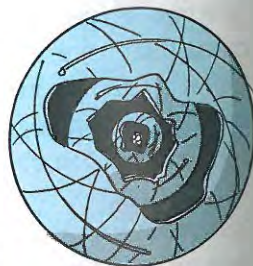


פליטת אור



אם מספקים לאנטנה מתכתית אנרגיה באופן שגורם לאלקטרונים החופשיים שבה להתנוודד - הלוך ושוב - אלפי תנודות בשנייה, היא תפלוט גלי רדיו. אילו ניתן היה לגרום לאלקטרונים החופשיים להתנוודד מיליוני-מיליארדים של תנודות בשנייה, הגל הנפלט היה גל של אור נראה. אך אור אינו נוצר מאנטנות מתכתיות, ואף באטומים הוא אינו נוצר פשוט בתנודות קלות של קליפות האלקטרונים, כפי שכבר ציינו בפרקים הקודמים. כבר למדנו להבחין בין אור המוחזר מעצמים, נשבר בהם, מפוזר באמצעותם או עוקף אותם, לבין אור הנפלט מהעצמים. בפרק זה נדון בפיסיקה של מקורות האור - של פליטת אור.

תהליך פליטת האור מאטומים כרוך במעברי אלקטרונים באטום מרמות אנרגיה גבוהות יותר לרמות נמוכות מהן. את תהליך הפליטה ניתן להבין בעזרת המודל המדמה את האטום לגוף שסביבו נעים כוכבי לכת, מודל שתיארנו בפרק 10. כשם שכל יסוד מתאפיין במספר האלקטרונים המאכלסים את הקליפות שעוטפות את גרעין האטום, כך גם יש לכל אטום תבנית אופיינית של קליפות אלקטרונים, או של רמות אנרגיה, המתקיימות ברדיוסים מסוימים ובאנרגיות מסוימות בלבד. רמות האנרגיה הבלתי-רציפות הללו הן בדידות. את המצבים הבדידים האלה מכנים מצבים קוונטיים, ואנו נשוב לדון בהם בפרוטרוט בשני הפרקים הבאים. בינתיים נעסוק בתפקיד שהם ממלאים בפליטת אור בלבד.



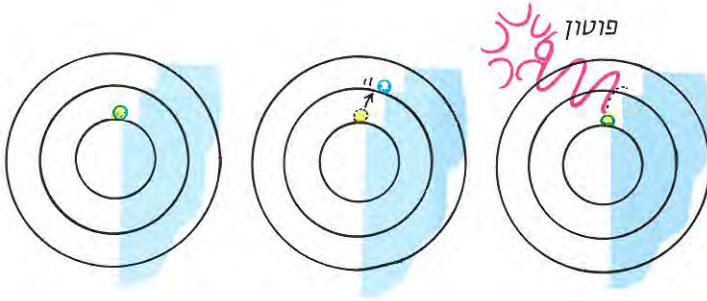
איור 29.1
האלקטרונים מסביב לגרעין
האטום מאכלסים קליפות
בדידות.

עירור

לאלקטרון שרחוק מהגרעין יש אנרגיה פוטנציאלית חשמלית גדולה יותר מלאלקטרון הקרוב לגרעין. לפיכך, אלקטרון מרוחק יותר נמצא במצב אנרגיה גבוה יותר, או ברמת אנרגיה גבוהה יותר. במובן מסוים הדבר דומה לאנרגיה של קפיץ הדלת כאשר היא פתוחה או לאנרגיה של פטיש מורם. ככל שהדלת פתוחה יותר, האנרגיה הפוטנציאלית של הקפיץ גדולה יותר; ככל שהפטיש מורם גבוה יותר, האנרגיה הפוטנציאלית הכובדית שלו גדולה יותר.

איור 29.2

את המסלולים השונים באטום אפשר לדמות למדרגות. כאשר אלקטרון מועלה לרמה גבוהה יותר, האטום מעוקר. כאשר הוא יורד למדרגה נמוכה יותר הוא משחרר אנרגיה בצורת אור.



