהירות גדלה, אין מסת הגוף נשארת קבועה, אלא ערכה הולך וגדל.

את תלות המסה במהירות ניתן למצוא, אם נצא מהנחה שחוק שימור התנע מתקיים גם במסגרת המושגים החדשים של מרחב וזמן. החישובים מסובכים מאוד, ולכן נביא את התוצאה הסופית בלבד.

נסמן באמצעות m_0 את מסת הגוף במנוחה. מסת אותו גוף, הנע במהירות v ,

תוגדר אז על-ידי הנוסחה:¹

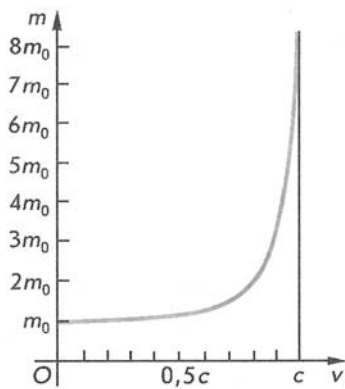
$$(9.6) \quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

בציור 227 מתוארת תלות מסת הגוף במהירותו. הציור מראה שערך המסה

הולך וגדל ככל שמהירות הגוף קרובה יותר למהירות האור c . כאשר מהירות התנועה קטנה בהרבה ממהירות האור, גודל הביטוי $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ שונה מעט מאוד מ-1. כך עבור המהירות של חללית מודרנית, $v \approx 10 \text{ km/sec}$, מקבלים:

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 0.99999999944$$

¹ בפיזיקה המודרנית מקובל להתייחס למסה כמסת המנוחה m_0 בלבד – ולא להגדיר את המושג של מסה בתנועה.



ציור 227

לא מפתיע אפוא, שאי-אפשר למדוד את גידול המסה במהירויות כאלה; אולם לא כך הדבר לגבי חלקיקי יסוד במאיצים מודרניים, המגיעים למהירויות עצומות. אם מהירות החלקיק קטנה ממהירות האור ב- 90 km/sec בלבד, גדלה מסתו פי 40. מאיצי אלקטרונים רבי-עוצמה יכולים להאיץ אותם למהירויות הקטנות ממהירות האור ב- $35-50 \text{ מ"ש'}$. במהירות זו גדלה מסת האלקטרונים פי 2,000.

כדי שאלקטרון כזה יוחזק במסלול מעגלי, חייב השדה המגנטי לפעול עליו בכוח הגדול פי 2,000 מהערך, שהיה מתקבל אילו לא היינו מתחשבים בתלות המסה במהירות.

כדי לחשב את מסלולי התנועה של חלקיקים מהירים, אי-אפשר להשתמש בחוקי המכניקה של ניוטון. בהתחשב בביטוי (9.6) שווה התנע של גוף:

$$(9.7) \quad \vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

החוק הבסיסי של המכניקה החדשה נשאר בצורתו הקודמת:

$$(9.8) \quad \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}$$

אולם הביטוי לתנע מוגדר כאן על-ידי הנוסחה (9.7) – ולא כמכפלה $m_0 \vec{v}$.

ובכן המסה, שבזמנו של ניוטון נחשבה כבלתי משתנה, תלויה במהירותה.

במהלך גידול מהירות התנועה הולכת וגדלה מסת הגוף, הקובעת את תכונות ההתמד של הגוף. כאשר $v \rightarrow c$, גדלה מסת הגוף בהתאם למשוואה (9.6) לאינסוף ($m \rightarrow \infty$); התאוצה תשאף לאפס, והמהירות מפסיקה לגדול ללא קשר למשך זמן פעולת הכוח.

המסקנות העיקריות של תורת היחסות

הצורך להשתמש במשוואות תורת היחסות בחישובי המאיצים המודרניים מוכיח את נכונותה, ומעיד שתורת היחסות הפכה מתיאוריה למדע שימושי.

עקרון ההתאמה

את חוקי הדינמיקה של **ניוטון** ומושגים קלאסיים של מרחב וזמן אפשר לתאר כמקרה פרטי של חוקי תורת היחסות, המתקיימים במהירויות תנועה הקטנות בהרבה ממהירות האור.

זוהי דוגמה למושג **עקרון ההתאמה**, שלפיו כל תיאוריה, המתאימה לתיאור התופעות באופן מעמיק ורחב יותר, חייבת לכלול את קודמותיה כמקרה פרטי.

לראשונה נוסח עקרון ההתאמה על-ידי **נילס בוהר** בהקשר להתאמה בין תיאוריית הקוונטית לתיאוריה הקלאסית. הוא היה המדען הראשון שהבין את מהות עיקרון זה.

משוואות התנועה של תורת היחסות מתחשבות בתלות של המסה במהירותה. הן מוצאות יישום רחב בהנדסת המאיצים של חלקיקי יסוד ובמערכות חדשניות אחרות.



1. רשמו את משוואת התלות של מסת הגוף במהירות תנועתו.
2. באיזה תנאי אפשר לא להתחשב בתלות של המסה במהירות?

§80 הקשר בין מסה לאנרגיה

נעבור כעת למסקנה החשובה ביותר של תורת היחסות, בעלת תפקיד מרכזי בפיזיקה של הגרעין ושל חלקיקי היסוד: הקשר האוניברסלי בין אנרגיה לבין המסה.

הקשר בין אנרגיה למסה נובע בהכרח מחוק שימור האנרגיה ומהעובדה, שמסת הגוף תלויה במהירות תנועתו. נדגים זאת בדוגמה הפשוטה הבאה: כאשר מחממים גז בכלי, מקנים לו אנרגיה מסוימת. מהירות התנועה התרמית של המולקולות תלויה במידת השקעת האנרגיה בגז, וגדלה עם חימום הגז. הגדלת מהירות התנועה של המולקולות משמעה, בהתאם לנוסחה (9.6), הגדלת המסה של המולקולות, ולכן

המסקנות העיקריות של תורת היחסות

גדלה מסת הגז כאשר גדלה האנרגיה הפנימית שלו. לכן, קיים קשר בין מסת הגז לבין האנרגיה האצורה בו.

נוסחת איינשטיין

באמצעות תורת היחסות ניסח איינשטיין את הנוסחה הנפלאה הבאה, הקושרת

בין אנרגיה לבין מסה:

$$(9.9) \quad E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

האנרגיה האצורה בגוף או במערכת גופים שווה למכפלת המסה בריבוע מהירות האור.

אם משתנה אנרגיית המערכת, משתנה גם המסה:

$$(9.10) \quad \Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}$$

מכיוון שהמקדם $\frac{1}{c^2}$ קטן מאוד, אפשריים שינויים ניכרים במסה כאשר קיימים שינויים גדולים באנרגיה. במהלך תגובות כימיות או במהלך חימום גופים בתנאים רגילים שינויי האנרגיה הם כה קטנים, שאי-אפשר למדוד את שינויי המסה המתאימים בניסוי. למים בקומקום החם מסה גדולה יותר מאשר למים בקומקום הקר, אולם אפילו באמצעות מאזניים הרגישים ביותר לא ניתן לגלות את ההפרש במסות. רק תהליכים גרעיניים, שמעורבים בהם חלקיקי יסוד, מלווים בשינויי אנרגיה כה גדולים, ששינוי המסה מתגלה בהם בקלות.

בפיצוץ פצצת מימן משתחררים כ- 10^{17} J. כמות אנרגיה זו גדולה מהאנרגיה החשמלית, המיוצרת בכל כדור הארץ במשך כמה ימים. האנרגיה המשתחררת נפלטת עם קרינה. הקרינה נושאת אנרגיה בעלת מסה המגיעה ל- 0.1% ממסת החומר של הפצצה.

אנרגיית המנוחה

בהתאם לנוסחה (9.9), נושא גוף אנרגיה גם אם מהירותו שווה לאפס. זוהי

אנרגיית המנוחה E_0 :

המסקנות העיקריות של תורת היחסות

$$(9.11) \quad E_0 = m_0 c^2$$

זוהי תוצאה מדהימה ונפלאה: כל גוף, בעצם היותו בעל מסה, אוצר בתוכו אנרגיה, הפרופורציונית למסת המנוחה m_0 .

כאשר חלקיקי יסוד בעלי מסת מנוחה מסוימת הופכים לחלקיקים בעלי מסת מנוחה השווה לאפס, $m_0 = 0$, מותמרת אנרגיית מסת המנוחה במלואה לאנרגיה קינטית של החלקיקים שנוצרו. עובדה זאת היא ההוכחה הברורה ביותר לקיום אנרגיה של מסת המנוחה.

הפיזיקה מכירה שתי נוסחאות נפלאות, פשוטות בצורתן, והמכילות מידע על אודות תופעות רבות. אחת מהן היא נוסחת איינשטיין: $E_0 = m_0 c^2$. את הנוסחה השנייה – נוסחת פלנק – נכיר בפרק: הפיזיקה המודרנית.

?

1. מהו חוק הקשר ההדדי בין מסה לאנרגיה?
2. מהי אנרגיית המנוחה?
3. מדוע אי-אפשר לגלות את הגדלת מסת הגוף כאשר מחממים אותו?

מקבץ תרגילים 11

1. מנקודת מבטו של צופה, הנמצא ברכבת נוסעת, פגיעות הברק בנקודת A (לפני הרכבת) ובנקודה B (מאחורי הרכבת) התרחשו בו-זמנית. איזה ברק פגע קודם מנקודת מבטו של הצופה, הנמצא על הקרקע?
2. מהי מהירותו של האלקטרון, אם ידוע שמסתו גדולה ממסת המנוחה שלו פי 40,000?
3. כמות מים, שמסתם 1 ק"ג, חוממו ל-50 K. בכמה גדלה מסת המים?
4. האם יכול אלקטרון לנוע בתווך כלשהו במהירות העולה על מהירות האור?

המסקנות העיקריות של תורת היחסות

תקציר פרק 9

1. תורת היחסות של איינשטיין מבוססת על שתי הנחות יסוד : הנחת היסוד העיקרית היא עקרון היחסות, ומהותו: כל תהליכי הטבע מתרחשים באופן דומה בכל מערכת ייחוס אינרציאלית.
2. בהתאם להנחת היסוד השנייה שווה מהירות האור בריק בכל מערכות הייחוס האינרציאליות. היא אינה תלויה במהירות מקור האור או במהירות גלאי האור.
3. תורת היחסות מהווה תורת מרחב וזמן, שבאה להחליף את המושגים הקלאסיים הישנים. בהתאם לתורת היחסות, סדר הופעת האירועים (המושג "בו-זמני"), המרחקים ופרקי הזמן אינם מוחלטים, אלא יחסיים ותלויים במשתני מערכת הייחוס.
4. מתורת היחסות נובע, שמהירות האור בריק היא המהירות הגבוהה ביותר האפשרית להעברת פעולות (מידע) בין גופים בטבע.
5. עם הגדלת מהירות הגוף אין מסתו נשארת קבועה; היא גדלה בהתאם לנוסחה:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

כאשר: m_0 – מסת הגוף במנוחה. התנע של גוף בתורת היחסות מבוטא בנוסחה:

$$\vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

את החוק העיקרי של הדינמיקה ניתן לרשום בתורת היחסות בצורתו כחוק השני של ניוטון:

$$\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}$$

המסקנות העיקריות של תורת היחסות

6. המסקנה החשובה ביותר של תורת היחסות לפיזיקה של הגרעין ושל חלקיקי היסוד היא הקשר בין מסה לאנרגיה. האנרגיה E של גוף או מערכת גופים שווה למכפלת המסה בריבוע מהירות האור:

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

הביטוי $E_0 = m_0 c^2$ מהווה את אנרגיית המנוחה.

7. במהירויות תנועה, הנמוכות בהרבה ממהירות האור, מתקיימים המושגים הקלאסיים של מרחב וזמן, וכן חוקי המכניקה של ניוטון. זוהי דוגמה לעקרון ההתאמה הכללי של תיאוריות פיזיקליות.

פרק 10. קרינה וספקטרום

עד כה עסקנו בהתקדמות גלי האור. כעת נכיר את תהליך פליטת האור על-ידי גופים.

§81 סוגי קרינה, מקורות אור

בשיעורים הקודמים הכרתם כמה מקורות אור. בסעיף זה נספר לכם על אילו עקרונות פיזיקליים מבוססת פעולתם, ואילו סוגי קרינה הם יוצרים.

מקור אור חייב לצורך אנרגיה

אור הוא גל אלקטרומגנטי בעל אורך גל בתחום $4 \cdot 10^{-7} \text{ m} - 8 \cdot 10^{-7} \text{ m}$. גלים אלקטרומגנטיים נפלטים במהלך תנועה מואצת של חלקיקים טעונים. חלקיקים טעונים אלה מרכיבים את האטומים שמהם בנוי החומר; אולם ללא הידעיה כיצד בנוי האטום אי-אפשר לדעת מהם התהליכים הגורמים לפליטת האור. ברור רק שבתוך האטום אין אור, כמו שאין קול במיתר של פסנתר. בדומה למיתר הרוטט ומפיק קול לאחר ההקשה בו בפטישון, כך פולטים האטומים אור רק לאחר עירובם.

על מנת שאטום יקרין, יש להעניק לו אנרגיה מסוימת. במהלך הפליטה מאבד האטום את האנרגיה הנרכשת, וכדי להבטיח קרינה רציפה דרושה אספקת אנרגיה רציפה לאטום ממקור חיצוני.

קרינת תרמית

הסוג הפשוט והנפוץ ביותר של קרינה הוא **קרינה תרמית**, ובה איבוד האנרגיה, שאצורה באטומים, מתקזזת עם התנועה התרמית של האטומים (או המולקולות) של הגוף המקרין לצורך פליטת אור. ככל שהטמפרטורה גבוהה יותר, עדות היא שהאטומים נעים מהר יותר. ברגע ההתנגשות בין אטומים מהירים (או מולקולות) זה עם זה, מותמר חלק מהאנרגיה הקינטית שלהם לאנרגיית עירור של האטומים, וכך פולטים הם אור.

מקור אור תרמי הוא השמש וגם נורת להט רגילה. הנורה היא מקור נוח מאוד, אולם אינו חסכוני: רק כ- 12% מכלל האנרגיה, הנפלטת על-ידי חוט הלהט של הנורה, מותמרים לאנרגיית אור. גם אש היא מקור אור תרמי. גרגירי פיח (חלקיקי דלק שלא נשרפו כליל) מתחממים על חשבון האנרגיה, הנפלטת במהלך שריפת הדלק, ופולטים אור.

סוגי קרינה

אלקטרו-לומינסנציה

מקור האנרגיה, הדרושה לאטומים לקרינת אור, עשוי להימצא במקורות שאינם תרמיים. במהלך פריקה בגזים מעניק השדה החשמלי לאלקטרונים אנרגיה קינטית רבה, ואלקטרונים מהירים מתנגשים עם אטומים בהתנגשויות פלסטיות. חלק מהאנרגיה הקינטית של האלקטרונים מופנה לעירור האטומים, ואלה מחזירים את האנרגיה בצורת גלי אור. אם כן, הפריקה בגז מלווה בקרינה המכונה **אלקטרו-לומינסנציה**.¹

הזוהר הצפוני הוא תוצאה של אלקטרו-לומינסנציה: זרמים של חלקיקים טעונים, הנפלטים מהשמש, נתפסים בשדה המגנטי של כדור הארץ. הם מעוררים את האטומים, הנמצאים בשכבות העליונות של האטמוספירה באזורים שליד הקטבים המגנטיים של כדור הארץ, וכך מקרינות שכבות אלה אור. באלקטרו-לומינסנציה משתמשים בשלטי פרסומת מוארים המכילים "צינורות ניאון".

לומינסנציה קתודית

זריחת גופים מוצקים, הנגרמת על-ידי הפצצתם באלקטרונים, מכונה **לומינסנציה קתודית**. סוג זה של לומינסנציה אחראי לקרינת אור במסך שפופרת הטלוויזיה.

לומינסנציה כימית

במהלך תגובות כימיות מסוימות משתחרר חום, וחלק מהאנרגיה התרמית הזאת הופך לקרינת אור. מקור האור נשאר קר (בטמפרטורה של הסביבה), והתופעה מכונה **לומינסנציה כימית**. רבים מכם מכירים אותה ככל הנראה: בלילה ניתן לפגוש ביער חרק קטן וזוהר: הגחלילית. על-פני גופו דלוק "פנס" ירוק קטן. לא תסבלו מכווייה אם תתפסו את הגחלילית, משום שלכתם הזוהר שעל גבה טמפרטורה השווה לזו של האוויר. תכונה דומה יש ליצורים חיים רבים: בקטריות, חרקים, דגים רבים החיים בעומק האוקיינוס. לפעמים זוהרים בחושך אף גזרי עץ רקוב.

¹ המילה הלועזית Luminance, משמעותה: קרינה.

פוטו-לומינסנציה

האור שפוגע בחומר חוזר חלקית, וחלקית נבלע. בדרך כלל גורמת אנרגיית האור הנבלע להתחממות החומר, אולם גופים מסוימים מקרינים אור בעקבות הקרינה הפוגעת בהם. זוהי **פוטו-לומינסנציה**. האור מעורר את האטומים של החומר (מגביר את האנרגיה הפנימית), והם מקרינים אור בעצמם. לדוגמה: צבעים זוהרים, שצובעים בהם צעצועים, מקרינים אור לאחר שחושפים אותם לאור שמש או לאור חזק ממקור אחר.

לאור הנפלט בתהליך הפוטו-לומינסנציה אורך גל גדול יותר מהאור המעורר את הקרינה. בזאת ניתן להיווכח בניסוי פשוט: נאיר נוזל פלואורסצנטי באלומת אור אולטרה-סגול (אור לבן שמעבירים דרך מסנן אולטרה-סגול) – והנוזל יקרין אור ירוק-צהוב, שאורך הגל שלו גדול יותר מזה של האור האולטרה-סגול.

תופעת פוטו-לומינסנציה מוצאת שימוש רחב במנורות פלואורסצנטיות המקרינות אור לבן. על-ידי ציפוי המשטח הפנימי של המנורות בתערובת של חומרים פוטו-לומינסנטיים שונים ניתן להגיע לגוון האור הרצוי. מנורות לומינסנציה חסכוניות באנרגיה ממנורות הלהט הרגילות.

בפרק זה מנינו סוגי קרינה עיקריים ואת מקורותיהם. המקורות הנפוצים ביותר הם מקורות אור תרמיים.

?

1. אילו מקורות אור אתם מכירים?

2. אילו סוגי קרינה השפיעו עליכם במהלך היממה האחרונה?

§82 הספקטרום ומכשירים ספקטראליים

נלמד על שיטות המחקר של קרינה ממקורות שונים.

ההתפלגות הספקטראלית של האנרגיה

אין מקור, היוצר אור מונוכרומטי, כלומר אור בעל אורך גל אחד ומוגדר במדויק. בזה ניתן להשתכנע באמצעות ניסויים פשוטים בסיוע מנסרה וסריג עקיפה.

האנרגיה, שנושא האור הנפלט מהמקור, נחלקת בין גלים בעלי אורכי גל שונים,



המרכיבים את אלומת האור. ניתן גם לומר שהאנרגיה מתפלגת בין תדירויות שונות, מכיוון שבין אורך הגל לבין תדירותו קיים הקשר הפשוט:

$$\lambda v = c$$

צפיפות שטף הקרינה האלקטרומגנטית, שעליה דובר בסעיף 50, מוגדרת על-ידי האנרגיה ΔW , המכסה את כל התדירויות. כדי לאפיין את פילוג עוצמת הקרינה לפי התדירויות יש להגדיר גודל חדש: עוצמת הקרינה, הנפלטת בתחום יחידת תדירות. גודל זה מכונה **צפיפות ספקטרלית** של עוצמת הקרינה.

נסמן את הצפיפות הספקטרלית ב- $I(v)$. עוצמת הקרינה בתחום ספקטרלי צר Δv תשווה ל- $I(v)\Delta v$. אם נסכם את כל הביטויים מסוג זה עבור כל התדירויות של הספקטרום, נקבל את צפיפות שטף הקרינה I .

את צפיפות שטף הקרינה אפשר למצוא באופן ניסויי. כדי לבצע זאת יש ליצור את ספקטרום הקרינה – למשל, באמצעות מנסרה – ולמדוד את צפיפות שטף הקרינה בתחומים ספקטראליים קטנים ברוחב Δv .

אין לסמוך על העין בהערכה זו של ההתפלגות הספקטרלית, אף לא באופן מקורב, משום שלעין רגישות שונה לצבעי אור (אורכי גל) שונים: הרגישות המרבית של העין נמצאת בתחום הירוק-צהוב של האור. טוב ויעיל יהיה לנצל את תכונת הגוף השחור בבלוע, כמעט במלואו, אור בכל אורכי הגל. בליעת אנרגיית הקרינה (כלומר האור) מלווה בחימום הגוף. לכן די יהיה למדוד את טמפרטורת הגוף ולהסיק על כמות האנרגיה הנבלעת ביחידת זמן.

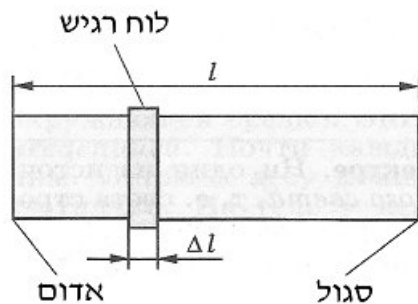
למד-טמפרטורה רגיל רגישות נמוכה מאוד, ולכן לא ניתן יהיה להשתמש בו בניסויים כאלה; דרושים מכשירים רגישים יותר למדידת הטמפרטורה. ניתן להשתמש במד-טמפרטורה חשמלי, המבוסס על נגד, שהרכיב הרגיש לחום בו בצורת לוח מתכת דק. מכסים לוח זה בשכבת פיח דקה, הבולעת אור מכל אורך גל כמעט במלואו.

את לוח המכשיר, הרגיש לחום, יש להציב במקום זה או אחר של הספקטרום (ציור 228). לכל הספקטרום של האור הנראה – מהאור האדום ועד לאור הסגול שרוחבו I – מתאים תחום תדירויות מ- v_R עד v_V . לרוחב ΔI של הלוח השחור

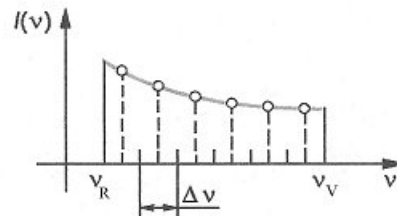


מתאים תחום קטן של תדירויות Δv . אם נזיז את הלוח לאורך הספקטרום, נגלה שצפיפות עוצמת הקרינה המרבית נמצאת בקצה האדום של הספקטרום – ולא בתחום הירוק-צהוב, כפי שזה נראה בהסתכלות בעין.

על-פי תוצאות הניסויים האלה ניתן לשרטט גרף של תלות צפיפות עוצמת הקרינה בתדירות. צפיפות עוצמת הקרינה מתקבלת בהתאם לטמפרטורת הלוח, ואת התדירות ניתן למצוא אם המכשיר מכויל, כלומר ידוע לאיזו תדירות מתאים קטע נתון של הספקטרום.



ציור 228



ציור 229

אם נסמן על ציר x את ערכי התדירות המתאימים לאמצע התחום Δv , ועל ציר y – את הערכים של צפיפות עוצמת הקרינה, נקבל שורת נקודות. נעביר דרכן קו רציף (ציור 229). העקומה מראה את פילוג האנרגיה בתחום הנראה של ספקטרום הפליטה של קשת ריתוך חשמלית.

מכשירים ספקטרליים

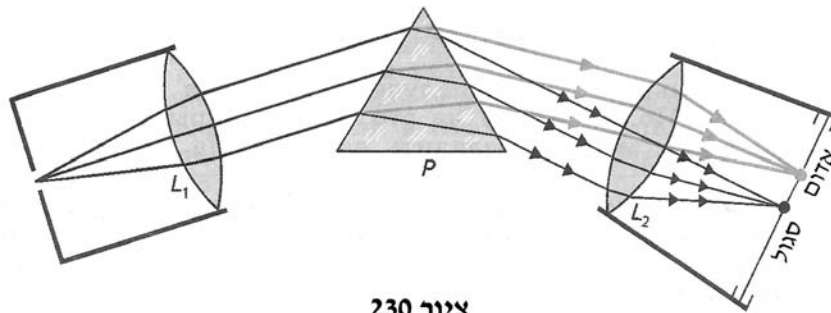
לחקירה מדוקדקת ומדויקת של הספקטרום אין די במכשירים פשוטים כחריץ צר וכמנסרה. דרושים מכשירים, היוצרים ספקטרום חד, כלומר מכשירים, המפרידים בצורה טובה את הגלים בעלי האורך השונה, ושאינם יוצרים חפיפה בתחומי ספקטרום שונים. מכשירים אלה מכונים **מכשירים ספקטרליים**. הרכיב העיקרי שלהם הוא מנסרה או סריג עקיפה.

נבין את מבנהו של המכשיר הספקטרלי, המבוסס-מנסרה (ציור 230). תחילה מגיעה הקרינה הנחקרת לחלק של המכשיר המכונה **קולימטור** – צינור שבקצה אחד שלו נמצא מסך עם חריץ צר, ובקצה האחר – עדשה מרכזת L_1 . החריץ נמצא במרחק המוקד מהעדשה, ולכן אלומת האור המתבדרת, היוצאת מהחריץ ופוגעת



בעדשה, יוצאת מהעדשה כאלומה מקבילה ופוגעת במנסרה P.

מכיוון שלתדירויות שונות מתאימים מקדמי שבירה שונים, יוצאות מהמנסרה בכיוונים שונים אלומות אור מקבילות, הפוגעות בעדשה L_2 . במרחק המוקד מהעדשה מציבים מסך, זכוכית מט או לוח צילום. העדשה L_2 מרכזת את האלומות המקבילות על המסך, ובמקום דמות אחת של החריץ מתקבלת שורת דמויות. לכל תדירות (ליתר דיוק: לכל תחום תדירויות צר) מתאימה דמות שלה, וכל הדמויות יחד יוצרות ספקטרום.



ציור 230

המכשיר המתואר מכונה **ספקטרוגרף**. אם במקום העדשה השנייה משתמשים בעינית כדי לצפות בספקטרום ישירות בעין, מכונה המכשיר **ספקטרוסקופ**. את המנסרות ואת החלקים האחרים של מכשירים ספקטראליים מייצרים מזכוכית, אך גם מחומרים שקופים אחרים, כמו קוורץ, מלח שולחן ואחרים, כדי להקטין את בליעת הקרינה הנבדקת בתוך הרכיבים.

הכרתם גודל פיזיקלי חדש: **הצפיפות הספקטרלית של עוצמת הקרינה**. למדתם כיצד מודדים אותה, ומהם מרכיביו של המכשיר הספקטראלי.

?

1. תארו את מבנה המכשיר הספקטראלי שבו, במקום המנסרה, משתמשים בסריג עקיפה.
2. לשם מה חוקרים את התכולה הספקטרלית של הקרינה (אם אינכם יודעים, תקראו על כך בסעיפים הבאים)?

סוגי קרינה

התכולה הספקטרלית של קרינה מגוונת מאוד; אולם ניתן לחלק את כל סוגי הספקטרום, כפי שמראה הניסיון, לארבעה סוגים.

הספקטרום הרציף

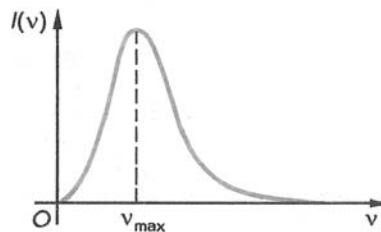
הספקטרום של השמש או של פנס הוא רציף, כלומר מיוצגים בו כל אורכי הגל. בספקטרום אין "שטחים מתים", ועל מסך הספקטרוגרף ניתן לראות פס צבעוני רצוף (איור V בעמוד הצבעוני).

פילוג האנרגיה לפי התדירויות, כלומר הצפיפות הספקטרלית של עוצמת הקרינה, שונה בגופים שונים. לדוגמה: גוף בעל משטח שחור מאוד מקרין גלים אלקטרומגנטיים בכל התדירויות, אולם לעקומת תלות הצפיפות הספקטרלית של עוצמת הקרינה בתדירות קיים מקסימום בתדירות מסוימת v_{max} (ציור 231). אנרגיית הקרינה בתדירויות קטנות מאוד ($v \rightarrow 0$) וגדולות מאוד ($v \rightarrow \infty$) היא זניחה. כאשר הטמפרטורה עולה, אז מיקום המקסימום של הצפיפות הספקטרלית של עוצמת הקרינה לכיוון הגלים הקצרים.

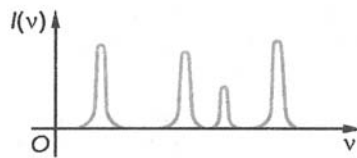
כפי שמלמד הניסיון, את הספקטרום הרציף יוצרים גופים, הנמצאים במצב צבירה מוצק או נוזלי, וגם גזים, הנמצאים בלחץ גבוה מאוד. כדי לקבל ספקטרום רציף יש לחמם את הגוף לטמפרטורה גבוהה.

צורת הספקטרום הרציף ועצם קיומו תלויים לא רק בתכונות האטומים הפולטים, אלא באופן הפעולה ההדדית שבין האטומים.

את הספקטרום הרציף יוצרת פלסמה בטמפרטורה גבוהה. גלים אלקטרומגנטיים נפלטים על-ידי פלסמה בעיקר במהלך ההתנגשויות בין האלקטרונים ליונים.



ציור 231



ציור 232

הספקטרום הקווי

נכניס לתוך להבת אש חתיכת אסבסט, הטבולה בתמיסת מלח שולחן רגיל, ונתבונן בלהבה דרך הספקטרוסקופ. נבחין אז בקו צהוב בהיר על רקע של ספקטרום רציף חלש מאוד (איור 2V בדפים הצבעוניים). את הקו הצהוב הזה יוצרים אדי נתרן, הנוצרים במהלך פירוק של מלח השולחן בתוך הלהבה. בציור הצבעוני רואים גם את הספקטרום של המימן ושל ההליום. כל אחד מהם מורכב מאוסף קווים בודדים צבעוניים בעלי בהירות שונה, המופרדים בפסים כהים רחבים. אלה הם סוגי ספקטרום המכונים **ספקטרום קווי**. משמעות הספקטרום הקווי היא שהחומר פולט אור בעל אורכי גל מאוד מסוימים (ליתר דיוק: אור בתחומים צרים מאוד של אורכי גל). בציור 232 ניתן לראות דוגמה לפילוג צפיפות עוצמת הקרינה בספקטרום קווי. כל קו הוא בעל רוחב סופי.

ספקטרום קווי אופייני לכל החומרים במצב של גז אטומי (אולם לא מולקולרי). במקרה זה פולטים אור אטומים, שלמעשה אינם פועלים זה על זה. זהו סוג הספקטרום הבסיסי ביותר. **אטומים בודדים פולטים אור בעל אורכי גל מוגדרים מאוד**.

כדי לצפות בספקטרום קווי משתמשים בקרינת אדי החומר בלהבת אש או בזריחת התפרקות חשמלית של גז בתוך שפופרת, המלאה בגז זה.

כאשר צפיפות הגז החד-אטומי עולה, מתרחבים הקווים הספקטראליים הבודדים, ולבסוף, בתנאי לחץ גבוה, כאשר השפעת האטומים זה על זה משמעותית, הקווים חופפים, והספקטרום הופך לרציף.

ספקטרום פסים

ספקטרום פסים מורכב מפסים בודדים, המופרדים באזורים כהים. באמצעות מכשיר ספקטראלי רגיש מאוד ניתן לראות, שכל פס מורכב מאוסף של קווים בודדים צפופים מאוד. להבדיל מספקטרום קווי, נוצר ספקטרום הפסים לא על-ידי אטומים, אלא על-ידי פליטת אור ממולקולות חופשיות או הקשורות בקשר חלש זו עם זו.

כדי לצפות בספקטרום של מולקולות משתמשים באותן שיטות בהן צופים בספקטרום הקווי: הכנסת הדגם ללהבת אש או התפרקות חשמלית בשפופרת המלאה בגז הנבדק.

ספקטרום בליעה

כל החומרים, שהאטומים שלהם נמצאים במצב מעורר, פולטים גלי אור. האנרגיה שלהם מפולגת באופן שונה בין אורכי גל שונים. בליעת אור בחומר תלויה גם היא באורך הגל. כך מעבירה זכוכית אדומה גלים בעלי אורך גל המתאים לאור האדום ($\lambda \approx 8 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$), ובולעת את כל היתר.

אם נעביר אור לבן דרך גז קר, שאינו פולט קרינה, יופיעו ברקע של הספקטרום הרציף של המקור קווים כהים (איורים 5V–8V). גז קר בולע באופן חזק ביותר את האור בעל אותם אורכי גל, שהוא פולט במצב חם מאוד. הקווים הכהים ברקע של הספקטרום הרציף הם קווי בליעה, היוצרים יחד את **ספקטרום הבליעה**.

הכרנו את הספקטרום הרציף, את הספקטרום הקווי, את ספקטרום הפסים ואת סוגי ספקטרום הבליעה.

?

1. האם ספקטרום של נורת להט הוא רציף?
2. מה ההבדל העיקרי בין ספקטרום קווי לבין ספקטרום רציף?

§84 אנליזה ספקטרלית

לספקטרום קווי חשיבות מיוחדת, מכיוון שמבנהו הוא תולדה של מבנה האטום: הרי ספקטרום זה נוצר על-ידי אטומים, שאין גורם חיצוני משפיע על קרינתם; לכן ההיכרות עם הספקטרום הקווי היא צעד ראשון ללימוד מבנה האטום. באמצעות הצפייה בספקטרום קווי הזדמן למדענים "להציץ" לתוך האטום, וכך נוגעת האופטיקה במישרין בפיזיקה האטומית.

התכונה העיקרית של הספקטרום הקווי היא העובדה, שאורכי הגל (או תדירויות הגל) של הספקטרום הקווי אינם תלויים כלל בשיטת עירור הקרינה של האטומים. האטומים של יסוד כימי יוצרים ספקטרום, שאינו דומה לספקטרום של יסוד אחר; הם פולטים מגוון אורכי גל מוגדר מאוד.

זהו הבסיס לאנליזה ספקטרלית: שיטת גילוי של ההרכב הכימי של החומר על-פי הספקטרום. בדומה לטביעת אצבעות של אדם, כך ייחודי הספקטרום הקווי לכל סוג חומר. הייחודיות של תוואי הקווים שעל עור אצבעות אדם מסייעת לזיהוי,

סוגי הספקטרום

ובדומה לכך אפשר לזהות את ההרכב הכימי של החומר הודות לייחודית של הספקטרום שלו. באמצעות האנליזה הספקטרלית ניתן לגלות יסוד נתון בחומר מורכב – אפילו אם מסתו אינה עולה על 10^{-8} g. השיטה רגישה אפוא מאוד.

אנליזה כמותית של הרכב החומר על-פי הספקטרום קשה מאוד, מכיוון שבהירות הקווים הספקטראליים תלויה לא רק במסת החומר, אלא גם בשיטת עירור הקרינה. כך בטמפרטורות נמוכות לא מתגלים כלל קווים ספקטראליים רבים; אולם הקפדה על תנאים סטנדרטיים של עירור הקרינה מאפשרת לבצע גם אנליזה ספקטרלית כמותית.

כיום ידועים קווי הספקטרום של כל האטומים שבנמצא, וקיימות טבלאות המכילות את רובם. באמצעות האנליזה הספקטרלית התגלו יסודות חדשים רבים: רובידיום, צזיום ועוד. לעתים קרובות נתנו ליסודות שמות בהתאם לצבע קווי הספקטרום החזקים ביותר: לרובידיום יש קווים חזקים בצבע אדום-כהה (בצבע של אבן החן רובי). משמעותה של המילה "צזיום" היא: תכלת שמים, וזהו הצבע של הקווים הספקטראליים העיקריים של יסוד זה.

בעזרת האנליזה הספקטרלית גילו את ההרכב הכימי של השמש והכוכבים. שיטות גילוי אחרות במרחבי גלקסיה אינן שימושיות כלל. הסתבר שכוכבים מורכבים מאותם יסודות כימיים שנמצאים בכדור הארץ.

ומעניין: את ההליום מצאו תחילה באטמוספרת השמש, ורק לאחר מכן גילו אותו באטמוספרה של כדור הארץ. שם היסוד הזה מזכיר את ההיסטוריה של גילוי: המילה "הליום", משמעה: שמש.

הודות לפשטותה היחסית ולאוניברסליות שלה האנליזה הספקטרלית היא השיטה העיקרית לבדיקות הרכב החומרים בתעשיית המתכת, בהנדסת המכונות ובתעשיית הגרעין. בעזרת האנליזה הספקטרלית מגלים את הרכבם הכימי של עפרות ומינרלים.

הרכבן של תערובות אורגניות מורכבות נלמד על-פי הספקטרום המולקולרי שלהן.

את האנליזה הספקטרלית אפשר לבצע לא רק על-פי ספקטרום הפליטה, אלא

גם על-פי ספקטרום הבליעה. קווי הבליעה בספקטרום של השמש והכוכבים – הם שמאפשרים לחקור את הרכבם הכימי של הגופים הקוסמיים האלה. פני השטח הבהירים של השמש, המכונים **פוטוספירה**, פולטים ספקטרום רציף. האטמוספירה של השמש בולעת אורכי גל מסוימים של הקרינה הזאת, וכך מופיעים קווי בליעה על רקע הספקטרום הרציף של הפוטוספירה.

אולם גם האטמוספירה של השמש פולטת אור. במהלך ליקוי חמה, כאשר הירח מסתיר את השמש, מתרחש "היפוך" קווי הספקטרום: במקום קווי בליעה בספקטרום של השמש נדלקים קווי פליטה.

בתחום האסטרופיזיקה משתמשים באנליזה ספקטרלית לא רק לגילוי ההרכב הכימי של כוכבים, ענני גז וכדומה, אלא גם למציאת ערכים פיזיקליים אחרים של הגופים האלה, כמו טמפרטורה, לחץ, מהירות, עוצמת שדה מגנטי וכדומה.

חשוב לדעת ממה מורכבים הגופים שסובבים אותנו, ולשם כך פיתחו שיטות רבות; אולם את הרכב הכוכבים אפשר ללמוד באמצעות האנליזה הספקטרלית בלבד.

?

1. אילו פעולות יש לבצע עם גרגיר חומר על מנת לגלות את הרכבו הכימי

באמצעות אנליזה ספקטרלית?

2. מה מתגלה על-פי קווי הבליעה בספקטרום של השמש: הרכב

האטמוספירה או הרכב השכבות הפנימיות של השמש?

§85 קרינה אינפרה-אדומה ואולטרה-סגולה

הקרינה הנראית (האור) אינה מכסה את כל גוני הקרינה האפשריים. בצדי הקרינה הנראית שוכנים אזורים של קרינה אינפרה-אדומה ואולטרה-סגולה.

קרינה אינפרה-אדומה

נחזור לניסוי של חקירת התפלגות האנרגיה בספקטרום של קשת, הנוצרת בהתפרקות חשמלית, כמתואר בסעיף 82. כאשר מזיזים את הלוח המושחר – החלק הרגיש של המכשיר – לקצה האדום של הספקטרום, מגלים עליית טמפרטורה. אם נזיז את הלוח מעבר לקצה האדום של הספקטרום, שם אין העין מבחינה באור, מתחמם הלוח עוד יותר. הגלים האלקטרומגנטיים, הגורמים להתחממות זו,

סוגי הספקטרום

מכונים גלים **אינפרה-אדומים**, ואותם פולט כל גוף חם גם כשאנו מקרין אור נראה. לדוגמה: תנור חימום בבית פולט גלים אינפרה-אדומים, הגורמים להתחממות משמעותית של הגופים סביבו. לכן מכנים לעתים גלים אינפרה-אדומים בשם **גלי חום**.

אורכי הגל של קרינה בלתי נראית זו גדולים יותר מאורך הגל של האור האדום. מרב האנרגיה, הנפלטת ממנורת חשמל, היא באמצעות קרניים אינפרה-אדומות – ולא דווקא בקרינת אור נראה.

בקרינה אינפרה-אדומה משתמשים לייבוש ציפויים ולייבוש פרות וירקות; מכשירי חימום פולטים קרינה זו, ועוד. פותחו מכשירים, שהופכים את דמות הגופים באור אינפרה-אדום לתמונה באור הנראה, וכך מאפשרות משקפות וכְּוונות אופטיות צבאיות לראות בחושך מוחלט.

קרינה אולטרה-סגולה

גם מעבר לקצה הסגול של הספקטרום מגלה הלוח המושחר של המכשיר למדידת צפיפות האנרגיה טמפרטורה גבוהה יותר, אך אין היא משמעותית. גלים אלקטרומגנטיים, בעלי אורך גל קצר מזה של האור הסגול, מכונים **גלים אולטרה-סגוליים**.

אפשר לגלות את הקרינה האולטרה-סגולה באמצעות מסך, המצופה בחומר פלואורסצנטי: המסך מתחיל להקרין אור בחלקו של הספקטרום, שבו מתרכזות הקרניים, הנמצאות מעבר לקצה הסגול של הספקטרום.

קרינה אולטרה-סגולה מתאפיינת בפעילות כימית גבוהה. רגישות מוגברת לאור אולטרה-סגול קיימת בשכבה רגישה של סרט צילום.

קרניים אולטרה-סגולות אינן נראות לעין, ולכן אינן יוצרות דמות גלויה על רשתית העין; אולם השפעתן על עור האדם ועל רשתית העין רבה והרסנית. קרינה אולטרה-סגולה של השמש אינה נבלעת מספיק בשכבות הגבוהות של האטמוספירה, ולכן אין לשהות זמן רב בפסגות ההרים ללא ביגוד, המכסה את כל חלקי העור, וללא משקפי שמש. משקפי זכוכית, השקופים לאור הנראה, מגינים על העיניים מפני קרינה אולטרה-סגולה, מכיוון שהזכוכית בולעת אותה.

לעומת זאת, לקרינה אולטרה-סגולה במינון נמוך השפעה רפואית טובה: כמות



קטנה של קרינה מסייעת ביצירת ויטמין D, ויש לה השפעה טובה גם על מערכת העצבים המרכזית ועל שורה של תהליכים ביוכימיים מועילים אחרים.

לקרניים אולטרה-סגולות תכונות חיטוי חזקות: הקרינה משבשת את תהליכי החיים של חיידקים, ומשום כך נמצאת ביישום רחב במכשירים רפואיים שונים.

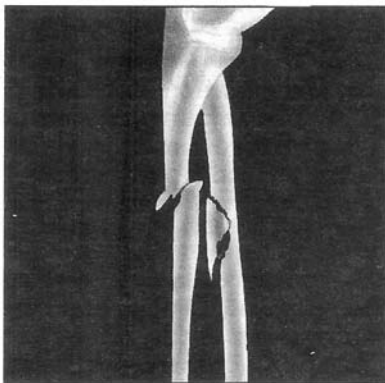
גוף מחומם מקרין בעיקר קרינה אינפרה-אדומה בעלת אורכי גל ארוכים מאלה של האור הנראה. לקרינה אולטרה-סגולה אורכי גל קצרים מאלה של האור הנראה, והיא מתאפיינת בפעילות כימית גבוהה.

?

1. מדוע אור שמש, החודר דרך זכוכית החלון, אינו גורם לשיזוף?
2. האם אתם מכירים מקור אור אולטרה-סגול כלשהו? אם כן, תארו אותו.

§86 קרני רנטגן

ייתכן שלא כולם שמעו על קרניים אינפרה-אדומות ואולטרה-סגולות, אולם כולם בוודאי יודעים על קיומן של קרני רנטגן. קרני הפלא האלה חודרות דרך גופים, האטומים לאור רגיל.



ציור 233

בליעת קרני רנטגן פרופורציונית לצפיפות החומר. באמצעות קרני רנטגן ניתן להפיק צילומים של איברים פנימיים שבגוף האדם. בצילומים אלה רואים היטב את עצמות השלד (ציור 233) ואת האזורים, שבהם ניזוקו או השתנו רקמות רכות.

גילוי קרני רנטגן

קרני רנטגן התגלו בשנת 1895 על-ידי הפיזיקאי הגרמני **וילהלם רנטגן**. רנטגן ידע להבחין בחידוש שבגילוי, כאשר אחרים לפניו לא מצאו בו כל עניין.

בשלהי המאה ה-19 הוסבה תשומת לבם של הפיזיקאים להתפרקות חשמלית של גז, הנמצא בלחץ נמוך. בתנאים אלה נוצרו בשפופרת שבה נערך הניסוי זרמי אלקטרונים מהירים מאוד, שכוננו אז **קרני קתודה**. מהותן של קרניים אלה נסתרה

סוגי הספקטרום

היתה מהפיזיקאים באותה תקופה – מלבד ההבנה שמקורם בקתודה של השפופרת.

וילהלם רנטגן (1845-1923)



מדען גרמני. בשנת 1895 גילה קרינה אלקטרומגנטית בעלת אורכי גל קצרים מאוד: "קרני רנטגן". גילוי השפיע רבות על פיתוח כל ענפי הפיזיקה, ובין היתר הוביל לגילוי תופעת הרדיואקטיביות. לרנטגן הוענק פרס נובל הראשון בפיזיקה. רנטגן סייע להחדרת המצאתו לרפואה. המבנה של שפופרת הרנטגן, שפותח על-ידיו, נשמר במבנהו העירוני עד ליום זה.

רנטגן חקר את קרני הקתודה, ובמהרה שם לב שלוח צילום, הנמצא ליד השפופרת, השחיר גם כאשר היה עטוף בנייר שחור. הוא צפה בתופעה נוספת שהדהימה אותו: מסך נייר, הטבול בתמיסת בריום מסוימת שעטף את השפופרת, זהר באור ירקרק. כאשר חצץ **רנטגן** בכף ידו בין השפופרת לבין המסך, נראו על המסך צללים כהים של עצמות כף היד על רקע בהיר של מתווה כף היד.

המדען הבין שבמהלך עבודתה של שפופרת ההתפרקות נוצרת קרינה, שאינה מוכרת ובעלת כושר חדירה גבוה. הוא כינה קרינה זו בשם "קרני-X". ברבות הימים כונתה קרינה זו: "קרני רנטגן".

רנטגן גילה שקרינה חדשה נוצרה במקום שבו קרני קתודה (זרמי אלקטרונים מהירים) פגעו במעטפת הזכוכית של השפופרת. במקום זה הקרינה הזכוכית אור ירוק.