כאשר מעלים את האלקטרון בדרך כלשהי לרמת אנרגיה גבוהה יותר, אומרים שהאטום מעוקר. האלקטרון נשאר ברמה הגבוהה יותר לפרק זמן קצר בלבד; בדומה לדלת הקפיצית, הוא שב במהרה למצבו היציב. כאשר שב האלקטרון לרמה הנמוכה יותר, האטום מאבד את האנרגיה שרכש לזמן מה, והיא משתחררת כאנרגיית קרינה. האטום עבר תהליך של **עירור** ודעיכה. כשם שכל אטום מתאפיין במספר אלקטרונים ייחודי לו, כך לכל יסוד יש מערך של רמות אנרגיה האופייני לו. כשאלקטרונים באטום מעורר יורדים מרמות גבוהות לרמות נמוכות יותר, הם פולטים בכל מעבר דופק או פרץ של קרינה אלקטרומגנטית הקרוי פוטון, שתדירותו קשורה לאנרגיית המעבר. אנו רואים בפוטון גופיף ממוקם של אנרגיה טהורה - "חלקיק" של אור - הנפלט מהאטום. תדירות הפוטון נמצאת ביחס ישר לאנרגיה שלו. בסימון מקוצר,

$$E \sim f$$

לדוגמה, פוטון באלומה של אור אדום נושא כמות אנרגיה המתאימה לתדירותו. לפוטון שתדירותו כפולה יש אנרגיה כפולה והוא יימצא בתחום העל-סגול של הספקטרום. כשמעוררים אטום, תדירויות רבות של אור נפלטות ממנו וכל תדירות מתאימה לרמות מעוררות שונות ולרמות שונות שהאטום דעך אליהן. שלל התדירויות האלה מעניק לאור הנפלט מכל יסוד מעורר את הצבע האופייני לו.

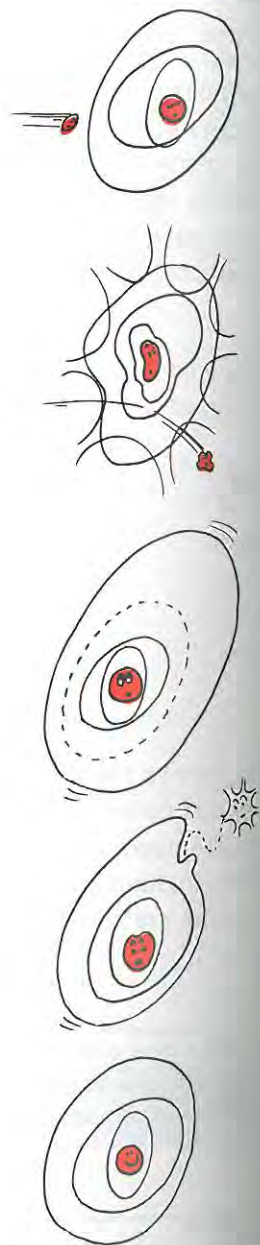
דוגמה מוכרת לעירור היא האור הנפלט משפופרות התאורה שבשלטי פרסום. הצבעים השונים בשלט מקורם בעירור של גזים שונים, אף שאת כולם מקובל לכוות בשם שלטי "ניאון". למעשה, רק האור האדום הוא אור ניאון. בקצותיה של שפופרת הזכוכית נמצאות אלקטרודות. חימום של האלקטרודות האלה גורם לשחרור אלקטרונים מהן, ומתח החילופין הגבוה

השורר בין האלקטרודות גורם לאלקטרונים לנוע ביניהן הלך ושוב במהירויות גבוהות. מיליוני אלקטרונים מהירים מתורוצים הלך וחזור בתוך שפופרת הזכוכית ומתנגשים במיליוני אטומי מטר; בכל התנגשות כזאת, אלקטרונים באטום עוברים למרות אנרגיה שהן גבוהות יותר בשיעור השווה לפחת באנרגיה הקינטית של האלקטרון הפוגע, וכאשר שבים האלקטרונים למסלול היציב, תוספת האנרגיה שרכשו מוקרנת כאור האדום האופייני לניאון. כל עוד נמשכים עירור אטומי הניאון ודעיכתם, התהליך שב ומתרחש. התוצאה הכוללת של תהליך זה היא הפיכת אנרגיה חשמלית לאנרגיית קרינה.

גם צבעיהן של להבות אש שונות הם תוצאה של עירור. אטומים שונים בלהבה פולטים אור בצבעים האופייניים למרווחים שבין רמות האנרגיה שלהם. אם נשים בלהבה מלח שולחן, למשל, ייווצר הצבע הצהוב האופייני לנתרן. כל יסוד המעורר בלהבה או באופן אחר יפלוט את הצבע האופייני לו; צבע זה הוא הרכבה של צבעים רבים, המהווים יחדיו את הספקטרום האופייני לאותו יסוד.

דוגמה אחרת לעירור כזה הם פנסי רחוב. רחובות הערים אינם מוארים עוד בנורות להט אלא באור הנפלט מגזים כמו אדי כספית. אור זה אינו רק בהיר יותר אלא גם זול יותר. שלא כבנורות להט, שבהן רוב האנרגיה הופכת לחום, בנורת אדי כספית רוב האנרגיה המושקעת הופכת לאור. האור מנוורת אלו עשיר בצבעים הכחולים והסגולים ולכן האור ה"לבן" שבו הן מאירות שונה מזה של נורות הלהט. אם תוכלו לשאול ממעבדת בית הספר מנסרה משולשת או סריג עקיפה, התבוננו דרכם באורו של פנס רחוב ותראו שהוא מורכב מצבעים הנפרדים זה מזה. הדבר מעיד על קיומן של רמות האנרגיה באטומי המנורה. שימו לב לצבעים השווים המתקבלים מנורות שונות של אדי כספית, הוכחה לעובדה שכל אטומי הכספית זהים.

את תהליכי העירור והדעיכה ניתן להסביר כהלכה רק באמצעות תורת הקוונטים. ניסיון להסביר את התהליך במונחי הפיסיקה הקלאסית יוביל לסתירות. מן ההיבט הקלאסי, מטען חשמלי מואץ פולט קרינה אלקטרומגנטית. מעניין לציין שבמעבר מרמת אנרגיה גבוהה לנמוכה האלקטרון מואץ, כי בדיוק כשם שמהירותם של כוכבי הלכת הפנימיים יותר במערכת השמש גבוהה יותר ממהירות כוכבי הלכת החיצוניים יותר, כך מהירויותיהם של האלקטרונים במסלולים הפנימיים יותר גבוהות יותר. מהירותו של אלקטרון היורד לרמה אנרגטית נמוכה יותר גדלה. האלקטרון המואץ בעת המעבר מקרין איפוא פוטון! אך כאן נעוצה בעיה - גם אלקטרון המצוי במסלול כלשהו מואץ כל העת (תאוצה צנטריפטלית), בין שרמת האנרגיה שלו משתנה ובין שאינה משתנה. לפי התורה הקלאסית הוא אמור להקרין אנרגיה ברציפות, אך לא כך הדבר. כל הניסיונות להסביר את פליטת האור מאטום מעורר במונחי התורה הקלאסית נכשלו. אין מודל פשוט שבעזרתו ניתן להבין תהליך זה. אנו נאמר בפשטות שאור נפלט בשעה שאלקטרונים באטום עוברים מרמת אנרגיה גבוהה לרמה נמוכה ממנה, ושהאנרגיה והתדירות של הפוטון הנפלט קשורות זו לזו בקשר $E \sim f$.



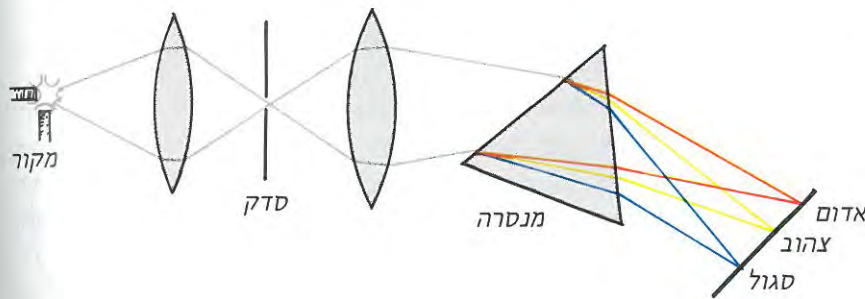
איור 29.3
עירור ודעיכה.