הניסויים הבאים גילו שקרני-X נוצרים במהלך בלימת אלקטרונים מהירים במחסום כלשהו, ובפרט באלקטרודות מתכת.

תכונות קרני רנטגן

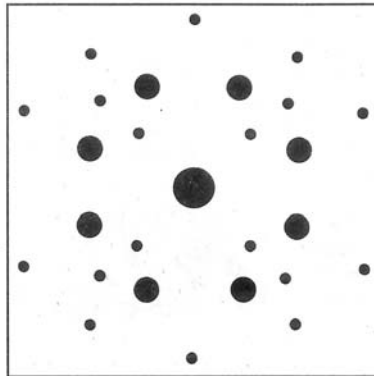
הקרניים שהתגלו על-ידי **רנטגן** השפיעו על לוח צילום, גרמו ליינון האוויר – אולם לא הוחזרו באופן משמעותי מחומרים כלשהם, ולא עברו שבירה. שדה אלקטרומגנטי לא השפיע כלל על כיוון התקדמותן.

הסברה היתה שקרני רנטגן הן גלים אלקטרומגנטיים, הנפלטים במהלך בלימה בבת-אחת של אלקטרונים. בשונה מגלי אור שבתחום הנראה של הספקטרום

ומגלים אולטרה-סגולים, לגלי רנטגן אורך גל קצר בהרבה, וקטן יותר עבור האלקטרונים בעלי אנרגיה גבוהה יותר המתנגשים במחסום. כושר החדירות הגבוה של קרני הרנטגן ותכונותיהן האחרות הובילו להשערה בדבר אורך הגל הקטן, אולם השערה זו זקוקה היתה להוכחה, וזו התקבלו 15 שנה לאחר מותו של רנטגן.

העקיפה של קרני רנטגן

אם קרינת רנטגן היא גלים אלקטרומגנטיים, צריכה להיראות תופעת העקיפה המשותפת לכל סוגי הגלים. תחילה העבירו קרני רנטגן דרך חריצים צרים מאוד בלוח עופרת, אולם מאום לא הזכיר את העקיפה. המדען הגרמני **מקס בורן** הניח, שאורך הגל של קרני רנטגן קטן מדי מכדי לגלות את העקיפה על מחסומים מלאכותיים כאלה: הרי אי-אפשר ליצור חריץ שרוחבו כ- 10^{-8} cm, כגודלו של האטום עצמו! האם אכן אורך הגל של קרני רנטגן בסדר גודל זה? נותרה דרך אחת להיווכח בכך: להשתמש בגבישים, המהווים מבנים מסודרים, שבהם שווים המרחקים בין אטומים בודדים לסדר הגודל של האטומים עצמם: 10^{-8} cm. גביש בעל מבנה מחזורי הוא המכשיר הטבעי, שבהכרח היה גורם לעקיפה של גלים בעלי אורך גל הקרוב לגודל האטומים.



ציור 234

אלומת קרני רנטגן צרה הופנתה אפוא לכיוון הגביש, שמאחוריו הוצב לוח צילום, והתוצאה תאמה לכל הציפיות האופטימיות: עם כתם מרכזי גדול, שנוצר על ידי הקרניים שהתקדמו בקו ישר, הופיעו כתמים קטנים, המסודרים סביבו (ציור 234). את הופעתם של הכתמים האלה אפשר היה להסביר על-ידי העקיפה של קרני רנטגן במבנה גבישי מסודר בלבד.

לימוד תבנית העקיפה אפשר לגלות את אורך הגל של קרני רנטגן. הסתבר שהוא קטן יותר מאורך גל של קרינה אולטרה-סגולה, ואכן בסדר גודל השווה לגודל האטום.

יישום קרני רנטגן

לקרני הרנטגן נמצאו שימושים מעשיים רבים מאוד.

ברפואה משתמשים בהם לאבחון מחלות, ולפני פיתוח אמצעים יעילים יותר השתמשו בהן לריפוי מחלת הסרטן.

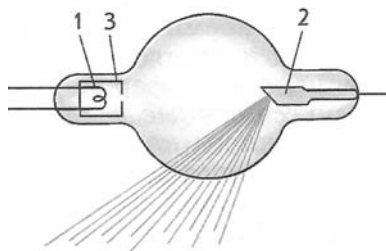
שימוש רחב מאוד בקרני רנטגן קיים במחקר מדעי: על-פי תבנית העקיפה, הנוצרת במהלך העברת קרני רנטגן דרך גביש, מצליחים לשחזר את סדר האטומים במרחב, כלומר את מבנה הגביש. הסתבר שלא קשה לעשות זאת בגבישים לא אורגניים. באמצעות אנליזה, המבוססת על פיזור קרני רנטגן, הצליחו לפענח את המבנה של תרכובות אורגניות מורכבות ביותר, כולל חלבונים. לדוגמה: פוענח המבנה המולקולרי של ההמוגלובין, המכיל עשרות אלפי אטומים.

הישגים אלה התאפשרו הודות לעובדה, שאורך הגל של קרני רנטגן קטן מאוד. כך ניתן היה "לראות" מבנים מולקולריים ולקבל תבניות עקיפה, שבעזרתן הצליחו לפענח את המבנה המרחבי של האטומים.

מהשימושים האחרים של קרני רנטגן נזכיר את גילוי הפגמים הפנימיים בתוך גופים מוצקים: סדקים פנימיים במסילות רכבת, חללים בגופי מכונות, מטוסים וכדומה. גילוי זה של פגמים פנימיים באמצעות קרני רנטגן מתבסס על שינוי בשיעור בליעת הקרינה בגוף, כאשר נמצאים בתוכו חללים ריקים או זיהומים.

מבנה שפופרת רנטגן

את קרני הרנטגן יוצרים במכשירים משוכללים המכונים **שפופרות רנטגן**.
בציור 235 מתוארת סכימה של שפופרת רנטגן אלקטרונית. קתודה 1 היא ספירלה מוולפרם, הפולטת אלקטרונים כשהיא בטמפרטורה גבוהה; גליל 3 ממקד את זרם האלקטרונים; ובהמשך דרכם הם מתנגשים באלקטרודה מתכתית (אנודה) 2; וההתנגשות מלווה בהיווצרותן של קרני רנטגן. המתח בין האנודה לקתודה מגיע לכמה עשרות קילוולטים. בשפופרת יוצרים ריק גבוה, ולחץ הגז בה אינו עולה על 10^{-5} mm Hg.



ציור 235

בשפופרות רנטגן חזקות מקררים את האנודה בזרם מים, מכיוון שבלימת האלקטרונים מתלווה בפליטת כמות חום ניכרת. רק כ- 3% מאנרגיית האלקטרונים מותרת לקרינת רנטגן.

אורכי הגל של קרני רנטגן הם בתחום $10^{-9} - 10^{-10}$ m. לקרני רנטגן כושר חדירות גבוה מאוד, והן בשימוש ברפואה, בתעשייה ובמחקר (חקירת מבנה הגבישים ומבן של מולקולות אורגניות מורכבות).

?

1. כיצד בנויה שפופרת רנטגן?
2. מדוע קשה לייצר מיקרוסקופ רנטגני?

§87 ספקטרום של קרינה אלקטרומגנטית

אנו יודעים כבר שלגלים אלקטרומגנטיים אורכי גל שונים מאוד: מערכים בסדר גודל של 10^3 m (גלי רדיו) עד ל- 10^{-10} m (קרני רנטגן); וכי האור הנראה מהווה חלק זעיר מהספקטרום הרחב של הגלים האלקטרומגנטיים. בחקירת חלק זעיר זה של הספקטרום התגלו סוגי קרינה אחרים בעלי תכונות ייחודיות.

בצדדים הפנימיים של כריכת ספר זה מתואר ספקטרום מלא של גלים אלקטרומגנטיים. צוינו בו אורכי גל ותדירויות של סוגי קרינה שונים, וכן המכשירים שבאמצעותם יוצרים גלים אלקטרומגנטיים בתחומים השונים של הספקטרום.

מקובל הסיווג: קרינה בתדירות נמוכה, קרינת רדיו, קרניים אינפרה-אדומות, האור הנראה, קרניים אולטרה-סגולות, קרני רנטגן וקרני γ . את כל סוגי הקרינה האלה – מלבד קרני γ – אתם מכירים. את קרינת ה- γ , בעלת אורך גל קצר ביותר, פולטים גרעיני האטום.

אין הבדל עקרוני בין סוגי קרינה שונים: כולם גלים אלקטרומגנטיים, הנוצרים



על-ידי חלקיקים טעונים. ככלל מתגלים גלים אלקטרומגנטיים גם על-פי השפעתם על חלקיקים טעונים, וכל הגלים מתקדמים בריק במהירות 300,000 ק"מ לשנייה. אם כך, שרירותיים הם הגבולות בין תחומי הספקטרום השונים.

סוגי קרינה שונים נבדלים זה מזה לפי מקורות ייצורם (קרינה מאנטנה, קרינה תרמית, קרינה במהלך בלימת אלקטרונים מהירים וכדומה), ולפי אמצעי הקליטה שלהם.

כל סוגי הקרינה האלקטרומגנטית נוצרים גם על-ידי גופים קוסמיים, ונחקרים באמצעות לוויינים של כדור הארץ וספינות חלל. בעיקר נחקרות קרינת רנטגן וקרינת- γ , הנבלעות היטב באטמוספירה. ההבדלים באורכי הגל מלווים בהבדלים מהותיים בתכונות הגלים.

סוגי קרינה בעלי אורכי גל שונים נבדלים מאוד זה מזה על-פי אופי בליעתם בחומר. קרינה בעלת אורך גל קצר (קרינת רנטגן, ובעיקר קרינת γ) נבלעת באורח חלקי.

החומרים, האטומים לאור הנראה, שקופים הם לסוגי הקרינה האלה. המקדם של הגלים האלקטרומגנטיים מחומרים אלה תלוי גם הוא באורך הגל.

אולם ההבדל העיקרי בין הקרינה בעלת אורכי גל קצרים לבין הקרינה בעלת אורכי גל ארוכים הוא בכך, שלקרינה הראשונה תכונות רבות כתכונות המודל החלקיקי של הקרינה. על כך ידובר בפרק "קוונטים של אור".

?

1. באילו אמצעים קולטים גלי רדיו קרינה אופטית וקרינת רנטגן?
2. בעזרת האיורים שעל עמודי הכריכה הפנימיים ציינו את התחומים של סוגי הקרינה השונים.

תקציר פרק 10

1. אור נפלט על-ידי חלקיקים טעונים – הם האלקטרונים הנעים בתוך האטומים. האטום יוכל להקרין אור, אם יקבל אנרגיה ממקור חיצוני. מקורות האור התרמיים הם הנפוצים ביותר: השמש, נורות להט חשמליות, אש וכו'.
2. האפיון החשוב ביותר של קרינה הוא התפלגות האנרגיה לפי התדירויות או לפי אורכי הגל. חלוקה זו מתאפיינת על-ידי הצפיפות הספקטרלית של עוצמת הקרינה.
3. את הספקטרום של הקרינה חוקרים באמצעות מכשירים ספקטרליים. הרכיב העיקרי של המכשיר הספקטרלי הוא מנסרה או סריג עקיפה.
4. הקרינה, הנפלטת על-ידי גופים מוצקים או נוזלים, וכן על-ידי פלסמה הנמצאת בטמפרטורה גבוהה, היא בעלת ספקטרום רציף, ובו מיוצגים בעוצמות שונות אורכי הגל השונים.
- הקרינה, הנפלטת על-ידי חומר במצב של גז אטומי, היא בעלת ספקטרום קווי. אורכי הגל של ספקטרום אטומי תלויים בתכונות האטומים בלבד, ואינם תלויים בשיטת העירור שלהם. על העובדה הזאת מבוססת אנליזה ספקטרלית.
- הספקטרום של הקרינה, הנפלטת על-ידי מולקולות, מכיל פסים בהירים המופרדים באזורים כהים. ספקטרום זה מכונה **ספקטרום פסים**.
5. מידת הבליעה של האור על-ידי חומר תלויה באורך הגל. חומר בולע היטב אור בעל אותם אורכי גל, שהוא פולט במצב חם מאוד. על-פי קווי הבליעה מגלים את ההרכב הכימי של השמש והכוכבים.
6. גלים אלקטרומגנטיים בעלי אורכי גל מ- $4 \cdot 10^{-7}$ עד ל- $8 \cdot 10^{-7}$ m הם התחום הנראה. קרינה בעלת אורכי גל ארוכים יותר מאור אדום ($8 \cdot 10^{-7}$ m) מכונה **אינפרא-אדומה**. את הקרניים האינפרא-אדומות פולט כל גוף חם. גלים אלקטרומגנטיים בעלי אורכי גל הקצרים מ- $4 \cdot 10^{-7}$ m מכונים **אור**

אולטרה-סגול. אור זה מתאפיין בפעילות כימית מוגברת.

7. אורך גל קצר עוד יותר יש לקרני רנטגן: בסדר גודל של אטום. קרני רנטגן נוצרות במהלך בלימה בבת-אחת של אלקטרונים, שעברו קודם מתח מאיץ של כמה קילוולטים. קרניים אלה נבלעות מעט בחומר. משתמשים בהן ברפואה, (אבחון וריפוי בהקרנות), בתעשייה (גילוי פגמים פנימיים) ובמחקר מדעי.
8. הספקטרום של גלים אלקטרומגנטיים משתרע מגלי רדיו ארוכים ($\lambda > 1 \text{ km}$) ועד לגלי קרינת גמא ($\lambda < 10^{-10} \text{ m}$). את הגלים האלקטרומגנטיים מחלקים באופן שרירותי לתחומים לפי סימנים שונים (שיטת הפליטה, שיטת הקליטה, השפעה על חומר). ההבדלים באורכי גל גורמים להבדלים מהותיים ביניהם. לקרינה בעלת אורך גל קצר תכונות רבות כאלה של המודל החלקיקי.

פיזיקת הקוונטים

המהפכה הגדולה בפיזיקה החלה עם תחילת המאה ה-20. עד אז לא צלחו הנסיונות להסביר את התפלגות האנרגיה בספקטרום הקרינה התרמית (ציור 231). חוקי האלקטרומגנטיות של **מקסוול**, שנבדקו ואומתו בניסויים כה רבים, "סירבו לעבוד", כאשר ניסו ליישםם לגבי פליטת גלים אלקטרומגנטיים בעלי אורך גל קצר, והרי את עצם קיומם של הגלים האלקטרומגנטיים ניבאו המדענים על סמך חוקיו של **מקסוול**!

האלקטרו דינמיקה של **מקסוול** הובילה למסקנה חסרת היגיון: לפיה חייב גוף חם לאבד אנרגיה באופן מתמיד על-ידי פליטת גלים אלקטרומגנטיים, ועקב זאת להתקרר עד לאפס המוחלט. בהתאם לתיאוריה הקלאסית, שיווי-משקל תרמי בין חומר לבין קרינה הוא בלתי אפשרי, וניסיון יומיומי מראה שדבר כזה אינו קורה בפועל: גוף חם אינו מבזבז את כל האנרגיה בפליטת גלים אלקטרומגנטיים. בחיפוש מוצא מסתירה זו שבין התיאוריה לבין הניסיון הניח המדען הגרמני **מקס פלנק**, שאטומים פולטים את האנרגיה האלקטרומגנטית במנות בודדות המכונים **קוונטים**, ושהאנרגיה E של כל מנה פרופורציונית לתדירות ν של הקרינה:¹

$$E = h \nu$$

מקדם הפרופורציונליות h מכונה **קבוע פלנק**.

משמעותה של ההנחה של **פלנק** היא, שחוקי הפיזיקה הקלאסית אינם מתאימים לחלוטין לתופעות של עולם המיקרו.

התיאוריה של קרינה תרמית שפיתח **פלנק** התאימה לניסוי בצורה מושלמת. על-פי התפלגות האנרגיה לפי התדירויות שנצפתה בניסויים גילו את ערכו של **קבוע פלנק**:

$$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec}$$

בסעיף הבא נתאר תופעה פיזיקלית אחרת, שבאמצעותה ניתן למצוא את **קבוע פלנק**, אולם בשיטה פשוטה יותר.

¹ זוהי השנייה מבין הנוסחאות הפשוטות הגדולות של הפיזיקה (הראשונה היא: $E = mc^2$).

בעקבות הגילוי של **פלנק** החלה להתפתח תיאוריה פיזיקלית חדשה, עדכנית ומקיפה ביותר, המכונה **תורת הקוונטים**. פיתוחה נמשך עד היום הזה.

מקס פלנק (1858 – 1947)



פיזיקאי גרמני. אבי תורת הקוונטים – התורה החדשה של תנועות, פעולות והפיכות הדדיות של חלקיקי מיקרו. במאמר שפרסם בשנת 1900 מנתח **פלנק** את נושא הקרינה התרמית, הנמצאת בשיווי-משקל עם החומר. במאמר זה הניח **פלנק** לראשונה שאנרגיית האוסצילטור (מערכת המבצעת תנודות הרמוניות) איננה רציפה, ושערכיה האפשריים פרופורציוניים לתדירות התנודות. האנרגיה האלקטרומגנטית נפלטת על-ידי האוסצילטור במנות בודדות. **פלנק** תרם רבות לפיתוח תורת התרמודינמיקה.

פלנק מצא את דרך המוצא מהקשיים, שבהם נתקלה תורת הקרינה התרמית בסוף המאה ה-19. מחיר ההצלחה הזאת היה שלילת חוקי הפיזיקה הקלאסית בעולם המיקרו והקרינה.

פרק 11. קוונטים של אור

לחוקי הקוונטים מצייתים כל חלקיקי המיקרו; אולם לראשונה התגלו התכונות הקוונטיות של החומר בחקירת התופעה של פליטה ובליעה של אור.

§88 האפקט הפוטו-אלקטרי

צעד חשוב בפיתוח התיאוריה של האור נעשה במהלך חקר התופעה, שנגלתה על-ידי **הרץ** ונחקרה בהקפדה על-ידי המדען הרוסי **סטולטוב**. התופעה מכונה **האפקט הפוטו-אלקטרי**.

האפקט הפוטו-אלקטרי הוא עקירה של אלקטרונים מהחומר בהשפעת אור.

צפייה באפקט הפוטו-אלקטרי

כדי לגלות אפקט פוטו-אלקטרי אפשר להשתמש באלקטרוסקופ, שאליו מחובר לוח אבץ (ציור 236). אם נטען את הלוח במטען חיובי, ונאיר אותו בהארה חזקה – בנורת כספית, למשל, או בקשת חשמלית – לא יתפרק האלקטרוסקופ ממטענו; אולם אם נטען את הלוח במטען שלילי, תגרום אלומת אור חזקה להתפרקות מהירה של המכשיר.

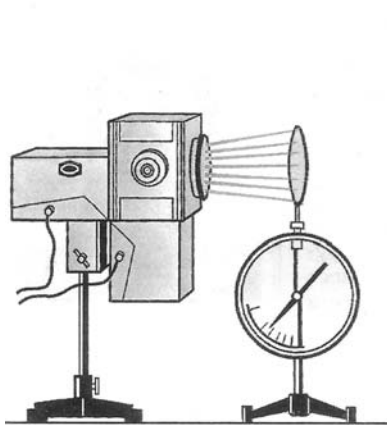
תורת הקוונטים. תופעה פוטו-אלקטריה

ניתן להסביר זאת באופן הבא: אור עוקר אלקטרונים ממשטח הלוח; כאשר המשטח טעון שלילית, משתחררים ממנו האלקטרונים, והאלקטרוסקופ נפרק ממטענו. כאשר הלוח טעון חיובית, אין האלקטרונים, העקורים על-ידי קרינת האור, מפחיתים ממטענו החיובי, אף נמשכים אל הלוח ומתיישבים עליו שוב, ומטען האלקטרוסקופ אינו משתנה.

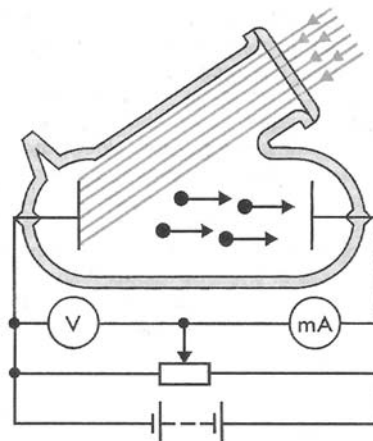
אולם כאשר מציבים בדרכו של האור זכוכית רגילה, אין הלוח הטעון שלילית מאבד את האלקטרונים גם כאשר עוצמת האור גבוהה מאוד. מכיוון שזכוכית בולעת קרינה אולטרה-סגולה, ניתן להסיק מניסוי זה שהאור האולטרה-סגול – הוא שגורם לאפקט הפוטו-אלקטרי. אי-אפשר להסביר עובדה ניסויית ופשוטה זו בהתבסס על המודל של אור כגלים: לא ברור מדוע גלי אור בעלי תדירות נמוכה אינם יכולים לעקור את האלקטרונים – אף אם משרעת הגל גדולה, ובהתאם לכך סביר היה שיגדל הכוח הפועל על האלקטרונים.

חוקי האפקט הפוטו-אלקטרי

כדי לקבל תמונה מלאה יותר של האפקט הפוטו-אלקטרי, יש לברר במה תלויה כמות האלקטרונים, הנעקרים על-ידי האור ממשטח החומר (פוטו-אלקטרונים), ומה קובע את מהירות פליטתם או את מידת האנרגיה הקינטית האצורה בהם. לשם כך ערכו ניסויים רבים באמצעות שפופרת זכוכית מרוקנת מאוויר, שמתקינים בה שתי אלקטרודות (ציור 237).



ציור 236



ציור 237

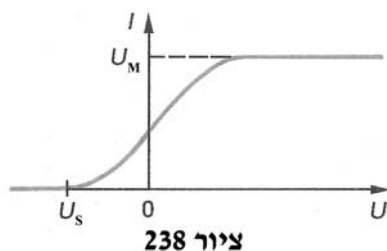
חורח הקוונטים. חופעה פוטו-אלקטריה

אחת האלקטרודות מוארת באור, העובר לתוך השפופרת מבעד לחלון מקוורץ, המעביר אור נראה וגם קרינה אולטרה-סגולה. על האלקטרודות מפילים מתח, הניתן לשינוי באמצעות נגד משתנה הנמדד באמצעות וולטמטר. לאלקטרודה המוארת מחברים את הקצה השלילי של הסוללה. בהשפעת האור פולטת האלקטרודה אלקטרונים, ובתנועתם בשדה החשמלי מהווים אלה זרם חשמל. כאשר המתח נמוך, לא כל האלקטרונים מגיעים לאלקטרודה השנייה. אם נגביר את הפרש הפוטנציאלים בין האלקטרודות עבור עוצמת אור קבועה, תעלה עוצמת הזרם, ועבור מתח מסוים תגיע לערך מרבי ותפסיק לגדול – אף אם נגביר עוד את המתח (ציור 238). הערך המרבי של עוצמת הזרם I_M מכונה **זרם הרוויה**, והוא נקבע על-ידי כמות האלקטרונים הנפלטים על-ידי האלקטרודה המוארת בשנייה אחת.

על-ידי שינוי עוצמת ההארה בניסוי זה הצליחו לגלות **שכמות האלקטרונים, הנעקרים על-ידי האור מהמשטח המתכתי בשנייה אחת, פרופורציונית לאנרגיית גל האור הנבלעת באותו פרק הזמן, כלומר לעוצמת ההארה.**

עובדה זאת אינה מפתיעה: ככל שהאנרגיה של אלומת אור גבוהה יותר – כך יעילה יותר השפעתו.

נתאר כעת את מדידת האנרגיה הקינטית (או המהירות) של האלקטרונים הנפלטים. הגרף בציור 238 מראה שעוצמת הזרם שונה מאפס גם כאשר המתח שווה לאפס. משמעות גילוי זה היא, שחלק מהאלקטרונים העקורים מגיע לאלקטרודה הימנית (ציור 237) גם בהעדר מתח. אם נשנה את קוטביות הסוללה, תקטן עוצמת הזרם, ועבור מתח הפוך מסוים U_S היא תתאפס. פירוש הדבר הוא, ששדה חשמלי בולם את האלקטרונים עד לעצירה מוחלטת ומחזיר אותם לאלקטרודה.



מתח העצירה U_S תלוי באנרגיה הקינטית המרבית של האלקטרונים העקורים. על-ידי מדידת מתח העצירה ושימוש במשפט האנרגיה הקינטית ניתן למצוא את הערך המרבי של האנרגיה הקינטית של האלקטרונים:

תורח הקוונטים. חופעה פוטו-אלקטריה

$$\frac{mv^2}{2} = eU_s$$

כפי שמראה הניסוי, כאשר משתנה עוצמת אור ההארה (צפיפות שטף הקרינה), אין מתח העצירה משתנה, ולכן אינה משתנה האנרגיה הקינטית של האלקטרונים. מנקודת המבט של תורת הגלים עובדה זאת אינה מובנת: הרי ככל שעוצמת האור גדולה יותר – כך גדולים יותר הכוחות הפועלים על האלקטרונים מצדו של השדה החשמלי של גל האור, והאנרגיה הקינטית המועברת לאלקטרונים צפויה להיות גדולה יותר!

הניסוי הוכיח שהאנרגיה הקינטית של האלקטרונים, המשוחררים על-ידי האור, תלויה לינארית (קווית) בתדירות האור בלבד. **האנרגיה הקינטית המרבית של פוטו-אלקטרונים הולכת וגדלה בתלות קווית עם תדירות האור, ואינה תלויה בעוצמתו.** אם תדירות האור קטנה מערך מסוים, v_{\min} , עבור החומר המוקרן – ובלא תלות בעוצמת ההארה – האפקט הפוטו-אלקטרי אינו מתרחש כלל.

חוקי האפקט הפוטו-אלקטרי פשוטים בצורתם, אולם תלות האנרגיה הקינטית המרבית של האלקטרונים בתדירות היא מסתורית.

?

1. מהו ערכו של קבוע פלנק?
2. מהם חוקי האפקט הפוטו-אלקטרי?

§89 תורת האפקט הפוטו-אלקטרי

לא צלחו הנסיונות להסביר את האפקט הפוטו-אלקטרי באמצעות חוקי האלקטרודינמיקה של **מקסוול**, שלפיהם אור הוא גל אלקטרומגנטי, הממלא את המרחב באופן רציף. לא היה אפשר להבין מדוע אנרגיה של פוטו-אלקטרונים תלויה בתדירות האור בלבד, ומדוע רק אור בעל אורך גל קצר עוקר את האלקטרונים ממשטח המתכת המוקרנת.

ההסבר לאפקט הפוטו-אלקטרי ניתן בשנת 1905 על-ידי **איינשטיין**. הוא פיתח את הרעיונות של **פלנק** ביחס לפליטת אור מקוטעת שאינה רציפה. בחוקי האפקט הפוטו-אלקטרי, שהתקבלו באופן ניסויי, ראה **איינשטיין** את ההוכחה המשכנעת: **לאור מבנה מקוטע, והוא נבלע במנות בדידות.**

תורת הקוונטים. חופעה פוטו-אלקטריה

נמצא שערך האנרגיה E של כל מנת קרינה תואמת להנחה של **פלנק** – שהאנרגיה פרופורציונית לתדירות:

$$(11.1) \quad E = h \nu$$

כאשר h – **קבוע פלנק**.

האור אכן נפלט במנות, אך מכאן לא נובע המבנה הדיסקרטי (המקוטע) של האור עצמו. הרי גם את המים המינרליים מוכרים בבקבוקים, אולם מכך לא נובע שהמים מורכבים מחלקים בגודל בקבוק שאינם נחלקים עוד. בחקר האפקט הפוטו-אלקטרי הסתבר שלאור מבנה חלקיקי: מנת האנרגיה של האור, $E = h\nu$, שנפלטה שומרת על שלמותה, כלומר: עשויה להיבלע רק כל המנה, בשלמותה.

אם ניישם את חוק שימור האנרגיה, ניתן למצוא את האנרגיה הקינטית של פוטו-אלקטרונים. האנרגיה של מנת אור $h\nu$ מושקעת בביצוע **עבודת המילוט A** (המכונה גם **אנרגיית קשר**). זו העבודה שיש לבצע כדי לשחרר את האלקטרון מהמתכת ולהקנות לו אנרגיה קינטית. לכן:

$$(11.2) \quad h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$$

משוואה זו מסבירה את כל העובדות הנוגעות לאפקט הפוטו-אלקטרי. על-פי **איינשטיין**, פרופורציונית עוצמת האור למספר קוונטים (מנות) של אנרגיה שבאלומת האור, ולכן היא מגדירה את כמות האלקטרונים המשחררים מהמתכת. בהתאם ל- (11.2) נקבעת מהירותם של האלקטרונים לפי תדירות האור ולפי עבודת המילוט A, התלויה בסוג המתכת ובמצב המשטח המוקרן – ואינה תלויה בעוצמת האור.

בחומרים השונים הבונים את המשטחים המוקרנים מופיע האפקט הפוטו-אלקטרי אם תדירות האור ν גדולה מערך מזערי ν_{\min} ; שהרי כדי לעקור אלקטרון ממתכת – אף אם לא להקנות לו אנרגיה קינטית – יש להשקיע את עבודת המילוט A. לכן צריכה האנרגיה של קוונט להיות גדולה מעבודת המילוט: $h\nu > A$.

התדירות הגבולית v_{\min} מכונה **הגבול האדום של האפקט הפוטו-אלקטרי**,

וערכה הוא:

$$(11.3) \quad v_{\min} = \frac{A}{h}$$

עבודת המילוט A תלויה בסוג החומר, ולכן גם תדירות הסף v_{\min} של האפקט הפוטו-אלקטרי (הגבול האדום) שונה בחומרים שונים.

עבור אבץ מתאים לגבול האדום אורך גל $\lambda_{\max} = 3.7 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ (קרינה אולטרה-סגולה). זהו פשר הניסוי, בו הופסק האפקט הפוטו-אלקטרי בעקבות חציצה באמצעות לוח זכוכית, הבולע את הקרניים האולטרה-סגולות.

עבודת המילוט לאלומיניום או לברזל גדולה יותר מאשר לאבץ, ולכן השתמשו בניסוי המתואר בסעיף 88 בלוח אבץ. למתכות אלקליות אנרגיית קשר קטנה יותר, ואורך הגל λ_{\max} , המתאים לגבול האדום, גדול יותר.

$$\text{כך עבור נתרן: } \lambda_{\max} = 6.8 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

באמצעות משוואת **איינשטיין** (11.2) ניתן למצוא את **קבוע פלנק**: יש למצוא באופן ניסויי את תדירות האור ν , את אנרגיית הקשר A ואת האנרגיה הקינטית של הפוטו-אלקטרונים. המדידות והחישובים הובילו לערך $h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec}$.

בדיוק את אותו ערך קיבל **פלנק** כאשר פיתח תיאוריה של תופעה אחרת לגמרי: הקרינה התרמית. שוויון הערכים של **קבועי פלנק**, שהתקבלו באמצעות שיטות שונות, מוכיח את נכונות ההנחות לגבי פליטה ובליעה של אור בחומר במנות בדידות.

על אף פשטותה מסבירה משוואת **איינשטיין** (11.2) את האפקט הפוטו-אלקטרי במלואו. בעבור הפיתוח של תורת האפקט הפוטו-אלקטרי זכה **איינשטיין בפרס נובל**.

?

1. אילו עובדות מעידות על התכונות החלקיקיות של האור?
2. מהו הגבול האדום באפקט הפוטו-אלקטרי?

חורח הקוונטים. תופעה פוטו-אלקטריה

בפיזיקה מודרנית נחשב הפוטון כאחד מחלקיקי היסוד, והוא עומד בראש רשימת חלקיקי היסוד כבר עשרות שנים.

אנרגיה ותנע של פוטון

במהלך הפליטה והבליעה נוהג האור כזרם חלקיקים בעלי אנרגיה $E = hv$, התלויה בתדירות. באופן מפתיע מאוד הפכה מנת אור להיות דומה למושג חלקיק. התכונות של האור, המתגלות במהלך פליטה ובליעה, מכונות **תכונות חלקיקיות**; וחלקיק האור עצמו מכונה **פוטון** או **קוונט של קרינה אלקטרומגנטית**.

פוטון הוא בעל מנת אנרגיה $h\nu$. לעתים אין מבטאים את האנרגיה של הפוטון באמצעות התדירות ν , אלא באמצעות התדירות הסיבובית $\omega = 2\pi\nu$.

אם במקום h , כמקדם הפרופורציונליות, נשתמש בגודל קטן יותר: $\bar{h} = \frac{h}{2\pi}$ (המכונה "h עם קו"') השווה ל:

$$\bar{h} = 1.0545726 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{sec}$$

אזי שווה אנרגיית הפוטון:

$$(11.4) \quad E = hv = \bar{h}\omega$$

על-פי תורת היחסות קשורה האנרגיה תמיד למסה באמצעות הנוסחה $E = mc^2$. מכיוון שאנרגיית הפוטון שווה ל- $h\nu$, שווה מסת הפוטון ל:

$$(11.5) \quad m = \frac{h\nu}{c^2}$$

לפוטון אין מסת המנוחה m_0 , דהיינו הוא אינו יכול להתקיים במצב נייח, אלא מיד עם היווצרותו שווה מהירותו ל- c . המסה המוגדרת על-ידי הנוסחה (11.5) היא מסת הפוטון הנייד. לפי מסת הפוטון ומהירותו ניתן למצוא את התנע:

$$(11.6) \quad p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

התנע של הפוטון מכיוון בכיוון הקרן.

ככל שהתדירות גבוהה יותר – כך גדולים יותר האנרגיה והתנע של הפוטון, ובולטות יותר תכונותיו החלקיקיות של האור.



קבוע פלנק קטן מאוד, ואנרגיית הפוטונים של האור הנראה היא מזערית; פוטון של אור ירוק הוא בעל אנרגיה של $4 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

בניסויים הנפלאים של המדען הרוסי **ס' ואוילוב** גילו, שכמכשיר רגיש ביותר מסוגלת עין האדם לקלוט הפרשי עוצמת הארה הנמדדים בקוונטים בודדים.

הדואליות חלקיק-גל

המדענים נאלצו להגדיר את האור כזרם חלקיקים – מעין חזרה לתורת החלקיקים של **ניוטון**; אולם אסור לשכוח שההתאבכות והעקיפה של האור מצביעות באופן חד-משמעי על תכונותיו הגליות. האור מגלה אפוא דואליות בתכונותיו: בהתפשטות האור מתגלות תכונות אור גליות, ובמעברו דרך החומר (המלווה בפליטה ובבליעה) – תכונות של חלקיקים. הדבר מוזר ולא נתפס: איננו מסוגלים לדמיין כיצד עשויה דואליות כזו בטבע להתקיים – אולם זו עובדה. חסרי אמצעים אנו כדי לתאר לעצמנו את התהליכים במלואם בעולם המיקרו, מכיוון ששונים הם לגמרי מאותן תופעות, שצפו בהן בני-האדם במשך מיליוני שנים, ולאורן ניסחו לקראת סוף המאה ה-19 את החוקים הבסיסיים של עולם המיקרו.

השערת דה-ברולי

משך זמן רב נקשר המושג של שדה אלקטרומגנטי לחומר המפוזר במרחב באופן רציף (המשמש כתווך להתפשטות הגל האלקטרומגנטי); לעומת זאת הצטיירו האלקטרונים בדמיון הפיזיקאים כחתיכות חומר קטנות; והשם "חלקיק" הופיע תמיד ליד המילה "אלקטרון".

ואולי האלקטרון וחלקיקים אחרים גם הם בעלי תכונות של גלים? את המחשבה המהפכנית הזו ביטא בשנת 1923 המדען הצרפתי הצעיר **לואי דה-ברולי**.

בהנחה שתנועת החלקיקים קשורה בהתפשטות גלים מיוחדים, הצליח **דה-ברולי** למצוא את אורך הגלים האלה. הסתבר שהקשר בין אורך הגל לתנע של החלקיק היה בדיוק כמו זה של הפוטון (11.6). אם נסמן את אורך הגל ב- λ , ואת התנע ב- p , אזי:

$$(11.7) \quad \lambda = \frac{h}{p}$$

זוהי הנוסחה המפורסמת של **דה-ברולי** – אחת מהבסיסיות בעולם המיקרו.



התכונות הגליות של חלקיקים, שתוארו על-ידי **דה-ברולי**, התגלו בהמשך באופן ניסויי. עקיפת האלקטרונים וחלקיקים אחרים בגבישים דומה לעקיפת קרני רנטגן, וגם את הנוסחה (11.7) הוכיחו בצורה ניסויית.

התכונות הייחודיות האלה של גופים מזעריים מעולם המיקרו מתוארות על-ידי מכניקת הקוונטים – התיאוריה המודרנית של עולם המיקרו. בעולם מיקרו זה אין חוקי המכניקה של **ניוטון** מתקיימים ברוב המקרים.

פוטון הוא חלקיק יסוד חסר מסה ומטען, אולם בעל אנרגיה ותנע. זהו קוונט של השדה האלקטרומגנטי, שבאמצעותו פועלים חלקיקים טעונים. בליעת אנרגיה ופליטתה במנות בדידות הן דוגמאות של התגלות התכונה החלקיקית של השדה האלקטרומגנטי.

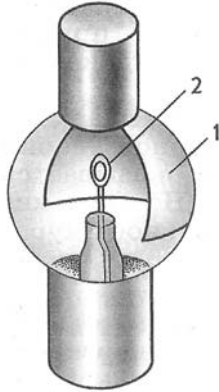
הדואליות חלקיק-גל היא תכונה כללית של החומר, המתגלה בעולם המיקרוסקופי.

- ?** 1. כיצד ניתן למצוא את האנרגיה, את המסה ואת התנע של הפוטון, אם ידועה תדירות האור?
2. למה מתכוונים במילים "דואליות חלקיק-גל"?

§91 שימושי האפקט הפוטו-אלקטרי

לגילוי האפקט הפוטו-אלקטרי חשיבות רבה להבנה מעמיקה של טבע האור; אולם חשיבותו של המדע אינה רק בבירור המבנה המורכב והמגוון של העולם, אלא גם בכך שהוא נותן לנו כלים, שבאמצעותם ניתן להעמיק חקור ולשפר את תנאי המחיה של בני-האדם.

הודות לאפקט הפוטו-אלקטרי התחיל הקולנוע "לדבר", והתאפשרה העברת דמויות נעות בטלוויזיה. השימוש במכשירים פוטו-אלקטרוניים אפשר לפתח מכונות לעיבוד חומרים לפי שרטוטים נתונים וללא התערבות הפועל. המכשירים, המבוססים על האפקט הפוטו-אלקטרי מגוונים מאוד: בודקים מידות של גופים במדויק, מדליקים ומכבים מגדלור ותאורת רחוב, פותחים וסוגרים דלתות וכו'.



ציור 239

כל זה התאפשר הודות לפיתוח מכשיר מיוחד – התא הפוטו-אלקטרי, שבו מבקרת אנרגיית אור את אנרגיית זרם החשמל.

תא פוטו-אלקטרי מורכב משפופרת זכוכית מרוקנת מאוויר. חלק מהמשטח הפנימי שלה מצופה בשכבה דקה של מתכת בעלת אנרגיית קשר נמוכה (ציור 239). זוהי קתודה 1.

אור חודר לתוך השפופרת דרך חלון שקוף.

במרכזה נמצא תיל בצורת לולאה – האנודה 2,

המשמשת לקליטה של פוטו-אלקטרונים. את האנודה מחברים לקוטב החיובי של הסוללה. כאשר פוגע האור בקתודה של התא הפוטו-אלקטרי, נוצר במעגל זרם חשמל, והוא סוגר או פותח מעגל חשמלי חיצוני באמצעות מגבר זה או אחר. השילוב בין תא פוטו-אלקטרי ומגבר מאפשר לבנות מגוון מכשירים אוטומטיים בעלי "כושר ראייה". אחד מהם הוא ה"עין" של דלת, הנפתחת בהתקרבות אדם אליה.

מכשירים מסוג זה עשויים למנוע תאונות. בבית-המלאכה עוצר תא פוטו-אלקטרי מיידית מכבש ענק, אם יד הפועל מונחת באזור מסוכן, או ברגע בו מוסרת היד מאזור מוגן.

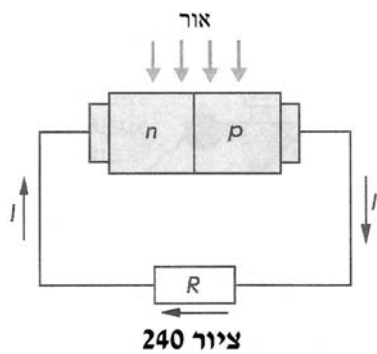
באמצעות תא פוטו-אלקטרי משחזרים פס-קול הרשום על סרט קולנוע. תאים פוטו-אלקטריים רגישים לאור הנראה ולקרינה אינפרא-אדומה.

תא פוטו-אלקטרי המבוסס על מוליך למחצה

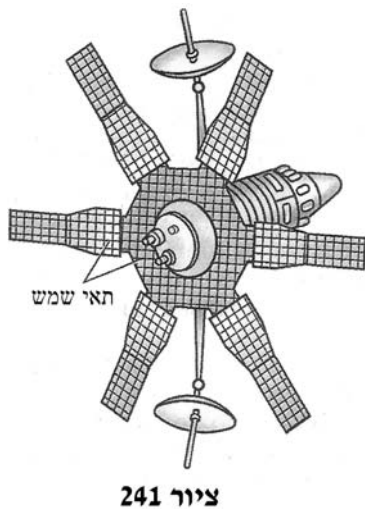
עד עתה תיארנו את התופעה המכונה "אפקט פוטו-אלקטרי חיצוני"; יישומים רבים נמצא לתופעה המכונה "אפקט פוטו-אלקטרי פנימי" במוליכים למחצה. התופעה מיושמת ברכיבים המכונים **פוטו-רזיסטור** (Resistor – נגד). התנגדותו של רכיב זהו תלויה בעוצמת ההארה. נבנו גם תאים פוטו-אלקטריים, המייצרים כא"מ והופכים את אנרגיית האור במישרין לאנרגיית זרם חשמל. במקרה זה נוצר כא"מ, המכונה "פוטו-כא"מ" באזור הצומת p-n של שני סוגי מוליכים למחצה,



כאשר מאירים את האזור. בהשפעת האור נוצרים זוגות של אלקטרון-חור. באזור הצומת p-n קיים שדה חשמלי, והוא מאלץ את הנשאים המשניים לעבור דרך הצומת. החורים, הנמצאים במוליך למחצה מסוג n, עוברים למוליך למחצה מסוג p; והאלקטרונים, הנמצאים במוליך למחצה מסוג p, עוברים לאזור מסוג n. כך מצטברים המטענים העיקריים באזורי p ו-n בהתאמה. כתוצאה מכך גדל הפוטנציאל של המוליך למחצה מסוג p, וזה של המוליך למחצה מסוג n קטן. התהליך מתרחש עד שזרם הנשאים העיקריים דרך הצומת משתווה לזרם הנשאים המשניים. בין שני סוגי מוליכים למחצה מתייצב הפרש פוטנציאלים השווה לפוטו-כא"מ.



אם נסגור את המעגל דרך עומס חיצוני, יזרום במעגל זרם, שעוצמתו נקבעת על-פי הפרש הזרמים של הנשאים המשניים והנשאים העיקריים דרך המעבר n-p (ציור 240). עוצמת הזרם תלויה בעוצמת ההארה של האור הפוגע ובהתנגדות העומס R.



תאים פוטו-אלקטריים, המבוססים על המעבר n-p, יוצרים כא"מ בסדר גודל של 1-2 וולט. הספק הזרם העובר דרך העומס מגיע למאות ואט, ונצילות המערכת היא בקרוב 20%. בתאים פוטו-אלקטריים בעלי עוצמה זרם נמוכה משתמשים במדי-אור.

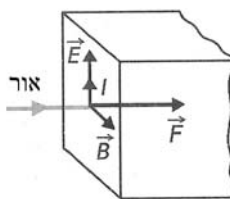
יישום נפוץ של תאים פוטו-אלקטריים, המבוססים על מוליכים למחצה, נמצא בסוללות של "תאי שמש", המשמשות כמקור חשמל עיקרי בתחנות חלל (ציור 241).

תאים פוטו-אלקטריים – הן אלה המבוססים על שפופרות ריק הן המבוססים על מוליכים למחצה – נמצאים בשימוש רחב. האחרונים משמשים גם כמקורות פוטו-כא"מ.

§92 לחץ של אור (לחץ קרינה)

על סמך תורת האור האלקטרומגנטית ניבא **מקסוול**, שאור יפעיל לחץ על מחסום. **פ' לבדיב** היה המדען שמדד לחץ זה.

בהשפעת השדה החשמלי של הגל מתנוודדים האלקטרונים ונוצר זרם חשמל, המכוון לאורך ציר השדה החשמלי (ציור 242). על האלקטרונים, הנעים באופן מסודר, פועל השדה המגנטי **בכוח לורנץ** \vec{F} , שכיוונו ככיוון ציר התפשטות הגל. זהו **כוח הלחץ של האור (לחץ הקרינה האלקטרומגנטית)**.

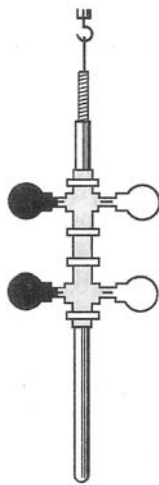


ציור 242

כדי להוכיח את נכונותה של התורה של **מקסוול** חשוב היה למדוד את הלחץ של האור. מדענים רבים ניסו לעשות זאת, אך ללא הצלחה, מכיוון שהלחץ קטן מאוד. על משטח, ששטחו 1 מטר רבוע, פועל ביום שמש בהיר כוח, השווה בסך הכול ל- $4 \cdot 10^{-6}$ N. הראשון שמדד את לחץ האור היה המדען הרוסי **לבדיב** בשנת 1900.