שאלה

חברכם סבור כי את אטומי גז הניאון במנורת ניאון יש להחליף מפעם לפעם באטומים חדשים, מפני שבעירורים החוזרים ונשנים האנרגיה של האטומים נוטה להתבזבז, ואור המנורה יתעמעם וילך. מה תענו על כך?

ספקטרום פליטה

לכל יסוד יש מערך של רמות אנרגיה האופייני לו, ולפיכך הוא פולט תבנית של תדירויות אור האופיינית לו - היא **ספקטרום הפליטה** שלו. ניתן לראות תבנית זו כשמעבירים את האור דרך מנסרה, ובאופן ברור יותר - כשמעבירים את האור תחילה דרך סדק צר ולאחר מכן ממקדים אותו דרך מנסרה על מסך שמאחוריה. התקן זה - המורכב מסדק, מעדשות ממקדות וממנסרה (או מסריג עקיפה) - נקרא **ספקטרוסקופ**, ובצורתו השונות הוא אחד המכשירים השימושיים ביותר במדע המודרני (איור 29.4).



איור 29.4

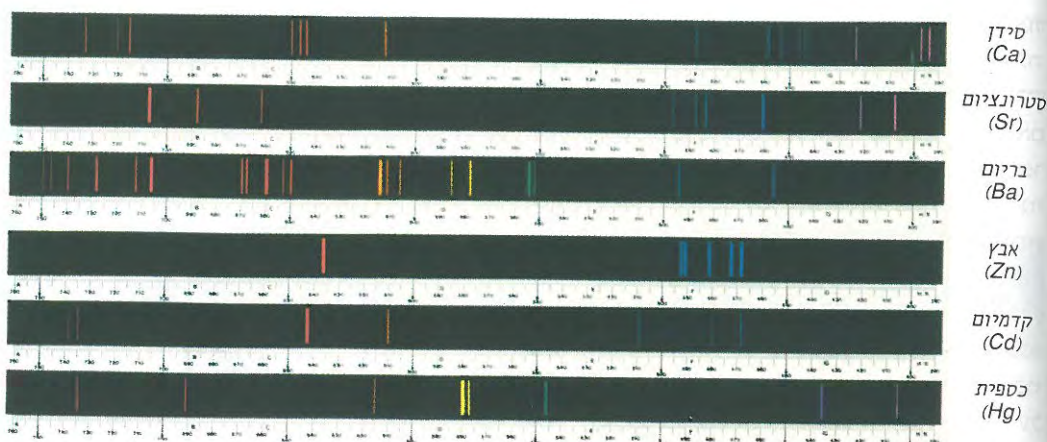
ספקטרוסקופ פשוט.

כל צבע ממוקד בהתאם לתדירותו במקום מוגדר ויוצר דמות של הסדק על המסך, על סרט צילום או בגלאי מתאים אחר. דמויות הסדק השונות בצבעיהן נקראות קווי ספקטרום. כמה תבניות של קווי הספקטרום האופייניים של יסודות אחדים מובאות באיור 29.5. מקובל לציין את הצבעים באמצעות אורכי הגל שלהם ולא באמצעות תדירויותיהם, אך כמובן, לכל אורך גל נתון מתאימה תדירות מוגדרת*.

תשובה:

אטומי הניאון אינם מוסרים אנרגיה רבה יותר מזו שהעניק להם הזרם החשמלי שבשפופרת, ולכן הם אינם "מתבזבזים". כל אטום יכול להתעורר ולדעוך ללא הרף. אם האור מתעמעם, סביר להניח שהשפופרת דולפת. אחרת, אין כל צורך להחליף בה את הגז, כי לא ניתן להבדיל בין אטום "טרי" לאטום "משומש". סביר ביותר ששניהם עתיקים יותר ממערכת השמש.

* היזכרו מפרק 18 כי $f\lambda = v$, באשר v היא מהירות הגל, f היא תדירות הגל ו- λ - אורך הגל. לגבי האור, v היא מהירות האור שסימונה הקבוע c , ומהקשר $c = f\lambda$ ניתן לקבל את הקשר בין תדירות לאורך גל, כלומר, $f = c/\lambda$ ו- $\lambda = c/f$.



איור 29.5

תבניות ספקטרום אופייניות.