במכשיר של **לבדיב** מוט קל מאוד, התלוי על חוט זכוכית דק, שאליו הודבקו כנפיים קלות (ציור 243). כל המערכת הוכנסה למכל, שנשאב ממנו האוויר. אור פגע בכנפיים הנמצאות בצד האחד של המוט, ועל גודל הלחץ ניתן היה לשפוט על-פי זווית הפיתול של החוט. הקשיים במדידה המדויקת קשורים בחוסר האפשרות לרוקן את כל האוויר מהכלי; בנוסף, התחממות הכנפיים וקירות הכלי מחישה את תנועת המולקולות של האוויר, ונוצרים מומנטים נוספים המזהמים ניסוי עדין זה. על פיתול החוט משפיע גם החימום השונה של צדי הכנפיים: הצד המופנה למקור האור מתחמם יותר מהצד הנגדי, והמולקולות, המוחזרות מהצד החם יותר, מעבירות לכנף תנע גדול יותר מכפי שמעבירות לכנף המולקולות, המוחזרות מהצד הקר יותר.

פוטונים



ציור 243

למרות הטכנולוגיה הנחותה של מכשירי המדידה בזמן ההוא הצליח **לבדיב** להתגבר על כל הקשיים: הוא השתמש במכל גדול מאוד ובכנפיים קלות מאוד, ובסופו של דבר הוכיח את עובדת קיום הלחץ של האור, אף מדד אותו. הערך שהתקבל תאם את זה שחישב **מקסוול**. בהמשך, לאחר שלוש שנות עבודה, הצליח **לבדיב** לבצע ניסוי עדין עוד יותר: הוא מדד את לחץ האור על גזים.

הופעתה של תורת הקוונטים אפשרה להסביר את סיבת הלחץ של האור: בדומה לחלקיקי חומר בעלי מסת מנוחה, נושאים פוטונים תנע, וכאשר הם נבלעים בגוף, הם מעבירים לו תנע זה. בהתאם לחוק שימור התנע שווה התנע של גוף לסכום של כל ערכי התנע של הפוטונים שנבלעו, ולכן גוף נייח מתחיל לנוע. שינוי התנע משמעותו, על-פי החוק השני של ניוטון, שעל הגוף פועל כוח.

אם כן, הניסויים של **לבדיב** שבו והוכיחו שפוטונים נושאים תנע.

אף-על-פי שלחץ האור קטן מאוד בתנאים רגילים, השפעתו עשויה להיות משמעותית מאוד: בתוך הכוכבים, שם שוררת טמפרטורה בת כמה עשרות מיליוני מעלות קלווין, אמור לחץ הקרינה האלקטרומגנטית להגיע לערכים ענקיים. לכוחות לחץ אלה, בצירוף עם כוחות הגרוויטציה, תפקיד משמעותי ביותר בתהליכים המתרחשים בתוך הכוכבים.

בהתאם לאלקטרודינמיקה של **מקסוול** נוצר הלחץ של האור בעקבות פעולת **כוח לורנץ** על האלקטרונים של החומר, המתנוודדים בהשפעת השדה החשמלי של הגל האלקטרומגנטי. מנקודת המבט של מכניקת הקוונטים נוצר הלחץ עקב העברת התנע של הפוטונים לגוף במהלך בליעתם.

§93 הפעולה הכימית של האור צילום

מולקולות בודדות בולעות את אנרגיית האור במנות, המכונות קוונטים, $h\nu$. בקרינת אור נראה ואור אולטרה-סגול די באנרגיה זו כדי לפרק מולקולות רבות. כך באה לידי ביטוי הפעולה הכימית של אור.

כל שינוי במבנה מולקולרי הוא תהליך כימי. לאחר פירוק המולקולות על-ידי אור מתחילה לעתים קרובות שרשרת תהליכים כימיים. דהייט הצבעים של בד, הנמצא באור השמש, ושיזוף הם דוגמאות של הפעולות הכימיות של האור.

תגובות כימיות חשובות ביותר מתרחשות בהשפעת אור בעלים ירוקים של עצים ודשא ובמיקרואורגניזמים רבים. בהשפעת אור השמש מתרחשים בעלה הירוק תהליכים, הנחוצים לקיום החיים על פני כדור הארץ. התהליכים האלה הם המקור למזון ולחמצן לנשימה.

העלים בולעים פחמן דו-חמצני מהאוויר ומפרקים את המולקולה הזו למרכיביה: פחמן וחמצן. התהליך מתרחש במולקולות הכלורופיל בהשפעת הקרניים האדומות של ספקטרום השמש. על-ידי הצמדת האטומים של היסודות השונים, שקולט השורש מהאדמה, לשרשרת האטומים של הפחמן, בונה הצמח מולקולות של חלבונים, שומנים ופחמימות. כל זה מתרחש בהשקעה של האנרגיה, שמקורה בקרני השמש. לא האנרגיה עצמה היא החשובה כאן, אלא הצורה שבה היא מגיעה: פוטו-סינתזה (כך מכנים תהליך זה) יכולה להתרחש בהשפעת אור, שהוא בעל הרכב ספקטרולי מסוים בלבד.

תהליך הפוטו-סינתזה טרם נלמד עד הסוף. כאשר זה יקרה, ייתכן ויתחיל עידן חדש לאנושות, וחלבונים וחומרים אורגניים מורכבים אחרים ייוצרו בבתי חרושת תחת כיפת השמים...

על הפעולה הכימית של האור מבוסס תהליך הצילום.

הצילום

השכבה הרגישה של סרט הצילום מכילה גבישוניים של כסף ברומיד (AgBr) הטמונים בז'לטין. פגיעת קוונט אור בגבישון גורמת לעקירת האלקטרונים מיונים בודדים של כסף. אלקטרונים אלה נתפסים על ידי יונים של כסף, ובגבישון נוצר

הפעולה הכימית של האור

מספר קטן של אטומים נייטרליים של כסף; אולם כמות הכסף המתכתי הנוצר בעקבות תהליך זה אינה גדולה.

אם נחשוף את סרט הצילום לאור, נוכל לראות שהוא משחיר, אבל מעט. ההשחרה נגרמת בעקבות היווצרות כסף מתכתי. הדמות, שנוצרה בסרט הצילום בהשפעת האור, מכונה **דמות סמויה**.

הפעולה הראשונה של עיבוד הסרט מכונה **פיתוח**. את הסרט טובלים בתמיסה של מַטוּל או של חומרים אחרים. בהשפעתם מתרחש תהליך גיבוש האטומים של כסף שנחשפו לאור, ועל הסרט נוצרת דמות "הפוכה" של העצם: את מקומם של אזורים בהירים תופסים אזורים כהים, ולהפך (ציור 244א). הפעולה הבאה היא **שמירה**, במהלכה נמסים ונשטפים גבישוניים של כסף ברומיד, סרט הצילום כבר אינו רגיש לאור, וטובלים אותו בתמיסה היפוסולפית. לאחר שטיפה במים התשליל (הנגטיב) מוכן. מצמידים אותו לנייר-פוטו, דהיינו נייר רגיל המצופה בשכבה רגישה לאור, וחושפים לאור. לאחר עיבוד כימי, הדומה לעיבוד הסרט, מקבלים דמות "ישרה" (ציור 244ב).

הצילום מאפשר לקלוט ולרשום אירועים מהירים מאוד כמו ברק, ולאחר מכן לחקור אותם במעבדה; לקלוט אור חלש מאוד שפולטים גופים קוסמיים רחוקים (לצורך זה חושפים סרט לאור לזמן רב); לקלוט אור בלתי נראה (אולטרה-אדום, שפולט כל גוף חם); לרשום פס קול בקולנוע ועוד.



(א)



(ב)

ציור 244

הפעולה הכימית של האור

מקבץ תרגילים 12

1. שרטטו גרף של האנרגיה הקינטית של פוטו-אלקטרונים בתלות תדירות האור. כיצד ניתן למצוא את קבוע פלנק באמצעות גרף זה?
2. מהו מקדם השבירה המוחלט של תווך, שאנרגיית הפוטון שבו היא $E = 4.4 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, ואורך הגל - $\lambda = 3.0 \cdot 10^{-7} \text{ m}$?
3. מהי אנרגיית הפוטון המתאימה לאורך גל של $\lambda = 5.0 \cdot 10^{-7} \text{ m}$?
4. מהו אורך הגל λ של אור שמאירים בו משטח מתכתי, אם ידוע שהאנרגיה הקינטית של פוטו-אלקטרונים היא $W_k = 4.5 \cdot 10^{-20} \text{ J}$, ואנרגיית הקשר $A = 7.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$?
5. מה הגבול האדום v_{\min} של האפקט הפוטו-אלקטרי, אם ידוע שאנרגיית הקשר של אלקטרון עם המתכת היא $A = 3.3 \cdot 10^{-19} \text{ J}$?
6. קרינה בעלת אורך גל $3.0 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ פוגעת בחומר, שהסף האדום של האפקט הפוטו-אלקטרי בו הוא $v_{\min} = 4.3 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$. מהי האנרגיה הקינטית של הפוטו-אלקטרונים?

תקציר פרק 11

1. בתחילת המאה ה-20 נולדה תורת הקוונטים – תיאוריית התנועה והפעולות ההדדיות שבין חלקיקי יסוד והמערכות המורכבות מהם.
2. כדי להסביר את ייחודיות הקרינה התרמית הניח **פלנק**, שאטומים פולטים אנרגיה אלקטרומגנטית באופן שאינו רציף, אלא במנות בדידות, דיסקרטיות, המכונות **קוונטים**. האנרגיה של כל מנה מוגדרת על-ידי הנוסחה:

$$E = h \nu$$

כאשר: $h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec}$ – קבוע פלנק; ν – תדירות האור (הקרינה).



3. גל אלקטרומגנטי נבלע במנות בדידות. את העובדה הזאת מוכיחים הניסויים בפוטו-אלקטריות, בעקירת אלקטרונים מחומר בהשפעת האור. כמות האלקטרונים המשוחררים פרופורציונית לעוצמת הקרינה, והאנרגיה הקינטית שלהם נקבעת על-ידי תדירות האור בלבד. בהתאם למודל של **איינשטיין** מושקעת המנה הנבלעת של אנרגיה $h\nu$ בעבודת המילוט A של האלקטרון מהמתכת, והיתרה – לאצירת אנרגיה קינטית באלקטרון:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$$

אם תדירות האור $\nu < \nu_{\min} = \frac{A}{h}$, לא יתקיים האפקט הפוטו-אלקטרי. 4. במהלכי פליטה ובליעה מגלה האור תכונות של חלקיקים. חלקיק של אור מכונה **קוונט אור** או **פוטון**. אנרגיית הפוטון מוגדרת על-ידי הנוסחה:

$$E = h\nu = \hbar\omega$$

כאשר: $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.05 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{sec}$ – תדירות סיבובית.

תנע של פוטון p נקבע על-ידי הנוסחה: $p = \frac{h}{\lambda}$.

5. במהלך התקדמותו מגלה האור תכונות של גל (התאבכות ועקיפה).
6. לאור תכונות דואליות – גל וחלקיק – בו-זמנית. בהמשך התברר שכל חלקיקי היסוד מגלים דואליות מסוג זה.

7. האפקט הפוטו-אלקטרי מצא יישום רחב בהנדסה. באמצעות מכשירים מיוחדים – תאים פוטו-אלקטריים – שולטת אנרגיית האור באנרגיית הזרם החשמלי. בתאים פוטו-אלקטריים משתמשים במכונות אוטומטיות "רואות". על האפקט הפוטו-אלקטרי מבוססת פעולת תאי השמש.

8. מתורת **מקסוול** נובע שאור מפעיל לחץ על מחסומים. הלחץ הזה קטן מאוד, התגלה לראשונה ונמדד על-ידי **לבדיב**.

9. בליעת האור בחומר מלווה בפעולה כימית של האור. בעלים ירוקים ובמיקרואורגניזמים רבים מתרחשות התגובות הכימיות החשובות בהשפעת האור. פחמן דו-חמצני נקלט מהאטמוספירה על-ידי העלים ומתפרק לפחמן וחמצן. זו מהותה של הפוטו-סינתזה.

פרק 12. פיזיקה אטומית

גילוי המבנה המורכב של האטום הוא השלב החשוב ביותר בהתבססותה של הפיזיקה המודרנית, והוא הטביע את חותמו על פיתוחה העתידי. במהלך פיתוח המודל הכמותי של מבנה האטום, שנועד להסביר את מבנה הספקטרום האטומי, התגלו חוקי תנועה חדשים של חלקיקים אטומיים. אלה חוקי המכניקה הקוונטית.

§94 מבנה האטום, ניסוי רתרפורד

הפיזיקאי האנגלי ארנסט רתרפורד חקר את פיזור חלקיקי α בחומר, ובשנת 1911 גילה את גרעין האטום: גוש מסיבי, הקטן פי 10,000 מגודל האטום.

המודל של תומסון

לא בנקל הגיעו המדענים להבנה נכונה של מבנה האטום. המודל הראשון של האטום הוצע על-ידי הפיזיקאי האנגלי ג'." תומסון, שגילה את האלקטרון. על-פי המודל של תומסון ממלא המטען החיובי של האטום את כל נפח האטום, והוא מפוזר בו בצפיפות אחידה. האטום הפשוט ביותר, אטום המימן, הוא כדור שקוטרו כ- 10^{-8} cm הטעון חיובית, ובתוכו נמצא האלקטרון. באטומים מורכבים יותר נמצאים בכדור הטעון חיובית כמה אלקטרונים, וכך דומה האטום לעוגה, שהאלקטרונים בה הם כצימוקים.

אולם מודל תומסון עמד בסתירה מוחלטת לניסויים, שחקרו את התפלגות המטען החיובי באטום. לניסויים אלה, שנערכו לראשונה על-ידי רתרפורד, היה תפקיד מכריע בהבנת מבנה האטום.

הניסוי של רתרפורד

מסת האלקטרון קטנה פי כמה אלפים ממסת האטומים. מכיוון שהאטום נייטרלי, מהווה את רוב המסה של האטום החלק הטעון חיובית.

כדי לחקור באופן ניסויי את התפלגות המטען החיובי (ובהתאם – את התפלגות המסה) בתוך האטום, הציע רתרפורד בשנת 1906 להשתמש בחלקיקי α כדי לבצע "צנתור" של האטום. חלקיקי α נוצרים במהלך התפרקות של רדון ושל כמה יסודות אחרים. מסתם גדולה פי 8,000 ממסת האלקטרון, ומטענם החיובי שווה

מבנה האטום, ניסוי רתרפורד

גודלו לפעמיים מטען האלקטרון. חלקיקי אלפא הם יונים של אטום ההליום, ומהירותם גבוהה מאוד: בסדר גודל של $1/15$ ממהירות האור.

ארנסט רתרפורד (1871 – 1937)



פיזיקאי אנגלי יליד ניו זילנד. הגילויים בעקבות ניסוייו של רתרפורד היוו בסיס למדע המודרני ולהבנת מבנה האטום והרדיואקטיביות. הוא הראשון שחקר את הרכב הקרינה הרדיואקטיבית. רתרפורד גילה את גרעין האטום, ולראשונה ביצע תהליכים גרעיניים. כל הניסויים שערך בלטו בפשטות ובבהירות ונשאו אופי בסיסי.

רתרפורד הפציץ אטומים של יסודות כבדים בחלקיקי α . עקב מסתם הנמוכה אין האלקטרונים יכולים לשנות את מסלולם של חלקיקי α , דומה הדבר לאבן קטנה, שאינה יכולה לשנות באופן משמעותי את מהירותה של מכונית בעת התנגשותן.

לפיזור (שינוי כיוון התנועה) של חלקיקי α יכול אפוא לגרום רק החלק הטעון חיובית של האטום, ולפי תבנית פיזורם של חלקיקי α אפשר לגלות את אופי התפלגות המטען החיובי והמסה בתוך האטום. המערך הניסויי של רתרפורד מתואר בציור 245:



בתוך גליל עופרת 1, שלאורכו קדחו תעלה צרה, הוכנס חומר רדיואקטיבי – לדוגמה רדון. אלומת חלקיקי α , היוצאת מהתעלה, פוגעת בלוח דקיק 2, העשוי מהחומר הנחקר

(נחושת, זהב וכדומה). לאחר הפיזור פוגעים חלקיקי α במסך חצי שקוף 3, המצופה באבץ גופריתי. התנגשות כל חלקיק במסך מלווה בהבזק אור (סינטימציה), ואותו ניתן לגלות באמצעות המיקרוסקופ 4. כל המערכת נמצאת בכלי מרוקן מאוויר.

בתנאי ריק גבוה בתוך המכשיר ובהיעדר לוח המתכת הופיע על המסך עיגול בהיר, המורכב מהבזקים, שנגרמו על-ידי אלומה צרה של חלקיקי α ; אולם כאשר

מבנה האטום ניסוי רתרפורד

חסמו את דרכה של האלומה בלוח המתכת, הופיעו חלקיקי α על המסך בעיגול בעל שטח גדול יותר עקב פיזורם.

לאחר שכלול המערכת הניסויית ניסה **רתפורד** לגלות הטיה של חלקיקי α בזוויות גדולות. בהפתעה גמורה הסתבר, שחלק זעיר מהחלקיקים (בערך אחד מאלפיים) סטה לזוויות הגדולות מ- 90° . מאוחר יותר הודה **רתפורד**, שכאשר הציע לתלמידיו לצפות בפיזור חלקיקי α בזוויות גדולות, לא האמין הוא עצמו בתוצאה חיובית: "זה בלתי ייאמן באותה מידה", אמר **רתפורד**, "שאיילו הייתם יורים פגז תותח בדף נייר, היה הפגז חוזר ופוגע בכס".

אכן, לא היה אפשרי לחזות תוצאה זו על בסיס מודל **תומסון**; שכן אם המטען החיובי מפוזר בכל האטום, לא היה יכול ליצור שדה חשמלי חזק דיו כדי להחזיר את חלקיק α . כוח הדחייה המרבי מוגדר על-פי חוק קולון:

$$(12.1) \quad F_{\max} = \frac{kq_\alpha q}{R^2}$$

כאשר: q_α – מטען של חלקיק α ; q – המטען החיובי של האטום; R – רדיוס האטום; k – מקדם פרופרציונליות. עוצמת השדה החשמלי של כדור, הטעון באופן אחיד, מרבית על פני משטח הכדור, והולכת וקטנה בהתקרבותו למרכז. לכן ככל שקטן הרדיוס R , כך גדול הכוח המחזיר את חלקיקי α .

מדידת גודל גרעין האטום

רתפורד הבין שחלקיקי α ייזרק לאחור במקרה אחד בלבד: כאשר המטען החיובי של האטום ומסתו מרוכזים באזור קטן מאוד של המרחב. כך הגיע **רתפורד** לרעיון של גרעין האטום: גוף קטן מידות, שמרוכזים בו כמעט כל מסת האטום וכל מטענו החיובי.

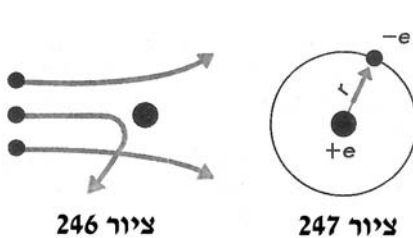
בציור 246 מתוארים המסלולים של חלקיקי α , העוברים במרחקים שונים מהגרעין.

על-ידי ספירת חלקיקי α , שהתפזרו בזוויות שונות, יכול היה **רתפורד** להעריך את מידות הגרעין.



הסתבר שקוטר הגרעין הוא בסדר גודל של $10^{-12} - 10^{-13}$ cm (לגרעינים שונים מידות שונות), וגודל האטום עצמו הוא 10^{-8} cm, כלומר גדול מהגרעין פי 100,000-10,000. בהמשך הצליחו למדוד גם את מטען הגרעין. אם נקבע שמטען האלקטרון שווה ל-1, מציין המספר הסידורי של היסוד ברשימת היסודות המחזורית של מנדלייב את מטען הגרעין.

המודל הפלנטרי של האטום



מהניסויים של **רתפורד** נובע המודל הפלנטרי של האטום: במרכזו נמצא גרעין הטעון חיובית, ובו מרוכזת כמעט כל מסת האטום. האטום כולו הוא נייטרלי, ולכן מספר האלקטרונים שבו ומספר יחידות מטען הגרעין שווים ותואמים את מקומם

הסידורי ברשימת היסודות המחזורית. ברור שהאלקטרונים בתוך האטום אינם נייחים – אחרת היו נוחתים על הגרעין; אלא הם נעים סביב הגרעין בדומה לפלנטות הסובבות סביב השמש. צורת תנועה זו מתקיימת הודות לפעולת כוחות קולון מצדו של הגרעין.

באטום המימן סובב סביב הגרעין אלקטרון אחד בלבד. לגרעין אטום המימן מטען חיובי, השווה בגודלו למטען האלקטרון, ומסתו גדולה בערך פי 1836.1 ממסת האלקטרון. גרעין זה מכונה **פרוטון**, והחלו להתייחס אליו כאל חלקיק יסוד. גודל האטום שווה לרדיוס המסלול של האלקטרון (ציור 247).

למודל הפלנטרי הפשוט והמוחשי הוכחה ניסויית ישירה בניסוי של פיזור חלקיקי α ; אולם על בסיס מודל זה אי-אפשר להסביר את עצם קיומו של האטום ואת יציבותו: הרי תנועת האלקטרונים סביב הגרעין היא תנועה בתאוצה, והיא כלל לא קטנה. על-פי משוואות **מקסוול** פולט חלקיק שנע בתאוצה גלים אלקטרומגנטיים בעלי תדירות, השווה לתדירות מחזור הסיבוב של החלקיק סביב הגרעין. הפליטה מלווה באיבוד אנרגיה, וזה גורם להתקרבות האלקטרונים אל הגרעין בדומה להתקרבות של לויין לכדור הארץ, הנבלם בשכבות הגבוהות של האטמוספירה. כפי שמראים החישובים, המבוססים על המכניקה של **ניוטון**

מבנה האטום ניסוי רתרפורד

והאלקטרודינמיקה של **מקסוול**, חייב אלקטרון לנחות על הגרעין בזמן קצר ביותר (סדר גודל של 10^{-8} sec), והאטום יפסיק אז להתקיים. אבל דבר כזה לא קורה במציאות; האטומים יציבים, ובמצב בלתי מעוזר הם יכולים להתקיים לזמן בלתי מוגבל וללא פליטת גלים אלקטרומגנטיים. למסקנה לגבי האובדן הבלתי נמנע של אטום עקב איבוד אנרגיה לקרינה מגיעים בעקבות השימוש בחוקי הפיזיקה הקלאסית בתופעות, המתרחשות בתוך האטום. מכאן נובע שאי-אפשר להשתמש בחוקי הפיזיקה הקלאסית כדי להסביר תופעות בקנה מידה אטומי.

רתרפורד פיתח את המודל הפלנטרי של האטום: האלקטרונים סובבים סביב הגרעין בדומה לפלנטות הסובבות סביב השמש. המודל הוא פשוט, מבוסס באופן ניסויי, אולם אינו יכול להסביר את יציבותו של האטום.

?

1. מדוע אין החלקיקים השליליים שבאטום משפיעים על פיזור חלקיקי α ?
2. מדוע לא היו חלקיקי α מתפזרים בזוויות גדולות, אילו היה המטען החיובי של האטום מפורז בכל נפח האטום?
3. מדוע אין המודל הפלנטרי של האטום תואם את חוקי הפיזיקה הקלאסית?

§ 94 ניסוי פרנק-הרץ

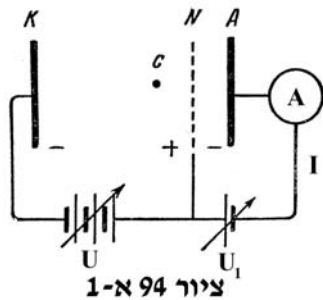
לאחר שבשנת 1906 מדד **מיליקן** את מטען האלקטרון, ובשנת 1911 גילה **רתרפורד** את גרעין האטום, צצו מודלים שונים של האטום (כמו "עוגת הצימוקים" של **תומסון** והמודל הפלנטרי של **רתרפורד**). כדי לאמת אותם היה צורך במידע ניסויי מדויק לגבי אופן הפעולה ההדדית בין אלקטרונים לבין אטומים.

לאחר גילוי קרני הקתודה (בשנת 1869) וקרני הרנטגן (בשנת 1895) שופרו שיטות המחקר באמצעות "תותח האלקטרונים", והמדענים ניסו להשתמש בו כדי לחקור גם את מבנה האטום. שתי שאלות עלו מיד עם הופעתו של המודל הפלנטרי:

1. מה צריכה להיות האנרגיה המזערית של האלקטרון, הפוגע באטום, כדי לפרק את האטום ליון חיובי ולאלקטרון?

ניסוי פרנק-הרץ

2. מה צריכה להיות האנרגיה המזערית של האלקטרון, הפוגע באטום, כדי שיעביר חלק מהאנרגיה שלו לגרעין של האטום (כלומר, שההתנגשות לא תהיה אלסטית)?



התשובות לשתי השאלות הללו ניתנו בסדרות הניסויים שבוצעו בשנת 1902 על-ידי הפיזיקאי הגרמני פ' לנארד, ובשנת 1914 על-ידי פרנק והרץ. הניסויים נערכו במערכות דומות (ציור 94-א1), והם כללו שפופרת זכוכית, שבתוכה אדים של כספית בלחץ נמוך. האלקטרונים נפלטים בקתודה מחוממת K, והם מואצים על-ידי השדה החשמלי

הנוצר בין הקתודה לבין רשת מתכתית N. המתח המאיץ מצוי בתחום שבין 0 ל-15 וולט. כאשר מגיעים האלקטרונים לרשת, הם רוכשים מהירות v, הנקבעת לפי

חוק שימור האנרגיה:

$$\frac{mv^2}{2} = eU$$

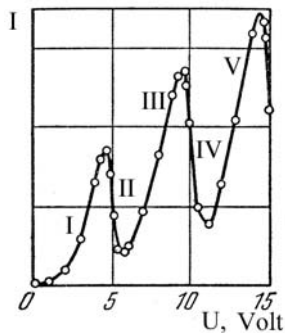
וממשיכים בדרכם לאנודה A, הנמצאת בפוטנציאל נגדי U_0 . מתח נגדי זה גורם להאטת האלקטרונים ולמניעת חלק מהם (או מכולם) להגיע לאנודה. מתח זה מכונה **מתח עצירה**.

שפופרת מסוג זה, בעלת שלוש אלקטרודות, מכונה **טריודה**.

בניסוי נמדדת תלות זרם האנודה I במתח המאיץ U. מתח העצירה U_0 מונע מהאלקטרונים, שנותקו מהאטום כתוצאה מהתנגשויות לא אלסטיות, להגיע לאנודה. קובעים את מתח העצירה על ערך נמוך בהרבה מהמתח המאיץ $U_0 \ll U$, ומתחילים להעלות את המתח המאיץ (ציור 94-א2). ככל שהוא עולה, גדלה עוצמת הזרם דרך האנודה, מכיוון שלאלקטרונים הנפלטים מהקתודה מהירות גבוהה יותר, ולכן מספר רב יותר של אלקטרונים מצליח להגיע לאנודה (קטע I של הגרף).

ואולם, כאשר מגיע המתח המאיץ ל- $U = 4.9 \text{ V}$, יורד הערך של הזרם באופן חד (קטע II של הגרף); כאשר המתח ממשיך לעלות, שוב עולה עוצמת הזרם; וכאשר מגיע המתח לערך של $U = 9.8 \text{ V}$, יורדת עוצמת הזרם פעם נוספת.





ציור 94 א-2

זוה הפירוש שניתן לתוצאות אלה: כל עוד האנרגיה הקינטית של האלקטרון הפוגע היתה נמוכה, התרחשה התנגשות אלסטית, ובמהלכה שינה האלקטרון הפוגע את כיוונו, אך שמר את מהירותו; מצדו כמעט לא שינה האטום את מצבו (משום שמסתו גדולה פי כמה אלפים מזו של האלקטרון).

ואולם כאשר אנרגיית האלקטרון מגיעה ל- 4.9 eV , מסוגל האטום "לקלוט" את האנרגיה של האלקטרון הפוגע במעבר למצב אנרגטי "מעורר".

את המצב החדש אפשר לתאר כמצב, שבו הופך מסלול של אחד האלקטרונים ה"חיצוניים" של האטום למסלול "רחוק" יותר מהגרעין, ועקב כך – בעל אנרגיה פוטנציאלית גבוהה יותר.

האלקטרון הפוגע מאבד את כל האנרגיה הקינטית שלו ואינו מסוגל להגיע לאנודה. כאשר המתח המאיץ עולה לערך של 9.8 V , מתנגש האלקטרון המואץ באותו אופן באטום כספית בנקודה מסוימת (לדוגמה: בנקודה c) לפני הרשת, מאבד בה את כל האנרגיה, אולם ממשיך בדרכו לרשת. בדרכו הוא צובר אנרגיה של 4.9 eV ומעביר אותה לאטום כספית אחר בהתנגשות נוספת. לכן אלקטרונים בעלי אנרגיה זו של 9.8 eV לא יגיעו גם הם לאנודה. זה ההסבר לירידה השנייה בגרף (קטע IV).

לאחר שהמדענים הבינו את תוצאות הניסוי, נשאלה השאלה: האם האטום יישאר במצב המעורר זמן רב – או שיחזור למצב היסוד שלו? ואם יחזור, לאיזו צורה תותמר אנרגיית העירור? הרי קלוש הסיכוי להעביר אותה בחזרה לאלקטרון מתנגש מזדמן! נבדקה האפשרות שהאנרגיה תיפלט בצורה של פוטון – ואכן קרינה כזו נתגלתה! היא היתה בתחום האולטרה-סגול ($\lambda = 0.254 \mu\text{m}$) והופיעה כאשר המתח המאיץ היה $U = 4.9 \text{ V}$.

ניסויי פרנק-הרץ סיפקו הוכחה ישירה לקיום מצבי אנרגיה בדידים, והיוו בסיס לטכניקות ספקטרוסקופיות נוספות לחקירת מבנה האטום.



§95 הנחות היסוד של בוהר מודל אטום המימן לפי בוהר

הפיזיקאי הדני **נילס בוהר**, שחקר ופיתח את תורת הקוונטים – הוא שחילץ בשנת 1913 את תורת מבנה האטום מהמצב המביך. **איינשטיין** העריך את עבודתו של **בוהר** כ"מוזיקליות עלית בתחום המחשבה". בהתבסס על עובדות ניסוייות בודדות חזה **בוהר** בעזרת האינטואיציה הגאונית שלו את מהות התופעות שחקר.

הנחות היסוד של בוהר

בוהר לא פיתח את תורת האטום המסודרת, אלא ניסח בצורת הנחות יסוד את בסיס התיאוריה החדשה. הוא לא שלל בצורה גורפת את חוקי הפיזיקה הקלאסית, אבל הנחות היסוד החדשות שלו תחמו והגבילו חלק מההנחות המתבססות עליה. הצלחת התיאוריה של **בוהר** היתה מדהימה, ולכל המדענים התבהר ש**בוהר** מצא דרך נכונה לפיתוח התיאוריה המושלמת של תנועת חלקיקי היסוד: **המכניקה הקוונטית**.

נילס בוהר (1885 – 1962)



פיזיקאי דני. פיתח את התיאוריה הקוונטית הראשונה של האטום, ולאחר מכן השתתף בפיתוח היסודות של המכניקה הקוונטית. **בוהר** תרם רבות לפיתוח תורת הגרעין האטומי והתגובות הגרעיניות. הוא השלים את מודל הביקוע של גרעיני האטום, שבמהלכו משתחררת אנרגיה אדירה. בקופנהגן ייסד בוהר את בית-הספר הבינלאומי לפיזיקאים, ותרם לשיתוף פעולה בין פיזיקאים מכל העולם.

הנחת היסוד הראשונה של **בוהר** היא זו: **המערכת האטומית יכולה להימצא במצבים יציבים מיוחדים, המכונים קוונטיים, ולכל אחד מהם מתאימה אנרגיה מסוימת E_n . במצב יציב זה אין המערכת פולטת קרינה**. הנחה זו סותרת את המכניקה הקלאסית, הטוענת שאנרגיית האלקטרונים בתנועה עשויה להיות כלשהי. ההנחה סותרת גם את האלקטרודינמיקה של **מקסוול**, המתירה אפשרות של תנועה מואצת של אלקטרונים ללא קרינת גלים אלקטרומגנטיים.

הנחות היסוד והאטום של בוהר

הנחת היסוד השנייה של בוהר היא זו: פליטת אור מתרחשת במהלך מעבר של אטום ממצב יציב ברמת אנרגיה גבוהה יותר E_k – למצב יציב ברמת אנרגיה נמוכה יותר E_n . אנרגיית הפוטון הנפלט שווה להפרש האנרגיות שבין שני המצבים היציבים:

$$(12.2) \quad h\nu_{kn} = E_k - E_n$$

מכאן אפשר לחלץ את תדירות הקרינה הנפלטת:

$$(12.3) \quad \nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h} = \frac{E_k}{h} - \frac{E_n}{h}$$

כאשר אור נבלע, עובר האטום ממצב יציב בעל רמת אנרגיה נמוכה למצב יציב בעל רמת אנרגיה גבוהה יותר.

גם הנחת היסוד השנייה סותרת את האלקטרודינמיקה של מקסוול, מכיוון שבהתאם להנחה זו, אין תדירות האור הנפלט מעידה על תכונות התנועה של האלקטרון, אלא על שינוי האנרגיה של האטום בלבד.

בוהר השתמש בהנחות אלה כדי לפתח תיאוריה במערכת פשוטה ביותר: אטום המימן. הבעיה העיקרית היתה למצוא תדירויות של גלים אלקטרומגנטיים, המוקרנים על-ידי המימן. את התדירויות האלה ניתן למצוא בהתבסס על ההנחה השנייה, אם ידוע כיצד להגדיר את המצבים היציבים של אנרגיית האטום. גם את הכלל הזה ניסח **בוהר** כהנחת יסוד.

מודל אטום המימן על-פי בוהר

בוהר השתמש בחוקי המכניקה של ניוטון ובכלל החישוב של מצבים יציבים שניסח, וחישב את הרדיוסים של מסלולי האלקטרון ואת רמת אנרגיות המצבים היציבים. הרדיוס המזערי של המסלול – הוא שקובע את גודל האטום.

בציורים 248 א-ו מתוארים ערכי האנרגיה (ביחידות של אלקטרון-וולט¹) של המצבים היציבים. הנחת היסוד השנייה של **בוהר** מאפשרת לחשב – על-פי הערכים

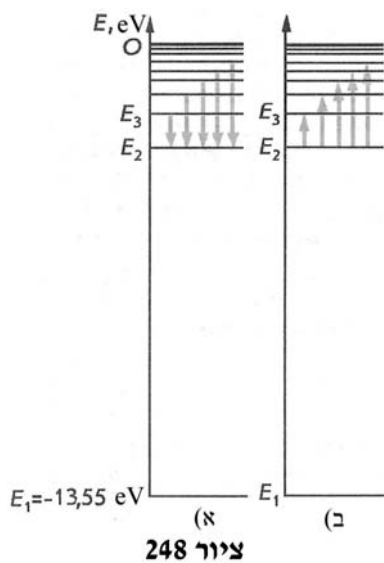
¹ בפיזיקה אטומית מקובל לבטא אנרגיה ביחידות של אלקטרון-וולט (eV). 1 eV שווה

לאנרגיה, שרוכש האלקטרון לאחר מעבר של הפרש פוטנציאלים של וולט אחד:

$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$



הידועים של רמות האנרגיה של המצבים היציבים – את תדירויות הקרינה הנפלטת על-ידי אטום המימן. התיאוריה של **בוהר** נותנת ערכי תדירויות הקרובים לאלה הנמדדים במעבדה. כל תדירויות הפליטה של אטום המימן יוצרות שורת סדרות, וכל אחת מהן נוצרת במהלך מעבר האטום לאחד ממצבי האנרגיה המותרים בכל מצבי האנרגיה העליונים (המצבים בעלי אנרגיה גבוהה יותר).



המעברים למצב המעוקר הראשון (לרמת האנרגיה השנייה) מהרמות העליונות יוצרים את **סדרת בלמר**. בציור 248 מתוארים המעברים האלה על-ידי חצים. הקווים האדום, הירוק ושני הכחולים הם באזור הנראה של הספקטרום (איור 3V בדף הצבעוני) ומתאימים למעברים:

$$E_3 \rightarrow E_2, E_4 \rightarrow E_2, E_5 \rightarrow E_2, E_6 \rightarrow E_2$$

סדרה זו מכונה על שם המורה השווייצרי **בלמר**, שעל בסיס ניסויים פיתח עוד בשנת 1885 נוסחה פשוטה לחישוב התדירויות של קווי הספקטרום של המימן בתחום הנראה.

בליעת אור

בליעת אור היא התהליך ההפוך לפליטה. כאשר אטום בולע אור, הוא עובר ממצבי אנרגיה נמוכים לגבוהים. הקרינה שהוא בולע היא בעלת אותה התדירות שהוא פולט במעברו ממצבי אנרגיה גבוהים לנמוכים. בציור 248 מתוארים בחצים מעברי האטום, המלווים בבליעת אור, ממצבים מסוימים למצבים אחרים.

על בסיס שתי הנחות היסוד ועל בסיס כלל חישוב רמות האנרגיה מצא **בוהר** את רדיוס האטום של המימן ואת רמות האנרגיה של המצבים היציבים של האטום. כך ניתן היה עתה לחשב את התדירויות של הגלים האלקטרומגנטיים, הנפלטים והנבלעים על-ידי האטום.

הנחות היסוד והאטום של בוהר

?

1. מהן הסתירות בין הנחות היסוד של בוהר לבין חוקי המכניקה הקלאסית והאלקטרודינמיקה?
2. איזו קרינה נוצרת במעברי אלקטרון באטום המימן לרמת האנרגיה הנמוכה ביותר? ציירו באמצעות חצים את המעברים האלה על הסכימה של רמות האנרגיה (ציור 248).

§96 קשיי התורה של בוהר מכניקה קוונטית

ההצלחה הגדולה ביותר לתיאוריה של בוהר מיוחדת לאטום המימן; בזכותה היה אפשר לבנות תיאוריה כמותית של הספקטרום.

אולם המדענים לא הצליחו לפתח תיאוריה כמותית של האטום הבא לאחר המימן – ההליום, בהתבסס על הרעיונות של בוהר. לגבי אטום ההליום ואטומים מורכבים יותר אפשרה התורה של בוהר להסיק מסקנות איכותיות בלבד, חשובות כשלעצמן.

אין זה מפתיע, שכן התורה של בוהר מלאה סתירות פנימיות: לצורך הפיתוח של תורת אטום המימן השתמשו, מחד, בחוקי המכניקה הניוטונית ובחוק קולון הידוע מזמן, ומאידך הוגדרו הנחות יסוד חדשות במונחים של קוונטים, שלכאורה אין בינם לבין המכניקה של ניוטון והאלקטרודינמיקה של מקסוול ולא כלום. השימוש במושגי הקוונטים דרש ארגון מחדש הן של המכניקה הן של האלקטרודינמיקה. ארגון כזה התבצע במהלך הרבע השני של המאה ה-20, כאשר פותחו תיאוריות חדשות: מכניקת הקוונטים ואלקטרודינמיקה קוונטית.

הנחות היסוד של בוהר המשיכו להתקיים – אולם לא כהנחות יסוד, אלא כתוצאות של העקרונות הבסיסיים של התיאוריות החדשות. הסתבר שכלל החישוב של רמות האנרגיה, שפיתח בוהר, מתקיים לעתים רחוקות.

המושג של מסלולים מוגדרים, שבהם נע האלקטרון באטום של בוהר, הפך למקורב מאוד. למעשה דומה תנועת האלקטרון באטום רק מעט מאוד לתנועת הפלנטות במסלולים מוגדרים. אילו אפשר היה לצלם את אטום המימן בזמן

הנחות היסוד והאטום של בוהר

חשיפה ארוך, היינו רואים ענן בעל צפיפות משתנה. את רוב הזמן מעביר האלקטרון במרחק מסוים מהגרעין, ואפשר לתאר מרחק זה באופן מקורב מאוד כרדיוס האטום. צילום האטום לא היה דומה לתמונה המוכרת של מערכת השמש, אלא דומה יותר לכתם מטושטש, שהתקבל מצילום פרפר המסתובב סביב פנס.¹

בעזרת המכניקה הקוונטית ניתן היום להשיב לכל שאלה בדבר המבנה והתכונות של קליפות האלקטרונים באטומים, אולם התורה הכמותית מורכבת מאוד, ואנו לא נעסוק בה בספר זה. התיאור האיכותי של קליפות האלקטרונים נלמד בדרך כלל במסגרת הכימיה.

§97 לייזרים

על השאלה: מהו לייזר?² השיב אחד משלושת הפיזיקאים, שקיבלו פרס נובל על פיתוחו, המדען הרוסי נ' באסוב: "לייזר הוא מכשיר, שבו האנרגיה – בין אם תרמית או כימית או חשמלית – הופכת לאנרגיית השדה האלקטרומגנטי; זו קרן לייזר. להתמרה כזו של אנרגיה מתלווה בהכרח איבוד חלק מהאנרגיה, אולם אנרגיית הלייזר איכותית יותר. איכות האנרגיה מוגדרת על-ידי צפיפותה הגבוהה ואפשרות העברתה למרחקים ארוכים. את קרן הלייזר אפשר למקד בכתם קטנטן, שקוטרו בסדר גודל של אורך הגל, ולקבל צפיפות אנרגיה, העולה על צפיפות האנרגיה של פיצוץ גרעיני. באמצעות קרינת לייזר השיגו ערכים גבוהים ביותר של טמפרטורה, לחץ ועוצמת שדה מגנטי. קרן הלייזר נושאת מידע באורח יעיל ביותר, ולכן פתח פיתוח הלייזר עידן חדש לאנושות בתחום העברה ועיבוד של מידע".

פליטה מאולצת

בשנת 1917 ניבא איינשטיין אפשרות לפליטה מאולצת של אור על-ידי האטום, שמשמעה: פליטה של אור על-ידי אטומים, הנמצאים במצב מעורר בהשפעת אור הפוגע בהם. התכונה הנפלאה של קרינה זו היא העובדה שגל האור, הנוצר בפליטה מאולצת, אינו שונה מהגל הפוגע באטום לא בתדירות, לא במופע ולא בקיטוב.

¹ יש להבין שהדמיון שטחי מאוד ומתקיים רק בממוצע של זמן חשיפה ארוך. תנועת האלקטרון אינה דומה למעוף הפרפר, אף לא לתנועת גוף מקרוסקופי אחר.

² המילה לייזר מורכבת מהאותיות הראשונות של הביטוי האנגלי: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (הגברת אור באמצעות פליטה מאולצת של קרינה).

בשפה של תורת הקוונטים, פליטה מאולצת משמעה: מעבר האטום מרמת אנרגיה גבוהה לרמת אנרגיה נמוכה יותר; אולם המעבר אינו ספונטני כבפליטה רגילה, אלא מתרחש תחת השפעה חיצונית.

לייזרים

עוד בשנת 1940 טען הפיזיקאי הסובייטי **פבריקנט** שיתאפשר שימוש בפליטה מאולצת להגברת הגלים האלקטרומגנטיים. בשנת 1954 יישמו המדענים הסובייטים **באסוב** ו**פרוחורוב** והמדען האמריקני **טאונס** את תופעת הפליטה המאולצת ובנו מחולל גלי רדיו בתחום המיקרוגל, שאורכם 1.27 cm.

על פיתוח זה זכו שלושת המדענים בשנת 1963 בפרס נובל. בשנת 1960 נבנה בארצות-הברית הלייזר הראשון – המחולל הקוונטי של גלים אלקטרומגנטיים בתחום הנראה.

תכונות קרינת הלייזר

כמקור אור יש לייזר יתרונות על-פני מקורות אור אחרים:

1. לייזר מאפשר ליצור אלומת אור בעלת זווית התבדרות קטנה מאוד (כ- 10^{-5} rad). קרן כזו, המשוגרת מכדור הארץ לירח, תיצור על הירח כתם שקוטרו 3 ק"מ.
2. אור הלייזר מונוכרומטי. להבדיל ממקורות אור רגילים, שבהם אטומים פולטים אור באופן בלתי תלוי, פולטים האטומים בלייזר אור באופן מתואם. לכן אין משרעת הגל מכילה שינויים אקראיים.
3. לייזרים מהווים מקורות אור בעלי עוצמה גבוהה ביותר. בתחום צר של ספקטרום ובמשך פרק זמן קצר מאוד (בסדר גודל של 10^{-13} sec) מפיקים סוגי לייזרים אחדים אור בעוצמה של 10^{17} W/cm² – שעה שעוצמת הקרינה מהשמש שווה ל- $7 \cdot 10^3$ W/cm² בלבד, ובכל תחום הספקטרום. בתחום הצר של $\Delta\lambda = 10^{-6}$ cm (רוחב קו ספקטרלי של לייזר) עוצמת הקרינה של השמש שווה בסך הכל ל- 0.2 W/cm². עוצמת השדה החשמלי בגל אלקטרומגנטי, הנפלט מלייזר, עולה על עוצמת השדה בתוך האטום.



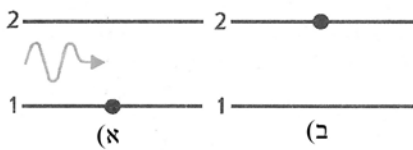
עקרון פעולת הלייזר

בתנאים רגילים נמצאים רוב האטומים במצב האנרגטי הנמוך ביותר. לכן אין חומרים קורניים אור בטמפרטורות נמוכות.

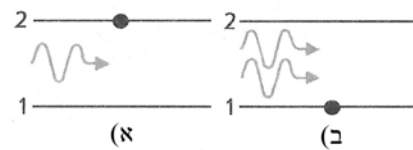
כאשר גל אלקטרומגנטי עובר דרך חומר, חלק מהאנרגיה שלו נבלע. האנרגיה הנבלעת מעוררת חלק מהאטומים, כלומר, הם עוברים למצב אנרגטי גבוה יותר. מעבר זה מלווה בהפחתת האנרגיה של אלומת האור:

$$h\nu = E_2 - E_1$$

השווה להפרש האנרגיות בין הרמות 2 ו-1. בציור 249 מתוארים באופן סכימתי אטום לא מעוֹכָר וגל אלקטרומגנטי בצורת קטע של גרף פונקציית סינוס. האלקטרון נמצא ברמת האנרגיה הנמוכה. בציור 249 מתואר אטום מעוֹכָר, כלומר שבלע אנרגיה. האטום המעוֹכָר עשוי למסור את האנרגיה לאטומים שכנים כתוצאה מהתנגשות, או לפלוט פוטון בכיוון כלשהו.