אם מעבירים את האור הנפלט ממנורת אדי נתרן דרך הספקטרוסקופ, מתקבל קו צהוב יחיד - דמות יחידה של הסדק. אם מקטינים את רוחב הסדק מגלים שלמעשה הקו מורכב משני קווים סמוכים מאוד זה לזה. קווים אלו מתאימים לשתי התדירויות העיקריות של האור הנפלט מאטומי נתרן מעוררים. שאר הספקטרום נראה אפל. (למעשה קיימים בו קווים רבים נוספים, אך לרוב הם כה עמומים שלא ניתן להבחין בהם בעין בלתי מזוינת.)

תופעה דומה מתרחשת בכל האדים הלוחטים. באור מנורה של אדי כספית נראה זוג קווים צהובים בהירים הקרובים זה לזה (אך במקום שונה מזה של קווי הנתרן), קו ירוק רב עוצמה וכמה קווים כחולים וסגולים. משפופרת ניאון מתקבלת תבנית מסובכת יותר של קווים. אנו מגלים שהאור שפולט כל יסוד במצב הגזי יוצר תבנית קווים שאופיינית לאותו יסוד. קווים אלו מתאימים למעברים של האלקטרון בין רמות אנרגיה אטומיות ומאפיינים כל אטום כפי שטביעות אצבע מאפיינות בני אדם. הספקטרוסקופ הוא לכן מכשיר מרכזי ורב שימושים באנליזה כימית.

בפעם הבאה שתצפו בתוצאה של עירור אטומי, למשל כשתראו את הלהבה הירוקה הנוצרת כששמים פיסת נחושת באש, עיצמו את עיניכם ודמיינו לעצמכם את האלקטרונים הקופצים בין רמות האנרגיה בתבנית האופיינית לאטום המעורר - תבנית הפולטת אור בצבע ייחודי לאטום זה. אכן כך הדבר!

שאלה

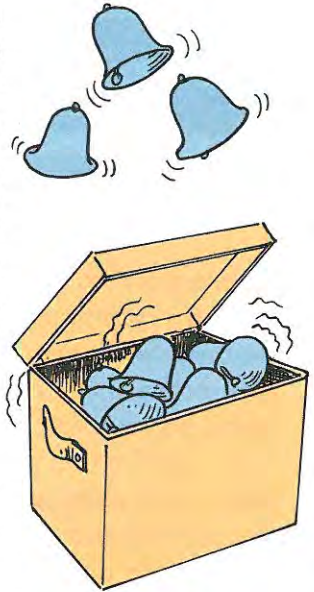
תבניות ספקטרום אינן כתמים חסרי צורה של אור; הן מורכבות מקווים ישרים נפרדים ועדינים. מה הסיבה לכך?

תשובה:

קווי הספקטרום אינם אלא דמויות של הסדק, שהוא עצמו פתח צר וישר שהאור עובר דרכו לפני הנפיצה במנסרה (או בסריג עקיפה). כאשר מצרים את הסדק לרוחב מזערי, ניתן להפריד בין קווים סמוכים (כלומר להבחין ביניהם). סדק רחב יותר מאפשר לאור רב יותר לעבור וכך ניתן להבחין בקלות רבה יותר בקרינה עמומה, אך זאת במחיר טשטוש ההפרדה בין קווים סמוכים.

להט

אור הנוצר כתוצאה מטמפרטורה גבוהה הוא בעל תכונת הלהט. רובו של האור מסוג זה שאנו מכירים הוא אור לבן - כזה הבוקע, למשל, מנורת להט רגילה. אור זה נראה שונה מאוד מהאור האדום-בהיר הנפלט משפופרת ניאון קרירה. כידוע, הרכבה של כל תדירויות האור הנראה, נראית כאור לבן; אם כך, האם פירוש הדבר שאטומי הטונגסטן של תיל הלהט בנויה מתאפיינים במספר אינסופי של רמות אנרגיה? התשובה שלילית; אם נאדה את התיל למצב גזי ונעורר את אטומי הטונגסטן, הגז יפלוט מספר סופי של תדירויות ויתקבל גוון כחלחל. האור הנפלט מהאטומים המרוחקים זה מזה במצב הגזי שונה מאוד מהאור הנפלט מאותם אטומים הסמוכים זה לזה במצב המוצק. ההבדל ביניהם דומה להבדל בין הצלילים המופקים מפעמון בודד מצלצל לאלה המופקים מתיבה מלאה בפעמונים מצלצלים (איור 29.6). האטומים בגז מרוחקים זה מזה. נוכחותם של אטומים סמוכים כמעט שאינה משפיעה על מעברי האלקטרונים בין רמות האנרגיה של האטום. אך כאשר האטומים צפופים, כמו במוצק, האלקטרונים ברמות החיצוניות אינם עוברים בין רמות האנרגיה של אטום "האב" שלהם בלבד, אלא גם בין הרמות של אטומים סמוכים. מעברי אנרגיה אלה אינם מוגדרים היטב אלא תלויים בפעולת הגומלין בין אטומים סמוכים, המאפשרת מספר אינסופי של מעברים - ולכן מספר אינסופי של תדירויות מעבר.



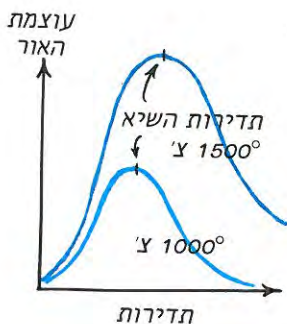
איור 29.6

צלילו של פעמון בודד נשמע צלול ותדירותו ברורה, ולעומתו הצליל הבוקע מקופסה מלאה בפעמונים אינו מתואם. ההבדל בין הצלילים דומה להבדלים בין אור הנפלט מאטומים במצב הגזי לבין אור הנפלט מאטומים במצב המוצק.

כפי שניתן לצפות, פעולת הגומלין בין האלקטרונים של אטומים סמוכים במוצק מתגברת עם עליית הטמפרטורה. ככל שגדלה האנרגיה הקינטית של המולקולות, כן גדל מספר העירורים ובעקבות זאת גדלה גם האנרגיה המוקרנת. באיור 29.7 מתוארת האנרגיה המוקרנת בתחום רחב של תדירויות עבור שתי טמפרטורות שונות (כזכור, בפרק 26 דנו בעקומת הקרינה של אור השמש). כאשר מוסיפים ומחממים את המוצק, מתרחשים מעברים בתחום רחב יותר של אנרגיות ונפלטת קרינה בתדירויות גבוהות יותר. התדירות השלטת באנרגיה המוקרנת - תדירות השיא - נמצאת ביחס ישר לטמפרטורה המוחלטת של הגוף הפולט:

$$\bar{f} \sim T$$

הקו מעל ל- $\bar{f}$ מציין את תדירות השיא, כדי להבדיל בינה לבין יתר התדירויות הרבות של האנרגיה המוקרנת מהמקור הלוהט. אם טמפרטורת הגוף הקורן (בקלווין) מוכפלת, תדירות השיא של האנרגיה המוקרנת מוכפלת גם היא.



איור 29.7

עקומות קרינה של מוצק לוהט.

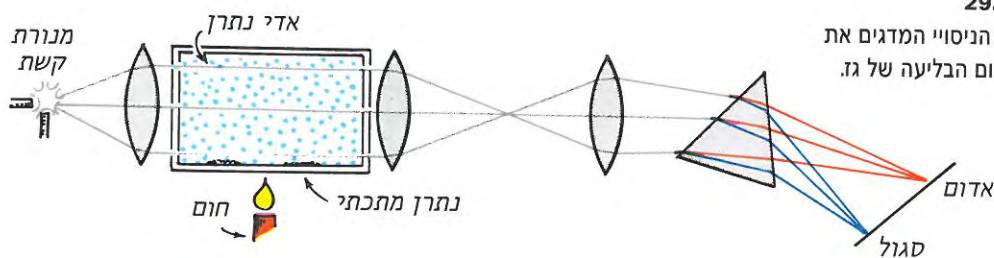
לגלים האלקטרומגנטיים של אור סגול תדירות גבוהה כמעט כפליים מתדירות הגלים של האור האדום. לפיכך, הטמפרטורה של כוכב שקרינתו סגולה גבוהה פי שניים בקירוב מהטמפרטורה של כוכב אדום*. ניתן לקבוע מהי הטמפרטורה של גופים לוהטים - ויהיו אלה כוכבים או תוכים של כבשנים - באמצעות מדידת תדירות השיא (או הצבע) של הקרינה הנפלטת מהם.