ציור 249



ציור 250

נתאר כעת לעצמנו, שבצורה כלשהי עוררנו את רוב האטומים של התווך. מעבר גל אלקטרומגנטי בעל תדירות

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

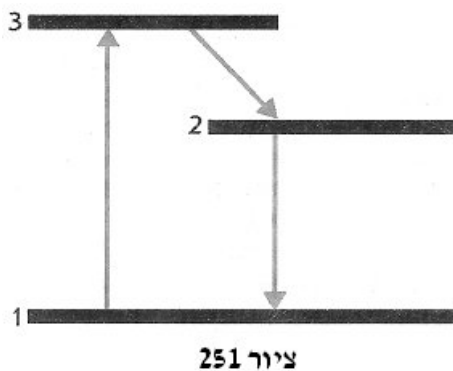
ילווה אז דרך התווך לא בהיחלשות הגל, אלא להפך: יגִבֵּר הגל על חשבון הפליטה המאולצת. בהשפעת קרינה זו חוזרים האטומים בצורה מסודרת ומתואמת לרמת האנרגיה הנמוכה ביותר ופולטים גלים בעלי אותה תדירות ומופע כִּשְׁל הגל הפוגע. בציור 250 מתוארים האטום המעורר והגל; ובציור 250 מתואר האטום, שעבר לרמה הבסיסית, והגל שהתגבר.



מערכת בעלת שלוש רמות אנרגטיות

קיימות שיטות עירור שונות של אטומים בתווך. בלייזר, המבוסס על גביש רובין, משתמשים במנורת הבזק חזקה, ועירור האטומים מתבצע בעקבות בליעת אור.

אולם שתי רמות אנרגיה אינן מספיקות כדי ליצור לייזר. לא חשוב מה תהיה עוצמת האור של המנורה – מספר האטומים המעוררים לא יהיה גדול ממספר האטומים הנמצאים ברמת היסוד. הרי אור מעורר בו-זמנית אטומים וגם גורם למעברים מאולצים מהרמה העליונה לתחתונה!



הפתרון נמצא בשימוש בשלוש רמות אנרגיה (מספר הרמות הכולל הוא תמיד גדול, אולם מדובר ברמות ה"פעילות").
בציור 251 מתוארות שלוש רמות האנרגיה. בהעדר השפעה חיצונית אין הזמן שבו נמצאת המערכת האטומית במצבים אנרגטיים שונים ("זמן החיים") שווה. זמן החיים של המערכת ברמה 3

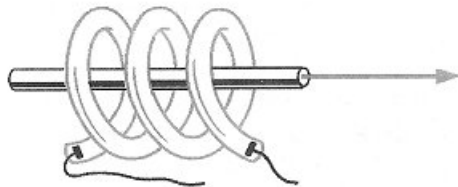
קצר מאוד – בסדר גודל של 10^{-8} sec, ולאחר מכן עוברת המערכת בעצמה למצב 2, ללא פליטת אור (האנרגיה המשתחררת במעבר זה מועברת לסריג הגביש).

"זמן החיים" במצב 2 הוא פי 100,000 ארוך יותר, כלומר קרוב ל- 10^{-3} sec. המעבר ממצב 2 למצב 1 בהשפעת גל אלקטרומגנטי חיצוני מלווה בפליטה. בתהליך זה משתמשים בלייזרים: לאחר הבזק של מנורה חזקה עוברת המערכת למצב 3, וכעבור פרק זמן של כ- 10^{-8} sec היא עוברת למצב 2, ובו היא מתקיימת זמן ארוך. כך נוצר "אכלוס יתר" של הרמה המעוררת 2 יחסית ל"אכלוס" ברמת היסוד 1.

רמות אנרגיה מתאימות נמצאות בגביש של רובין. זהו גביש אדום של תחמוצת אלומיניום Al_2O_3 , המכיל אטומים של כרום קסיג (כ- 0.05%). דווקא הרמות של יוני הכרום הן בעלי התכונות הנדרשות.



המבנה של לייזר רובין



ציור 252

מגביש הרובין יוצרים מוט, שבו הבסיסים הם משטחים ישרים ומקבילים. מנורת קשת, המבוססת על התפרקות גז שצורתה ספירלה, יוצרת אור כחול-ירוק. פריקה של סוללת הקבלים, בעלת קיבולת של כמה אלפי מיקרופאראד, יוצרת זרם קצר דרך הגז, ונוצר הבזק אור בהיר. כעבור זמן קצר נוצר "אכלוס יתר" של רמת האנרגיה 2.

כתוצאה ממעברים אקראיים $1 \rightarrow 2$ מתחילים להיפלט גלים בכל הכיוונים. אותם גלים, המתקדמים בזווית לציר הגביש, יוצאים ממנו ואינם משתתפים עוד בתהליך; אולם הגל, המתקדם לאורך ציר הגביש, עובר החזרות מרובות מהקצוות. גל זה גורם להיווצרות של פליטה מאולצת של יונים מעוזרים של כרום, והוא מתעצם מהר מאוד.

אחד ממשטחי הקצה הוא מראָה, והאחר שקוף למחצה. דרכו יוצא הבזק קצר (הנמשך כמאה מיקרו-שניות) של אור אדום בעל אותן תכונות נפלאות, שאותן תיארו בראשית הפרק.

הגל קוהרנטי, מכיוון שכל האטומים פולטים באופן מתואם; ובעל עוצמה רבה, מכיוון שבמהלך הפליטה המאולצת משתחררת כל האנרגיה הנאגרת בפרק זמן קצר מאוד.

סוגי לייזרים אחרים

לייזר הרובין שהכרנו פועל בצורת הבזקים, אך קיימים גם לייזרים הפועלים באופן רציף.

בלייזרים מבוססי גז התווך הפעיל הוא גז, והאטומים של התווך הפעיל מעוזרים באמצעות התפרקות חשמלית.



משתמשים גם בלייזרים המבוססים על מוליכים למחצה; לייזרים מסוג זה פועלים באופן רציף, ומקור אנרגיית העירור הוא זרם חשמל.

נבנו גם לייזרים מבוססי גז (גזודינמיים) בעלי עוצמה רבה – עד מאות קילוואטים, הפועלים באופן רציף. בלייזרים אלה נוצר "אכלוס יתר" של הרמות העליונות בתהליך של התרחבות והתקררות אדיאבטיות של זרימות גז, המחוממות לפני כן עד לטמפרטורות של כמה אלפי מעלות.

יישומי לייזרים

יישום הלייזרים נפוץ מאוד בתקשורת, בעיקר בחלל, שבו אין עננים הבולעים אור. משתמשים בלייזרים גם לרישום מידע ולשמירתו (תקליטורים).

לעוצמה האדירה של אלומת לייזר נמצא יישום בתעשיית אידוי מתכות בריק, בחיתוך ובריתוך של מתכות ועוד. בעזרת קרן לייזר מבצעים ניתוחים רפואיים: "מלחימים" את רשתית העין שהתנתקה ממקומה. בהתבסס על הקוהרנטיות של קרן הלייזר מקבלים דמויות תלת-ממדיות של גופים (הולוגרמות).

הלייזרים אפשרו לבנות מד-טווח, שבו נמדד המרחק לגוף בדיוק של כמה מילימטרים. דיוק כזה לא ניתן להשיג באמצעות מערכות איכון רדיו.

על-ידי הארת אטומים או מולקולות באור לייזר ניתן ליזום תגובות כימיות, שאינן מתרחשות בתנאים רגילים.

נמשך המחקר ביישום אפשרי של קרני לייזר חזקות ל"הצתת" תגובת היתוך גרעיני מבוקרת.

יישומי הלייזרים כה רבים ומגוונים, שקצרה היריעה מלהזכירם פה.

פיתוח הלייזר הוא דוגמה לפיתוח מדע בסיסי (תורת הקוונטים), המוביל להתקדמות אדירה בתחומי תעשייה וטכנולוגיה שונים.



1. מה השונה בין קרינת לייזר לבין הקרינה של מנורת להט?

2. מהם השימושים העיקריים של הלייזרים?



מקבץ תרגילים 13

1. רדיוס המסלול הראשון של אלקטרון במודל האטום של בוהר הוא:

$$r_0 = \frac{\hbar^2}{kme^2}$$

כאשר: m - ו- e - המסה והמטען האלקטרוני, בהתאמה; $k = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$.
מהי המהירות v והתאוצה a של האלקטרון?

2. לאיזה מרחק מזערי יתקרבו במהלך התנגשות מרכזית חלקיק α וגרעין של

בדיל נייח? המהירות של חלקיק α : $10^9 \frac{cm}{sec}$, ומסתו: $6.7 \cdot 10^{-24} g$.

3. מצאו את אורך הגל של אור, הנפלט על-ידי אטום מימן במעברו ממצב יציב בעל

אנרגיה $E_4 = -0.85 eV$ ($k = 4$) למצב בעל אנרגיה $E_2 = -3.4 eV$ ($n = 2$).

תקציר פרק 12

1. במהלך מחקר על פיזור חלקיקי α בחומר גילה **רתרפורד** את קיומו של גרעין האטום. המטען החיובי וכמעט כל מסת האטום מרוכזים בגרעין האטום, שגודלו $10^{-13} - 10^{-12} cm$ (ערך זה קטן מגודל האטום פי 10,000 – 100,000). מטען הגרעין שווה למספרו הסידורי של היסוד בטבלת היסודות המחזורית של **מנדלייב** כפול גודל המטען של אלקטרון. גרעין האטום של מימן הוא פרוטון בודד.

2. על בסיס הניסויים הציע **רתרפורד** את המודל הפלנטרי של האטום. לפי מודל זה, סובבים האלקטרונים סביב הגרעין בדומה לפלנטות המסתובבות סביב השמש; אולם על-פי חוקי הפיזיקה הקלאסית לא יהיה יציב אטום כזה, משום שהאלקטרונים צריכים להקרין, וכך לאבד אנרגיה ולנחות על הגרעין.

3. הפתרון לסתירות אלה הוצע על-ידי **בוהר** במהלך פיתוח התורה הקוונטית.

בוהר הציע שתי הנחות יסוד, המנוגדות למכניקה של **ניוטון** ולאלקטרודינמיקה של **מקסוול**.

לפי הנחת היסוד הראשונה יכולה מערכת אטומית להימצא במצבים יציבים מיוחדים (מצבים קוונטיים), ולכל אחד מהם מתאימה רמת אנרגיה מסוימת E_n ; במצב יציב אין האטום מקרין.

על-פי הנחת היסוד השנייה של **בוהר** מתרחשות פליטה או בליעה של אור במעבר האטום ממצב יציב אחד לאחר. אנרגיית הפוטון הנפלט או הנבלע שווה להפרש רמות האנרגיות במצבים היציבים:

$$h\nu_{kn} = E_k - E_n$$

4. תורת **בוהר** נתנה ערכים נכונים לכל תדירויות הספקטרום הקווי של המימן, ואפשרה למצוא באופן תיאורטי את רדיוס אטום המימן.

אולם תורתו של **בוהר** אינה עקבית מבחינה לוגית, ועל בסיסה לא הצליחו לפתח מודלים כמותיים של אטומים מורכבים יותר (אטומי הליום ואחרים).

לפיתוח תורת הקוונטים התלווה ארגון מחדש של המכניקה והאלקטרודינמיקה. עבודה זאת הסתיימה בשנות העשרים של המאה ה-20, וכך הושלמו המכניקה הקוונטית והאלקטרודינמיקה הקוונטית.

5. על בסיס תורת הקרינה הקוונטית פותחו המחוללים הקוונטיים של גלי רדיו ומחוללים קוונטיים של האור הנראה – הלייזרים. הלייזרים יוצרים קרינה קוהרנטית בעלת עוצמה רבה.

קרינת הלייזרים מוצאת יישום רחב ביותר בתחומי מדע וטכנולוגיה שונים.



פרק 13. הפיזיקה של גרעין האטום

המושגים גרעין האטום וחלקיקי יסוד הוזכרו פעמים רבות. ידוע לכם שאטום מורכב מגרעין ומאלקטרונים. גרעין האטום עצמו מורכב מחלקיקי יסוד. הפרק של הפיזיקה, שבו נלמד על המבנה ועל התגובות המתרחשות בגרעין האטום, מכונה פיזיקה גרעינית.

תחילה לא היתה חלוקה לפיזיקה גרעינית ולפיזיקה של חלקיקי יסוד. את הרב-גוניות של עולם חלקיקי היסוד גילו כאשר חקרו את התהליכים הגרעיניים. הגדרת הפיזיקה של חלקיקי היסוד כמדע עצמאי התרחשה בשנות החמישים של המאה ה-20. כעת מפרידים בין שני תחומי הפיזיקה: האחד הוא חקירת גרעין האטום, והאחר – חקירת התכונות וההמרות ההדדיות של חלקיקי יסוד.

§98 שיטות גילוי ורישום של חלקיקי יסוד

תחילה נכיר מכשירים, שהודות להם החלה להתפתח הפיזיקה הגרעינית והפיזיקה של חלקיקי היסוד. מכשירים אלה נועדו לצפייה ולחקירה של ההתנגשויות והמעברים ההדדיים בין הגרעין לבין חלקיקי היסוד, והם מספקים מידע על האירועים המתרחשים בעולם המיקרו.

עקרון פעולת המכשירים לרישום חלקיקי היסוד

כל מכשיר, הרושם את תנועתם של חלקיקי יסוד או של גרעינים אטומיים נעים, דומה לרובה דרוך: כל מאמץ קטן בלחיצה על הדק הרובה יגרום לתוצאה שאינה משתווה לעוצמת מאמץ הירי.

רשם אירועי המיקרו הוא מערכת מורכבת, המתקיימת במצב בלתי יציב. כל זעזוע קטן, הנגרם על-ידי חלקיק עובר, יוזם תהליך של מעבר המערכת למצב חדש, יציב יותר; ותהליך זה – הוא המאפשר לרשום את החלקיק. קיימות כיום כמה שיטות שונות לרישום החלקיקים, ובהתאם למטרות הניסוי והתנאים שבהם מבצעים אותן משתמשים במכשירים אלה או אחרים, השונים זה מזה בתכונותיהם העיקריות.

גילוי ורישום של חלקיקי היסוד

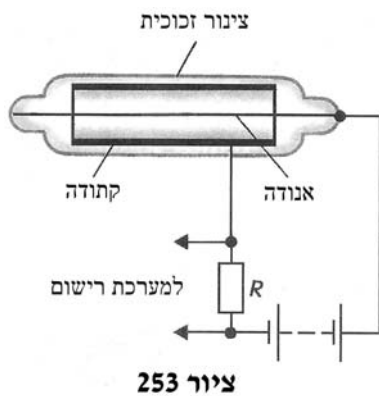
מונה גייגר

מונה גייגר הוא אחד המכשירים החשובים ביותר לרישום ולספירה אוטומטית של חלקיקים.

המונה (ציור 253) מכיל צינור זכוכית, המצופה מבפנים בשכבת מתכת (קתודה), וחוט מתכת דק העובר לאורך ציר הצינור (אנודה). הצינור מלא בגז, בדרך כלל ארגון. פעולת המונה מבוססת על תופעת היינון בעת ההתנגשות. בעבור חלקיק טעון (אלקטרון, חלקיק α וכדומה) דרך הגז, הוא עוקר אלקטרונים מאטומים ויוצר יונים חיוביים ואלקטרונים חופשיים. השדה החשמלי בין האנודה לקתודה (ביניהן קיים הפרש מתח גבוה) מאיץ את האלקטרונים עד לרמות אנרגיה, שעבורן מתחיל תהליך היינון. כך נוצרת שרשרת יונית, הזרם דרך המכשיר גדל באופן חד, נוצר הבזק מתח על נגד העומס R , וזה נרשם במכשיר הרישום.

על מנת שהמונה יוכל לרשום את החלקיק הבא הנכנס בו, יש לכבות את שרשרת ההתפרקויות. כיבוי זה מתרחש באופן אוטומטי: מכיוון שברגע הופעת הבזק הזרם המתח על נגד העומס R גדול, יורד באופן קיצוני הפרש המתח בין האנודה לקתודה, ושרשרת ההתפרקויות נפסקת.

משתמשים במונה גייגר בעיקר לרישום אלקטרונים וקרינת γ (פוטונים בעלי אנרגיה גבוהה); אולם אי-אפשר לקלוט במישרין את הפוטונים של קרינת γ עקב יכולת היינון הנמוכה שלהם. כדי לגלות אותם מצפים את משטח הפנים של הצינור במתכת, שקרינת γ משחררת ממנה אלקטרונים.



המונה מגלה כמעט את כל האלקטרונים הנכנסים אליו. לגבי קרינת γ נרשם בערך קוונט (פוטון) אחד מתוך מאה. רישום חלקיקים כבדים (לדוגמה: חלקיקי α) אינו פשוט, מכיוון שקשה לעשות במונה מעבר דק שיהיה חדיר לחלקיקים אלה.

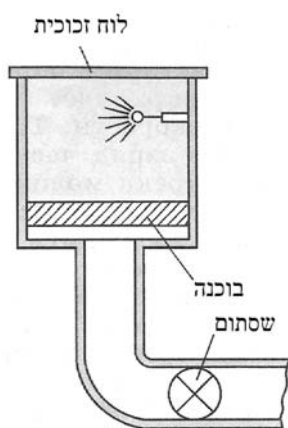
היום פותחו מונים, הפועלים גם על עקרונות אחרים.

גילוי ורישום של חלקיקי היסוד

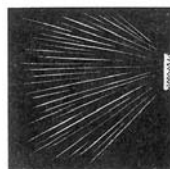
תא וילסון

תא וילסון מאפשר לרשום את מעבר החלקיק וכן כמה מתכונותיו. בתא וילסון, שנבנה ב-1912, משאיר חלקיק טעון שובל, הניתן לצפייה ישירה או לצילום. ניתן לכנות מכשיר זה "חלון לעולם המיקרו", כלומר הצצה לעולם חלקיקי היסוד והגופים המורכבים מהם.

פעולת תא וילסון מבוססת על עיבוי אדים רוויים על-גבי היונים, ובעקבות כך היווצרות טיפות מים. יונים אלה נוצרים לאורך מסלולו של חלקיק נע טעון.



ציור 254



ציור 255

תא וילסון בנוי ממכל אטום, המלא אדי מים או אדי כוהל הקרובים לרוויה (ציור 254). כתוצאה מהוצאה מהירה של הבוכנה יורד הלחץ מתחתיה, והאדים מתרווחים בתא בתהליך אדיאבטי, ועקב כך מתקרר האד והופך לרווי ביותר. מצב זה של האד אינו יציב: האד מתעבה בקלות. כגרעיני עיבוי משמשים היונים, הנוצרים באזור הפעיל של התא על-ידי החלקיק העובר. אם חלקיק נכנס לתא רגע לפני ההתרווחות או מיד לאחריה, מופיעות בדרכו טיפות מים. טיפות אלה מהוות את השובל הנראה של החלקיק, המכונה **טראק** (ציור 255). לאחר מכן חוזר התא למצבו ההתחלתי, והיונים מסולקים על-ידי השדה החשמלי. בהתאם לגודל התא משתנה זמן הקיום של המצב הפעיל מכמה שניות לעשרות דקות.

המידע שמספקים טראקים בתא עשיר בהרבה מזה שיכול לספק מונה כלשהו. על-פי אורך הטרסק ניתן לגלות את אנרגיית החלקיק, ולפי מספר הטיפות ליחידת אורך הטרסק – את מהירותו.

ככל שהטרסק ארוך יותר – כן גדולה יותר אנרגיית החלקיק; וככל שמספר הטיפות ליחידת אורך הטרסק גדול יותר – כן נמוכה מהירותו.

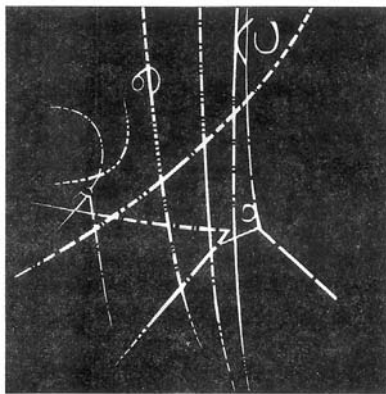
המדענים הרוסים ג' קפיצא וד' סקובלצין הציעו להכניס את התא לשדה מגנטי

גילוי ורישום של חלקיקי היסוד

אחיד. השדה המגנטי פועל על חלקיק טעון נע בכוח מסוים (כוח לורנץ), וזה מעקם את מסלול החלקיק מבלי לשנות את גודל מהירותו. עקמומיות הטראק גבוהה יותר עבור חלקיק בעל מטען גדול יותר ומסה קטנה יותר. על-פי רדיוס העקמומיות ניתן לגלות את היחס בין מטען החלקיק למסתו. אם אחד מהגדלים האלה ידוע, אפשר למצוא את האחר; ובאופן דומה ניתן לחשב את מסת החלקיק על-פי מטען החלקיק ועקמומיות הטראק.

תא הבועות

בשנת 1952 הציע המדען האמריקני ד' גלייזר להשתמש לגילוי הטראקים של החלקיקים בנוזל, המחומם לטמפרטורה הגבוהה מטמפרטורת הרתיחה. על היונים, הנוצרים במהלך תנועה מהירה של חלקיק טעון בנוזל כזה, נוצרות בועות אדים, והן היוצרות את השובל הנראה. תאים מסוג זה מכונים **תאי בועות**. במצב ההתחלתי נמצא הנוזל בתא בלחץ גבוה, וכך נמנעת הרתיחה – אף שטמפרטורת הנוזל גבוהה מטמפרטורת הרתיחה בלחץ אטמוספרי. אם לחץ הנוזל יורד באופן קיצוני, נמצא מצב הנוזל בחימום יתר, ולפרק זמן קצר יהיה מצבו בלתי יציב. חלקיקים טעונים, העוברים דרך התא בדיוק ברגע זה, יגרמו להופעת הטראקים, המכילים בועות אדים (ציור 256). הנוזלים שבהם משתמשים הם מימן נוזלי ופרופאן. פרק הזמן הפעיל אינו גדול: כ- 0.1 שנייה.



ציור 256

יתרונו של תא הבועות לעומת תא וילסון הוא בצפיפות גבוהה יותר של חומר פעיל. עקב כך מסלולי החלקיקים קצרים, ואפילו חלקיקים בעלי אנרגיה גבוהה נתקעים בתא. עובדה זו מאפשרת לצפות בסדרת מעברים עוקבים של החלקיק ובתגובות הנלוות.

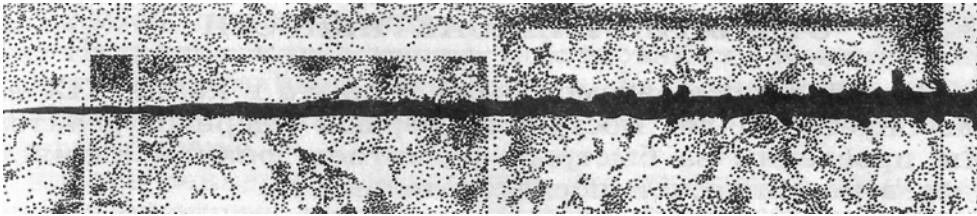
הטראקים בתא וילסון ובתא הבועות מהווים אחד ממקורות המידע העיקריים לגבי התנהגותם ותכונותיהם של החלקיקים.

צפייה בטראקים של חלקיקי היסוד מרתקת ומעניקה תחושה של מגע ישיר בעולם המיקרו.

שיטת שכבות הצילום העבות

בנוסף לתא וילסון ולתא הבועות משתמשים לגילוי ולרישום של חלקיקים בשכבות צילום עבות. פעולת היינון בתוך שכבה רגישה של פלטת צילום, הנגרמת בעקבות העברת חלקיקים טעונים מהירים דרך השכבה, אפשרה למדען הצרפתי א' בקרל לגלות את תופעת הרדיואקטיביות בשנת 1896. השיטה שוכללה מאוחר יותר על-ידי מדענים סובייטים.

שכבת הצילום מכילה מספר רב של גבישוני כסף ברומיד. חלקיק טעון מהיר, החודר לתוך הגבישון, עוקר אלקטרונים מאטומים בודדים של ברום, ושרשרת של גבישוניים כאלה יוצרת דמות סמויה. לאחר תהליך הפיתוח נוצר בגבישוניים כסף מתכתי, ושרשרת גרגירי כסף משחזרת את מסלול החלקיק (ציור 257). על-פי אורך הטראק ורוחבו אפשר להעריך את האנרגיה האצורה בחלקיק ואת מסתו.



ציור 257

עקב הצפיפות הרבה של השכבה אורך הטראקים קצר מאוד (בסדר גודל של 10^{-3} cm עבור חלקיקי α , הנפלטים על-ידי יסודות רדיואקטיביים), אולם ניתן להגדיל את התמונות.

היתרון של שכבות צילום הוא בזמן החשיפה הארוך מאוד שלהם, המאפשר לקלוט אירועים נדירים. הודות ליכולת הבלימה הגבוהה שבתוך השכבה גדל מספר התגובות המעניינות בין החלקיקים לבין הגרעינים.

תיארנו חלק קטן מהמכשירים לגילוי ולרישום של תנועתם של חלקיקי יסוד. המערכות המודרניות מיועדות לגילוי חלקיקים נדירים בעלי זמן חיים קצר מאוד.

?

1. האם אפשר לגלות חלקיקים בלתי טעונים בתא וילסון ?
2. אילו יתרונות יש לתא הבועות על-פני תא וילסון ?

גילוי ורישום של חלקיקי היסוד

אי-היציבות של אטומים נתגלתה בסוף מאה ה-19, וכעבר 46 שנה נבנה הכור האטומי הראשון. נעקוב אחר הפיתוח המהיר של הפיזיקה הגרעינית בסדר היסטורי.

גילוי הרדיואקטיביות התרחש במקרה, ובעקבותיו הוכחה מורכבותו של גרעין האטום. כפי שזכור לכם נצפו קרני רנטגן לראשונה במהלך התנגשויות של אלקטרונים מהירים בקיר הזכוכית של צינור, שהתרחשה בו התפרקות חשמלית. המדען הצרפתי **בקרל** חקר זמן רב תופעה דומה: זריחת חומרים שהוקרנו באור השמש. לחומרים כאלה משתייך גם מלח האורניום, ששימש בעבודתו של המדען.

בקרל הגה בסוגיה: האם לאחר הקרנת החומר באור השמש מופיעות, בנוסף לאור הנראה, גם קרני רנטגן? **בקרל** עטף לוח צילום בנייר שחור עבה, הניח מעליו גרגיר מלח אורניום וחשף אותו לאור שמש בהיר. לאחר הפיתוח השחיר הלוח באותם מקומות, שבהם היו מונחים גרגירי המלח. הסתבר לו שהאורניום יצר קרינה, הדומה לקרינת רנטגן, החודרת דרך גופים שאינם שקופים ופועלת על לוח צילום. **בקרל** סבר שקרינה זו מופיעה בהשפעת אור השמש; אולם ביום סגרירי בפברואר 1896 דחה את הניסוי עקב מזג האוויר הרע, הכניס את לוח הצילום למגירה, והניח עליו באקראי צלב נחושת, שעליו פוזר מלח אורניום. כשפיתח **בקרל** את לוח הצילום, גילה עליו השחרה שצורתה כשל צלב: ללא השפעה חיצונית כלשהי יצר מלח האורניום בעצמו קרינה. בעקבות כך החל מחקר מקיף בתחום הרדיואקטיביות. סביר להניח שגם ללא צירוף מקרים זה היו מתגלות תופעות הרדיואקטיביות, אולם כנראה מאוחר הרבה יותר.

מהר מאוד גילה **בקרל**, שבדומה לקרינת רנטגן גורמת קרינת מלח האורניום ליינון האוויר ופורקת אלקטרוסקופ טעון. מניסוייו בתרכובות כימיות שונות של אורניום קבע עובדה חשובה מאוד: עוצמת הקרינה נקבעת לפי כמות האורניום בדגם בלבד, כלומר אינה תלויה כלל בסוג התרכובת שלה הוא שייך. במילים אחרות: תכונה זו אופיינית ליסוד אורניום – ולא לתרכובותיו.

הגיויני היה לנסות ולגלות יכולת דומה של קרינה עצמית ביסודות אחרים מלבד אורניום. בשנת 1898 גילו **מרי סקלודובסקי-קירי** בצרפת ומדענים אחרים קרינה

של היסוד תוריום. בהמשך נעשו חיפושים אחר יסודות מקרינים נוספים על-ידי **מרי סקלודובסקי-קירי** ובעלה **פייר קירי**. מחקר מקיף של עפרות, המכילות אורניום ותוריום, אפשרו להם לבודד יסוד חדש, שלא היה ידוע לפני כן. הוא מכונה על שם מולדתה של מרי סקלודובסקי-קירי: **פולוניום**.

מרי סקלודובסקי-קירי (1867 – 1934)



פיזיקאית וכימאית. נולדה בפולין לזוג הורים מורים ולמדה בצרפת. היתה האישה הראשונה שקיבלה תואר פרופסור באוניברסיטת פריס. **סקלודובסקי-קירי** יחד עם בעלה **פייר קירי** גילו את היסודות הרדיואקטיביים **פולוניום ורדיום**, וחקרו את תכונותיהם. היא פיתחה שיטות עיבוד ואנליזה של עפרות אורניום, ובמשך כמה שנים חקרה את הקרינה הרדיואקטיבית והשפעתה על תאים חיים. **מרי סקלודובסקי-קירי** זכתה פעמיים בפרס נובל: בפיזיקה ובכימיה.

לבסוף נתגלה יסוד חדש נוסף, שפלט קרינה חזקה מאוד, וכונה "רדיום" (שמשמעו: קורן). התופעה של פליטה עצמית כונתה על-ידי בני הזוג קירי בשם **רדיואקטיביות**.

לרדיום מסה אטומית יחסית 226, והוא תופס את המשבצת שמספרה 88 בלוח היסודות המחזורי של **מנדלייב**. עד לגילויה של קירי היתה משבצת זו ריקה. על-פי תכונותיו הכימיות שייך הרדיום ליסודות מסוג עפרה בסיסית.

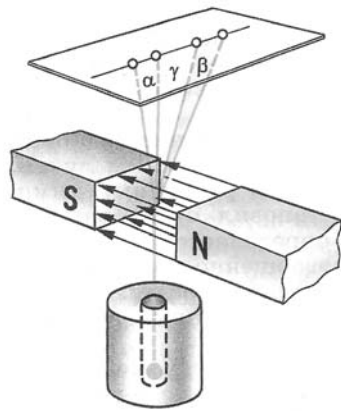
בהמשך גילו, שכל היסודות בעלי מספר סידורי מעל 83 הם יסודות רדיואקטיביים.

בסוף המאה ה-19 התגלתה הרדיואקטיביות. שורה של יסודות כימיים יוצרים באופן עצמאי קרינה מסוג שונה.

§100 קרינות אלפא, ביתא וגמא

לאחר גילויים של היסודות הרדיואקטיביים החל מחקר להבנת המקור הפיזיקלי של הקרינה שהם פולטים. מלבד **בקרל** ובני הזוג **קירי** החל לעסוק בזה גם **רתפורד**.





ציור 258

הניסוי הקלאסי, שאפשר לגלות את הרכב הקרינה הרדיואקטיבית, היה זה: דוגמית רדיום הונחה בתחתית תעלה צרה בתוך גוש עופרת. מול התעלה נמצא לוח צילום. על הקרינה היוצאת מהתעלה פועל שדה מגנטי חזק, שקוויו מאונכים לאלומה (ציור 258). כל המערכת נמצאת בריק.

בהעדר שדה מגנטי נמצא על לוח הצילום לאחר הפיתוח כתם כהה אחד בדיוק מול התעלה. בעקבות פעולת השדה המגנטי

התפצלה האלומה לשלוש אלומות: שני מרכיבים של האלומה המקורית הוסטו לכיוונים מנוגדים – עדות למטענים חשמליים שונים-סימן באלומות אלה: המרכיב השלילי של הקרינה הוסט הרחק מהמרכיב החיובי; והמרכיב השלילי כלל לא הוסט בשדה המגנטי. המרכיב החיובי מכונה "קרני-אלפא", המרכיב השלילי – "קרני-ביתא", והנייטרלי – "קרני-גמא" (קרני α , קרני β וקרני γ).

שלושת סוגי קרינה אלה שונים זה מזה במידה רבה מאוד בכושר החדירה, כלומר באופן שבו הם נבלעים בחומרים שונים. כושר החדירה הנמוך ביותר שייך לקרני α . דף נייר, שעוביו 0.1 מ"מ, אינו שקוף עבורם; ואם נכסה בדף הנייר את פתח היציאה בגוש העופרת, לא יתגלה על לוח הצילום הכתם המתאים לקרינת α . הרבה פחות נבלעים במעברם דרך החומר קרני β : לוח אלומיניום בולם אותם לחלוטין, רק אם עוביו כמה מילימטרים. כושר החדירה המרבי הוא של קרני γ .

מידת הבליעה של קרני γ גדלה עם הגדלת המספר הסידורי של החומר הבולע; אולם אפילו שכבת עופרת בעלת עובי של 1 ס"מ חדירה עבורן. מעבר של קרני γ דרך שכבת עופרת כזו מחלישה את האלומה פי 2 בלבד.

כפי שנראה, הטבע הפיזיקלי של קרני α , β ו- γ שונה.



קרני γ

על-פי תכונותיהן דומות מאוד קרני γ לקרני רנטגן, אולם כושר חדירתן גבוה בהרבה. תחילה סברו שקרני γ הן גלים אלקטרומגנטיים, אך כל הספקות לגבי מסקנה זאת הוסרו לאחר שגילו את עקיפת קרני γ בגבישים ומדדו את אורך הגל שלהן. הסתבר שהוא קטן מאוד: בין 10^{-8} ל- 10^{-11} cm.

בטבלת הגלים האלקטרומגנטיים ממוקמים גלי γ ליד קרני הרנטגן. מהירות ההתקדמות של קרני γ שווה למהירות הגלים האלקטרומגנטיים: בקירוב רב 300,000 ק"מ/ש"י.

קרני β

מלכתחילה נחשבו קרני α ו- β לזרמי חלקיקים טעונים. קל היה לבצע ניסויים עם קרני β , מכיוון שהן מוסטות היטב ובאופן ניכר הן בשדה מגנטי הן בשדה חשמלי.

המשימה העיקרית היתה גילוי המטען והמסה של החלקיקים. חקירת הסטייה של חלקיקי β בשדה חשמלי ובשדה מגנטי גילתה שהם אלקטרונים, הנעים במהירויות קרובות מאוד למהירות האור. המהירויות של חלקיקי β , שנפלטו על-ידי יסודות רדיואקטיביים שונים, שונות. עובדה זו הוכחה בהתרחבות האלומה של חלקיקי β בשדה המגנטי (ראו ציור 258).

חלקיקי α

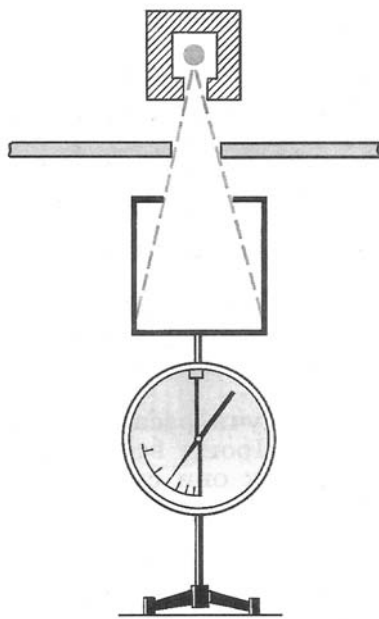
קשה יותר היה לברר מהו המבנה של חלקיקי α , מכיוון שהם מוסטים מעט בשדה חשמלי ובשדה מגנטי.

את הבעיה פתר סופית **רתפורד**: הוא מדד את יחס המטען q של החלקיק למסתו m על-פי ההסטה בשדה מגנטי. הסתבר שהוא קטן פי 2 מאשר של הפרוטון, שהוא כגרעין האטום של מימן. מטען פרוטון שווה למטען הבסיסי, ומסתו קרובה



מאוד ליחידת המסה האטומית.¹ אם כן, לחלקיק α מטען בסיסי חיובי אחד ומסה, השווה לשתי יחידות מסה אטומית.

אולם מטענו של חלקיק α ומסתו נותרו בלתי ידועים, והיה צריך אפוא למדוד או את המטען או את מסת החלקיק. הופעתו של מונה גייגר אפשרה למדוד מטען באופן פשוט ומדויק יותר: דרך חלון דק מאוד יכולים חלקיקי α לחדור לתוך המונה, להיקלט ולהירשם.



ציור 259

רתפורד הציב בדרכם של חלקיקי α מונה

גייגר, וזה מנה את מספר החלקיקים הנפלטים מדוגמית רדיואקטיבית בפרק זמן מסוים. אחר כך החליף את המונה בגליל מתכתי המחובר לאלקטרומטר רגיש (ציור 259). באמצעות אלקטרומטר מדד רתפורד את המטען הכולל של חלקיקי α , שנפלטו מהדוגמית לתוך הגליל באותו פרק זמן (מידת הרדיואקטיביות של חומרים רבים כמעט שאינה משתנה בזמן קצר). כאשר יודעים את המטען הכולל של חלקיקי α ואת מספרם, אפשר למצוא את היחס בין שני הגדלים, כלומר את מטענו של חלקיק α בודד. הסתבר שמטען זה שווה לשני מטעני יסוד.

רתפורד גילה אפוא שבחלקיק α נושא כל אחד משני מטעני היסוד שתי יחידות מסה אטומית. לכן שני מטעני יסוד נושאים ארבע יחידות של מסה אטומית.

¹ יחידת מסה אטומית (1 a.u.m) שווה ל-1/12 של מסת האטום של פחמן:

$$1 \text{ a.u.m.} \approx 1.66057 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$



אותו מטען ואותה מסה יש לגרעין האטום של הליום. מכך נובע שחלקיק α הוא גרעין האטום של הליום.¹

רתפורד לא הסתפק בתוצאה זו, אלא גם הוכיח בניסויים ישירים, שהתפרקות α מלווה בהיווצרות הליום: הוא אסף את חלקיקי α במכל מיוחד במשך כמה ימים, ובאמצעות אנליזה ספקטרלית הוכיח שבמכל נאסף הליום: כל חלקיק α "תפס" שני אלקטרונים והפך לאטום של הליום.

במהלך התפרקות רדיואקטיבית נוצרות קרני α (גרעיני אטום הליום), קרני β (אלקטרונים) וקרני γ (קרינה אלקטרומגנטית בעלת אורכי גל קצרים).

? 1. מדוע קשה יותר היה לגלות את ההרכב של קרינת α מאשר את זו של קרינת β ?

§101 התפרקות רדיואקטיביות

מה קורה לחומר המקרין קרינה רדיואקטיבית? בראשית המאה ה-20 לא היה קל להשיב לשאלה זו, משום שכבר בתחילת המחקר של הרדיואקטיביות התגלו גילויים מוזרים ובלתי רגילים.

התמיהה את המדענים הקצב הקבוע, שבו היסודות הרדיואקטיביים אורניים, תוריים ורדיום פולטים את הקרינה. במשך ימים, חודשים ושנים לא השתנתה עוצמת הקרינה באופן משמעותי; לא השפיעו עליה חימום או הגברת הלחץ. תגובות כימיות, שבהן השתתפו חומרים רדיואקטיביים – גם הן לא השפיעו על עוצמת הקרינה.

לאחר גילוי הרדיואקטיביות התגלה שהיא מלווה בשחרור אנרגיה. **פייר קירי** הכניס צנצנת המכילה רדיום כלוריד לתוך קלורימטר (מכשיר למדידת כמות חום). נבלעו בו קרני α , β ו- γ , ועקב כך התחמם המכשיר. **קירי** גילה שגרם אחד של רדיום משחרר בשעה אחת כ- 582 J של אנרגיה, וזו משתחררת בקצב קבוע במשך כמה שנים.

¹ בזמן ההוא (העשור הראשון של המאה ה-20) טרם נתגלה גרעין האטום, ולכן דיבר **רתפורד** על יון של הליום.

התפרקות רדיואקטיביות

מהו מקור האנרגיה, שאין משפיעים עליו כל הגורמים הפיזיקליים והכימיים הללו? נראה היה שהרדיואקטיביות מלווה בשינויים עמוקים, השונים מתהליכים כימיים רגילים. הרעיון, שאת התהליכים עוברים האטומים בעצמם, היה מהפכני.

כיום לא תפליא מחשבה זו אף ילד, מכיוון שישמע עליה עוד לפני שיעמוד על דעתו; אולם בראשית המאה ה-20 היתה מחשבה זו כה דמיונית, שצריך היה להיות אמיץ למדי כדי להשמיע אותה. באותה תקופה התקבלו הוכחות חותכות על עצם קיומם של אטומים; סוף-סוף צלח רעיונו של דמוקריטוס בן 2,000 השנים על המבנה האטומי של החומר – והנה כמעט מיד לאחר מכן מוטל בספק עצם הרעיון שהאטומים בעלי מבנה קבוע שאינו משתנה.

לא נפרט את כל אותם הניסויים, שהובילו בסופו של דבר לביטחון המוחלט, שבמהלך ההתפרקות הרדיואקטיבית מתרחש שינוי במבנה גרעיני האטומים. נתעכב רק על הניסויים הראשונים, שבהם התחיל **רתרפורד** והמשיכם הכימאי האנגלי **פ' סודי**.

רתרפורד גילה שמידת פעילותו של התוריום, המוגדרת כמספר חלקיקי α הנפלטים ביחידת זמן, נשארת קבועה בצנצנת אטומה; ואם הדוגמית מאווררת אפילו בזרמי אוויר חלשים, נחלשת הפעילות במידה ניכרת. המדען הניח אפוא שעם פליטת חלקיקי α פולט התוריום גז רדיואקטיבי איזשהו.

האוויר נשאב מהצנצנת שבה נמצא התוריום, ו**רתרפורד** בודד את הגז הרדיואקטיבי וחקר את כושר החדירה שלו. הסתבר שפעילות הגז הזה (להבדיל מפעילותם של תוריום, אורניום ורדיום) קטנה מהר מאוד עם הזמן: בכל דקה הולכת וקטנה הפעילות פי 2, וכעבור 10 דקות מתאפסת. **סודי** חקר את התכונות הכימיות של גז זה ומצא שאינו משתתף בתגובות כימיות כלשהן, כלומר הוא גז אציל. מאוחר יותר כונה הגז בשם "רדון", ומצא את מקומו בתא מספר 86 בטבלת היסודות המחזורית של מנדלייב.

גם יסודות רדיואקטיביים אחרים, כמו אורניום, אקטיניום ורדיום, נתגלו כמקורות של קרינה רדיואקטיבית. המסקנה הכללית שאליה הגיעו המדענים נוסחה במדויק על-ידי **רתרפורד**: "אטומים של חומר רדיואקטיבי נוטים



להתפרקויות ספונטניות.¹ בכל רגע הופך חלק קטן מהאטומים להיות בלתי יציב ומתפרק בפיצוץ. ברוב המקרים נפלט במהירות עצומה רסיס האטום – שהוא חלקיק α . במקרים אחרים מתלווה הפיצוץ בפליטת אלקטרון מהיר ובהופעת קרניים המכונות קרני γ , אשר בדומה לקרני רנטגן מאופיינות בהדירות גבוהה...

”נמצא שכתוצאה מהתפרקויות רדיואקטיביות נוצר חומר מסוג חדש לגמרי, השונה מהחומר המקורי בתכונותיו הפיזיקליות והכימיות. חומר חדש זה אף הוא בלתי יציב, ובעצמו מהווה מקור של קרינה רדיואקטיבית אופיינית...²”

”כך נלמד שאטומים של יסודות מסוימים נוטים להתפרקויות ספונטניות, המלווה בפליטת אנרגיה בכמות אדירה יחסית לכמות האנרגיה, המשתחררת בתהליכים מולקולריים רגילים.”

לאחר שהתגלה גרעין האטום, התבהר מיד שהוא המשתנה בהתפרקויות הרדיואקטיביות. הרי חלקיקי α אינם נמצאים כלל במסלולי האלקטרונים, והקטנת מספר האלקטרונים בקליפה ב-1 הופך את האטום ליון – ולא ליסוד כימי חדש, שהרי פליטת אלקטרון מהגרעין משנה את מטען הגרעין (מגדילה אותו ב-1).

רדיואקטיביות מהווה התפרקות ספונטנית של גרעינים, המלווה בפליטת חלקיקים שונים.

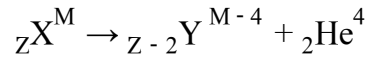
כלל ההעתקה

התפרקויות הגרעינים מקיימות את כלל ההעתקה, שניסח לראשונה **סודי**: במהלך התפרקות קרינת α מאבד הגרעין מטען חיובי $2e$, ומסתו פוחתת בארבע יחידות מסה אטומית בערך. כתוצאה מכך עובר היסוד שתי משבצות שמאלה לכיוון ראשית הטבלה המחזורית.

¹ מהמילה הלועזית spontaneous – אקראי.

² בפועל יכולים להיווצר גם גרעינים יציבים.

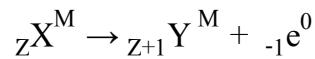
באופן סימבולי ניתן לרשום זאת כך :



כאן מסומן היסוד כמו בכימיה: מטען הגרעין נרשם בצד שמאל למטה, והמסה האטומית נרשמת בצד ימין למעלה. לדוגמה: המימן מסומן ${}_1\text{H}^1$.

חלקיק α – גרעין של הליום – סימנו ${}_2\text{He}^4$.

במהלך התפרקות β מהגרעין נפלט אלקטרון, ומטען הגרעין גדל ב-1, בעוד מסתו כמעט שאינה משתנה:



כאן מסמן ${}_{-1}e^0$ אלקטרון: סימן עלי 0, משמעו שמסתו קטנה מאוד יחסית ליחידת מסה אטומית. לאחר התפרקות β מועתק היסוד משבצת אחת ימינה בטבלה המחזורית. התפרקות γ אינה מלווה בשינוי המטען, ומסת הגרעין משתנה במידה מזערית בלבד.

כללי ההעתקה מורים שבמהלך התפרקות רדיואקטיבית נשמר המטען החשמלי, ובקירוב טוב נשמרת המסה האטומית היחסית של הגרעינים.

הגרעינים החדשים, הנוצרים בהתפרקות רדיואקטיבית – גם הם בדרך כלל רדיואקטיביים.