שאלה

התבוננו בעקומות הקרינה שבאיור 29.7 וקבעו איזה מקור פולט אנרגיית קרינה בתדירות ממוצעת גבוהה יותר - המקור בטמפרטורה של 1000° או זה שב- 1500° צלסיוס? איזה מהם פולט אנרגיית קרינה רבה יותר?

ספקטרום בליעה

כאשר מתבוננים מבעד לספקטרוסקופ באור הלבן הנפלט מנורת להט, מתגלה ספקטרום רציף בכל צבעי הקשת. אולם אם יימצא גז כלשהו בין מקור האור לספקטרוסקופ, נגלה בבדיקה מדוקדקת שהספקטרום אינו רציף לחלוטין. על רקע שלל צבעי הקשת נראים קווים אפלים, שהם למעשה קווי פליטה במהופך. אלה הם קווי בליעה. ספקטרום שבו מפוזרים קווים אפלים כאלה נקרא **ספקטרום בליעה**.



איור 29.8

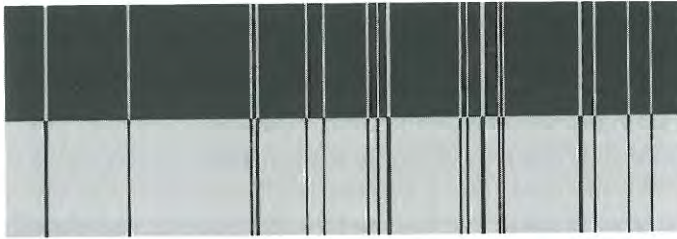
המערך הניסויי המדגים את ספקטרום הבליעה של גז.

כשם שאטומים פולטים אור, כך הם גם בולעים אור. אטום יבלע בעוצמה מרבית את האור בתדירויות שאליהן הוא "מכוון" - אותן תדירויות שהוא פולט. כאשר אלומת אור לבן עוברת דרך גז, אטומי הגז בולעים מהאלומה אותן תדירויות שנבחרות. האור שנבלע מוקרן מחדש, אך הוא מוקרן בכל הכיוונים ולא רק בכיוון האלומה הפוגעת. כאשר יוצרים את ספקטרום האור שנותר,

תשובה:

התדירות הממוצעת הנפלטת מהמקור שהטמפרטורה שלו 1500° גבוהה יותר, כפי שמעיד מקומו הימני יותר של שיא העקום. המקור בטמפרטורה של 1500° הוא המקור הבהיר יותר והוא פולט אנרגיה רבה יותר, כפי שניתן ללמוד מערכי הגרף האנכיים הגדולים יותר.

* אם תרחיבו את לימודיכם בנושא זה, תמצאו שקצב הפליטה של אנרגיית הקרינה מתכונתי לחזקה הרביעית של הטמפרטורה ביחידות קלווין. הכפלת הטמפרטורה מתאימה איפוא להכפלת התדירות של הקרינה, אך קצב פליטת האנרגיה גדל פי 16.



איור 29.9

ספקטרום פליטה וספקטרום בליעה.

תדירויות האור שנבלע מופיעות כקווים אפלים בתוך הספקטרום הרציף. מקום הקווים האפלים מתאים בדיוק למקומם של הקווים בספקטרום הפליטה של אותו גז (איור 29.9).