במהלך התפרקות רדיואקטיבית מתרחשת התפרקות של גרעיני האטום לגרעינים חדשים.

?

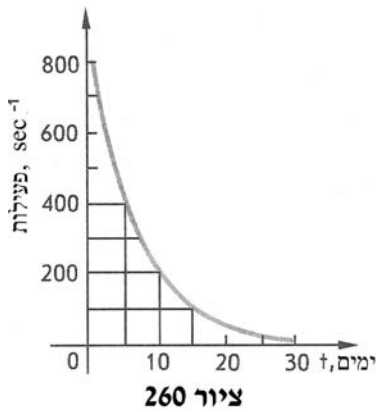
1. אילו מחוקי השימור הידועים לכם מתקיימים בהתפרקות רדיואקטיבית?

התפרקות רדיואקטיבית

§102 חוק ההתפרקות הרדיואקטיבית זמן מחצית החיים

התפרקות רדיואקטיבית מתרחשת על-פי חוק סטטיסטי.

במהלך המחקר על התפרקות חומרים רדיואקטיביים גילה **רתפורד** באופן ניסויי, שפעילותן נחלשת עם הזמן: הפעילות של רדון פוחתת פי 2 כבר לאחר דקה אחת, וגם פעילות האורניום, התוריום והרדיום הולכת וקטנה עם הזמן, אולם הרבה יותר לאט. לכל חומר רדיואקטיבי קיים פרק זמן, שבסופו קטנה הפעילות פי 2. פרק זמן זה מכונה **זמן מחצית החיים**: זמן מחצית החיים T הוא אפוא הזמן, שבמהלכו מתפרקים מחצית מכל האטומים הרדיואקטיביים.



ירידת הפעילות, כלומר מספר ההתפרקות בשנייה אחת, כתלות בזמן עבור אחד מהחומרים הרדיואקטיביים מתוארת בציר 260. זמן מחצית החיים של החומר הזה הוא 5 ימים.

נפתח כעת את הנוסחה המתמטית לחוק ההתפרקות הרדיואקטיבית. נניח שמספר האטומים הרדיואקטיביים ברגע ההתחלתי ($t = 0$) שווה ל- N_0 , כעבור זמן מחצית

החיים יהיה המספר $N_0/2$, וכעבור פרק זמן כזה נוסף יהיה המספר:

$$\frac{1}{2} \frac{N_0}{2} = \frac{N_0}{4} = \frac{N}{2^2}$$

כעבור זמן $t = nT$, כלומר כעבור n מחזורי זמן מחצית החיים, יהיה מספר

האטומים הרדיואקטיביים שווה ל:

$$N = N_0 \frac{1}{2^n}$$

מכיוון ש- $n = \frac{t}{T}$, נקבל:

$$(13.1) \quad N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$$

ביטוי זה הוא החוק הבסיסי להתפרקות רדיואקטיבית. על-פי הנוסחה (13.1)

מוצאים את מספר האטומים שלא התפרקו בכל רגע בזמן.

זמן מחצית החיים הוא הגודל הבסיסי, המגדיר את מהירות ההתפרקות הרדיואקטיבית. ככל שזמן מחצית החיים קצר יותר, כך האטומים חיים פחות ומתפרקים מהר יותר. עבור חומרים שונים זמן מחצית החיים שונה מאוד. כך זמן מחצית החיים של אורניום $^{238}\text{U}_{92}$ שווה ל-4.5 מיליארד שנה. הודות לכך הפעילות של האורניום אינה משתנה באופן משמעותי בפרק זמן של כמה שנים. זמן מחצית החיים של רדיום קטן בהרבה, כ-1600 שנה, ולכן הרדיום פעיל הרבה יותר מהאורניום. קיימים יסודות רדיואקטיביים בעלי זמן מחצית חיים של מיליונית השנייה.

כדי למצוא את זמן מחצית החיים באמצעות הנוסחה (13.1), יש לדעת את מספר

האטומים N_0 ברגע ההתחלתי, ולספור את מספר האטומים N שלא התפרקו כעבור פרק זמן מסוים t .

חוק ההתפרקות הרדיואקטיבית עצמו פשוט, אולם לא קל להפנים את המשמעות הפיזיקלית שלו. הרי בהתאם לחוק זה מתפרק בכל פרק זמן אותו חלק מהאטומים הקיימים (בזמן מחצית החיים מתפרקת מחצית ממספר האטומים), ולכן במרוצת הזמן אין קצב ההתפרקות משתנה. אטומים רדיואקטיביים "אינם מזדקנים"; כך, למשל, לאטומים של רדון, הנוצרים בהתפרקות של רדיום, סיכוי שווה להתפרק מיד לאחר היווצרותם – או 10 דקות לאחר מכן. ניתן לומר שההתפרקות של כל גרעין אינה "מוות מזקנה", אלא "מוות מקרי". לאטומים רדיואקטיביים (ליתר דיוק: לגרעינים) אין מושג של גיל. אפשר להגדיר רק את תוחלת החיים הממוצעת τ .

אורך החיים של אטומים בודדים יכול להשתנות מחלקי שנייה עד למיליארדי שנים. האטום של אורניום, כדוגמה, יכול להימצא באדמה מיליארדי שנים ולהתפרק פתאום – בו-בזמן ששכניו ממשיכים להתקיים במצבם הקודם. תוחלת החיים הממוצעת τ היא ממוצע של אורך החיים של מספר גדול של אטומים מסוג נתון, ופרופורציונית לזמן מחצית החיים. אי-אפשר לנבא מתי תתרחש התפרקות של אטום נתון, ואת המשמעות הפיזיקלית ניתן אפוא לייחס לתיאור ההתנהגות הממוצעת של אוסף רב של אטומים.

היפונים רדיואקטיביים

חוק ההתפרקות הרדיואקטיבית מגדיר את המספר הממוצע של אטומים, המתפרקים בפרק זמן מסוים; אולם תמיד קיימות סטיות מהערך הממוצע. ככל שמספר האטומים בדוגמית קטן יותר, כן גדולות יותר הסטיות. חוק ההתפרקות הרדיואקטיבית הוא חוק סטטיסטי.

אין טעם לדבר אפוא על חוק ההתפרקות הרדיואקטיבית עבור מספר קטן של אטומים. חוק זה מתקיים עבור מספר רב של חלקיקים.

?

1. מונה רושם חלקיקי β של דוגמית רדיואקטיבית בעלת עוצמה

נמוכה מאוד. האם מגיעים החלקיקים אל המונה במרווחי זמן

שוים?

§103 איזוטופים

חקר תופעת הרדיואקטיביות הוביל לגילוי חשוב לגבי טבע הגרעין האטומי.

כתוצאה מתצפיות במספר עצום של תהליכים רדיואקטיביים התברר שקיימים חומרים, הזוהים על-פי תכונותיהם הכימיות – אולם בעלי תכונות רדיואקטיביות שונות לחלוטין (כלומר מתפרקים באופן שונה), אותם לא הצליחו להפריד באמצעות השיטות הכימיות הידועות. על סמך זה הניח **סודי** בשנת 1911, שיסודות בעלי תכונות כימיות זהות והשוניים בתכונות אחרות – אחת מהשונויות שלהם היא הרדיואקטיביות. יסודות אלה ממוקמים בתא המתאים במערכת המחזורית של מנדלייב, אך בגין השונויות ביניהם כינה אותם **סודי** בשם **איזוטופים** (כלומר נמצאים במקומות זהים).

הרעיון של **סודי** אומת והוסבר שנה לאחר מכן, כאשר ג' **תומסון** ערך מדידות מדויקות של מסות היונים של ניאון בשיטת ההטיה בשדות חשמלי ומגנטי. הוא גילה שניאון מהווה תערובת של שני סוגי אטומים: רוב האטומים הם בעלי מסה יחסית השווה ל-20, אולם קיימת תוספת קטנה של אטומים בעלי מסה אטומית 22. כתוצאה מכך שווה המסה האטומית היחסית של התערובת ל-20.2. לאטומים בעלי תכונות כימיות זהות היו אפוא מסות שונות. שני סוגי הניאון נמצאים באותו תא בטבלה המחזוריים של מנדלייב, ולכן הם איזוטופים. איזוטופים עשויים אפוא

איזוטופים

להיבדל לא רק בתכונות רדיואקטיביות, אלא גם במסתם. לאיזוטופים מטעני גרעין שווים, ולכן שווה גם מספר האלקטרונים בקליפות האטומים, ותכונותיהם הכימיות זהות – אולם מסות הגרעין שונות. עם זאת עשויים הגרעינים להיות רדיואקטיביים או יציבים. ההבדל בתכונות הרדיואקטיביות של איזוטופים תלוי בהבדל בין מסות הגרעינים.

היום ידוע על קיומם של איזוטופים לכל היסודות. לכמה יסודות קיימים איזוטופים בלתי יציבים (דהיינו רדיואקטיביים) בלבד. קיימים איזוטופים ליסוד הכבד ביותר הנמצא בטבע, האורניום (מסות אטומיות יחסיות של 235, 238 ועוד) וליסוד הקל ביותר, מימן (מסות אטומיות יחסיות 1, 2, 3).

מעניינים בעיקר האיזוטופים של מימן, מכיוון שהם שונים זה מזה במסתם פי 2 או פי 3. האיזוטופ בעל מסה אטומית יחסית 2 נקרא **דייטריום**. הוא יציב (כלומר אינו רדיואקטיבי) ומהווה תוספת משקלית קטנה (ביחס 1:4,500) למימן רגיל. בחיבורו של דייטריום לחמצן נוצר חומר המכונה **מים כבדים**. בלחץ אטמוספרי רגיל הם רותחים בטמפרטורה של 101.2°C , וקופאים ב- 3.8°C .

איזוטופ המימן, שמסתו האטומית 3, מכונה **טריטיום**; הוא מהווה מקור של קרינה רדיואקטיבית מהסוג β , וזמן מחצית החיים שלו קרוב ל-12 שנה.

קיום האיזוטופים מוכיח, שמטען הגרעין האטומי לא קובע את כל התכונות של האטום, אלא רק את התכונות הכימיות ואת אותן תכונות פיזיקליות, התלויות בקליפות האלקטרוניות החיצוניות של האטום – לדוגמה: מידותיו. לעומת זאת אין מסת האטום ותכונותיו הרדיואקטיביות נקבעות על פי המספר הסידורי בטבלת היסודות המחזורית של מנדלייב.

חשוב לציין: כפי שהתברר ממדידות מדויקות, קרובות מסות אטומיות יחסיות של איזוטופים למספרים שלמים. לעומת זאת שונות לעתים בהרבה המסות האטומיות של יסודות כימיים ממספרים שלמים. כך המסה האטומית היחסית של כלור שווה ל-35.5. פירוש הדבר שבמצב הטבעי החומר הכימי הטהור הוא תערובת של איזוטופים ביחסים שונים. השלמות (המקורבת) של ערכי המסות האטומיות היחסיות של איזוטופים חשובה מאוד לחקר מבנה הגרעין האטומי.



לכל היסודות הכימיים קיימים איזוטופים. מטעני הגרעין של האיזוטופים של אותו יסוד שווים, אולם המסות שונות.

?

1. האם קיימים איזוטופים של בריום, שמסתו האטומית היחסית

היא 137.34?

§104 גילוי הנויטרון

השלב החשוב ביותר בהתפתחותה של פיזיקת הגרעין היה גילוי הנויטרון בשנת

1932.

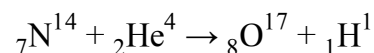
התפרקות מלאכותיות של גרעיני אטום

לראשונה בהיסטוריה האנושית ביצע **רתרפורד** בשנת 1919 את ההתפרקות המלאכותית של גרעין האטום. אירוע זה לא היה מקרי.

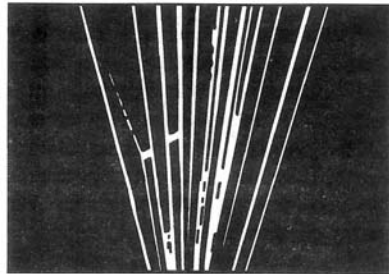
מכיוון שגרעין האטום די יציב, וטמפרטורה גבוהה, לחץ או שדות אלקטרומגנטיים לא גורמים להתפרקותו ואינם משפיעים על מהירות ההתפרקות הרדיואקטיבית, הניח **רתרפורד**, שכדי להרוס גרעין או להפוך גרעין מסוים לגרעין אחר נחוצה אנרגיה גבוהה מאוד. נשאי אנרגיה גבוהה, המתאימים ביותר למשימה זו, היו בזמנו חלקיקי α , הנפלטים מהגרעין במהלך התפרקות רדיואקטיבית.

הגרעין הראשון, שעליו בוצעה התפרקות מלאכותית, היה של חנקן ${}^{14}_7\text{N}$. במהלך הפצצת חנקן בחלקיקי α בעלי אנרגיה גבוהה, שנפלטו על-ידי רדיום, גילה **רתרפורד** את הפרוטונים – גרעיני האטום של מימן.

בניסויים הראשונים נעשה רישום הפרוטונים בשיטת הסינטילציות. התוצאות לא היו משכנעות ובטוחות, אולם כעבור כמה שנים הצליחו לצפות בהתפרקות החנקן בתא וילסון: חלקיק α אחד מתוך 50,000 חלקיקים, שנפלטו על-ידי דוגמית רדיואקטיבית, נתפס על-ידי גרעין של חנקן, וגרם לפליטה של פרוטון. כתוצאה מכך הפך גרעין החנקן לגרעין של איזוטופ של חמצן:



גילוי הנויטרון



ציור 261

בציור 261 נראית אחת התמונות של תהליך זה. משמאל רואים את ה"מזלג" האופייני: הפיצול של טראק. המסלול העבה שייך לגרעין של החמצן, והדק – לפרוטון. חלקיקי α אחרים אינם עוברים התנגשויות עם גרעינים, והטראקים שלהם נראים כקווים ישרים.

חוקרים אחרים גילו התפרקות בהשפעת חלקיקי α אצל גרעיני פלואור, נתרן ואלומיניום, המלווים בפליטת פרוטונים. גרעיני היסודות הכבדים, הנמצאים בחלק התחתון של הטבלה המחזורית, לא עברו התפרקות. ברור שהמטען הגדול של גרעיני היסודות האלה מנע מחלקיק α להתקרב לגרעין.

גילוי הנויטרון

בשנת 1932 התרחש האירוע החשוב ביותר בתחום הפיזיקה הגרעינית: תלמידו של **רתפורד**, המדען האנגלי **ד' צ'דוויק**, גילה את הנויטרון.

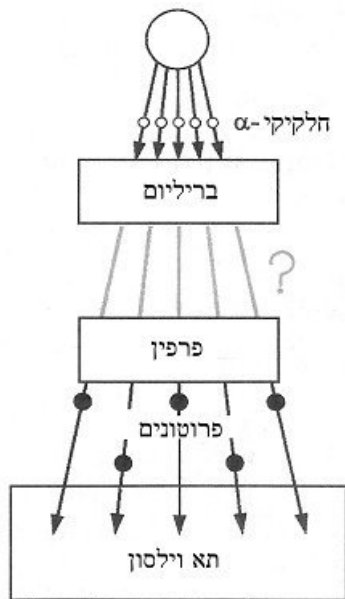
בעת הפצצת בריליום בחלקיקי α לא הופיעו פרוטונים, אולם התגלתה קרינה בעלת חדירות גבוהה, שחדרה דרך לוח בעובי 10 – 20 ס"מ. תחילה הניחו שזו קרינת γ בעלת אנרגיה גבוהה. **אירן ז'וליו-קירי** (בתם של **מרי ופייר קירי**) ובעלה **פרדריק ז'וליו-קירי** גילו, שאם בדרכה של הקרינה הנוצרת בהפצצת בריליום בחלקיקי α מצויבים לוח פרפין, גדל כושר היינון של הקרינה באופן חד. הם סברו שהקרינה משחררת מלוח הפרפין את הפרוטונים, הנמצאים בכמות גדולה בחומר המכיל מימן. באמצעות תא וילסון (תרשים הניסוי מתואר בציור 262) גילו הזוג **ז'וליו-קירי** את הפרוטונים האלה, ועל-פי אורך הטראקים העריכו את האנרגיה שלהם. אם אכן שוחררו הפרוטונים במהלך התנגשויות בקוונטים של קרינת γ , אמורה אנרגיית הקוונטים האלה להיות עצומה: כ- 55 MeV.

פרדריק ז'וליו-קירי (1900 – 1958)



מדען צרפתי ופעיל ציבור. הוא ואשתו אירן ז'וליו-קירי גילו בשנת 1934 את הרדיואקטיביות המלאכותית. חשיבות רבה היתה לגילוי הנויטרונים בעבודות המחקר של הזוג קירי בפליטה של בריליום בהשפעת חלקיקי α . בשנת 1939 מצא ז'וליו-קירי את המספר הממוצע של נויטרונים, המשתחררים בביקוע גרעיני של אורניום, והראה את הדרך לתגובת שרשרת גרעינית המלווה בשחרור אנרגיה.

צ'דוויק צפה בתא וילסון בטראקים של גרעיני חנקן, שהתנגשו בקרינת בריליום. על-פי ההערכות שלו, רמת האנרגיה של קרינת γ , המסוגלת להקנות לגרעיני חנקן את האנרגיה שנצפתה בניסויים האלה, צריכה היתה להיות 90 MeV. ניסוי דומה בתא וילסון עם גרעיני ארגון הוביל למסקנה, שרמת אנרגיית הקוונטים במקרה זה צריכה להיות כ- 150 MeV. כתוצאה מצפיות אלה נתקלו החוקרים בסתירה: לאותם הקוונטים היתה אנרגיה שונה.



ציור 262

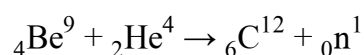
התברר שההנחה שבריליום פולט קוונטים γ – חלקיקים חסרי מסת מנוחה, שגויה; ושבהשפעת חלקיקי α מבריליום נפלטים חלקיקים כבדים כלשהם. רק בהתנגשויות עם חלקיקים כבדים יכלו פרוטונים או גרעיני חנקן וארגון לרכוש את האנרגיה הגבוהה שנצפתה. מכיוון שלחלקיקים אלה כושר חדירות גבוה והם לא גרמו במישרין ליינון הגז, הם היו נייטרליים מבחינה חשמלית, כי הרי חלקיק טעון מושפע מהתווך ומאבד אנרגיה מיד.

החלקיק החדש כונה **נויטרון**. את קיומו ניבא **רתפורד** 10 שנים לפני הניסוי של **צ'דוויק**. על-פי האנרגיה והתנע של הגרעינים המתנגשים עם הנויטרונים מצאו את מסתו של הנויטרון:

נילוי הנויטרון

הסתבר שמסתו קצת גדולה יותר ממסת הפרוטון: 1838.6 מסות של אלקטרון – בעוד מסתו של פרוטון 1836.1 מסות של אלקטרון.

כאשר פוגע חלקיק α באטום של בריליום, מתרחשת התגובה הבאה:



כאן ${}_0\text{n}^1$ הוא סמלו של הנויטרון; מטענו שווה לאפס, ומסתו היחסית שווה לאחת.

נויטרון הוא חלקיק לא יציב: בפרק זמן של כ-15 דקות מתפרק נויטרון חופשי לפרוטון, אלקטרון ונויטרינו – חלקיק חסר מסת מנוחה.

חלקיק היסוד נויטרון חסר מטען חשמלי. מסת הנויטרון גדולה ממסת הפרוטון בשיעור של 2,5 מסות האלקטרון.

?

1. נסו להסביר: מדוע בהתנגשות מרכזית עם פרוטון מוסר לו הנויטרון את כל האנרגיה שבו, ובהתנגשות עם גרעין של חנקן – רק חלק ממנה?

§105 מבנה גרעין האטום כוחות גרעיניים

מיד לאחר ניסויי צ'דוויק וגילוי הנויטרון הציגו בשנת 1932 הפיזיקאי הסובייטי ד' איבננקו והפיזיקאי הגרמני ו' הייזנברג מודל גרעין חדש. המודל הוכח במחקרים הבאים של התפרקויות גרעיניות, והוא שורד עד היום הזה.

המודל החדש של הגרעין

על-פי המודל החדש מורכבים הגרעינים מחלקיקי יסוד משני הסוגים: פרוטונים ונויטרונים.

מכיוון שהאטום כולו נייטרלי מבחינה חשמלית ומטען האלקטרון שווה בערכו למטען הפרוטון, שווה מספר הפרוטונים בגרעין למספר האלקטרונים בקליפה האטומית, ולכן שווה מספר הפרוטונים בגרעין למספר האטומי Z של היסוד בטבלת היסודות המחזורית של מנדלייב.

מבנה הגרעין

סכום מספר הפרוטונים Z ומספר הנויטרונים N שבגרעין מכונה **מספר המסה**, ומסמנים אותה באות A :

$$(13.2) \quad A = Z + N$$

מסות הפרוטון והנויטרון קרובות זו לזו, וכל אחת מהן שווה בערך ליחידת מסה אטומית. מסת האלקטרונים באטום קטנה בהרבה ממסת הגרעין, ולכן מספר המסה של הגרעין שווה למסה האטומית היחסית של היסוד, המעוגלת למספר שלם. איזוטופים הם גרעינים בעלי אותו מספר Z , אולם מספרי מסה A שונים, כלומר, בעלי מספר נויטרונים שונה.

כוחות גרעיניים

מכיוון שגרעינים די יציבים, אמורים פרוטונים ונויטרונים להיות מוחזקים בתוך הגרעין על-ידי כוחות גדולים מאוד. מהם הכוחות האלה? אפשר מיד לומר שאין אלה כוחות גרוויטציה, משום שהם חלשים מדי. יציבות האטום אינה מוסברת גם בנוכחות כוחות אלקטרומגנטיים מסיבה פשוטה: בין הפרוטונים בעלי מטען מאותו סימן פועל כוח דחייה, ולנויטרונים אין כלל מטען חשמלי.

לכן בין חלקיקי הגרעין, הפרוטונים והנויטרונים (אותם מכנים לעתים "נוקליאונים"), פועלים כוחות מיוחדים המכונים **כוחות גרעיניים**. מהן התכונות הבסיסיות של הכוחות הגרעיניים?

הכוחות הגרעיניים חזקים בערך פי 100 מכוחות חשמליים (כוחות קולון). אלה הם הכוחות החזקים ביותר המצויים בטבע, ולכן מכנים את פעולות הגומלין בין חלקיקי הגרעין **פעולות חזקות**.

התכונה חשובה של הכוחות הגרעיניים היא הפעולה מקרוב. כוחות אלקטרומגנטיים נחלשים יחסית לאט עם גודל המרחק. לעומתם מתגלים הכוחות הגרעיניים באופן משמעותי במרחקים, המשתווים בסדר גודל למידות הגרעין ($10^{-13} - 10^{-12}$ cm), כפי שהודגם לראשונה בניסויי **רתפורד** בפיזור חלקיקי α על-ידי גרעיני האטום. אפשר להמשיל את הכוחות הגרעיניים ל"ענק בעל ידיים קצרות". תורת הכוחות הגרעיניים טרם הושלמה; התקדמות ניכרת בפיתוחה הושגה ב-10 השנים האחרונות.



גרעיני האטום בנויים מפרוטונים ונויטרונים. חלקיקים אלה מוחזקים בתוך הגרעין בכוחות גרעיניים.

?

1. מהן התכונות העיקריות של הכוחות הגרעיניים?

§106 אנרגיית הקשר של גרעין האטום

למושג אנרגיית הקשר תפקיד חשוב ביותר בפיזיקה הגרעינית. אנרגיית הקשר מאפשרת להסביר את יציבות הגרעין ולהבין אילו תהליכים גורמים לשחרור האנרגיה האטומית.

הנוקליאונים בגרעין מוחזקים בידי כוחות גרעיניים חזקים. על מנת להוציא נוקליאון מהגרעין יש לבצע עבודה רבה, כלומר להקנות לגרעין אנרגיה רבה.

אנרגיית הקשר היא האנרגיה, הדרושה לפירוק מלא של הגרעין לנוקליאונים בודדים. על-פי חוק שימור האנרגיה, אפשר גם לטעון שאנרגיית קשר שווה לאנרגיה, המשתחררת במהלך היווצרות הגרעין מחלקיקים בודדים. אנרגיית הקשר של גרעיני האטום גדולה מאוד. כיצד ניתן להעריך אותה?

בעוד שניתן לחשב את אנרגיית האלקטרונים באטום, לא הצליחו עד היום לחשב באופן תיאורטי את אנרגיית הקשר שבין גרעיני האטום. ניתן להעריכה באמצעות הנוסחה של איינשטיין לגבי הקשר שבין מסה לבין אנרגיה:

$$E = mc^2 \quad (13.3)$$

המדידות המדויקות ביותר של מסות הגרעינים מראות שמסת המנוחה של גרעין M_N קטנה תמיד מסכום מסות המנוחה של הפרוטונים והנויטרונים המרכיבים אותו:

$$M_N < Zm_p + Nm_n \quad (13.4)$$

פחת המסות – הפרש המסות:

$$\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_N$$

הוא חיובי. עבור הליום, למשל, מסת הגרעין קטנה ב- 0.75% מסכום המסות של שני פרוטונים ושני נויטרונים; ובהתאם, למול אחד של הליום: $\Delta M = 0.03 \text{ g}$.

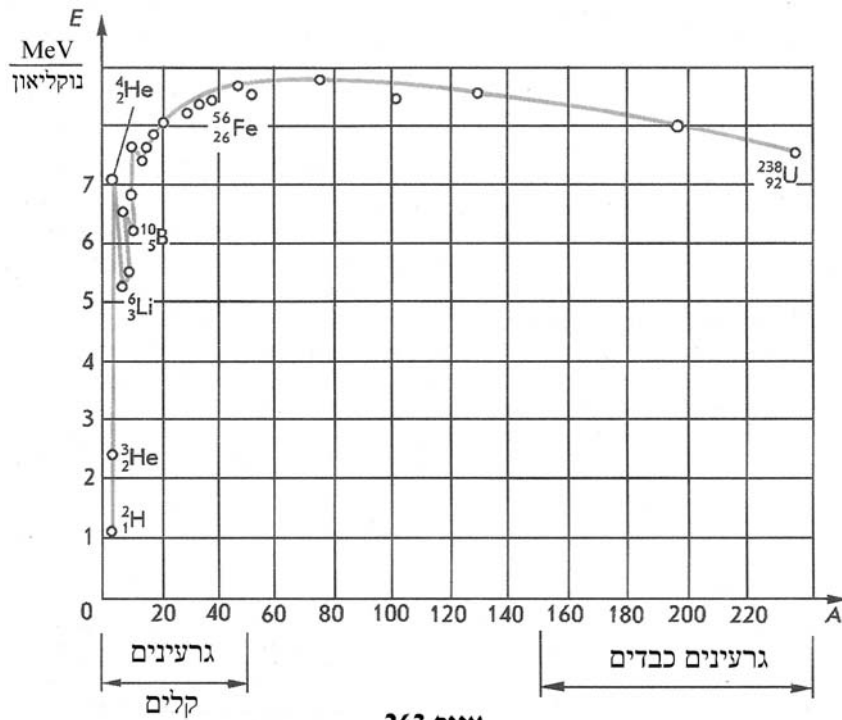
תגובות גרעיניות

הקטנת המסה בהיווצרות הגרעין מנוקליאונים, משמעותה הקטנת האנרגיה של

מערכת הנוקליאונים האלה בגודל של אנרגיית הקשר ΔE :

$$(13.5) \quad \Delta E = \Delta M c^2 = (Zm_p + Nm_n - M_N)c^2$$

אולם לאן נעלמות האנרגיה ΔE והמסה ΔM ?



ציור 263

בהשפעת כוחות גרעיניים, הפועלים במרחקים קטנים, מתחילים במהלך היווצרות הגרעין לנוע חלקיקים זה לקראת זה והאוצה אדירה. תנועה זאת מלווה בפליטת קוונטים γ בעלי אנרגיה ΔE ומסה $\Delta M = \frac{\Delta E}{c^2}$.

אפשר לקבל מושג על גודלה של אנרגיית הקשר מהדוגמה הבאה: היווצרות 4 גרם של הליום מלווה בשחרור אותה כמות אנרגיה כבשריפת 2 קרונוט עמוסי פחם. מידע חשוב על תכונות הגרעינים נמצא בתלות אנרגיית הקשר הסגולית במספר המסה A . אנרגיית הקשר הסגולית היא אנרגיית הקשר של נוקליאון אחד, ואותה מוצאים באופן ניסויי.

תגובות גרעיניות

ציור 263 מראה היטב, שמלבד לגבי הגרעינים הקלים ביותר, אנרגיית הקשר הסגולית היא פחות או יותר קבועה ושווה ל- 8 MeV/nucleon .

נדגיש: אנרגיית הקשר של אלקטרון בגרעין אטום המימן, השווה לאנרגיית היינון, היא כמעט פי מיליון קטנה יותר מערך זה.

לעקומה בציור 263 קיים מקסימום שאינו בולט במיוחד. אנרגיית הקשר הסגולית המקסימלית (8.6 MeV/nucleon) שייכת ליסודות בעלי מספרי מסה מ-50 עד 60, כלומר ברזל והיסודות הקרובים אליו במספרם הסידורי. גרעיני היסודות האלה הם היציבים ביותר.

בגרעינים כבדים הולכת אנרגיית הקשר הסגולית וקטנה, בעוד גִדְלָה אנרגיית קולון של דחיית הפרוטונים עם גדול המספר Z . כוחות קולון מנסים לפרוק את הגרעין.

החלקיקים בגרעין קשורים בקשר חזק זה לזה. אנרגיית הקשר בין החלקיקים מוגדרת על-פי פחת המסות.

?

1. מהי אנרגיית הקשר של הגרעין?
2. מדוע גרעין של נחושת יציב יותר מגרעין של אורניום?

§107 תגובות גרעיניות

במהלך פעולות גומלין הדדיות עוברים גרעיני האטום שינויים. אלה מלווים בהגדלת האנרגיה הקינטית של החלקיקים המשתתפים או בהקטנתה.

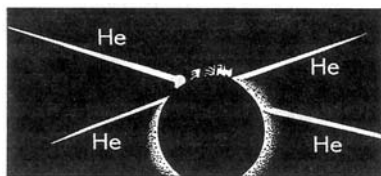
תגובות גרעיניות הן שינויים בגרעיני האטום, המתרחשים בהשפעת פעולות בינם לבין חלקיקי יסוד או בינם לבין עצמם. הכרנו כמה מתגובות אלה בסעיף 104.

תגובות גרעיניות קורות, כאשר חלקיקים מתקרבים קרבה יתרה לגרעין ונכנסים לאזור הפעולה של הכוחות הגרעיניים. מאחר שחלקיקים טעונים דוחים זה את זה, התקרבותם של חלקיקים הטעונים חיובית לגרעין (או התקרבות גרעינים זה לזה) אפשרית, אם לחלקיקים אלה (או לגרעינים) נמסרה אנרגיה קינטית רבה. את האנרגיה הזו מקנים לפרוטונים, לדייטרונים (גרעיני דייטריום),

תגובות גרעיניות

לחלקיקי α ולגרעינים אחרים וכבדים יותר באמצעות מאיצים מיוחדים להאצת חלקיקי יסוד טעונים.

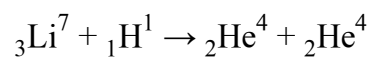
שיטה זו להאצת חלקיקים טעונים יעילה בהרבה מאשר השימוש בגרעיני הליום, הנפלטים על-ידי יסודות רדיואקטיביים. באמצעות מאיצי החלקיקים ניתן להקנות אנרגיה בסדר גודל של 10^5 MeV – הרבה יותר מהאנרגיה של חלקיקי α (לכל היותר 9 MeV). ניתן להשתמש בפרוטונים, שלא נוצרים כלל בתהליך של התפרקות רדיואקטיבית; השימוש בפרוטונים עדיף, מכיוון שמטען הפרוטון קטן פי 2 ממטענו של חלקיק α , ולכן כוח הדחייה, הפועל עליו מצדם של הגרעינים, יהיה קטן פי 2.



ציור 264

תגובה גרעינית ראשונה בהשתתפותם של פרוטונים מהירים בוצעה בשנת 1932.

אז הצליחו לפרק ליתיום לשני חלקיקי α :



כפי שמראה צילום הטראקים בתא וילסון

(ציור 264), סוטים גרעיני הליום לצדדים שונים לאורך קו ישר בהתאם לדרישות של חוק שימור התנע. מאחר שהתנע של פרוטון קטן בהרבה מהתנע של חלקיקי α הנוצרים, אין נראים הטראקים של הפרוטונים בצילום.

פליטה אנרגטית בתגובות גרעיניות

בתגובה הגרעינית המתוארת מעלה היתה האנרגיה הקינטית של שני גרעיני ההליום הנוצרים רבה מהאנרגיה הקינטית של הפרוטון המשתתף בתגובה ב- 7.3 MeV. התפרקות הגרעינים לוותה בשינוי האנרגיה הפנימית (אנרגיית הקשר). בתגובה זו גבוהה אנרגיית הקשר הסגולית בגרעיני הליום מאנרגיית הקשר הסגולית בגרעין הליתיום. לכן חלק מהאנרגיה הפנימית של גרעין הליתיום הופך לאנרגיה קינטית של חלקיקי α .

שינוי אנרגיית הקשר של גרעינים, משמעה שאנרגיית המנוחה הכוללת של החלקיקים והגרעינים, שהשתתפו בתגובה, אינה נשמרת: הרי אנרגיית המנוחה



של גרעין M_{Nc}^2 תלויה באנרגיית הקשר בהתאם לנוסחה (13.5)! על-פי חוק שימור האנרגיה, שינוי האנרגיה הקינטית במהלך תגובה גרעינית שווה לשינוי אנרגיית המנוחה של הגרעינים והחלקיקים המשתתפים בתגובה.

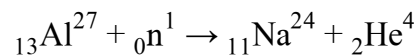
פליטה אנרגטית בתגובה גרעינית – כך מכונה הפרש אנרגיות המנוחה של גרעינים וחלקיקים לפני התגובה ולאחריה. בהתאם לנאמר קודם, שווה פליטה אנרגטית גם להפרש האנרגיות הקינטיות של החלקיקים המשתתפים בתגובה.

אם האנרגיה הקינטית של הגרעינים והחלקיקים לאחר התגובה גדולה יותר מאשר לפני, קיימת פליטת אנרגיה; ובמקרה ההפוך מלווה התגובה בספיגת אנרגיה. כזאת היא תגובה שמתרחשת בהפצצת חנקן בחלקיקי α (ראו סעיף 104). חלק מהאנרגיה הקינטית (כ- $1.2 \cdot 10^6 \text{ eV}$) מותמר במהלך התגובה לאנרגיה הפנימית של הגרעין החדש שנוצר.

האנרגיה המשתחררת במהלך תגובות גרעיניות עשויה להיות אדירה; אולם השימוש המעשי בה – באמצעות התנגשויות של חלקיקים (או גרעינים) מואצים עם גרעינים נייחים שבמטרה – בלתי אפשרי, שהרי רובם של החלקיקים המואצים יחטיא את גרעיני המטרה ולא יגרום לתגובה.

תגובות גרעיניות בהשתתפות נויטרונים

גילוי הנויטרון היווה אבן דרך מרכזית בחקר תגובות גרעיניות. מכיוון שהנויטרונים חסרי מטען, הם חודרים באופן חופשי לגרעיני האטומים וגורמים לתגובות. כך, למשל, מתרחשת התגובה הבאה:



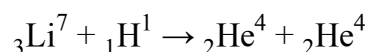
הפיזיקאי האיטלקי **אנריקו פרמי** היה הראשון, שחקר את התגובות היזומות באמצעות נויטרונים. הוא גילה שתגובות גרעיניות נגרמות לא רק על-ידי נויטרונים מהירים, אלא גם על-ידי נויטרונים אטיים, ושברוב המקרים הם אף יעילים יותר מן המהירים. את הנויטרונים המהירים עדיף אפוא להאט, והאטתם עד למהירויות התרמויות (המתאימות לטמפרטורת הסביבה) מתרחשת במים רגילים: במים נמצא

מספר רב של גרעיני מימן, פרוטונים, אשר מסתם שווה כמעט למסת הנויטרונים. כאשר מתנגשים כדורים בעלי מסה שווה, יעיל ביותר מעבר האנרגיה הקינטית מהאחד לאחר. בהתנגשות מרכזית של נויטרון עם פרוטון ניח מעביר הנויטרון לפרוטון את האנרגיה הקינטית במלואה.

התגובות לפעולות, שבהן משתתפים גרעינים אטומיים, הן מגוונות. נויטרונים אינם נדחים על-ידי הגרעינים, ולכן הם גורמים להתפרקות גרעיניות באופן יעיל ביותר.

?

1. תנו הסבר בעזרת הציור 263: מדוע במהלך התגובה הגרעינית



האנרגיה לא נספגת, אלא נפלטת?

2. מהי פליטה אנרגטית של תגובה גרעינית?

3. מהו ההבדל העיקרי בין תגובות גרעיניות בהשתתפות נויטרונים

לבין תגובות גרעיניות, הנגרמות על-ידי חלקיקים טעונים?

§108 ביקוע גרעיני אורניום

ביקוע לחלקים אפשרי בגרעינים של כמה יסודות כבדים בלבד. בעת הביקוע נפלטים מהגרעינים שניים עד שלושה נויטרונים וקרני גמא, ונפלטת גם אנרגיה רבה.

גילוי ביקוע האורניום

ביקוע האורניום נתגלה בשנת 1938 על-ידי המדענים הגרמניים או' גאן ופ' שטרסמן. הם מצאו, שבעת הפצצת האורניום על ידי נויטרונים נוצרים יסודות מהאזור האמצעי של טבלת היסודות המחזורית: בריום, קריפטון ועוד. המהות של ביקוע זה – ביקועו של גרעין אורניום שתפס נויטרון – נחשפה בראשית שנת 1939 על-ידי הפיזיקאי האנגלי או' פריש והמדענית היהודייה מאוסטריה לייזה מייטנר. ביקוע הגרעין אפשרי, כאשר מסת המנוחה של גרעין כבד גדולה מסכום מסות המנוחה של הרסיסים, הנוצרים בתהליך הביקוע. לכן מתרחשת פליטת אנרגיה, השקולה להפחתת מסת המנוחה המלווה את הביקוע; אולם המסה הכללית נשמרת, מכיוון שמסת הרסיסים, הנעים במהירות גבוהה, גדולה ממסת המנוחה של רסיסים אלה.

תגובות שרשרת

את אפשרות הביקוע של גרעינים כבדים ניתן להסביר בעזרת גרף של תלות אנרגיית הקשר הסגולית במספר מסה A (ראו ציור 263). אנרגיית הקשר הסגולית של גרעיני האטומים, הנמצאים במקומות האחרונים של הטבלה המחזורית ($A \approx 200$), קטנה בערך ב- 1 MeV מאנרגיית הקשר הסגולית של גרעיני היסודות, הנמצאים באמצע הטבלה המחזורית ($A \approx 100$). לכן תהליך הביקוע של הגרעינים הכבדים של היסודות שבאמצע הטבלה המחזורית כדאי יותר מבחינה אנרגטית: לאחר הפיצול עוברת המערכת למצב של אנרגיה פנימית מזערית, שהרי ככל שאנרגיית הקשר של הגרעין גדולה יותר – כך תשתחרר יותר אנרגיה בהיווצרות הגרעין, ובהתאמה, קטנה יותר תהיה האנרגיה הפנימית של המערכת שנוצרה.

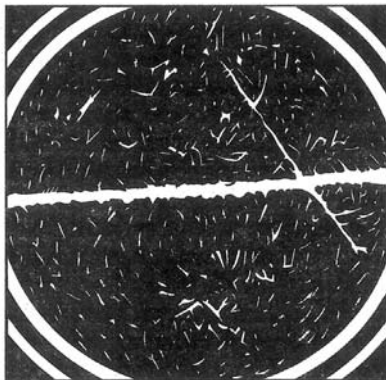
בעת ביקוע הגרעין גדלה אנרגיית הקשר לכל נוקליאון ב- 1 MeV , והאנרגיה הכללית הנפלטת תהיה גדולה מאוד – בסדר גודל של 200 MeV . אף תגובה גרעינית אחרת (שאינה קשורה בביקוע) אינה מלווה בפליטת אנרגיה כה רבה.

המדידות הישירות של האנרגיה, הנפלטת בעת ביקוע הגרעין של אורניום $^{235}\text{U}_{92}$, הוכיחו את היתרון האנרגטי הזה, כשנפלטה אנרגיה בערך של כ- 200 MeV . רוב האנרגיה (168 MeV) היא אנרגיה קינטית של הרסיסים. בציור 265 רואים את הטראקים של רסיסי אורניום, המתבקע בתא וילסון.

האנרגיה הנפלטת בעת ביקוע גרעיני, מקורה אלקטרוסטטי; האנרגיה הקינטית הגבוהה של הרסיסים נוצרת בעקבות כוחות הדחייה החשמליים.

מנגנון ביקוע גרעיני

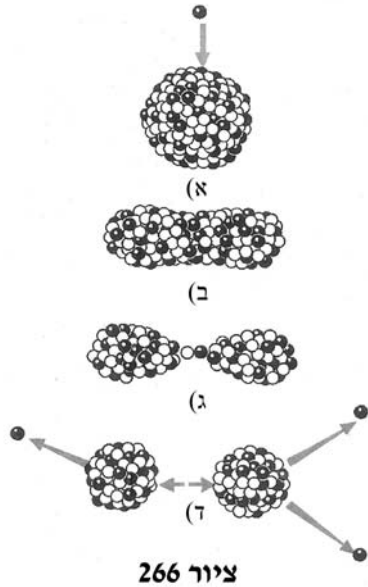
את תהליך הביקוע של גרעין האטום ניתן להסביר בעזרת מודל ה"טיפה". לפי מודל זה, דומה גוש הנוקליאונים לטיפת נוזל טעון (ציור 266). כוחות הגרעין בין הנוקליאונים פועלים לטווח קצר, בדומה לכוחות הפועלים בין



ציור 265

מולקולות של נוזל. עם כוחות הדחייה החזקים, הפועלים בין הפרוטונים והמנסים לפצל את הגרעין לרסיסים, פועלים בגרעין כוחות משיכה גדולים עוד יותר. כוחות

גרעיניים אלה שומרים על הגרעין מפני פירוק. צורתו של גרעין האורניום 235 כדורית. לאחר תפיסה של נויטרון נוסף מתחיל הגרעין המעוקר להתעוות ולקבל צורה מוארכת (ציור 266ב). הגרעין מתארך עד לרגע שבו כוחות הדחייה בין חצאי הגרעין המוארך יגברו על כוחות המשיכה הפועלים ב"צוואר" המקשר (ציור 266ג). אחר כך נקרע הגרעין לשני חלקים (ציור 266ד), ובהשפעת כוחות הדחייה החשמליים עפים שני הרסיסים במהירות השווה ל- $1/30$ ממהירות האור.



ציור 266

פליטת נויטרונים במהלך הביקוע

אירוע בסיסי, המתרחש במהלך הביקוע הגרעיני, הוא פליטת שניים עד שלושה נויטרונים. הודות לאירוע זה התאפשר שימוש מעשי באנרגיה פנים-גרעינית. אפשר להבין מדוע מתרחשת פליטה של נויטרונים חופשיים: ידוע שהיחס בין מספר הנויטרונים למספר הפרוטונים בגרעינים יציבים גדל עם הגדלת המספר האטומי. לכן ברסיסים, הנוצרים בעת הביקוע, גדול היחס בין מספר הנויטרונים למספר הפרוטונים מהמספר הגבולי המותר לגרעיני האטומים, הממוקמים באמצע הטבלה המחזורית של מנדלייב. כתוצאה מכך משתחררים כמה נויטרונים במהלך הביקוע, והאנרגיה שלהם עשויה להיות בתחום שבין כמה מיליוני אלקטרון-וולט ועד לערכים קטנים מאוד.

בדרך כלל רסיסי הביקוע בעלי מסה שונה. הרסיסים הם רדיואקטיביים, מכיוון שהם מכילים נויטרונים עודפים. לבסוף, לאחר סדרה של כמה התפרקויות β עוקבות נוצרים איזוטופים יציבים.

לסיום נזכיר שמתרחש גם תהליך ספונטני של ביקוע אורניום. זמן מחצית החיים של תהליך זה הוא 10^{16} שנה – גדול פי 2 מיליון מזמן מחצית החיים עבור התפרקות α של אורניום.



ביקוע גרעיני האטום הכבדים מתאפשר, מכיוון שאנרגיית הקשר הסגולית של גרעינים אלה קטנה מאנרגיית הקשר הסגולית של גרעיני היסודות הממוקמים באמצע הטבלה המחזורית.

§109 תגובות שרשרת גרעיניות

בעת הביקוע של גרעין אורניום משתחררים שניים עד שלושה נויטרונים. עובדה זו מאפשרת לבצע תגובת שרשרת של ביקוע אורניום.

כל אחד מהנויטרונים, הנפלטים מהגרעין בעת הביקוע, עשוי בתורו לגרום לביקוע של הגרעין השכן, וגם הוא יפלוט נויטרונים, העשויים לגרום לביקוע הבא. כתוצאה מכך גדל מהר מאוד מספר הגרעינים שעוברים ביקוע ונוצרת תגובת שרשרת. **תגובת שרשרת גרעינית** היא התגובה, שבה החלקיקים (הנויטרונים), הגורמים לתגובה, נוצרים במהלך התגובה עצמה.

תגובת השרשרת מלווה בפליטת אנרגיה עצומה. בעת ביקוע כל גרעין משתחררת אנרגיה בכמות של כ- 200 MeV. ביקוע כל גרעיני האורניום, שמסתו 1 גרם, גורם לפליטת כמות אנרגיה של $2.3 \cdot 10^4$ kW·h. כמות זאת שקולה לאנרגיה, הנפלטת בשריפה של 3 טונות פחם או 2.5 טונות של נפט.

אולם על מנת לבצע את תגובת השרשרת אי-אפשר להשתמש בכל הגרעינים המתפצלים בהשפעת הנויטרונים. מהגרעינים שנמצאים בטבע מתאימים למטרה זו גרעיני איזוטופ האורניום בעל מספר מסה 235, שסימנו ${}_{92}^{235}\text{U}$.

האיזוטופים של אורניום

אורניום טבעי מכיל בעיקר שני איזוטופים: ${}_{92}^{235}\text{U}$ ו- ${}_{92}^{238}\text{U}$; אולם חלקו של האיזוטופ ${}_{92}^{235}\text{U}$ הוא רק 1/140 מהאיזוטופ הנפוץ יותר ${}_{92}^{238}\text{U}$.

גרעיני ${}_{92}^{235}\text{U}$ מתפצלים בהשפעת נויטרונים מהירים ואטיים. לעומתם מתפצלים גרעיני ${}_{92}^{238}\text{U}$ בהשפעת נויטרונים בעלי אנרגיה גבוהה מ- 1 MeV. אנרגיה כזאת מאפיינת 60% מהנויטרונים הנוצרים בתגובה, אולם רק אחד מתוך חמישה נויטרונים מבצע ביקוע של ${}_{92}^{238}\text{U}$, ונויטרונים אחרים נתפסים על-ידי

תגובות שרשרת

האיזוטופ הזה מבלי לבצע ביקוע. אם כן, תגובת שרשרת באיזוטופ טהור ${}_{92}\text{U}^{238}$ היא בלתי אפשרית.

מקדם הריבוי של הנויטרונים

כדי שתבצע תגובת שרשרת אין צורך שכל נויטרון יגרום בהכרח לביקוע הגרעין, אלא שהמספר הממוצע של הנויטרונים המשוחררים במסת אורניום נתונה לא יקטן במרוצת זמן תהליך הביקוע.

תנאי זה יתקיים, אם מקדם הריבוי של נויטרונים k יהיה גדול מ-1 או שווה לו. **מקדם הריבוי של נויטרונים** הוא היחס בין מספר הנויטרונים ב"דור" כלשהו למספר הנויטרונים ב"דור" הקודם. בהחלפת ה"דורות" בביקוע גרעיני נבלעים נויטרונים של "הדור הישן", ונוצרים נויטרונים של "הדור החדש".

אם $k \geq 1$, מספר הנויטרונים גדל במרוצת זמן הביקוע או נשאר קבוע, ותגובת השרשרת מתקיימת. כאשר $k < 1$, הולך וקטן מספר הנויטרונים, ותגובת השרשרת אינה אפשרית.

מקדם הריבוי נקבע על-ידי ארבעה גורמים:

1. לכידת נויטרונים אטיים על ידי הגרעינים של ${}_{92}\text{U}^{235}$, ביקוע לאחר מכן, לכידת הנויטרונים המהירים על-ידי הגרעינים של ${}_{92}\text{U}^{235}$ ו- ${}_{92}\text{U}^{238}$ וביקוע נוסף בהמשך.

2. לכידת הנויטרונים על-ידי גרעיני אורניום ללא ביקוע.

3. לכידת נויטרונים על-ידי הרסיסים, הנוצרים כתוצאה מהביקוע, על-ידי החומר המאט (עליו נספר בהמשך) ועל-ידי רכיבי המבנה של המכשיר.

4. פליטת הנויטרונים מהיסודות המתפרקים.

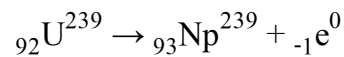
רק התהליך הראשון מלווה בריבוי מספר הנויטרונים (בעיקר על חשבון הביקוע של ${}_{92}\text{U}^{235}$). כל היתר גורמים להפחתת מספרם. תגובת השרשרת באיזוטופ טהור ${}_{92}\text{U}^{238}$ היא בלתי אפשרית, מכיוון שבמקרה זה $k < 1$, כלומר, מספר הנויטרונים, הנלכדים בגרעינים ללא ביקוע, גדול יותר ממספר הנויטרונים הנוצרים במהלך הביקוע.

תגובות שרשרת

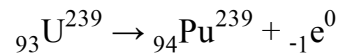
על מנת שמהלך התגובה יהיה יציב, צריך מקדם הריבוי של נויטרונים להיות שווה ל-1. על השוויון הזה יש לשמור בדיוק רב, כי כאשר יהיה $k = 1.01$, כמעט באופן מיידי יתרחש פיצוץ.

היווצרות של פלוטוניום

חשיבות רבה יש לתהליך לכידת הנויטרונים על-ידי האיזוטופ של אורניום ${}^{238}\text{U}$. לאחר הלכידה נוצר איזוטופ רדיואקטיבי ${}^{239}\text{U}$ בעל זמן מחצית חיים של 23 min. הפירוק מלווה בפליטת אלקטרון ובהיווצרות היסוד הראשון הנמצא אחרי האורניום בטבלה המחזורית: נפטוניום:



נפטוניום הוא חומר רדיואקטיבי מהסוג β , בעל זמן מחצית חיים של יומיים בקרוב. במהלך התפרקותו של נפטוניום נוצר היסוד הבא בטבלה המחזורית, פלוטוניום:



פלוטוניום הוא חומר יציב יחסית, מכיוון שזמן מחצית חייו הוא ארוך: קרוב ל-24,000 שנה. התכונה החשובה ביותר של פלוטוניום היא התפצלותו בדומה לאיזוטופ ${}^{235}\text{U}$ בהשפעת נייטרונים אטיים. לכן אפשר לקבל תגובת שרשרת, המלווה בשחרור כמויות אנרגיה אדירות, גם בעזרת הפלוטוניום.

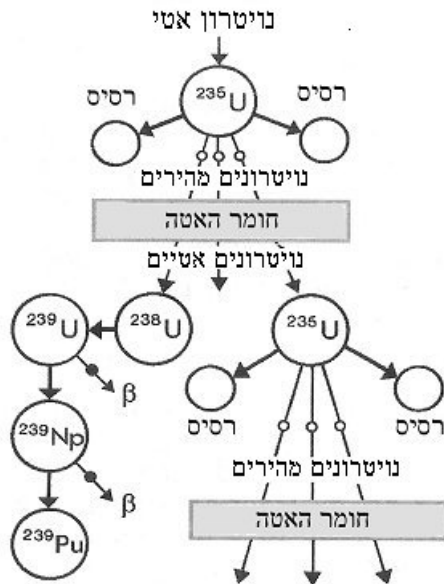
במהלך תגובות השרשרת נפלטת אנרגיה עצומה. התגובה מתאפשרת הודות לעובדה, שבמהלך התגובה משתחררים שניים עד שלושה נויטרונים. רוב האנרגיה הנפלטת מותמרת לאנרגיה קינטית של רסיסי הגרעינים.

?

1. במה תלוי מקדם הריבוי של הנויטרונים?
2. באילו איזוטופים של אורניום משתמשים לביצוע תגובת שרשרת גרעינית?

תגובות שרשרת

כור גרעיני הוא מערכת, שמתבצעת בה תגובת שרשרת מבוקרת של ביקוע גרעיני.



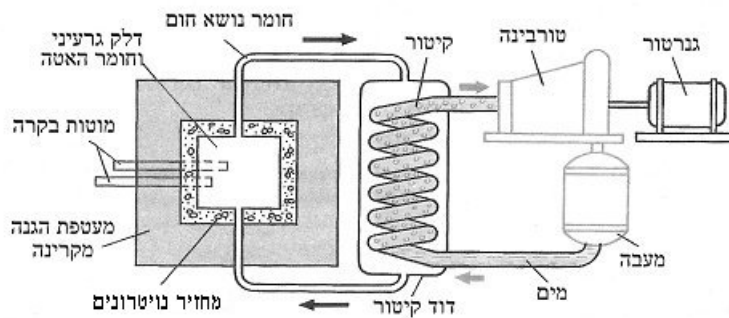
ציור 267

גרעיני אורניום, ובעיקר גרעיני האיזוטופ $^{235}_{92}\text{U}$, לוכדים בצורה יעילה ביותר את הנויטרונים האטיים. הסתברות הלכידה של נויטרונים אטיים והביקוע הגרעיני, שבא בעקבות כך, הוא מאות מונים גדול מזו של נויטרונים מהירים. לכן במערכות כורים גרעיניים, הפועלים על אורניום טבעי, משתמשים בחומר האטה מיוחד כדי להעלות את מקדם הריבוי של הנויטרונים. התהליכים המתרחשים בכור גרעיני מתוארים בציור 267.

המרכיבים העיקריים של כור גרעיני

בציור 268 מתוארת מערכת להפקת אנרגיה חשמלית, שבבסיסה כור גרעיני. המרכיבים העיקריים של כור גרעיני הם:

דלק גרעיני ($^{238}_{92}\text{U}$, $^{239}_{92}\text{Pu}$, $^{235}_{92}\text{U}$ ואחרים), חומר מאט נויטרונים (מים רגילים או כבדים, גרפיט ועוד), מוליך חום להוצאת האנרגיה הנוצרת בכור (מים, נתרן נוזלי ועוד) ומערכת לבקרת מהירות התגובה (מוטות קדמיום או בור, הבולעים את הנויטרונים והמוכנסים באזור הפעיל של הכור).



ציור 268



מבחוץ מכסים את הכור במעטפת הגנה, החוסמת את קרינת ה- γ והנויטרונים.
את המעטפת בונים מבטון עם חיזוקי ברזל.

חומר ההאטה הטוב ביותר הוא **מים כבדים** (ראו סעיף 103). גם מים רגילים
לוכדים נויטרונים והופכים למים כבדים. חומר האטה טוב נוסף הוא גרפיט;
הגרעינים שלו מאטים, אך לא לוכדים נויטרונים.

מסה קריטית

מקדם הריבוי k עשוי להיות שווה ל-1, בתנאי שגודל הכור – ובהתאם: מסת
האורניום – גדולים מערכים גבוליים מסוימים. מסת החומר הגרעיני הקטנה
ביותר, שעבורה יכולה להתרחש תגובת שרשרת גרעינית, מכונה **מסה קריטית**.

אם הכור קטן, גדולה מדי בריחת הנויטרונים דרך המשטח החיצוני של האזור
הפעיל (הנפח שבו נמצאים מוטות האורניום).

עם הגדלת מידות המערכת גדל מספר הגרעינים המשתתפים בתגובה ביחס ישר
לנפח, ומספר הנויטרונים שאובדים עקב הבריחה גדל ביחס ישר לשטח המעטפת
החיצונית. לכן על-ידי הגדלת מידות המערכת אפשר להגיע לערך $k \approx 1$ של
מקדם הריבוי. המערכת היא בעלת מידות קריטיות, כאשר מספר הנויטרונים
שאבדו כתוצאה מלכידה ובריחה שווה למספר הנויטרונים הנוצרים בתהליך
הביקוע. מידות קריטיות – ובהתאם: מסה קריטית – מוגדרות על-ידי סוג הדלק
הגרעיני, חומר ההאטה ומבנה הכור.

עבור אורניום טהור (ללא חומר האטה) ${}_{92}^{235}\text{U}$, שצורתו כדור, המסה הקריטית
שווה בערך ל-50 ק"ג. מכיוון שאורניום הוא חומר כבד מאוד, רדיוס הכדור, שזו
מסתו, הוא כ-9 ס"מ. על-ידי שימוש בחומר האטה נויטרונים ומעטפת מבריליום,
המחזירה את הנויטרונים, הצליחו להוריד את המסה הקריטית ל-250 גרם בלבד.

בקרת הכור מתבצעת באמצעות מוטות, המכילים קדמיום או בור. כאשר
המוטות הם מחוץ לכור, $k > 1$; וכאשר הם בפנים במלוא אורכם, $k < 1$. על-ידי
החדרת המוטות לתוך האזור הפעיל ניתן לעצור את התפתחותה של תגובת
השרשרת. בקרת הכורים מסתייעת במחשבים.



כורים על בסיס נויטרונים מהירים

נבנו גם כורים, הפועלים ללא החומר המאט נויטרונים מהירים. מכיוון שהסתברות הביקוע בהשפעת נויטרונים מהירים נמוכה, כורים מסוג זה אינם יכולים להשתמש באורניום טבעי.

את התגובה אפשר לבצע בתערובת מועשרת, המכילה לא פחות מ- 15% של האיזוטופ $^{235}\text{U}_{92}$. לכור הפועל על בסיס נויטרונים מהירים יש יתרון: במהלך עבודתו נוצרת כמות גדולה של פלוטוניום, שניתן להשתמש בו כבדלק גרעיני. כורים אלה מכונים **כורים מכפילים**, מכיוון שהם משחזרים דלק גרעיני. הכורים מתוכננים לפעולה עם מקדם מכפלה עד 1.5, ולכן במהלך הביקוע של 1 ק"ג של האיזוטופ $^{235}\text{U}_{92}$ נוצרים כ- 1.5 ק"ג פלוטוניום. בכור רגיל מקדם השחזור הוא 0.6 – 0.7.

כורים גרעיניים ראשונים

תגובת שרשרת גרעינית ראשונה באורניום בוצעה בארצות-הברית על-ידי צוות המדענים בהנהלתו של **אנריקו פרמי** בדצמבר 1942.

בברית המועצות נבנה הכור הגרעיני הראשון ב- 1946.

אנריקו פרמי (1901–1954)



פיזיקאי איטלקי. תרם רבות לפיתוח הפיזיקה העיונית והניסויית בת-זמננו. בשנת 1938 ברח מאיטליה לארצות-הברית. עם **דיראק** פיתח תורה קוונטית סטטיסטית של אלקטרונים וחלקיקים אחרים (הסטטיסטיקה של **פרמי-דיראק**). פיתח תורה כמותית של התפרקות β , שהיתה לאב-טיפוס של התורה הקוונטית הכללית של חלקיקי היסוד. ל**פרמי** כמה גילויים רבי-חשיבות בפיזיקה של הנויטרונים. בשנת 1942 בוצעה לראשונה תגובת שרשרת גרעינית מבוקרת בראשותו.

כיום קיימים סוגים שונים של כורים, והם שונים זה מזה הן בעוצמתם הן בייעודם.

מלבד דלק גרעיני נמצאים בכור גרעיני חומר האטה לנויטרונים ומוטות בקרה. האנרגיה הנפלטת מופקת מהכור באמצעות חומר נוזלי בעל קיבולת תרמית גבוהה.



1. מהי מסה קריטית?
2. מדוע משתמשים בכור גרעיני בחומר המאט נויטרונים?

§111 תגובות של היתוך גרעיני

גרעינים קלים יכולים להתמזג ולשחרר אנרגיה.

מסת המנוחה של גרעין אורניום גדולה מסכום מסות המנוחה של הרסיסים, הנוצרים במהלך ביקוע הגרעין. בגרעינים הקלים המצב הוא הפוך: מסת המנוחה של גרעין ההליום קטנה בהרבה מסכום מסות המנוחה של שני גרעיני מימן כבד, העשויים להיווצר בביקוע גרעין ההליום.

במהלך היתוך גרעינים קלים פוחתת אפוא מסת המנוחה, ובהתאם לכך תיפלט אנרגיה. תגובות היתוך של גרעינים קלים מתרחשות בטמפרטורות גבוהות מאוד בלבד. לכן מכנים אותן: **תגובות תרמו-גרעיניות**.

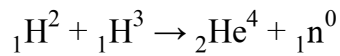
כדי שגרעינים יתמזגו, צריכים הם להתקרב זה לזה למרחק של כ- 10^{-12} cm, ואז ייכנסו לאזור ההשפעה של הכוחות הגרעיניים. להתקרבות זאת מפריעים כוחות קולון, היוצרים דחייה בין מטענים בעלי סימן זהה. על דחייה זו ניתן להתגבר באמצעות האנרגיה הקינטית הרבה של התנועה התרמית של הגרעינים.

האנרגיה, הנפלטת במהלך תגובה תרמו-גרעינית של נוקליאון אחד, גדולה מהאנרגיה הסגולית, המשוחררת בתגובת שרשרת של ביקוע גרעיני. כך מיזוג של מימן כבד, דייטריום, עם איזוטופ של מימן כבד עוד יותר, טריטיום, מלווה בשחרור כמות אנרגיה בשיעור 3.5 MeV לנוקליאון אחד, בעוד שביקוע אורניום, כדוגמה, מלווה בפליטה של כ- 1 MeV לנוקליאון אחד.

לתגובות היתוך תרמו-גרעיניות תפקיד מרכזי בהתפתחות היקום. כל התגובות האלה מלווה בפליטת אנרגיה, המהווה את מקור קרינת האור של הכוכבים במשך מיליארדי שנה.

ביצוע תגובות תרמו-גרעיניות מבוקרות היה מספק לאנושות מקור אנרגיה חדש ובלתי נדלה. מבחינה זו המבטיחה ביותר היא תגובת ההיתוך של דייטריום וטריטיום:





בתגובה זו משתחררת אנרגיה בשיעור 17.6 MeV. מכיוון שטריטיום אינו קיים בטבע, יש ליצרו מליתיום בכור התרמו-גרעיני עצמו.

כפי שמראים החישובים, תהיה התגובה כדאית מבחינה אנרגטית, אם החומרים המשתתפים בה יחוממו לטמפרטורה של כמה מאות מיליוני מעלות קלווין ויהיו בצפיפות גבוהה ($10^{14} - 10^{15}$ חלקיקים בסנטימטר מעוקב). עקרונית ניתן להשיג טמפרטורות כאלה בעת התפרקות חשמלית בפלזמה. הקושי הבסיסי נעוץ בשאלה: כיצד ובמה להחזיק את הפלזמה, הנמצאת בטמפרטורה כה גבוהה, לפרק זמן של 0.1 – 1 שנייה?

אין מעטפת חומרית שתתאים למשימה זו, מכיוון שבטמפרטורה זו כל חומר יהפוך מיד לאדים. הפתרון היחיד הנראה מעשי הוא שימוש בשדה מגנטי חזק, שיחזיק את הפלזמה בנפח מוגבל; אולם עד כה לא הצליחו לפתור בעיה זו עקב אי-היציבות של הפלזמה, הגורמת לדיפוזיה של חלק מהחלקיקים הטעונים דרך המעטפת המגנטית.

כיום נראה שכורים תרמו-גרעיניים מבוקרים ייבנו במוקדם או במאוחר. צוותי מדענים בארצות שונות פועלים לשם כך.

בינתיים הצליחו לבצע תגובת היתוך גרעיני שאינה מבוקרת – פצצת המימן (או פצצה תרמו-גרעינית).

ביצוע תגובה תרמו-גרעינית מבוקרת עשוי לפתור את בעיית האנרגיה של האנושות, ותגובה תרמו-גרעינית בפצצות מימן עלולה להשמיד אותה. הבחירה בידי אנוש.

?

1. מדוע מתרחשת תגובת היתוך של גרעינים קלים בטמפרטורות גבוהות מאוד בלבד?
2. כיצד ניתן להסביר, מבחינת חוק שימור האנרגיה, שאנרגיה נפלטת הן בתהליך הביקוע של גרעינים כבדים הן בהיתוך של גרעינים קלים?



§112 השימוש באנרגיה גרעינית

השימוש באנרגיית הגרעין לצורך המרתה לאנרגיה חשמלית נעשה לראשונה בברית-המועצות בשנת 1954. הספקה של תחנת החשמל הגרעינית הראשונה היה 5000 kW. האנרגיה שנפלטה בכור הגרעיני הפכה מים לאדים, ואלה הפעילו את הטורבינה הקשורה בצירה לגנרטור, והופקה אנרגיה חשמלית.

התפתחות ענף האנרגיה הגרעינית

לפי עיקרון זה פועלות תחנות חשמל גרעיניות רבות שנבנו ברחבי העולם. עוצמתם של הכורים בתחנות האלה היא בין 500 לבין 1000 MW.

לתחנות גרעיניות יש יתרון על-פני תחנות כוח הפועלות על דלק אורגני: כורים גרעיניים אינם צורכים דלק אורגני כפחם או כגז, ואינם מעמיסים קווי תובלה; תחנות גרעיניות אינן צורכות חמצן אטמוספרי ואינן מזהמות את הסביבה באפר או בחומרי שריפה אחרים. אולם מיקומן של תחנות גרעיניות באזורים מאוכלסים כרוך בסיכון מסוים.

בכורים, הפועלים על נויטרונים תרמיים (כלומר אטיים), מנצלים 1% – 2% של האורניום. את הניצול המלא של האורנים משיגים בכורים הפועלים על נויטרונים מהירים, שבהם מתקבל דלק גרעיני חדש: פלוטוניום. ב-1980 הופעל לראשונה כור גרעיני הפועל על נויטרונים מהירים בעל עוצמה של 600 MW.

תחנות גרעין מהוות גורם המסכן את הסביבה – בעיקר עקב זיהום רדיואקטיבי. בעיות רבות קשורות באחסון פסולת רדיואקטיבית ובפירוק התחנות שפג תוקף הפעלתן. זמן החיים של תחנות גרעיניות הוא כ-20 שנה. לאחר מכן אי-אפשר לתקן בלאי ולתחזק את הציוד עקב השפעה רב-שנתית של הקרינה על החומרים הבונים אותה.

תכנון תחנת חשמל גרעינית אמור לשקוד על בטיחות עבור עובדיה ואוכלוסיית האזור והסביבה. התאונה בכור בצ'רנוביל הראתה שכל שגיאה – אם זו שגיאה בתכנון, בהפעלה שגויה או שגיאת אנוש כלשהי – ממיטה אסון. כורים גרעיניים מותקנים גם בצוללות ובאוניות גדולות.

נשק גרעיני

תגובת שרשרת בלתי מבוקרת, בעלת מקדם ריבוי נויטרונים גדול, מתרחשת בפצצת אטום. על מנת שתתבצע פליטה כמעט מיידית של אנרגיה (פיצוץ), חייבת התגובה להתבסס על נויטרונים מהירים (ללא חומר האטה). כחומר הפעיל משתמשים באורניום טהור ${}^{235}\text{U}_{92}$ או בפלוטוניום ${}^{239}\text{Pu}_{94}$.

כדי שיארע פיצוץ חייבת מסת החומר הפעיל להיות גדולה מהמסה הקריטית. משיגים זאת באמצעות הצמדה מהירה של שתי חתיכות חומר לביקוע, שהמסה של כל אחת מהן קטנה מהמסה הקריטית; או באמצעות הפעלת מעיכה מהירה על גוש החומר הפעיל, כך שבריחת הנויטרונים דרך מעטפת הגוש תהיה קטנה עד כדי כך, שמסת הגוש תהיה גדולה מהמסה הקריטית. בשתי השיטות מבצעים פיצוץ מקדים באמצעות חומר נפץ רגיל.

בעת פיצוץ פצצת אטום מגיעה הטמפרטורה לעשרות מיליוני מעלות קלווין. בטמפרטורה כזו גדל הלחץ באופן קיצוני, נוצר גל הדף, ומתלווה לו קרינה חזקה. החומרים הנוצרים בעת הפיצוץ הם רדיואקטיביים ומסוכנים ליצורים חיים.

בשנת 1945, בשלהי מלחמת העולם השנייה, הוטלו שתי פצצות אטום על-ידי ארצות-הברית כנגד יפן: על הערים היפניות הירושימה ונגסאקי.

כדי ליזום את תגובת ההיתוך בפצצה תרמו-גרעינית (פצצת מימן) משתמשים בפיצוץ מקדים של פצצת אטום רגילה, הנמצאת בתוך פצצת המימן. השימוש בפיצוץ מקדים דרוש ליצירת מעיכה של החומר הגרעיני.

בסוף שנות הארבעים בנה צוות מדענים בברית-המועצות, בראשותו של א' **סחרוב**, את פצצת המימן הראשונה.

פיתוחו של הנשק הגרעיני הוביל למצב, שבו ניצחון במלחמה אינו אפשרי. מלחמה גרעינית עלולה להוביל את האנושות להשמדה עצמית, ולכן תומכות מדינות רבות בהגבלת הפצתו בעולם.

§113 ייצור איזוטופים רדיואקטיביים והשימוש בהם

בתעשיית הגרעין, ובכל תחומי החיים, נמצא שימוש הולך וגדל באיזוטופים רדיואקטיביים.

יסודות שאינם קיימים בטבע

באמצעות תגובות גרעיניות ניתן לייצר איזוטופים רדיואקטיביים, אך רק של יסודות כימיים הקיימים במצב יציב בטבע. ליסודות שמספרם 43, 61, 85 ו-87 לא קיימים איזוטופים יציבים בכלל, והם נוצרו לראשונה במעבדה. כך, לדוגמה, היסוד שמספרו הסידורי $Z = 43$, המכונה טכנציום, הוא איזוטופ בעל זמן מחצית החיים הארוך ביותר: כמיליון שנה.

בעזרת תגובות גרעיניות התקבלו גם היסודות הממוקמים מעבר לאורניום בטבלה המחזורית. על נפטוניום ופלוטוניום כבר דיברנו. מלבדם יצרו המדענים את היסודות הבאים: אמריציום ($Z = 95$), קיריי ($Z = 96$), ברקליום ($Z = 97$),

קליפורניום ($Z = 98$), איינשטייניום ($Z = 99$), פרמיום ($Z = 100$),

מנדלייביום ($Z = 101$), נובליום ($Z = 102$), לואורנציום ($Z = 103$),

רתרפורדיום ($Z = 104$), דובניום ($Z = 105$), סיבורגיום ($Z = 106$),

בוריום ($Z = 107$), גסיום ($Z = 108$), מייטנריום ($Z = 109$),

וגם את היסודות שמספרם 110, 111 ו-112, שטרם נקבעו שמותיהם. היסודות, שמספרם גדול מ-104, נוצרו לראשונה בדובנה שבברית-המועצות ובגרמניה.

אטומים מסומנים

במדע המודרני, בתעשייה וברפואה משתמשים באיזוטופים של יסודות שונים. השיטה הנפוצה ביותר היא שיטת האטומים המסומנים.

השיטה מבוססת על העובדה, שתכונותיהם הכימיות של איזוטופים רדיואקטיביים אינן שונות מתכונותיהם של האיזוטופים היציבים של אותם היסודות.

ניתן בקלות לאתר את האיזוטופים הרדיואקטיביים באמצעות קרינתם.

שימוש באיזוטופים רדיואקטיביים

הרדיואקטיביות משמשת כְּסֶמֶן מיוחד, שבאמצעותו אפשר לעקוב אחר התנהגות היסוד בתגובות כימיות שונות ובתהליכים פיזיקליים של חומרים. שיטת האטומים המסומנים היא אחת השיטות היעילות ביותר בפתרון בעיות רבות בביולוגיה, בפיזיולוגיה וברפואה.

איזוטופים רדיואקטיביים כמקור קרינה

לאיזוטופים רדיואקטיביים נמצא שימוש רחב במדע, ברפואה ובהנדסה כמקור קומפקטי של קרינת גמא. האיזוטופ הנפוץ ביותר הוא קובלט רדיואקטיבי $^{60}_{27}\text{Co}$.

ייצור איזוטופים רדיואקטיביים

איזוטופים רדיואקטיביים מיוצרים בכורים גרעיניים ובמאיצים של חלקיקי יסוד. ייצור האיזוטופים כיום הוא ענף תעשייתי רחב-היקף.

איזוטופים רדיואקטיביים בביולוגיה וברפואה

אחד המחקרים הבולטים באמצעות אטומים מסומנים היה המחקר על חילוף חומרים ביצורים חיים. כך למדו על אודות התחדשות מערכות החיים בחי: תאים "זקנים" מתים, ובמקומם נוצרים תאים "צעירים".

מעניין במיוחד קיומו של הברזל בהרכב הדם. ברזל הוא מרכיב בהמוגלובין של תאי הדם האדומים. כאשר הוכנס איזוטופ רדיואקטיבי של ברזל $^{59}_{26}\text{Fe}$ למזון, גילו שכמעט שאינו נכנס למחזור הדם, אלא רק כאשר מאגר הברזל בגוף מתרוקן; ואז מוסע הברזל באמצעות הדם לחלקי הגוף השונים ונספג בהם.

כאשר לא קיימים ליסוד איזוטופים רדיואקטיביים בעלי זמן מחצית החיים ארוך מספיק, כלחמצן ולחנקן, משנים את ההרכב האיזוטופי של יסודות יציבים. כך בעקבות הוספת האיזוטופ ^{18}O לחמצן גילו שחמצן חופשי, המשתחרר במהלך פוטוסינתזה, היה במקור מרכיב של המים – ולא של הפחמן הדו-חמצני, כפי שחשבו לפני כן.

לאיזוטופים רדיואקטיביים נמצא שימוש ברפואה, הן לצורכי אבחון הן למטרות ריפוי: נתרן רדיואקטיבי, המוחדר לדם בכמויות קטנות, מאפשר לחקור את מחזור הדם.

יוד מתרכז בבלוטת התריס – בעיקר במחלות הקשורות בבלוטה. על-ידי צפייה



בדרכי תנועתו של יוד רדיואקטיבי בגוף ניתן לאבחן את אזורי הספיגה שלו ולוודא את הדיאגנוזה. כמויות גדולות של יוד רדיואקטיבי גורמות להרס חלקי של רקמות פגומות, ולכן משתמשים בIOD גם לריפוי. קרינת גמא חזקה של קובלט מיושמת בריפוי מחלות סרטן ("תותח קובלט").

איזוטופים רדיואקטיביים בתעשייה

לא פחות נרחב הוא השימוש של איזוטופים רדיואקטיביים בתעשייה. אחת הדוגמאות היא בקרת בלאי של טבעות בוכנה במנועי שריפה פנימית: בהקרנת הטבעת על-ידי נויטרונים גורמים להופעת תגובות גרעיניות, והטבעת נעשית רדיואקטיבית. בעת פעולת המנוע חודרים רסיסי חומר מהטבעת לשמן הסיכה. על-ידי מדידת רמת הרדיואקטיביות של השמן לאחר משך זמן מסוים של פעולת המנוע מגלים את רמת הבלאי של הטבעת.

איזוטופים רדיואקטיביים מאפשרים להעריך דיפוזיה של מתכות ותהליכים בתנורי חום. משתמשים בקרינת גמא חזקה של חומרים רדיואקטיביים לחקירת המבנה הפנימי של גופי מתכת ולגילוי פגמים.

איזוטופים רדיואקטיביים בחקלאות

איזוטופים רדיואקטיביים משמשים בחקלאות. הקרנת זרעי צמחים (כותנה, כרוב, צנון וכו') במנות קטנות של קרינת גמא של מקורות רדיואקטיביים גורמת להעלאה משמעותית של היבול.

מנות גדולות של קרינה גורמות להופעות מוטציות בצמחים ובבקטריות, ובמקרים מסוימים מביאות להופעת מוטנטים בעלי תכונות רצויות חדשות. כך פותחו זנים חדשים של חיטה, שעועית וצמחים אחרים, וכן בקטריות בעלות שיעור ריבוי גבוה עבור תעשיית התרופות (ייצור אנטיביוטיקה). קרינת גמא של איזוטופים רדיואקטיביים מוצאת שימוש גם בהדברת חרקים מזיקים ובשימור חומרי מזון.

אטומים מסומנים משמשים בתעשיית חומרי הדשן ובחקירת תהליכי הדישון. לדוגמה: כדי לברר לאילו דשנים המכילים זרחן זקוק הצמח, מסמנים דשנים שונים באיזוטופ רדיואקטיבי של זרחן $^{32}\text{P}_{15}$, לאחר מכן מודדים את רמת הרדיואקטיביות של הצמח, וכך מגלים את כמות הזרחן מהדשנים השונים שנספגה בצמח.



איזוטופים רדיואקטיביים בארכיאולוגיה

יישום מעניין הוא השימוש בפחמן רדיואקטיבי בהערכת גילם של גופים עתיקים ממוצא אורגני (עץ, בדים, פחם וכו'). בצמחים מצוי תמיד איזוטופ של פחמן ^{14}C , המגלה רדיואקטיביות מסוג β , ושזמן מחצית החיים שלו הוא $T = 5700$ שנה. פחמן זה נוצר בכמות קטנה מחנקן שבאטמוספירה בהשפעת נויטרונים, הנוצרים בתהליכים גרעיניים הנגרמים על-ידי חלקיקים מהירים הנכנסים לאטמוספירה מהחלל (קרניים קוסמיות).

לאחר התרכבותו עם חמצן נוצר פחמן דו-חמצני, וזה נספג בצמחים ועובר דרכם גם לבעלי-חיים. גרם אחד של פחמן מעץ צעיר פולט כ-15 חלקיקי β בשנייה.

לאחר מות הגוף נפסקת ספיגת הפחמן לתוכו, וכמות הפחמן הנמצאת בגוף הולכת וקטנה בהתמדה עקב הקרינה הרדיואקטיבית. על-ידי מדידת אחוז האיזוטופ הרדיואקטיבי של הפחמן בעתיקות ניתן להעריך את גילן: אם הוא בגבולות 1,000 עד 50,000, ואפילו עד 100,000 שנה. בשיטה זאת מצאו את גילן של המומיות המצריות ואת אתרי המחיה של האדם הקדמון.

לאיזוטופים רדיואקטיביים יישום רחב בביולוגיה, ברפואה, בתעשייה, בחקלאות ואפילו בארכיאולוגיה.

?

1. מהם האיזוטופים הרדיואקטיביים, וכיצד משתמשים בהם?

§114 השפעה ביולוגית של קרינה רדיואקטיבית

לקרינה של חומרים רדיואקטיביים השפעה חזקה מאוד על כל היצורים החיים. אפילו קרינה חלשה – אך בתנאי ספיגה מלאה – מעלה את טמפרטורת הגוף ב- 0.001°C ומשבשת את פעילותם של התאים.

תא חי הוא מערכת מורכבת, שאינה יכולה לתפקד באופן תקין אם קיימים בה אזורים פגומים, ולו קטנים מאוד. אפילו קרינה חלשה עלולה לגרום לתא נזקים משמעותיים ולמחלות מסוכנות (מחלות קרינה). קרינה בעוצמה גבוהה גורמת למותם של יצורים חיים. סכנת הקרינה חמורה שבעתיים, מכיוון שאפילו מנות

השפעה ביולוגית של קרינה רדיואקטיבית

קטלניות של קרינה אינן גורמות לכאבים, וכך ניטלת אזהרת הכאב מפניה.

מנגנון השפעת הקרינה על יצורים ביולוגיים טרם הובן במלואו, אולם ברור שהוא קשור ביינון האטומים והמולקולות, המשנה את פעילותם הביוכימית. הרגישים ביותר לקרינה הם גרעיני התאים, ובעיקר של התאים המתרבים מהר. לכן פוגעת קרינה בראש ובראשונה במוח העצמות, ודרכו בתהליך ייצור הדם. אחריהם נפגעים תאי מערכת העיכול ואיברים נוספים.

לקרינה השפעה חזקה על גורמי התורשה בעקבות הפגיעה בגנים שבכרומוסומים. ברוב המקרים מזיקה השפעה זו על הגנים.

לעתים מביאה הקרינה מזור ורפואה ליצורים חיים. התאים שבגידולים סרטניים מתרבים בקצב מהיר ורגישים יותר לקרינה מאשר תאים רגילים. על כך מבוסס דיכוי הגידול על-ידי קרני גמא, הנפלטות על-ידי חומרים רדיואקטיביים ויעילות יותר מקרני רנטגן לצורך זה.

מנת הקרינה

השפעת הקרינה על יצורים חיים מאופיינת ב**מנת קרינה**. מנת הקרינה הנספגת היא היחס שבין האנרגיה הנספגת E של הקרינה, הגורמת ליינון, לבין מסת החומר המוקרן:

$$D = \frac{E}{m} \quad (13.6)$$

במערכת היחידות SI היחידה של מנת הקרינה הנספגת מכונה **גריי** (1 Gr).

1 גריי שווה למנת הקרינה הנספגת, כאשר לחומר המוקרן, שמסתו 1 ק"ג, מועברת אנרגיית קרינה מייננת שערכה 1 ג'אול:

$$1 \text{ Gr} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

קרינת רקע טבעית (קרינה קוסמית, רדיואקטיביות של הסביבה ושל גוף האדם) מספקת מנה שנתית בערך הקרוב ל- $2 \cdot 10^{-3}$ Gr. הוועדה הבינלאומית להגנה מפני הקרינה קבעה את מנת הקרינה השנתית המרבית המותרת עבור בני-אדם, העוסקים בקרינה, כ- 0.05 Gr. מנת קרינה של 10 Gr – 3, שנספגה בפרק זמן קצר, גורמת למוות.

רנטגן

במקרים רבים משתמשים עדיין ביחידת הקרינה **רנטגן** (R). יחידה זו היא מידת יכולת היינון של קרינת רנטגן וקרינת גמא. מנת הקרינה שווה לרנטגן אחד, אם בסנטימטר מעוקב אחד של אוויר יבש, הנמצא בטמפרטורה של 0°C ובלחץ 760 מ"מ עמודת כספית, נוצרת כמות של יונים, שהמטען הכולל מכל סימן ישווה לערך $3 \cdot 10^{-10}$ C. מספר זוגות היונים הנוצרים בתהליך זה הוא כ- $2 \cdot 10^9$. מספר היונים הנוצרים תלוי בשיעור האנרגיה הנספגת בחומר. שיעורו של רנטגן אחד שקול למנת קרינה נספגת 0.01 Gr.

הגנה מפני קרינה

במהלך העיסוק בכל מקור של קרינה (איזוטופים רדיואקטיביים, כור גרעיני וכו') חייבים לנקוט אמצעי הגנה כלפי כל מי שעלול להימצא באזור השפעת הקרינה.

השיטה הפשוטה ביותר היא הרחקת כל הצוות ממקור הקרינה למרחק גדול יחסית. לגבי הבליעה במרחב, עוצמת הקרינה פרופורציונית הפוך לריבוע המרחק מהמקור. לכן אין לקחת בידיים בקבוקון ובו דגימה של חומר רדיואקטיבי, אלא יש להשתמש במלחציים בעלי ידיות ארוכות.

באותם מקרים כאשר אי-אפשר להתרחק מהמקור למרחק רב, משתמשים לצורך הגנה בפני הקרינה במחסומים מחומרים הסופגים את הקרינה.

קשה ביותר היא ההגנה בפני קרני גמא ומנויטרונים עקב כושר החדירות הגבוה שלהם. הבולעת הטובה ביותר של קרני גמא היא העופרת. נויטרונים נבלעים טוב בבור ובקדמיום. נויטרונים מהירים נבלעים טוב בגרפיט.

לאחר התאונה בכור בצ'רנוביל הוחמרו כללי הבטיחות בתחנות חשמל גרעיניות בכל העולם.

התאונה בכור בצ'רנוביל המחישה את הסכנה הרבה בקרינה רדיואקטיבית. יש להיות מודעים לסכנה זאת ולאמצעי ההגנה מפניה.

?

1. מהי מנת קרינה?

השפעה ביולוגית של קרינה רדיואקטיבית

2. מהי עוצמת הקרינה (ברנטגנים) של קרינת הרקע הטבעית ?
3. מהי מנת הקרינה השנתית המרבית האפשרית (ברנטגנים) עבור צוות העוסק בחומרים רדיואקטיביים ?

מקבץ תרגילים 14

1. כתוצאה מסדרת התפרקות רדיואקטיביות הופך אורניום ${}_{92}\text{U}^{238}$ לעופרת ${}_{82}\text{Pb}^{206}$. כמה התפרקות α ו- β מתרחשות בדרך ?
2. זמן מחצית החיים של רדיום הוא $T = 1600$ שנה. כעבור כמה זמן יקטן מספר האטומים פי 4 ?
3. פי כמה יקטן מספר האטומים של אחד האיזוטופים של רדון בתום 1.91 ימים? זמן מחצית החיים של איזוטופ זה של רדון הוא $T = 3.82$ ימים.
4. באמצעות הטבלה המחזורית של מנדלייב מצאו את מספר הפרוטונים והנויטרונים בגרעיניהם של פלואור, ארגון, ברום, צזיום וזהב.
5. מהי אנרגיית הקשר של גרעין מימן כבד, הדדיטריום? המסה האטומית היחסית של גרעין הדדיטריום היא $m_D = 2.01355$, של פרוטון - $m_p = 1.00728$, ושל נויטרון - $m_n = 1.00866$; מסת אטום הפחמן היא $m_C = 1.995 \cdot 10^{-26}$ kg.
6. בהפצצת גרעיני בור ${}_{5}\text{B}^{11}$ בפרוטונים נוצר בריליום ${}_{4}\text{Be}^8$. איזה גרעין נוסף נוצר בתגובה זאת?
7. כתוצאה מביקוע גרעין האורניום ${}_{92}\text{U}^{235}$, שלכד נויטרון, נוצרים גרעיני בריום ${}_{56}\text{Ba}^{142}$ וקריפטון ${}_{36}\text{Kr}^{91}$, וכן שלושה נויטרונים חופשיים. אנרגיית הקשר הסגולית של גרעין בריום היא 8.38 MeV/nucleon, של גרעין קריפטון - 8.55 MeV/nucleon, ושל אורניום - 7.59 MeV/nucleon. מהי האנרגיה המשוחררת בביקוע גרעין אורניום אחד ?

השפטה ביולוגית של קרינה רדיואקטיבית

תקציר פרק 13

1. בפיזיקה גרעינית לומדים על אודות המבנה והתהליכים המתרחשים בגרעין. לגילוי ולרישום של ההתנגשויות והתהליכים של גרעיני האטום ושל חלקיקי היסוד משתמשים במכשירים מיוחדים, וביניהם: מונה גייגר, תא וילסון, תא הבועות ושכבות צילום.
2. בסוף המאה ה-19 גילה **בקרל** את תופעת הרדיואקטיביות. יסודות כימיים כאורניום, תוריום ואחרים פולטים בעצמם (ללא השפעה חיצונית) קרני α , β ו- γ . מקורות הקרינה שונים: קרני γ הם גלים אלקטרומגנטיים בעלי אורך גל קצר ($10^{-10} - 10^{-13}$ m); קרני β הן אלומות של אלקטרונים; וקרני α מהוות זרם גרעיני הליום.
3. **רתפורד** גילה שהתפרקות רדיואקטיבית היא התפרקות ספונטנית של גרעיני האטום, המלווה בפליטת חלקיקים שונים. על-פי חוק ההתפרקות הרדיואקטיבית, לכל חומר רדיואקטיבי קיים פרק זמן מסוים, שבמהלכו פוחתת פעילות החומר פי 2. פרק זמן זה מכונה **זמן מחצית החיים**. עבור חומרים שונים משתנה זמן מחצית החיים בטווח רחב: ממיליארדי שנה עד לחלקיקי שנייה.
4. לראשונה ביצע **רתפורד** התפרקות מלאכותית של גרעיני אטום באמצעות הפצתם בחלקיקי α , הנפלטים על-ידי חומרים רדיואקטיביים. בניסויים דומים גילה **צ'דוויק** חלקיק יסוד חדש, **נויטרון**. מטען הנויטרון שווה לאפס, ומסתו שווה בערך למסת הפרוטון (גדולה ממנה במקצת).
5. **הייזנברג ואיבנקו** הציעו מודל לגרעין האטום: היותו מורכב מפרוטונים ומנויטרונים. מספר המסה A של הגרעין שווה לסכום מספר הפרוטונים Z ומספר הנויטרונים N:

$$A = Z + N$$

- גרעינים בני מספר פרוטונים Z שווה – אולם בעלי מספר נויטרונים N שונה – מכונים **איזוטופים**. תכונותיהם הכימיות זהות.
6. פרוטונים ונויטרונים מוחזקים בגרעין על-ידי כוחות חזקים, הפועלים בטווחים

קצרים מאוד. כוחות אלה מכונים **כוחות גרעיניים**.

7. משתנה חשוב ביותר בפיזיקה הגרעינית הוא מושג **אנרגיית הקשר** ΔE . אנרגיית הקשר שווה לאנרגיה שיש להשקיע על מנת לפצל גרעין לנוקליאונים הבודדים, שמהם הוא מורכב. אנרגיית הקשר גדולה מיליוני מונים מאנרגיית היינון של האטום.
8. תהליכים, המתרחשים באטומים במהלך פעולתם ההדדית זה עם זה (או עם חלקיקי יסוד), מכונים **תגובות גרעיניות**. תגובות גרעיניות מלוות בפליטה או בספיגת אנרגיה. רוב התגובות הגרעיניות מתרחשות בעת התנגשויות של גרעינים עם חלקיקי יסוד טעונים או עם גרעינים קלים בעלי אנרגיה גבוהה. את האנרגיה הנדרשת הם רוכשים במאיצים של חלקיקים אלמנטריים או של יונים. נויטרונים אינם נדחים על-ידי הגרעינים, ולכן הם יכולים להשתתף בתגובות גרעיניות גם כאשר מנת האנרגיה שלהם נמוכה.
9. גרעיני אורניום, תוריום ויסודות כבדים אחרים עשויים להתפצל בהשפעת נויטרונים. האנרגיה הנפלטת בתהליך זה היא בסדר גודל של 200 Mev. ביקוע הגרעין מלווה בפליטת שניים עד שלושה נויטרונים, והיא מאפשרת ביצוע תגובת שרשרת גרעינית מבוקרת בכור גרעיני. תגובת ביקוע גרעיני בלתי מבוקרת מתרחשת בפצצת אטום.
10. בעת התנגשותם עשויים גרעינים קלים להתמזג ולשחרר אנרגיה. תגובות גרעיניות כאלה עשויות להתרחש בטמפרטורה גבוהה בלבד, ולכן קוראים להן **תגובות תרמו-גרעיניות**. תגובות אלה הן מקור האנרגיה של השמש והכוכבים, והם פולטים אותה במשך מיליארדי שנה. טרם הצליחו לבצע תגובה תרמו-גרעינית מבוקרת.
11. בברית-המועצות נבנתה תחנת החשמל הגרעינית הראשונה בעולם. לאחר התאונה בכור בצ'רנוביל ננקטים אמצעי בטיחות מוגברים בכל התחנות הגרעיניות בעולם.
12. איזוטופים רדיואקטיביים, הנוצרים בכורים גרעיניים ובמאיצי חלקיקים טעונים, משמשים במדע, ברפואה, בחקלאות ובתעשייה.
13. קרינה רדיואקטיבית נושאת בחובה סכנה רבה ליצורים חיים. בסביבתה של הקרינה יש לנקוט אמצעי הגנה מיוחדים.

פרק 14. חלקיקי יסוד

בפרק זה נדבר על חלקיקי היסוד.
אלה אינם מתפרקים, ומהם בנוי כל חומר.

§115 שלושת שלבי ההתפתחות בפיזיקה של חלקיקי היסוד

מכירים אתם כבר את האלקטרון, הפוטון, הפרוטון והנויטרון; ובכל זאת, מהו חלקיק יסוד?

השלב הראשון: מאלקטרון לפוזיטרון (1897 – 1932)

כאשר הפילוסוף והמדען היווני **דמוקריטוס** כינה חלקיקים בסיסיים שאינם נחלקים עוד בשם **אטום** (אטום ביוונית פירושו: אינו מתחלק), סבר ככל הנראה שמבנה החומר בטבע די פשוט: גופים שונים, צמחים ובעלי-חיים – הכול בנוי מחלקיקים קבועים ובלתי נחלקים; כל התהליכים המתרחשים בעולם הם תוצאה מסידור האטומים מחדש; הכול בעולם נזיל ומשתנה – מלבד האטומים עצמם שאינם משתנים.

אולם בסוף המאה ה-19 התגלה המבנה המורכב של האטום, והבינו שהאלקטרון הוא חלק מהאטום. לאחר מכן, במאה ה-20, גילו את הפרוטון ואת הנויטרון – החלקיקים שמרכיבים את גרעין האטום, וסברו אז שאלה הם חלקיקי היסוד, שאינם נחלקים ובלתי משתנים, ומהווים את אבני היסוד של הבריאה.

השלב השני: מפוזיטרון לקוורקים (1932 – 1964)

התברר שהעניין מסובך הרבה יותר: חלקיקים שאינם משתנים לא קיימים כלל. למושג "אלמנטרי" עצמו משמעות כפולה: מחד, אלמנטרי הוא המובן מאליון, הפשוט ביותר; מאידך, אלמנטרי – משמע בסיסי, המהווה את מהות ההוויה (במובן זה חלקיקים **תת-אטומיים**¹ מכונים כיום **אלמנטריים**).

קשה היום להשוות את אותם חלקיקים תת-אטומיים משתנים ל"אטומים" של **דמוקריטוס**, משום שאף לא אחד מהחלקיקים חי לנצח: רוב החלקיקים, המכונים היום אלמנטריים, אינם חיים יותר משתי מיליוניות השנייה, אפילו ללא השפעה חיצונית כלשהי. נויטרון חופשי (נויטרון הנמצא מחוץ לגרעין האטום) חי בממוצע 15 דקות.

¹ חלקיקים תת-אטומיים – החלקיקים שמהם מורכבים האטומים.

רק החלקיקים פוטון, אלקטרון ונויטרין היו נותרים קיימים, אילו כל אחד מהם היה יחיד ביקום (לנויטרין אין מטען חשמלי, ומסת המנוחה שלו ככל הנראה שווה לאפס).

לאלקטרון ולפרוטון קיימים "בעלי-ברית", המסוכנים ביותר לקיומם: **פוזיטרונים ואנטי-פרוטונים**. ההתנגשות בהם גורמת להשמדה הדדית של החלקיקים והיווצרות חלקיקים חדשים.

פוטון שנפלט ממנורת שולחן חי לא יותר מ- 10^{-8} sec; זה הזמן שדרוש לו כדי להגיע לעמוד שבספר ולהיבלע בנייר.

היחיד שחי חיי נצח הוא הנויטרין, מכיוון שכמעט שאינו פועל על חלקיקים אחרים. אולם גם הנויטרין נעלם בעת ההתנגשות בחלקיקים אחרים, אף שהתנגשויות כאלה נדירות ביותר.

בשאיפה הנצחית למציאת בסיס קבוע בעולמנו, המשתנה באופן מתמיד, לא מצאו אפוא המדענים את עצמם על "בסיס סלעי", אלא על "גבעת חול רופף".

כל חלקיקי היסוד משנים את מבנם באורח הדדי בעת ההתנגשויות, ושינויים אלה הם העובדה העיקרית של קיומם.

כאשר צפו מדענים בהתנגשויות בין חלקיקים בעלי אנרגיה גבוהה, כשלו ההנחות על היציבות והקביעות של החלקיקים האלמנטריים; אולם הרעיון העקרוני לגבי חלקיק בלתי מתפרק לא נתן למדענים מנוח.

חלקיקים אלמנטריים אכן בלתי מתפרקים, אולם הם בעלי תכונות מגוונות.

נניח שרוצים אנו לבדוק אם אלקטרון מורכב מתת-חלקיקים כלשהם. מה יש לעשות כדי לנסות לפרק אלקטרון? אפשר לחשוב על שיטה אחת בלבד: זו שבה פועל ילד, כאשר סקרן הוא לדעת מה נמצא בתוך הצעצוע שלו: לחבוט בצעצוע בחוזקה.

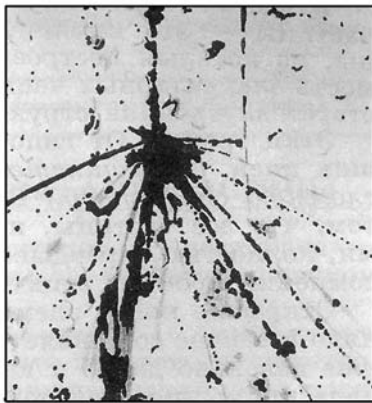
אי-אפשר להכות באלקטרון בפטיש, אך ניתן לחבוט בו באמצעות אלקטרון אחר, העף במהירות עצומה, או בחלקיק אחר הנע במהירות גבוהה.

המאיצים בני זמננו מקנים לחלקיקים טעונים מהירויות הקרובות למהירות האור.



מה קורה בעת התנגשות חלקיקים בעלי אנרגיה גבוהה במיוחד? הם כלל לא מתפרקים למשהו שניתן לכנותו "מרכיב", אלא נוצרים חלקיקים חדשים מרשימת החלקיקים האלמנטריים. ככל שאנרגיית החלקיקים המתנגשים גבוהה יותר, כך נוצרים יותר חלקיקים, וביניהם חלקיקים כבדים יותר. הליך זה מתאפשר מכיוון שמסת החלקיקים גדלה ככל שגדלה מהירותם. מזוג אחד של חלקיקים כלשהם בעלי מסה גדולה ניתן באופן עקרוני לקבל את כל החלקיקים הידועים כיום.

ציור 269 מראה את תוצאת ההתנגשות של גרעין פחם בעל אנרגיה של 60 מיליארד eV (הקו העבה למעלה) בגרעין של כסף משכבת הצילום. הגרעין מתפצל לרסיסים, ואלה עפים לכל הצדדים. בו-בזמן נוצר מספר רב של חלקיקים אלמנטריים חדשים המכונים **פיאונים**.



ציור 269

גרעיני האטומים, שהוסרו מהם האלקטרונים, נוצרו על-ידי יינון אטומים של פחם באמצעות קרן לייזר.

ייתכן שבעת התנגשות חלקיקים בעלי רמת אנרגיה, שאינה בת-השגה בימים אלה, ייווצרו חלקיקים חדשים, שאינם מוכרים כיום.

החלקיקים הנוצרים בהתנגשויות אינם "מרכיבים" של "חלקיקי-אם". הרי לאחר שמאיצים אותם יכולים "חלקיקי-בת" "ללדת" בעת התנגשותם עם חלקיקים הזחים ל"חלקיקי-האם" וחלקיקים נוספים רבים!

ובכן, ככל הידוע היום, חלקיקים אלמנטריים הם חלקיקים ראשוניים שאינם מתפרקים עוד, ומהם בנוי כל חומר ביקום; אולם משמעות "חלקיקי יסוד" אינה מעידה על העדר מבנה פנימי במ.

השלב השלישי: מקוורקים (1964) עד ימינו

בשנות השישים הועלו ספקות באשר לחלקיקים המכונים "אלמנטריים": האם מבנם מצדיק את כינויים? הבסיס לספקות ברור: מספרם של החלקיקים גדול מדי.



גילוי של חלקיק חדש היה תמיד – ועודנו – הישג אדיר למדע, וגילויים אכן באו זה לאחר זה.

גילו את קבוצת החלקיקים, שקיבלו כינויים מוזרים: K – **מזונים והיפרונים**, בעלי מסות הגדולות ממסות הנוקליאונים. בשנות השבעים הצטרפה אליהם קבוצה גדולה של חלקיקים בעלי מסות גדולות עוד יותר, שקיבלו את הכינוי **קסומים**.

מלבדם נתגלו חלקיקים בעלי זמן חיים קצר מאוד: של $10^{-22} - 10^{-23}$ sec. חלקיקים אלה כונו **רזוננסים (תהודות)**, ומספרם הגיע מעל ל-200.

בשנת 1964 הציעו **גל-מאן וצוויג** מודל, ולפיו כל החלקיקים המשתתפים בפעולות חזקות (גרעיניות), המכונים **הדרונים**, מורכבים מחלקיקים בסיסיים (או ראשוניים) יותר: **הקוורקים**.

לקוורקים מטען חשמלי שברי: $e + \frac{2}{3}$ ו- $e - \frac{1}{3}$. פרוטונים ונויטרונים מורכבים משלושה קוורקים.

כיום אין איש מעלה ספקות בדבר קיומם של הקוורקים, למרות שלא נתגלו במצב חופשי עד עתה. את קיומם של הקוורקים מוכיחים ניסויים בפיזור אלקטרונים בעלי אנרגיה גבוהה מאוד על פרוטונים ונויטרונים. מספר הקוורקים השונים שישה, וככל הידוע היום, הקוורקים חסרי מבנה פנימי, ובמובן זה עשויים להיחשב כחלקיקי יסוד אמיתיים.

חלקיקים קלים, שאינם משתתפים בפעולות החזקות (תוך-גרעיניות), מכונים **לפטונים**. מספרם שישה, כמספרם של הקוורקים (אלקטרון, שלושה סוגים של נויטרינו ועוד שני חלקיקים: **מיואון וטאון-לפטון**, בעלי מסה הגדולה בהרבה ממסת האלקטרון).

נראה עתה שקוורקים ולפטונים הם חלקיקים אלמנטריים אמיתיים.

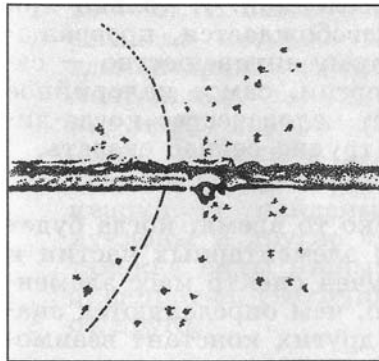
§116 גילוי הפוזיטרון והאנטי-חלקיקים

את קיום הכפיל של האלקטרון – הפוזיטרון, ניבא הפיזיקאי האנגלי **פאול דיראק** בשנת 1931.

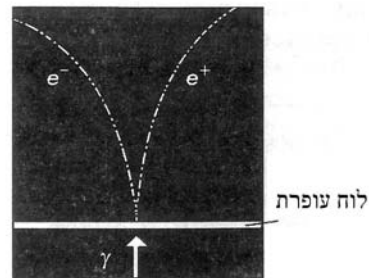
הוא ניבא שבעת פגישתם של פוזיטרון ואלקטרון ייעלמו שני החלקיקים, ובמקומם ייווצרו פוטונים בעלי רמת אנרגיה גבוהה; ושעשוי להתרחש גם תהליך הפוך: היווצרות של זוג אלקטרון-פוזיטרון, כאשר פוטון בעל רמת אנרגיה גבוהה דִּיךָ (מסתו צריכה להיות גדולה יותר מסכום מסות המנוחה של שני החלקיקים הנוצרים) יתנגש בגרעין.

כעבור שנתיים התגלה הפוזיטרון בתא וילסון, הנמצא בשדה מגנטי. כיוון ההתקממות של הטראק הצביע על סימן המטען. על-פי רדיוס העקמומיות מצאו את היחס שבין מטען החלקיק למסתו. גודלו של היחס היה כִּזֶּה של האלקטרון. בצירור 270 נראה הצילום הראשון, שהוכיח את קיומו של הפוזיטרון. החלקיק נע מלמטה כלפי מעלה, וכאשר חדר דרך לוח העופרת, איבד חלק מהאנרגיה שאצורה בו. עקב כך גדלה העקמומיות של המסלול.

תהליך ההיווצרות של הזוג אלקטרון-פוזיטרון על-ידי קוונט γ בלוח עופרת נראה בצירור 271. בתא וילסון, הנמצא בשדה מגנטי, מתווה הזוג סימן ייחודי של מזלג.



ציור 270



ציור 271

היעלמות, הרס הדדי (אניהילציה) של חלקיקים מסוג אחד והופעתם של אחרים במהלך תגובות בין חלקיקים אלמנטריים הם היפוך – ולא רק היווצרות של צירוף

חלקיקי יסוד

חדש ממרכיבי החלקיקים הישנים. באופן ברור במיוחד מתגלה היפוך זה בעת האניהילציה של הזוג אלקטרון-פוזיטרון: שני החלקיקים נושאים מסה מסוימת במצב מנוחה ומטענים חשמליים. הפוטונים, הנוצרים בתהליך זה, אינם נושאים מטענים, והם חסרי מסת מנוחה, מכיוון שאינם יכולים להתקיים במצב מנוחה.

בזמנו עורר גילוי ההיווצרות והאניהילציה של הזוגות אלקטרון-פוזיטרון סנסציה אמיתית במדע, שכן עד אז לא שיער איש שאלקטרון – החלקיק ה"וותיק" ביותר, אבן הבנייה החשובה ביותר של האטומים – עלול להיות בלתי נצחי. בהמשך התגלו "כפילים" – אנטי-חלקיקים – לכל החלקיקים. את האנטי-חלקיקים מציגים אל מול החלקיקים המתאימים, משום שבעת המפגש של כל חלקיק עם האנטי-חלקיק שלו מתרחשת אניהילציה: שני החלקיקים נעלמים, והופכים לקוונטים של אור או לחלקיקים אחרים.

לא מזמן נתגלו אנטי-פרוטון ואנטי-נויטרון. המטען החשמלי של האנטי-פרוטון הוא שלילי.

כעת ידוע היטב שהיווצרות ואניהילציה של הזוג חלקיק-אנטי-חלקיק אינן בלעדיות לאלקטרונים ולפוזיטרונים.

האטומים, שגרעיניהם מורכבים מאנטי-נוקליאונים וקליפותיהם מפוזיטרונים, מהווים **אנטי-חומר**. בשנת 1969 יצרו לראשונה בברית המועצות **אנטי-הליום**.

בעת אניהילציה של חומר ואנטי-חומר מותמרת אנרגיית המנוחה לאנרגיה קינטית של קוונטים γ הנוצרים בתהליך.

אנרגיית המנוחה היא מאגר האנרגיה הגדול והמרוכז ביותר ביקום. בתהליך האניהילציה משתחררת האנרגיה במלואה והופכת לסוגי אנרגיה אחרים. לכן אנטי-חומר הוא מקור האנרגיה היעיל ביותר, המספק "דלק" אידיאלי. האם תדע האנושות להשתמש אי-פעם בדלק זה? לעתיד פתונים.

אפשר לקוות שלא רחוק הזמן, שבו תיפתר הבעיה הבסיסית של פיזיקת חלקיקי היסוד ושל כל הפיזיקה בכלל: שיתקבל ספקטרום המסות של החלקיקים האלמנטריים, ויתברר מה קובע את גודל המטען החשמלי ואת ערכם של פרמטרים אחרים.

?

1. מה מבדיל בין שלושת שלבי ההתפתחות של פיזיקת החלקיקים האלמנטריים?
2. אלקטרון הוא החלקיק הקל ביותר מבין החלקיקים הטעונים. איזה מחוקי השימור הידועים לכם אוסר את היפוכו של האלקטרון לפוטון או לנויטרינו?
3. מנו את כל חלקי היסוד היציבים.
4. מהי התדירות של הקוונטים γ , הנוצרים בעת אניהילציה של אלקטרון ופוזיטרון אטיים?
5. האם אפשר לצפות בתא הבועות בטראק של חלקיק טעון, שזמן מחצית החיים שלו הוא 10^{-23} sec? מדוע?
6. מהו קוורק?

תקציר פרק 14

1. חלקיקים אלמנטריים הם חלקיקים ראשוניים ובלתי מתפרקים, שמהם בנוי כל חומר ביקום.
2. חלקיקים אלמנטריים אינם בלתי משתנים: הם עשויים להפוך האחד לאחר. היפוכים אלה הם עובדת קיומם החשובה ביותר.
3. לכל החלקיקים קיימים "כפילים" – אנטי-חלקיקים. לדוגמה: האנטי-חלקיק של האלקטרון הוא הפוזיטרון. לחלקיק ולאנטי-חלקיק שלו מסות שוות ומטענים מנוגדים בסימנם. בעת התנגשותם של חלקיק באנטי-חלקיק הם נעלמים (עוברים אניהילציה) והופכים לחלקיקים אחרים. אניהילציה של אלקטרון ופוזיטרון מלווה בהיווצרות של שניים (או שלושה) קוונטים γ .
4. מספר החלקיקים האלמנטריים שהתגלו לקראת שנות השבעים היה כמה עשרות. בהמשך המחקר גילו יותר מ-200 חלקיקים בעלי זמן חיים קצר, המוערך בשיעור 10^{-23} sec, המכונים **רזוננסים**. בעקבות כך הועלתה הסברה שכל החלקיקים, המשתתפים בפעולות החזקות, מורכבים מחלקיקים בסיסיים

יותר, המכונים **קוורקים**. קוורקים התגלו בתוך פרוטונים ונויטרונים בניסוי של פיזור אלקטרונים ונויטרונים בעלי אנרגיה גבוהה על נוקליאונים. עם זאת לא נמצאו קוורקים במצב חופשי, וכנראה לא ניתן לפרק את הנוקליאונים והחלקיקים האחרים לקוורקים, מכיוון שהכוחות הפועלים בין הקוורקים הולכים וגדלים עם התרחקותם זה מזה.

משמעות הפיזיקה להבנת העולם ולהתפתחות התעשייה

§117 תמונת העולם הפיזיקלית הכללית

סיימנו את לימודי הפיזיקה במסגרת בית-הספר. במידה זו או אחרת נחשף כל אחד מכם לתוצאותיה של העבודה העצומה בלימודי צורות התנועה של הגופים ומבנהו ותכונותיו של החומר, שנעשתה במהלך מאות שנים על-ידי מדענים מכל העולם. הפיזיקה מנחילה לנו את הבנת חוקי הטבע הכלליים ביותר, השולטים בעולם הסובב אותנו ובכל היקום.

חקר הפיזיקה נועד למציאת חוקי טבע כלליים ולמתן הסבר לכל המתרחש סביבנו. במהלך ההתקדמות להשגתה של המטרה נפרסה בפני המדענים יריעה גדולה ומורכבת, הממחישה את המשותף ואת האחידות בטבע. העולם אינו אוסף אירועים בודדים ובלתי תלויים, אלא התגלויות שונות של מכלול שלם אחד.

תמונת העולם המכנית

דורות רבים של מדענים הוקסמו, התפלאו וממשיכים להתפלא מהתמונה השלמה של העולם, שנבנתה על בסיס המכניקה של **ניוטון**. על-פי **ניוטון** מורכב היקום "מחלקיקים ראשוניים קשיחים, בעלי משקל, בלתי חדירים וזריזים... החלקיקים הראשוניים האלה קשיחים באופן מוחלט: הם קשיחים אינספור מונים יותר מהגופים המורכבים מהם, הם אינם מתבלים ואינם נשברים לרסיסים". הם שונים האחד מהאחר בעיקר מבחינה כמותית, כלומר במסתם. כל העושר והרבגוניות של העולם הם תוצאת השוני שבתנועת החלקיקים. המהות הפנימית שלהם איננה משמעותית.

הבסיס לתמונת העולם השלמה הזו היה האופי הכללי של חוקי התנועה, שהתגלו ונוסחו על-ידי **ניוטון**. לחוקים אלה מצייתים בדיוק רב הן גופים קוסמיים

חלקיקי יסוד

ענקיים הן גרגירי חול הנישאים ברוח. אפילו הרוח עצמה, המהווה תנועת חלקיקי אוויר בלתי נראים, גם היא נשלטת על-ידי אותם חוקים. במשך תקופה ארוכה היו המדענים משוכנעים שהחוקים הבסיסיים היחידים של הטבע הם חוקי המכניקה של ניוטון. המדען הצרפתי לגראנז' צוטט: "אין אדם מאושר יותר מניוטון; הרי רק פעם בחיים זוכה אדם, ורק אדם אחד, לבנות את תמונת היקום".

אולם התמונה המכנית הפשוטה של היקום לא הצליחה לתאר את התהליכים האלקטרומגנטיים. **מקסוול** גילה סוג חדש של חוקים בסיסיים, שאינם מהווים מקרה פרטי של המכניקה הניוטונית. **מקסוול** גילה את חוקי השדה האלקטרומגנטי.

תמונת העולם האלקטרומגנטית

על-פי המכניקה הניוטונית פועלים גופים זה על זה ישירות דרך הריק, וההשפעות מועברות בן-רגע (תורת הפעולה מרחוק). לאחר פיתוחה של האלקטרודינמיקה השתנה מושג הכוח באופן משמעותי: כל אחד מהגופים יוצר שדה אלקטרומגנטי המתפשט במרחב במהירות סופית. הכוחות מועברים באמצעות השדה (תורת הפעולה מקרוב).

הכוחות האלקטרומגנטיים הם הנפוצים ביותר; הם פועלים בגרעין האטום, במולקולה ובין המולקולות בגופים מקרוסקופיים, משום שכל האטומים מורכבים מחלקיקים טעונים. פעולת הכוחות האלקטרומגנטיים מתגלה הן במרחקים קטנים ביותר (בגרעין) הן בגדולים ביותר (קרינה אלקטרומגנטית של הכוכבים).

ההתפתחות של האלקטרודינמיקה הביאה לנסיונות לבנות את המודל האלקטרומגנטי השלם של היקום, שעל-פיו מתרחשים כל האירועים שביקום לפי חוקי האלקטרודינמיקה.

שיאו של המודל האלקטרומגנטי הכולל בא לאחר פיתוחה של תורת היחסות. הובנה המשמעות של מהירות האור כמהירות מרבית וסופית, נולדה תורת המרחב והזמן היחסית (המודרנית), ופותחו משוואות התנועה של הגופים, הנעים במהירות גבוהה מאוד, שהחליפו את משוואות התנועה של ניוטון.

בזמן פריחת המודל המכני של העולם ניסו להסביר תופעות אלקטרומגנטיות באמצעות תהליכים מכניים בתווך מיוחד ("האתר העולמי"), אבל עתה ניסו לפתח



את חוקי תנועת החלקיקים על בסיס התיאוריה האלקטרומגנטית, ואת חלקיקי החומר ניסו להציג כ"גושי" השדה האלקטרומגנטי. אולם המדענים לא הצליחו להסביר את כל תהליכי הטבע באמצעות התופעות האלקטרומגנטיות. כך, למשל, לא ניתן לפתח את משוואות התנועה של החלקיקים ואת חוקי הכבידה מתורת השדה האלקטרומגנטי. זאת ועוד; התגלו חלקיקים חסרי מטען וסוגי כוחות חדשים. הסתבר שהטבע מורכב יותר ממה שסברו תחילה: לא קיים חוק תנועה אחד, ולא קיים כוח אוניברסלי אחד, היכולים לתאר את מגוון התהליכים ביקום.

אחידות מבנה החומר

היקום רבגוני ביותר; אולם מפליא שהחומר, שממנו בנויים הכוכבים, הוא אותו חומר ממש שממנו בנוי כדור הארץ. האטומים, שמהם מורכבים כל הגופים בעולם, זהים; יצורים חיים מכילים את אותם האטומים שבחומר דומם.

לכל האטומים מבנה זהה, והם בנויים מחלקיקי יסוד משלושה סוגים: יש להם גרעין, המכיל פרוטונים ונויטרונים, וקליפות של אלקטרונים. הגרעין והאלקטרונים פועלים ביניהם באמצעות שדה אלקטרומגנטי, והקוונטים של השדה הם פוטונים.

את הפעולות בין פרוטונים לנויטרונים שבתוך הגרעין מבצעים בעיקר **π-מזונים** – קוונטים של השדה הגרעיני. בעת התפרקות הנויטרונים מופיעים נויטרינו. מלבד אלה נתגלו חלקיקי יסוד רבים אחרים, אולם פעילותם מתגלה כאשר רמות האנרגיה של החלקיקים גבוהות מאוד.

במחצית הראשונה של המאה ה-20 גילו עובדה בסיסית: **כל חלקיקי היסוד יכולים להפוך האחד לאחר.**

בשנות השבעים נקבע שכל החלקיקים, המשתתפים בפעולות חזקות, מורכבים משישה חלקיקים תת-אלמנטריים, המכונים **קוורקים**. חלקיקי היסוד האמיתיים הם **לפטונים וקוורקים**.

לאחר גילוי החלקיקים האלמנטריים וההיפוכים ההדדיים שלהם הצטיירה תמונת עולם, המבהירה (עד כה) את אחדות מבנה החומר ביקום.

בבסיס אחדות זו נמצאת החומריות של כל חלקיקי היסוד: כל החלקיקים האלמנטריים השונים מהווים צורות התגלמות שונות של החומר.



תמונת העולם הפיזיקלית העכשווית

אחדות היקום מתבטאת לא רק באחדות החומר; היא מתגלה גם בחוקי תנועת החלקיקים ובחוקי הכוחות הפועלים ביניהם.

על-פי הידוע כיום, למרות הרבגוניות הנפלאה של הגופים, הפועלים האחד על האחר, קיימים בטבע ארבעה סוגי כוחות בלבד: **כוחות גרוויטציה, כוחות אלקטרומגנטיים, כוחות גרעיניים וכוחות חלשים**. האחרונים מתגלים בעיקר בהיפוכי החלקיקים האלמנטריים האחד לאחר. בהתגלמות ארבעת סוגי הכוחות אנו נתקלים ביקום, בגופים כלשהם על פני כדור הארץ (ביניהם גם יצורים חיים), באטומים ובגרעיני האטום ובכל ההיפוכים של חלקיקים אלמנטריים.

שינוי מהפכני בדעות הקלאסיות על תמונת היקום הפיזיקלית התרחש לאחר גילוי התכונות הקוונטיות של החומר. הופעתה של הפיזיקה הקוונטית, המתארת את התנועה של חלקיקי המיקרו, פתחה עידן חדש לתמונת יקום כללית.

חלוקת החומר לבעל מבנה דיסקרטי ולשדה רציף איבדה את משמעותה המוחלטת. לכל שדה מתאימים קוונטים משלו: לשדה האלקטרומגנטי – פוטונים, לשדה הגרעיני – π -מזונים, וברמה עמוקה יותר – גלואונים, המאפשרים את הפעולות בין הקוורקים.

מצד שני נושאים כל החלקיקים תכונות של גלים. הדואליות חלקיק-גל משותפת לכל צורות החומר.

התיאור של שתי תכונות החומר, הסותרות כביכול האחת את זולתה (חלקיק – גל) במסגרת של מודל אחד, התאפשר הודות לעובדה, שחוקי התנועה של כל חלקיקי המיקרו, ללא יוצא מהכלל, הם סטטיסטיים. עובדה זו אינה מאפשרת תיאור חד-משמעי של התנהגות של גופי המיקרו.

העקרונות של המכניקה הקוונטית כלליים ומתאימים לתיאור התנועה של כל החלקיקים ולכל הפעולות ביניהם.

הפיזיקה המודרנית מדגימה אפוא את תווי האחדות של הטבע, אולם נותרו עדיין שאלות רבות, וטרם מובנת כל צורכה מהות אחדות זו. כך, למשל, לא ברור מדוע קיימים כל-כך הרבה חלקיקים אלמנטריים שונים, ומדוע הם נושאים את



ערכי המטען, את המסה ואת הגדלים האחרים. עד כה נמדדים ערכים אלה באופן ניסויי.

עם זאת מתבהר הקשר בין סוגי הפעולה השונים: הפעולות האלקטרומגנטיות והחלשות מאוחדות במסגרת תיאוריה אחת; והתברר המבנה של רוב החלקיקים האלמנטריים.

"כאן טמונים סודות כה עמוקים ומחשבות כה גבוהות, שלמרות המאמצים של מאות חכמים, שעמלו במשך אלפי שנים, טרם הצליחו לחדור אליהם; האושר הכרוך בחיפוש יצירתי ובמחקר לגילויים חדשים הוא עדיין נחלתו של אנוש". מילים אלה נאמרו לפני כ-350 שנה על-ידי גלילאו, והן טרם התיישנו.

הגישה המדעית

במורכבותם עולים חוקי הפיזיקה בהרבה על העובדות שמהן מתחילה חקירת התופעות, והם אמיתיים כעובדות הנצפות במישרין.

יותר ויותר אנשים מודעים לכך שאין נסים בחוקי הטבע, וכי ידיעתם של החוקים האלה מבטיחה את הישרדותה של האנושות והתפתחות הציוויליזציה.

§118 פיזיקה והמהפכה הטכנולוגית

חֲוֹנִים אנו עתה מהפכה טכנולוגית גדולה, שהחלה לפני כחצי מאה והביאה לשינויים מהפכניים בענפי מדע והנדסה רבים. אחד המדעים העתיקים, האסטרונומיה, עובר עִידן בזכות יציאת האדם לחלל. המתמטיקה קיבלה תנופה אדירה עם הולדת המדע העוסק במחשבים, הקיברנטיקה, ובזכות התפתחות המחשבים האלקטרוניים. הופעת הביולוגיה המולקולרית והתחדשות הגנטיקה גרמו למהפכה בביולוגיה. תהליכים דומים קורים במדע הכימיה, הגיאולוגיה, המטאורולוגיה, האוקיינולוגיה (מדע האוקיינוסים) ובמדעים רבים אחרים.

מתרחשים שינויים מהותיים בענפי הנדסה בסיסיים: מהפכה בייצור האנרגיה בזכות המעבר מתחנות כוח תרמיות, הפועלות על דלק אורגני, לתחנות חשמל גרעיניות. התפתחה תעשיית חומרים בעלי תכונות מיוחדות. שילוב פיתוחים חדשים בהנדסת מכונות עם שיטות בקרה ממוחשבות הביא למהפכה בחקלאות. תחבורה, בנייה ותקשורת נהיו לענפי הנדסה משוכללים ויעילים.

המהפכה הטכנולוגית שינתה גם את מעמדו של המדע בחיי החברה, והוא נהיה מרכיב יצרני: היום ובעתיד יהיה תלוי ייצורם של כל המוצרים ושל אמצעי המחיה בהישגים וברמת ההתפתחות המדעית.

בד-בבד עם שיפור תהליכי הייצור דואג המדע לשמירת הסביבה ולהגנת הטבע ממפגעי התעשייה ומתולדות ההרסניות של התפתחות החיים המודרניים. לפיזיקה תפקיד מוביל בין מדעי הטבע; השפעתה מכרעת על ענפי מדע, ההנדסה והתעשייה השונים. נציג כמה דוגמאות לדרך, בה השפיעה הפיזיקה על תחומי מדע אחרים.

פיזיקה ואסטרונומיה

במשך אלפי שנים קיבלו האסטרונומים מידע לגבי תופעות שמימיות רק באמצעות האור הנראה. הם חקרו את התופעות האסטרונומיות מבעד לחריץ צר בספקטרום רחב של הקרינה האלקטרומגנטית. בזכות התפתחות הרדיו-פיזיקה נולד לפני 40 שנה מדע הרדיו-אסטרונומיה, והוא הרחיב מאוד את הידע שלנו על היקום. בעזרתו גילו גופים קוסמיים רבים, שלא ידעו על קיומם קודם לכן. מקור מידע אסטרונומי נוסף הוא אזור הספקטרום האלקטרומגנטי בתחום של גלים דצימטריים וסנטימטריים.

זרם אדיר של מידע מביאים עמם מהחלל סוגי קרינה אחרים, שאינם מגיעים לפני כדור הארץ, אלא נבלעים באטמוספירה. עם יציאתו של האדם לחלל הופיעו תחומי אסטרונומיה חדשים, הפועלים באזורי הספקטרום האולטרה-סגול, האינפרא-אדום, קרני הרנטגן וקרני הגמא. הורחבו מאוד אפשרויות המחקר של חלקיקים קוסמיים הפוגעים באטמוספירה. כעת יכולים האסטרונומים לחקור את כל סוגי הקרינה ואת כל סוגי החלקיקים הבאים מהחלל. כמות המידע, שהתקבלה על-ידי האסטרונומים בעשרות השנים האחרונות, גדולה בהרבה מהכמות שהתקבלה בכל ההיסטוריה המדעית לפני כן. שיטות המחקר ומכשירי הצפייה והמדידה, המשמשים היום את האסטרונומים, לקוחים מהמאגר שנוצר על-ידי הפיזיקה המודרנית. האסטרונומיה העתיקה הופכת למדע צעיר ומתפתח, המכונה **אסטרופיזיקה**.

כעת מתבסס ענף אסטרופיזיקה חדש, שמקור המידע העיקרי שלו הוא זרמים של נויטרונים הנפלטים ממעמקי הכוכבים – מליבת השמש, למשל. הופעתו של ענף



חדש זה התאפשרה הודות להתפתחותה הנחשונית של הפיזיקה הגרעינית ושל הפיזיקה של החלקיקים האלמנטריים.

פיזיקה וביולוגיה

את המהפכה בביולוגיה קושרים בדרך כלל להופעתן של הביולוגיה המולקולרית והגנטיקה, החוקרות את התהליכים בחי ברמה מולקולרית. השיטות והאמצעים העיקריים, בהם משתמשים בביולוגיה מולקולרית לגילוי ולחקירת הגופים הביולוגיים, כוללים: מיקרוסקופ אלקטרוני ומיקרוסקופ פרוטוני, אנליזה מבנית המבוססת על פיזור קרני רנטגן, אלקטרונוגרפיה, אנליזה נוטרונית, אטומים מסומנים, צנטריפוגות ועוד. שיטות ואמצעים אלה פותחו על-ידי הפיזיקאים; ללא אמצעים אלה לא היו יכולים הביולוגים לבצע את פריצת הדרך לרמת המחקר המודרנית של התהליכים, המתרחשים ביצורים חיים.

פיזיקה והנדסה

הפיזיקה נמצאת בבסיס השינויים המהפכניים בכל ענפי ההנדסה: ייצור אנרגיה, תחבורה, בנייה, תעשייה וחקלאות.

פיזיקה וייצור אנרגיה

המהפכה בענף זה היא תולדה של הופעת האנרגיה האטומית. כמות האנרגיה, האצורה בדלק אטומי, עולה בהרבה על כמות האנרגיה האצורה בדלק אורגני. פחם, נפט וגז טבעי משמשים כחומר בסיסי לייצור מוצרים רבים. שריפתם בכמויות גדולות, משמעותה גרימת נזק בלתי הפיך לסביבה. לכן כדאי וחשוב להשתמש לצורכי ייצור האנרגיה בדלק אטומי (אורניום, תוריום). תחנות חשמל תרמיות גורמות נזק לסביבה בפליטת פחמן דו-חמצני לאטמוספירה, הגורמת לאפקט החממה ולהתחממות האקלים.

תחנות חשמל תרמו-גרעיניות ישחררו את האנושות מדאגות למקורות האנרגיה. כפי שלמדנו, הבסיס המדעי לייצור אנרגיה גרעינית ותרמו-גרעינית הוא הפיזיקה הגרעינית.

פיזיקה וייצור חומרים בעלי תכונות מיוחדות

תעשיית העתיד לא תתבסס ברובה על החומרים המוכנים הנמצאים בטבע, שאת תכונותיהם הכתיב הטבע, אלא על חומרים סינתטיים בעלי תכונות המוגדרות



מראש. במשולב עם הכימיה שמור תפקיד מכריע לשיטות פיזיקליות של עיבוד החומר: אלומות אלקטרוניים ויונים, קרני לייזר, שדות מגנטיים חזקים, לחץ וטמפרטורה גבוהים במיוחד, גלי קול אולטרה-סוניים, ננו-טכנולוגיות המאפשרות לפתח רכיבים זעירים במיוחד.

פיזיקה ומחשבים

לפיזיקה תפקיד מרכזי בפיתוח המחשבים המודרניים, המהווים בסיס למערכות חישוב, שליטה ובקרה, שבלעדיהן לא ייתכן קיומו של ענף משק בימינו. כל דורות המחשבים – החל באלה המבוססים על שופרות ריק, דיודות ועד לצייפים בעלי חיבורים מיקרוניים – נבנו לראשונה במעבדות פיזיקליות.

הפיזיקה המודרנית מציעה דרכים חדשות למזעור הרכיבים ולמהירות החישובים הקשורה בהם. השימוש בלייזרים, הולוגרפיה, סיבים אופטיים וחומרים מגנטיים אפשר קצב התקדמות מדהים בענף המחשוב, ההולך ומתפתח על בסיס הפיתוחים הפיזיקליים האחרונים.

פיזיקה ואינטרנט

המהפכה של האינטרנט – רשת המחשבים הכלל-עולמית – התאפשרה הודות לשיטות ומערכות להעברת המידע, שפותחו על-ידי הפיזיקאים: סיבים וכבלים אופטיים ותקשורת לוויינים. קצב העברת המידע תלוי ביעילות המרת המידע מאותות אלקטרוניים לאופטיים; ובפיתוח רכיבים המאפשרים את ההמרה הזאת. כל זה נעשה על-ידי הפיזיקאים.

תיארנו כאן רק חלק מהתחומים, שבהם יש לפיזיקה תפקיד מרכזי; אולם גם דוגמאות אלה מספיקות כדי להעריך את תפקידה ההולך והגדל של הפיזיקה בהתקדמות הטכנולוגית בכל תחומי המדע והחיים.

1. השפעת שדה מגנטי על זרם חשמל

הציוד : סליל תיל, פן, מקור זרם קבוע, נגד משתנה, מפסק, חוטי חיבור, מגנט בצורת פרסה.

הכנות לביצוע העבודה

תלו את הסליל על הכן וחברו אותו בטור לנגד, למפסק ולמקור זרם. המצב ההתחלתי של המפסק פתוח, ומצב הנגד מתאים להתנגדות מרבית.

מהלך הניסוי

1. קרבו מגנט אל הסליל התלוי וסגרו את המעגל; צפו בתנועות הסליל.
2. בחרו כמה מצבים אופייניים של מקום המגנט ומקום הסליל וציירו אותם. סמנו את כיוון השדה המגנטי ומגמתו, את מגמת הזרם ואת כיוון תנועת הסליל ומגמתו יחסית למגנט.
3. בדקו באופן ניסויי את כיוון התנועה של הסליל ומגמתו בכל אחד מהמצבים.

2. חקירת תופעת ההשראה האלקטרומגנטית

הציוד: אמפרמטר, מקור זרם ישר, סלילים עם ליבה, מגנט-פרסה, מפסק לחצני, חוטי מתכת, מחט מגנטית (מצפן), נגד משתנה.

הכנות לביצוע העבודה

1. הכניסו בסליל אחד את ליבת הברזל וחזקו אותה באמצעות אום. חברו בטור את הסליל למקור הזרם, ולאחריו בטור את האמפרמטר, את הנגד המשתנה ואת המפסק. סגרו את המעגל, ובאמצעות המחט המגנטית (המצפן) גלו את מקום הקטבים המגנטיים של הסליל נושא הזרם. רשמו לאיזה צד סטה מחוג האמפרמטר. בהמשך יהיה אפשר לאתר את סימני הקטבים בסליל נושא הזרם על-פי כיוון הסטייה של מחוג האמפרמטר.
2. נתקו את הנגד והמפסק מהמעגל, וסגרו שוב את המעגל על-ידי חיבור הדקי האמפרמטר ישירות אל הסליל (סדר החיבור נשאר זהה).

מהלך הניסוי

1. הצמידו את הליבה לאחד הקטבים של המגנט והכניסו אותה לתוך הסליל. צפו במחוג האמפרמטר.
2. חזרו על הניסוי כאשר אתם מוציאים את הליבה מהסליל, וגם כאשר הופכים את הקטבים של המגנט בהכנסת הליבה ובהוצאתה.
3. ציירו את סכימת הניסוי ובדקו את קיום **חוק לנץ** בכל המקרים.
4. מקמו את הסליל השני ליד הראשון כך שציריהם יהיו לאורך קו אחד.
5. הכניסו את ליבת הברזל בכל סליל וחברו את הסליל השני אל מקור הזרם.
6. סגרו ונתקו את המעגל באמצעות המפסק וצפו בסטיית מחוג האמפרמטר.
7. ציירו את סכימת הניסוי ובדקו את אמיתותו של **חוק לנץ**.

3. מדידת התאוצה של נפילה חופשית באמצעות מטוטלת

הציוד: שעון בעל מחוג שניות, סרט מדידה בעל דיוק של $\Delta_1 = 0.5 \text{ cm}$, כדור עם

תפסן, חוט באורך מטר אחד לפחות, כן עם טבעת ואום.

הכנת לביצוע העבודה

כדי למדוד את תאוצת הנפילה החופשית משתמשים במכשירי מדידה שונים המכונים **גרווימטרים**, ובפרט במכשירים מבוססי מטוטלת. באמצעותם ניתן למדוד את תאוצת הנפילה החופשית בשגיאה מוחלטת כ- $10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{sec}^2}$. במעבדה זו משתמשים במכשיר פשוט ביותר: כדור התלוי בקצה חוט. כאשר ממדי הכדור קטנים יחסית לאורך החוט, והסטיות ממצב שיווי-המשקל אינן גדולות, שווה זמן מחזור התנודות ל:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

כדי להגדיל את דיוק המדידה יש למדוד את משך הזמן t של מספר N גדול של תנודות מלאות של המטוטלת. אזי יהיה זמן המחזור:

$$T = \frac{t}{N}$$

ותאוצת הנפילה החופשית תהיה:

$$g = 4\pi^2 \frac{lN^2}{t^2}$$

מהלך הניסוי

1. הציבו את הכן בקצה השולחן. ליד קצהו העליון יש להתקין טבעת באמצעות אום ולקשור אליה את קצהו החופשי של החוט. הכדור שבקצהו האחר של החוט צריך להיות במרחק 1-2 ס"מ מהרצפה.
2. מדדו את אורך החוט באמצעות סרט מדידה.
3. יש להטות את הכדור 5-8 ס"מ מהמצב האנכי ולשחררו. הכדור יתחיל להתנודד.
4. מדדו פעמים מספר את משך הזמן t של 50 תנודות של המטוטלת וחשבו את הממוצע:

מדידת התאוצה של נפילה חופשית

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + \dots}{n}$$

כאשר: n – מספר הנסיונות של מדידת זמן המחזור.

5. חשבו את השגיאה המוחלטת הממוצעת של מדידת הזמן:

$$\Delta \bar{t} = \frac{|t_1 - \bar{t}| + |t_2 - \bar{t}| + |t_3 - \bar{t}| + \dots}{n}$$

רשמו את התוצאה בטבלה.

l, m	$\Delta \bar{t}$, sec	Δt , sec	\bar{t} , sec	t, sec	מס' המדידה

6. חשבו את תאוצת הנפילה החופשית לפי הנוסחה:

$$\bar{g} = 4\pi^2 \frac{ln^2}{\bar{t}^2}$$

7. חשבו את השגיאה היחסית של מדידת הזמן ε_t .

8. חשבו את השגיאה היחסית של מדידת אורך המוטלת $\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l}$. הגודל Δl

שווה לסכום השגיאות של סרט המדידה ושגיאת המדידה עצמה, השווה

למחצית ערך שנת החלוקה של הסרט: $\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2$.

9. חשבו את השגיאה היחסית של מדידת g על-פי הנוסחה:

$$\varepsilon_g = \varepsilon_l + 2\varepsilon_\pi + 2\varepsilon_t$$

ניתן להזניח את שגיאת העיגול של π ; אם יהיה $\pi = 3.14$, אפשר גם להזניח את

מדידת התאוצה של נפילה חופשית

ϵ_1 , אם היא קטנה פי 4 (ויותר) מ- $2\epsilon_t$.

10. מצאו את $\Delta g = \epsilon_g \bar{g}$ ורשמו את תוצאת המדידה בצורה:

$$\bar{g} - \Delta g \leq g \leq \bar{g} + \Delta g$$

הערה: את חישוב שגיאת הניסוי מומלץ לבצע באמצעות נגזרות חלקיות, כמפורט בסופו של הספר הראשון.

מדידת החאוצה של נפילה חופשית

4. מדידת מקדם השבירה של זכוכית

הציוד והמדידות הנדרשות

במעבדה זו יש למדוד את מקדם השבירה של לוח זכוכית שצורתו טרפז. את אחת הפאות המקבילות של הלוח מאירים באלומת אור צרה. במהלך מעברה דרך הלוח נשברת האלומה פעמיים. כמקור אור ניתן להשתמש בנורת חשמל, פנס כיס או באלומת אור לייזר. אם משתמשים במנורה, יכול רוחב האלומה להשתנות בהתאם למרחק בין המנורה לבין מסך אטום עם חריץ, שדרכו עובר האור ויוצר את האלומה.

מקדם השבירה של הזכוכית יחסית לאוויר מחושב לפי הנוסחה:

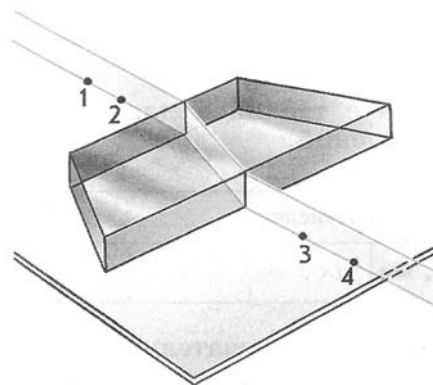
$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$$

כאשר α – זווית הפגיעה של האלומה בפאה; β – זווית השבירה בזכוכית.

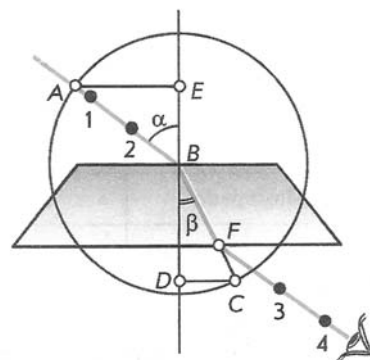
כדי לחשב את היחס באגף ימין פועלים כך: מניחים את הלוח על דף נייר מילימטרי, כך שאחת הפאות המקבילות תוצמד לקו המסמן את הגבול בין האוויר לבין הזכוכית. בעיפרון דק מסמנים את קו פאת הבסיס השנייה, ומאירים את הלוח באלומת אור צרה, הפוגעת בפאה בזווית כלשהי.

מסמנים שתיים-שלוש נקודות לאורך האלומה הפוגעת והעוברת (נקודות 1, 2,

3, 4 בציור 272).



ציור 272



ציור 273

מזיזים את הלוח ומשרטטים את מהלך שלוש הקרניים: הפוגעת, העוברת

מדידת מקדם השבירה של הזכוכית

והנשברת (ציור 273). דרך הנקודה B על קו הגבול בין שני סוגי התווכים אוויר-זכוכית מעבירים אנך לקו הגבול, ומסמנים את זווית הפגיעה α ואת זווית השבירה β . באמצעות מחוגה מעבירים מעגל, שמרכזו בנקודה B, ובונים משולשים ישרי-זווית ABE ו-CBD.

מכיוון ש- $\sin \alpha = \frac{AE}{AB}$, $\sin \beta = \frac{CD}{BC}$ ו- $AB = BC$, תקבל הנוסחה לחישוב מקדם השבירה של הזכוכית את הצורה:

$$(1) \quad n' = \frac{AE}{DC}$$

את אורך הקטעים AE ו-DC מודדים באמצעות נייר מילימטרי או סרגל. בשני המקרים שווה שגיאת המדידה ל-1 מ"מ. שגיאת האיפוס (מיקום קצה הסרגל יחסית לקצה האלומה) שווה גם היא ל-1 מ"מ.

את השגיאה היחסית המרבית ε של מדידת מקדם השבירה מחשבים על-פי

הנוסחה:

$$\varepsilon = \frac{\Delta AE}{AE} + \frac{\Delta DC}{DC}$$

השגיאה המוחלטת המרבית מחושבת על-פי הנוסחה:

$$\Delta n = n' \varepsilon$$

כאשר: n' – הערך המקורב של מקדם השבירה, המוגדר לפי נוסחה 1.

התוצאה הסופית של מדידת מקדם השבירה נרשמת כך:

$$n = n' \pm \Delta n$$

הכנות לביצוע העבודה

1. הכינו טופס עם טבלה לרישום תוצאות המדידות והחישובים.

חושב					מדוד	
Δn	$\varepsilon, \%$	$\Delta DC, \text{mm}$	$\Delta AE, \text{mm}$	n'	DC, mm	AE, mm

2. הדליקו את מקור האור.

מדידת מקדם השבירה של הזכוכית

מהלך הניסוי ועיבוד תוצאות המדידות

1. מדדו את מקדם השבירה של הזכוכית יחסית לאוויר עבור זווית פגיעה כלשהי. רשמו את התוצאה בהתחשב בשגיאות המחושבות.
2. חזרו על המדידה עבור זווית פגיעה אחרת.
3. השוו את התוצאות שהתקבלו על-פי הנוסחאות:

$$n_1' - \Delta n_1 < n_1 < n_1' + \Delta n_1$$

$$n_2' - \Delta n_2 < n_2 < n_2' + \Delta n_2$$

4. הסיקו לגבי תלות (או אי-תלות) מקדם השבירה בזווית הפגיעה.

שאלת ביקורת

על מנת לחשב את מקדם השבירה של הזכוכית מספיק למדוד באמצעות מד-זווית את הזוויות α ו- β , ולחשב את יחס הסינוסים. איזו מהשיטות מדויקת יותר: זו – או המתוארת במעבדה?

הערה: את חישוב שגיאת הניסוי מומלץ לבצע באמצעות נגזרות חלקיות, כמפורט בסופו של הספר הראשון.

5. מדידת העוצמה האופטית ואורך המוקד של עדשה מרכזת

הציוד : סרגל, שני משולשים ישרי-זווית, עדשה מרכזת ארוכת מוקד, מקור אור (נורה, פנס כיס), מכסה למקור האור, שבו חלון בצורה של אות, מקור זרם, מפסק, תילי חשמל, מסך, מסילה.

הכנות לביצוע העבודה

השיטה הפשוטה ביותר למדידת העוצמה האופטית ואורך המוקד של עדשה היא שימוש בנוסחת העדשה :

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F} \quad \text{או} \quad \frac{1}{d} + \frac{1}{f} = D$$

כעצם משתמשים באות מוארת, שמקורה במכסה של מקור האור. דמות ממשית של האות מתקבלת על המסך.

מהלך הניסוי

1. מרכיבים מעגל חשמלי של מקור האור.
2. מציבים את הנורה ליד קצה השולחן, ואת המסך – ליד הקצה האחר; ביניהם מעמידים את העדשה. מדליקים את הנורה ומזיזים את העדשה לאורך המסילה, עד אשר תתקבל על המסך דמות חדה של האות המוארת.
על מנת להקטין את שגיאת המדידה עקב הערכת החדות רצוי לקבל דמות מוקטנת (ולכן בהירה יותר).
3. מודדים את המרחקים d ו- f . יש לדייק בקריאת הנתונים.
חוזרים על הניסוי כמה פעמים, כאשר d נשאר קבוע, וכל פעם מקבלים דמות חדה. מחשבים את הערכים של \bar{f} , \bar{D} , \bar{F} . את התוצאות (במילימטרים) רושמים בטבלה.
4. את השגיאה המוחלטת ΔD של מדידת העוצמה האופטית של העדשה אפשר לחשב על-פי הנוסחה :

$$\Delta D = \frac{\Delta_1}{d^2} + \frac{\Delta_2}{d^2}$$

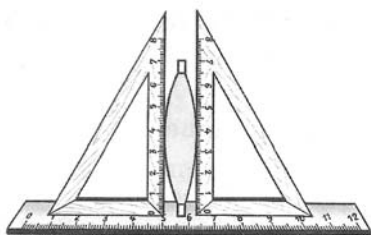
מדידת אורך המוקד של עדשה מרכזת

כאשר: Δ_1, Δ_2 – השגיאות המוחלטות של מדידת d ו-f, בהתאמה.

כאשר מחשבים את Δ_1 ו- Δ_2 יש להביא בחשבון, שמדידת המרחקים d ו-f לא יכולה להתבצע עם שגיאה הקטנה מעובי העדשה h.

מכיוון שהניסויים מתבצעים עבור מרחק d קבוע, $\Delta_1 = \frac{h}{2}$. שגיאת המדידה של f תהיה גדולה מזו ב- $\frac{h}{2}$ עקב אי-הדיוק בכוונון החדות. לכן: $\Delta_2 = \frac{h}{2} + \frac{h}{2} = h$.

מספר המדידה	$f, \times 10^{-3} \text{ m}$	$\bar{f}, \times 10^{-3} \text{ m}$	$d, \times 10^{-3} \text{ m}$	$\bar{D}, 1/\text{m}$	$\bar{F}, \text{ m}$
1					
2					
3					



ציור 274

5. מודדים את עובי העדשה h (ראו ציור

274), ומחשבים את ΔD על-פי הנוסחה:

$$\Delta D = \frac{h}{2d^2} + \frac{h}{f^2}$$

6. רושמים את התוצאה בצורה:

$$\bar{D} - \Delta D \leq D \leq \bar{D} + \Delta D$$

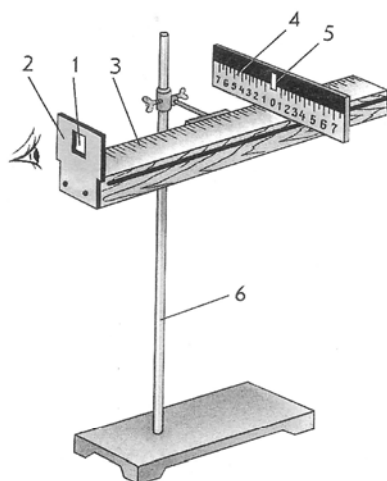
הערה: את חישוב שגיאת הניסוי מומלץ לבצע באמצעות נגזרות חלקיות, כמפורט בסופו של הספר הראשון.

מדידת אורך המוקד של עדשה מרכזת

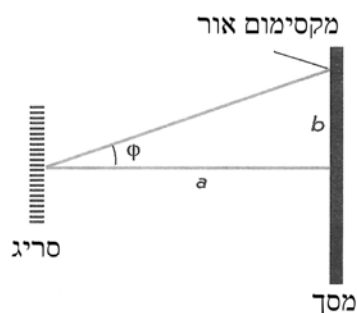
6. מדידת אורך הגל של האור

הציוד והמדידות הנדרשות

במעבדה של מדידת אורך הגל של האור משתמשים בסריג עקיפה בעל מחזור של $\frac{1}{100}$ mm או $\frac{1}{50}$ mm (ערך המחזור מסומן על הסריג).
הסריג הוא הרכיב העיקרי של מערך המדידה, המתואר בציור 275.



ציור 275



ציור 276

מציבים את הסריג (1) במסגרת (2) בקצה הסרגל (3). באותו סרגל מותקן המסך (4), ובמרכזו חריץ צר (5). את המסך אפשר להזיז לאורך הסרגל, וניתן למדוד את המרחק בינו לבין הסריג. על המסך ועל הסרגל נמצאת חלוקה מילימטרית. כל המערך מותקן על כן (6).

כאשר מסתכלים דרך הסריג והחריץ במקור אור (נורת חשמל או פנס כיס), ניתן לראות על פני הרקע השחור של המסך, משני צדי החריץ, את ספקטרום העקיפה מסדר 1, 2, 3 ועוד.

אורך הגל λ מוגדר על-פי הנוסחה:

$$\lambda = \frac{d \sin \varphi}{k}$$

כאשר: d – מחזור הסריג; k – סדר הספקטרום; φ – הזווית למרב האור בצבע המתאים.



מכיוון שהזוויות של כיווני המקסימום מסדר 1 ו-2 קטנות (לא עולות על 5°), ניתן במקום סינוסים להשתמש בטנגנסים. מצויר 276 רואים ש:

$$\tan \varphi = \frac{b}{a}$$

את המרחק a מהסריג למסך מודדים בסרגל, ואת המרחק b ממרכז המסך לקו הספקטרום הנבחר – על-פי החלוקה של אורך המסך.

הנוסחה הסופית לחישוב אורך הגל נראית כך:

$$\lambda = \frac{d b}{k a}$$

במעבדה זו אין מעריכים את שגיאת המדידה של אורך הגל עקב אי-ודאות בבחירת נקודות האמצע של הספקטרום של הצבע הנבחר.

הכנות לביצוע העבודה

1. מכינים טופס, הכולל טבלה לרישום תוצאות המדידה והחישובים.
2. מרכיבים את מערך הניסוי ומציבים מסך במרחק 50 ס"מ מהסריג.
3. מסתכלים דרך הסריג והחריץ במסך על מקור האור ומזיזים את הסריג בתוך המסגרת, כך שפסי הספקטרום יהיו במקביל לסקאלה של המסך.

מהלך הניסוי ועיבוד תוצאות המדידה

1. מחשבים את אורך הגל של האור האדום בפסי הספקטרום מסדר ראשון בשני צדי החריץ. מוצאים את הערך הממוצע של תוצאות המדידה.
2. חוזרים על פעולות אלה עבור אור סגול.
3. משווים את התוצאות עם אורכי גל של אור אדום ואור סגול, כפי שהם מופיעים בצויר הצבעוני (צויר מס' 3)

שאלת ביקורת

במה שונה ספקטרום העקיפה מספקטרום הנפיצה?



7. צפייה בספקטרום רציף ובספקטרום קווי

הציוד: מכשיר הקרנה, צינורות ספקטרליים הממולאים במימן, ניאון והליום, מקור מתח גבוה, מעגל התפרקות חשמלית, פן, מנסרות זכוכית.

מהלך הניסוי

1. מסתכלים דרך מנסרה בעלת זווית ראש של 45° אל החרוץ המואר של המקרן.
2. רושמים את הצבעים העיקריים של הספקטרום הנצפה.
3. חוזרים על הניסוי כאשר מסתכלים דרך מנסרה בעלת זווית ראש של 60° . רושמים את ההבדלים בין הספקטרומים.
4. מסתכלים אל הצינורות הספקטרליים הזוהרים דרך אחת המנסרות. רושמים את הקווים הבהירים ביותר.

תשובות לתרגילים

מקבץ תרגילים 1

3. $1.2 \cdot 10^{-2} \text{ J}$

מקבץ תרגילים 2

6. כעבור זמן-מה יתייצב זרם ישר בסליל האחר.

8. 0.2 A

9. 0.15 V

10. 1.2 J

מקבץ תרגילים 3

1. $\approx 15.8 \text{ N/m}$

2. $\approx 20 \text{ sec}$

3. $9 \text{ cm}; 25 \text{ cm}$

4. יגדל פי 2.4

5. הכדור השני.

6. 0.4 m

7. 0.6 rad/sec ; $3.2 \cdot 10^{-3} \text{ J}$

8. $T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}}$

9. 19.2 km/h

מקבץ תרגילים 4

1. $5 \cdot 10^{-3} \text{ J}$

2. $\approx 2.52 \cdot 10^{-6} \text{ sec}$

3. מ-16 עד 10 mH

4. $\approx 0.63 \text{ V}$

5. $\approx 0.63 \text{ V}$

6. $\approx 0.28 \text{ A}$

מקבץ תרגילים 5

1. בניצב לציר הסיבוב.
2. כא"מ מרבי כאשר מישור המסגרת מקביל לקווי השדה.
4. אפשר, למשל, ללפף מעל סליל אחד של השנאי סליל נוסף, שבו מספר ליפופים ידוע, ולמדוד מתח בין קצותיו, כאשר המתח בין קצות הסליל האחר ידוע.
5. השנאי עלול להישרף, מכיוון שהתנגדות הסליל לזרם ישר קטנה בהרבה מהתנגדות לזרם חילופין.
6. התנגדותו של סליל אחד קטנה מאוד. בסליל ייווצר זרם מושרה חזק. לכן תיפלט כמות חום גדולה, והיא תגרום להרס השנאי.
7. $1/10$; $22/7$; $35/6$; $300/11$.

מקבץ תרגילים 6

1. 660 m
2. 5000 m/sec
3. 1435 m/sec
4. 180°
5. יגדל בערך פי 4.2

מקבץ תרגילים 7

1. מ- $\lambda_1 = 92 \text{ m}$ עד $\lambda_2 = 565 \text{ m}$.
2. מכיוון שהאנטנה מכוונת אופקית, מכוון גם וקטור השדה החשמלי אופקית. לכן וקטור השדה המגנטי מכוון אנכית.
3. בירח אין יונוספירה.

מקבץ תרגילים 8

1. אלומת אור תהיה בלתי נראית.
2. התופעה נוצרה עקב התפשטות אור בקו ישר דרך החריר בתריס.
3. מידותיו של צל חלקי תלויים במרחק מגוף חוסם למסך. כאשר המרחק קטן (הרגל), הצל החלקי קטן; כאשר המרחק גדול (הראש), גם הצל החלקי גדול. אילו היה הפנס מקור נקודתי, היה הצל מהראש ומהרגל חד באותה מידה.



4. $k = 1, 2, 3, \dots$ כאשר: $(\text{סיבובים/שנייה}) \approx k \cdot 528 \text{ rev/sec}$

6. $x = 2l \sin \alpha = 10 \text{ cm}$

8. $H/2$. המרחק מהרצפה לקצה התחתון של המראה צריך להיות שווה לחצי

המרחק מהעיניים לרצפה. גובה הקצה העליון של המראה צריך להיות קטן

מגובה האדם במרחק השווה לחצי המרחק מהעיניים לקודקוד.

9. 0.55 ; 1.24

10. 1.4 cm

11. לצדו של קודקוד הזווית החדה של המנסרה.

12. לא תצא.

13. $n = 2$

מקבץ תרגילים 9

1. 12 cm

2. הדמות תהיה חדה באותה מידה, אולם פחות בהירה.

4. מקדם השבירה של מים שווה כמעט לזה של העין. לכן קרני אור הנכנסות

לעין כמעט לא נשברות, וכך לא נוצרת דמות חדה ברשתית.

7. 0.3 m

8. א) מפזרת; דמות מדומה; ב) מרכזת; דמות מדומה.

9. במרחק $F/2$.

מקבץ תרגילים 10

1. כתם בהיר.

3. $5.2 \cdot 10^{-7} \text{ m}$

מקבץ תרגילים 11

1. מנקודת מבט של הצופה, הנמצא על הקרקע, פגיעת הברק

בנקודה B (מאחורי הרכבת) התרחשה קודם.

2. מהירות האלקטרון קטנה ממהירות האור בערך ב- 10 cm/sec .

3. בערך ב- $2.3 \cdot 10^{-12} \text{ kg}$.

תשובות לתרגילים

מקבץ תרגילים 12

2. ≈ 1.5
3. $4 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
4. $2.5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$
5. $5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$
6. $\approx 3.8 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
7. $\approx 1.325 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot \text{m/sec}$

מקבץ תרגילים 13

1. $v \approx 2 \cdot 10^6 \text{ m/sec}$; $a \approx 10^{23} \text{ m/sec}^2$; $\approx 6.9 \cdot 10^{-14} \text{ m}$
3. $\approx 4.9 \cdot 10^{-7} \text{ m}$

מקבץ תרגילים 14

1. שמונה התפרקויות α ושש התפרקויות β .
2. כעבור 3200 שנה.
3. פי 1.41.
5. $\approx 2.2 \text{ MeV}$
7. $\approx 200 \text{ MeV}$

תשובות לתרגילים

נספח

המעבדה הווירטואלית



1. תכולת התקליטור

לספר זה מצורף תקליטור המכיל 6 לומדות: **וקטורי, מאג-מן, רוטארי, חזית-גל, סילואט וקרנית**. הלומדות מציגות הדמיות אינטראקטיביות של ניסויים ומעבדות הנלמדים בקורס פיזיקה בסיסי. כל לומדה בנויה כרצף הדמיות מודרכות, וכל הדמיה מציגה מעבדת חקר, שבה מגלה התלמיד פן מסוים של התופעה הנלמדת. בניסוי הבא מוצע לתלמיד לחקור פן אחר של הניסוי, וכך הלאה, עד שכל היבטי הניסוי נחקרים ונלמדים תוך כדי חקירה.

בסוף כל נושא מוצג לתלמיד "ניסוי חופשי", שבו אפשר לקבוע את כל הפרמטרים באופן בלתי תלוי, ולחקור את כל הקשרים של הניסוי ומאפייניו. הלומדות מכילות מבחן, המציג בעיות חישוב, וכן "מבחן מעבדה", שבו אמור התלמיד לקבוע את משתני הניסוי, שיובילו לתוצאה הנדרשת. כל השאלות במבחנים וב"מבחן מעבדה" כוללות נתונים אקראיים, וכך ניתן לחזור על השאלות פעמים רבות.

2. שילוב הלומדות במהלך הלימוד

הלומדות מתאימות הן להצגה בכיתה על-ידי המורה במהלך שיעור פרונטלי הן לשימוש התלמידים בביתם.

אופן השימוש בלומדות בכיתה מתואר ב"מדריך למורה", ואילו את ההמלצות לתלמיד אפשר לסכם כדלקמן:

א. כל לומדה מכילה כמה נושאים המופיעים ב**תפריט הראשי**, הנפתח לאחר הפעלתה. לאחר שבחרים את נושא הלימוד העיקרי, מתגלה **תפריט משני**, המפרט את הנושא לכמה תת-נושאים. בחרו בסעיף המתאים, והיכנסו לתהליך הלימוד והחקירה.

נספח: המעבדה הווירטואלית



ב. מומלץ לעבור על כל הפעולות המתוארות בחלון העליון של המסך: **שאלה, ניסוי חקר, מבחן מעבדה** או **שאלה חישובית** – גם אם נראה לכם שהיא פשוטה ויודעים אתם את התשובה או את התוצאה.

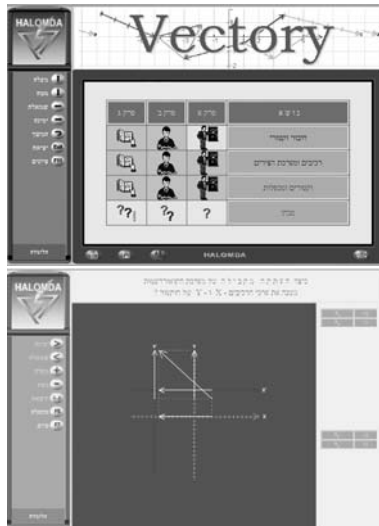
תמונה אחת שווה אלף מילים: במקרים רבים יעילה הדמיה אינטראקטיבית אחת לא פחות מהניסוי האמיתי, ובשילוב עם הסברים – אף יותר!

ג. מקשי ההפעלה של כל לומדה מרוכזים בחלון מיוחד בצד שמאל של המסך עם סימון בולט של הפעולה הקשורה בכל מקש. פעלו על-פי ההדרכה המופיעה בחלון ההדרכה או על-פי המקשים המסומנים כמומלצים – ותוכלו להתרכז בתוכן הלומדה, ולא באופן הפעלתה.

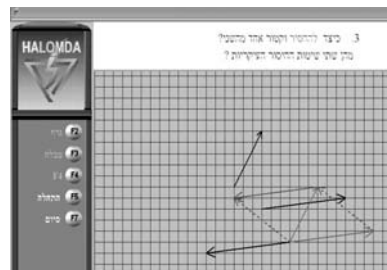
3. תוכני הלומדות

וקטורי

תורת הווקטורים: הגישה הגיאומטרית והאלגברית, חיבור, חיסור ומכפלה של וקטורים, היטלים וקואורדינטות.

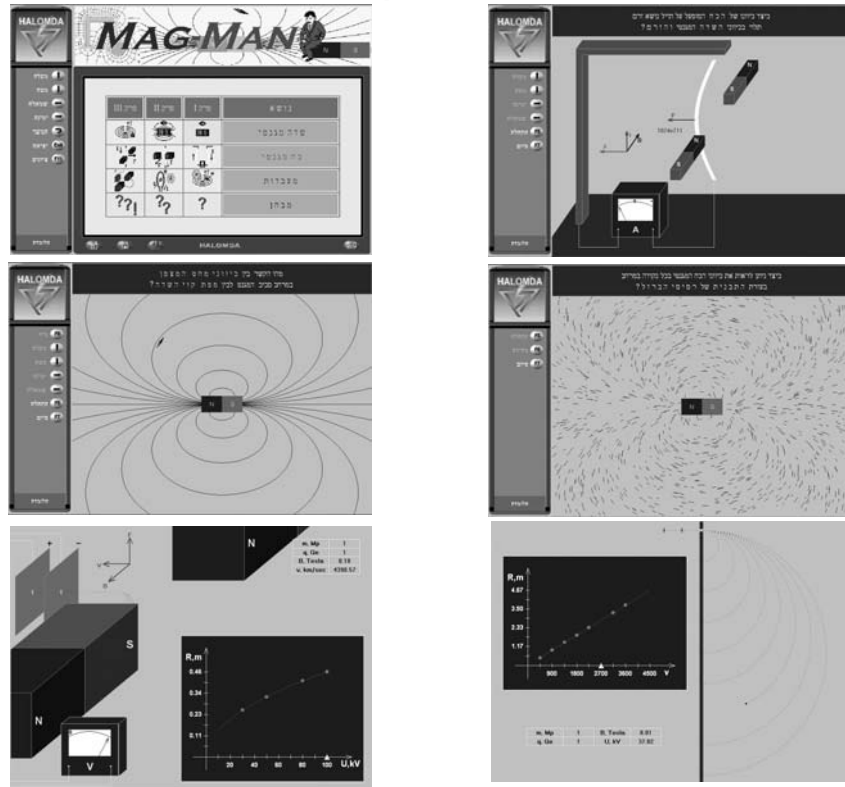


לימוד אינטראקטיבי ותרגול בנושא החשוב במיוחד במהלך לימודי אלקטרודינמיקה (2S , 3 , 5 , 6), תנודות (20S , 21) וגלים אלקטרומגנטיים (48S).



נספח: המעבדה הווירטואלית

מאג-מן



מגנטיות ואלקטרו-מגנטיות: מגנטים קבועים ומצפן, תבנית רסיסי ברזל, מפות קווי השדה, חוק אמפר, כוח לורנץ, גליונומטר טנגנטי, ספקטרוגרף מסות.

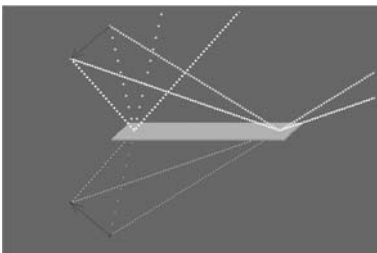
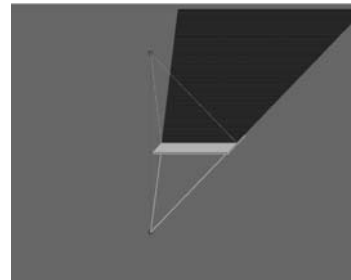
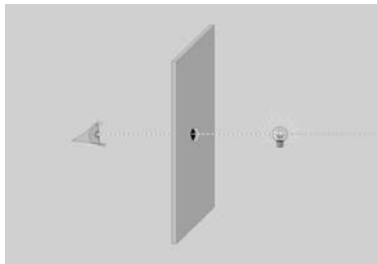
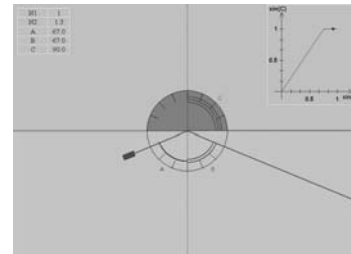
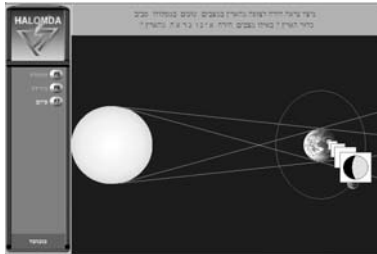
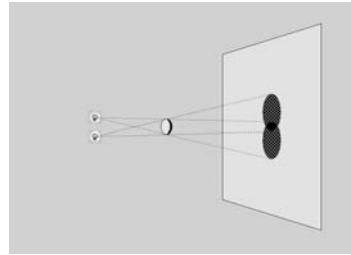
לימוד אינטראקטיבי ותרגול בנושאים הנלמדים בפרק 1 (1S עד 6).

בלומדה 4 פרקים: שדה מגנטי, כוח מגנטי, מעבדות ומבחן. בפרק הראשון חוקרים את מפות השדה המגנטי של מגנטים קבועים ושל תיל ישר נושא זרם; בפרק שני מגלים את ההשפעה ההדדית של זרמים מקבילים, חוקרים את התלות של כיוון הכוח המגנטי בכיוון הזרם ובעוצמתו (חוק אמפר); בפרק שלישי חוקרים את חוק ביו-סבר, מבצעים מעבדת חקר וירטואלית "גליונומטר טנגנטי" ולומדים באמצעות ניסויים וירטואליים על כוח לורנץ וספקטרוגרף המסות. הפרק הרביעי מציע 2 מבחנים מקיפים, בכל אחד 5 שאלות חישוב. בכל שאלה משתנה לפחות אחד מהנתונים באופן אקראי, וכך גדל למעשה מספר השאלות ונמנעות העתקות.

נספח: המעבדה הוירטואלית

סילואט

אופטיקה גיאומטרית א: אור וצל, ליקוי חמה, ליקוי לבנה, שבירת אור, החזרת אור, מראה מישורית



לומדה זו מקיפה נושאי אופטיקה רבים, הנלמדים בפרק 8 (60S, 61, 62) וכן את הנושאים הנלמדים בדרך כלל בחטי"ב כמבוא לאופטיקה (ליקויי מאורות, מראה מישורית ועוד).

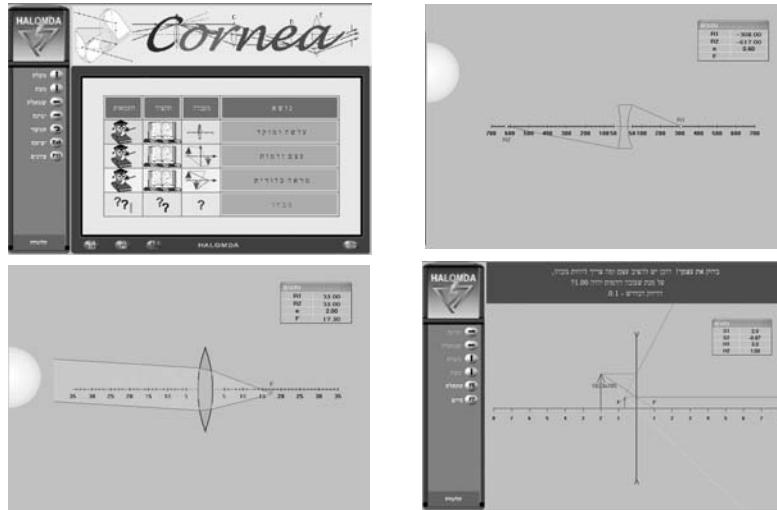
לאחר שלושת פרקי הלומדה ("אור וצל", "שבירת אור", "מראה ועין") בא פרק המבחן. הוא כולל 10 שאלות חישוב, המחולקות ל-2 סדרות, בכל אחת 5 שאלות.

כל שאלה מכילה פרמטר אקראי, וכך גדל למעשה מבחר השאלות.

נספח: המעבדה הווירטואלית

קרניח

אופטיקה גיאומטרית ב: סוגי עדשות, נוסחת מלטשי העדשות, יצירת דמות בעדשה, מראה כדורית

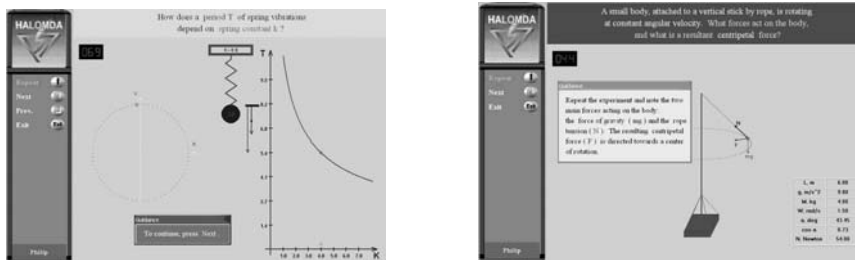


לומדה זו מקיפה נושאים, הנלמדים בפרק 8 (63§, 64 ו-65), וכן את הנושאים הנלמדים בקורס פיזיקה בחט"ב (מראה כדורית). לאחר שלושת פרקי הלומדה ("עדשה ומוקד", "עצם ודמות" ו"מראה כדורית") בא פרק המבחן. הוא כולל 10 שאלות חישוב, המחולקות ל-2 סדרות, בכל אחת 5 שאלות.

כל שאלה מכילה פרמטר אקראי, וכך גדל למעשה מבחר השאלות.

רוטרי

יסודות המכניקה ג: תנועה מעגלית, מטוטלת קווית, תנועה הרמונית, תנודות הרמוניות של קפיץ ומטוטלת מתמטית

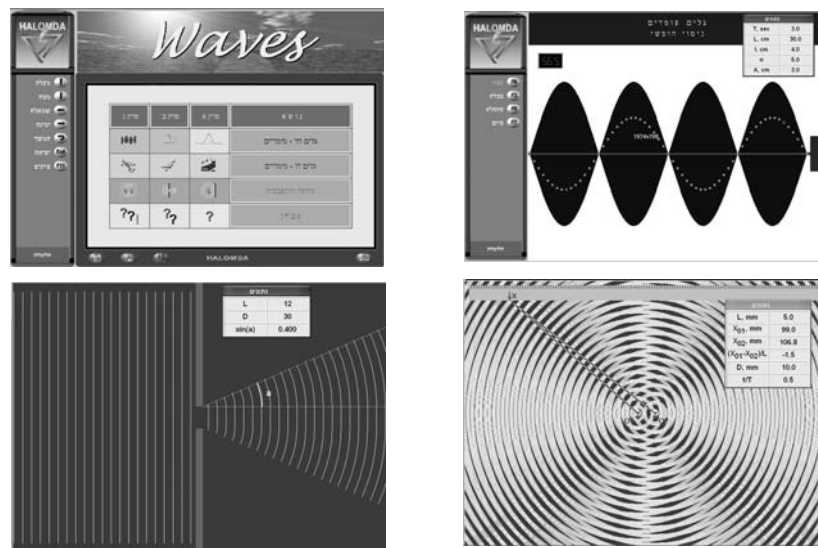


נספח: המעבדה הווירטואלית

הנושאים הנלמדים בפרקי ב' ו- ג' של לומדה זו ("תנועה הרמונית" ו"תנודות קפיץ ומטוטלת") מקיפים את נושאי הלימוד של פרק 3 (תנודות מכניות, 18§-23). הלומדה גם כוללת מבחן. הוא מחולק ל-2 סדרות, בכל אחת 5 שאלות.

חזית גל

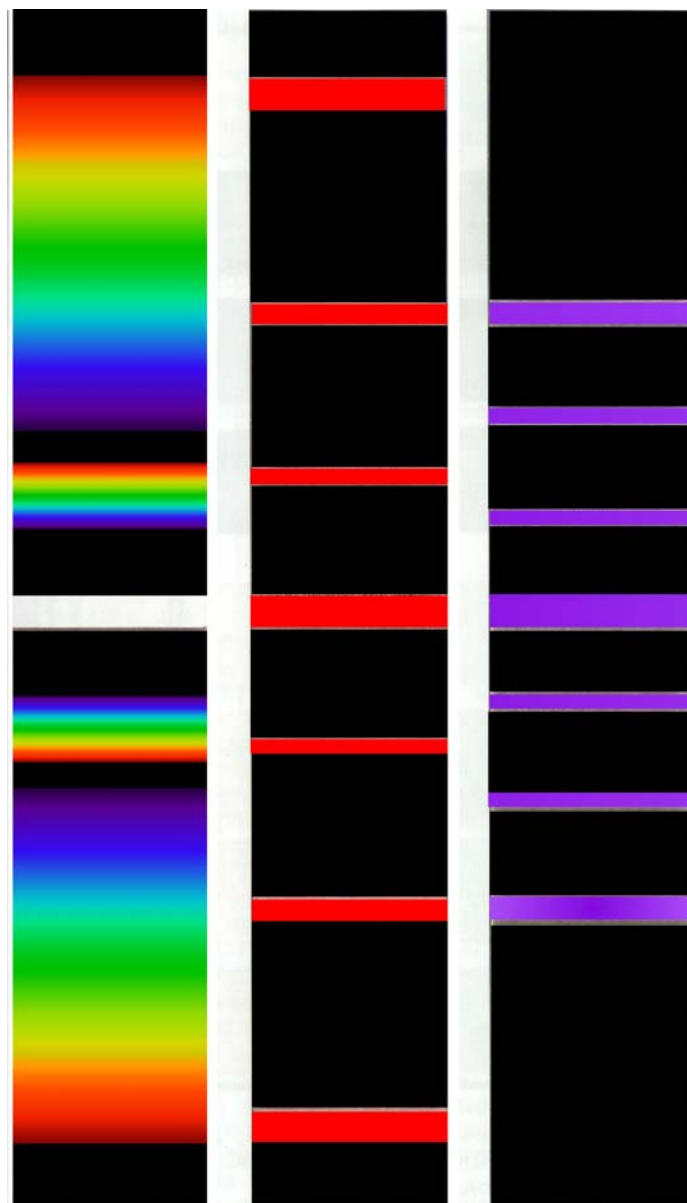
אופטיקה פיזיקלית וגלים: זעזוע יחיד, גלים רצים, גלים עומדים, אמבט גלים, עקיפה והתאבכות



לומדה זו מקיפה נושאים, הנלמדים בפרקים 6 (גלים מכניים, 42§ עד 45) ו-8 (גלי אור, 67§ עד 72). ההדמיות האינטרקטיביות המוגשות בלומדה זו מאפשרות לבצע מעבדות חקר רבות בנושא חשוב וקשה להמחשה באמצעים אחרים.

לאחר שלושת פרקי הלומדה ("גלים חד-ממדיים", "גלים דו-ממדיים" ו"עקיפה והתאבכות") בא פרק המבחן. הוא כולל 10 שאלות חשובות המחולקות ל-2 סדרות, בכל אחת 5 שאלות.

נספח: המעבדה הווירטואלית



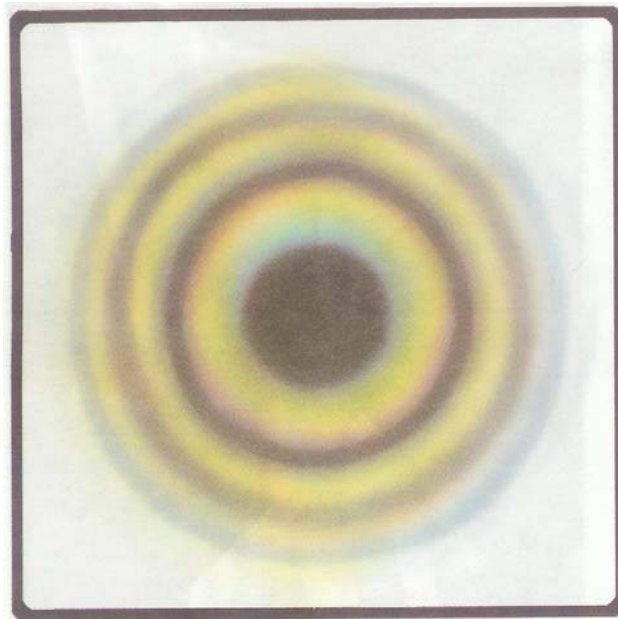
(1)

(2)

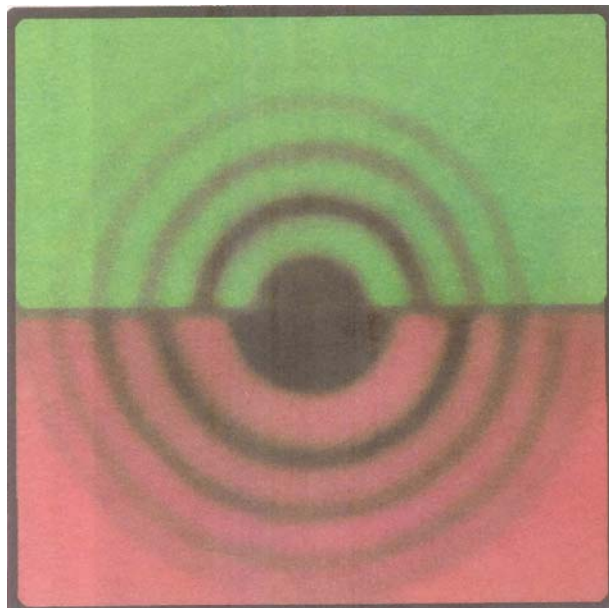
(3)

איור IV

דגמי ספקטרום שנוצרו באמצעות סריג עקיפה :
 1 – של אור לבן ; 2 – של אור אדום מונוכרומטי ; 3 – של אור סגול מונוכרומטי.



(1)

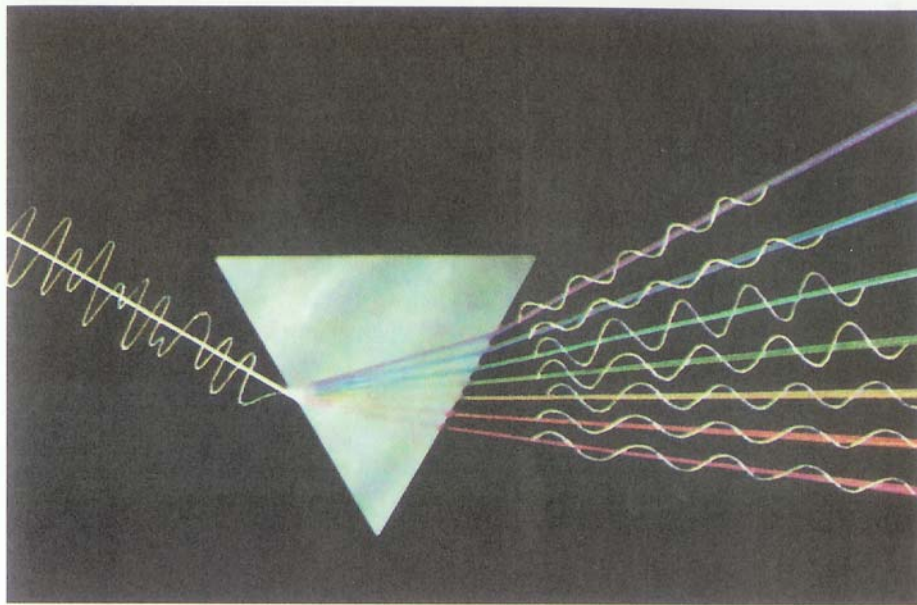


(2)

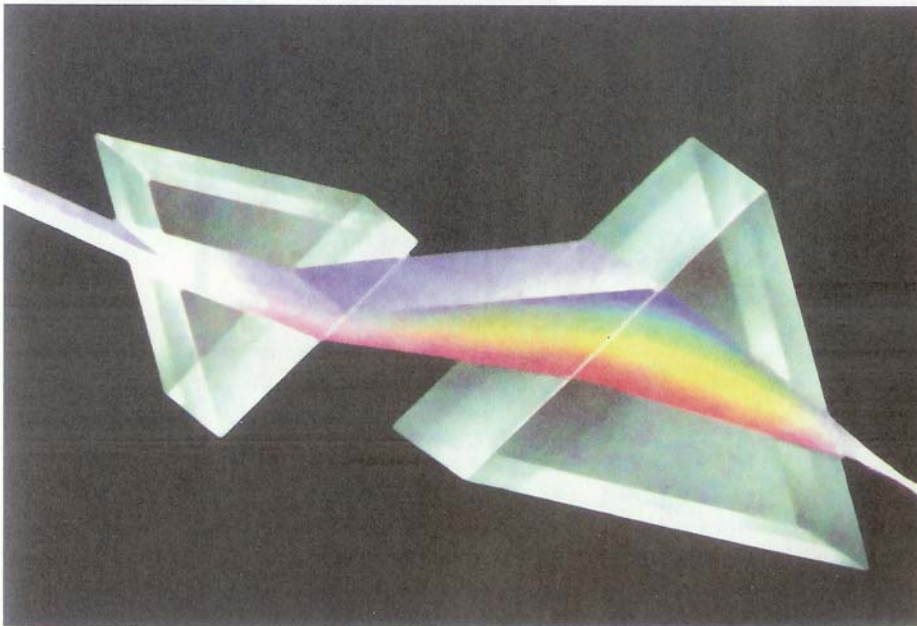
(3)

איור III

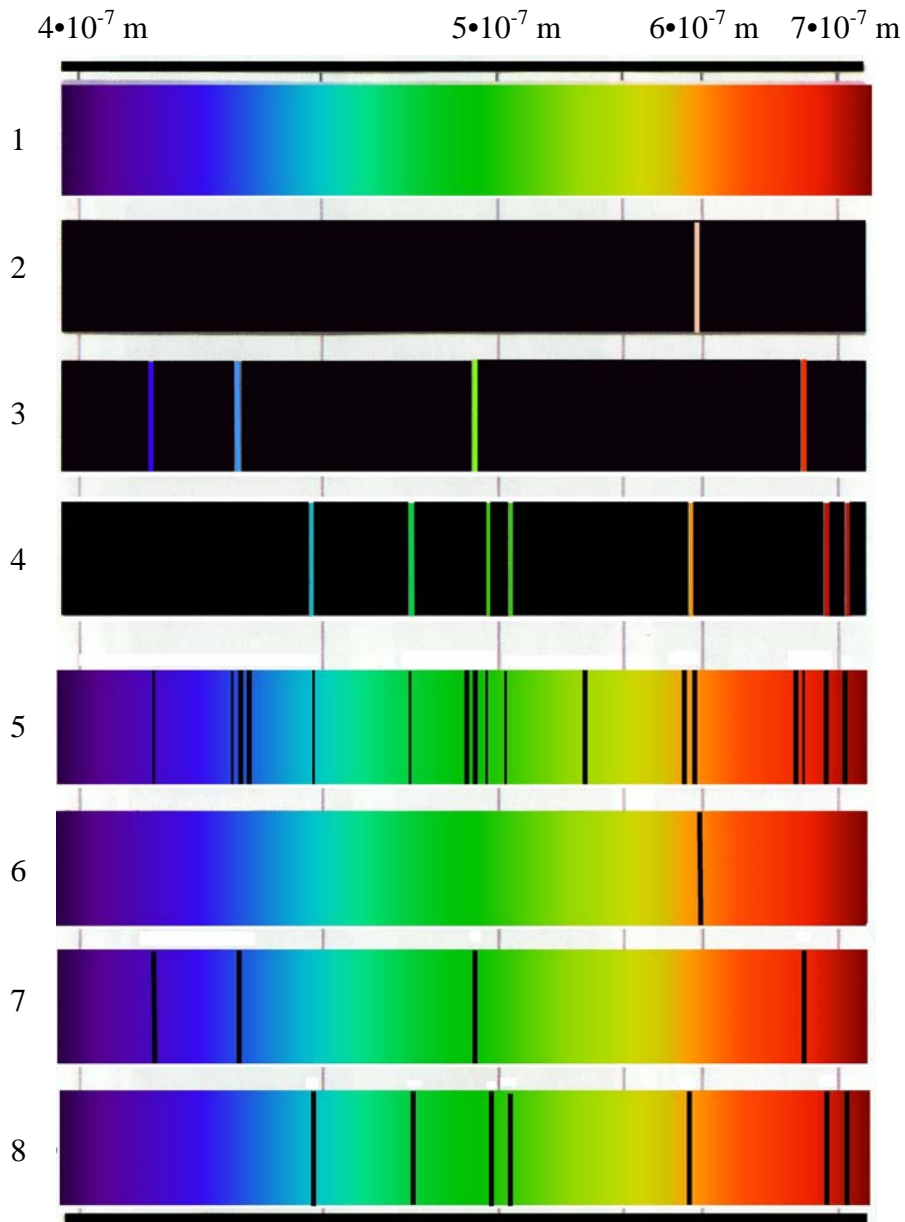
טבעות ניוטון שנוצרו באור מוחזר:
1 – באור לבן; 2 – באור ירוק; 3 – באור אדום.



איור I. נפיצת אור לבן באמצעות מנסרה. צבעים שונים מתאימים לאורכי גל שונים. אור לבן אינו מתאפיין באורך גל איזשהו.



איור II. נפיצת אור לבן באמצעות מנסרה והפיכתו מגוון הצבעים שמתקבל בחזרה לאור לבן באמצעות מנסרה נוספת.



איור V

ספקטרום של פליטה: 1 – ספקטרום רציף; 2 – ספקטרום של נתרן; 3 – ספקטרום של מימן; 4 – ספקטרום של הליום.
 ספקטרום של בליעה: 5 – של השמש; 6 – של נתרן; 7 – של מימן; 8 – של הליום.