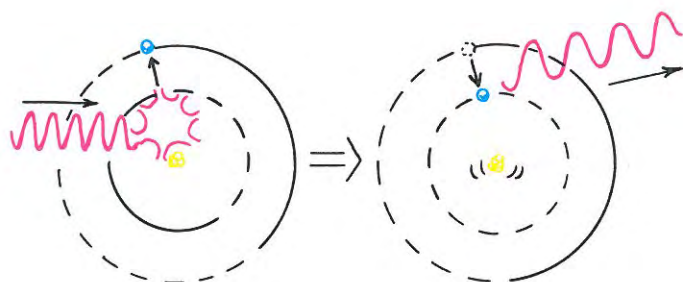
אף שהשמש היא מקור לוחט, בדיקה מדוקדקת של ספקטרום השמש מגלה כי הוא אינו רציף. קיימים בו קווי בליעה רבים, המכונים קווי פראונהופר על שם האופטיקאי הגרמני "פראונהופר", שהיה הראשון שגילה אותם ומיפה אותם במדויק. קווים דומים נראים גם בספקטרום של כוכבים אחרים. הם מעידים כי השמש והכוכבים מוקפים באטמוספירה של גזים קרירים יותר, אשר בולעת חלק מתדירויות האור שנפלט מהגוף המרכזי. ניתוח של קווים אלה מגלה את הרכבן הכימי של אטמוספירות הכוכבים הללו. הניתוחים מגלים כי היסודות הכימיים שבכוכבים הם אותם יסודות המצויים בכדור הארץ. מעניין לציין כי במדידות ספקטרוסקופיות של השמש נתגלו קווים שונים מאלו שנתגלו עד אז במעבדה. קווים אלה הביאו לזיהויו של יסוד שלא היה מוכר עד אז. היסוד כונה הליום - מן המילה היוונית הליוס, שמובנה שמש. ההליום התגלה בשמש עוד בטרם התגלה בכדור הארץ. מפתיע, האין זאת?

ניתן לקבוע את מהירותם של כוכבים על פי הספקטרום הנפלט מהם. בדיוק כפי שנוצר היסט דופלר בצלילו של מקור קול נע (פרק 18), כך נוצר היסט דופלר בתדירות האור הנפלט ממקור אור נע. התדירות (לא המהירות!) של אור הנפלט ממקור המתקרב אלינו גדלה, ואילו תדירותו של מקור המתרחק מאיתנו קטנה. קווי הספקטרום של מקור המתרחק מאיתנו מוסטים לעבר הקצה האדום של הספקטרום. מכיוון שהיקום מתפשט, ניתן להבחין בהיסט לאדום בספקטרום האור המגיע אלינו מן הגלקסיות שבמרחבי החלל. בפרק 31 נראה כיצד ניתן לקבוע, על סמך ספקטרום היסודות, את המבנה האטומי.

"טלטול" תרמי או הפגזת אטומים בחלקיקים מהירים, אלקטרונים למשל, אינם השיטות היחידות שבהן ניתן להעניק אנרגיית עירור לאטום. ניתן לעורר אטום גם אם גורמים לו לבלוע פוטון. מהקשר $E \sim f$ אנו למדים שאור שתדירותו גבוהה, כמו אור על-סגול, הנמצא בספקטרום מעבר לאור הנראה, מוסר אנרגיה רבה יותר בבליעתו של כל פוטון מאור שתדירותו נמוכה. חומרים רבים מעוררים כשהם מוארים באור על-סגול.

פלווארסנציה

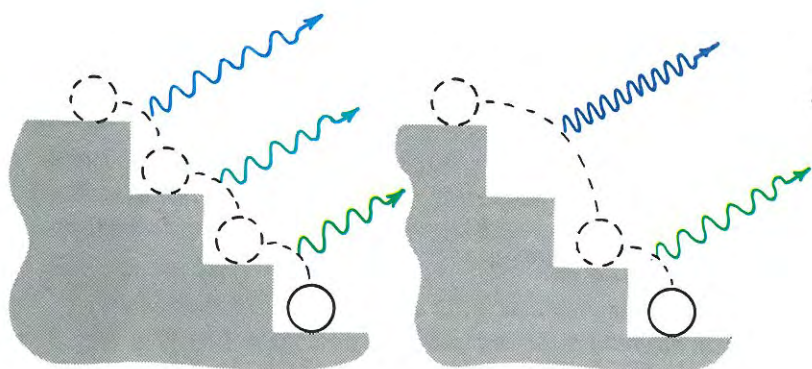
חומרים שעוררו באור על-סגול פולטים בדעיכתם אור נראה. התופעה המתרחשת בחומרים אלה נקראת **פלוואורסנציה**. כשפוטון של אור על-סגול פוגע באטום של חומר כזה האנרגיה שלו נחלקת לשני חלקים. חלק אחד יוצר חום ומגדיל את האנרגיה הקינטית של האטום כולו. החלק האחר מעורר אלקטרון ומעלה אותו לרמת אנרגיה גבוהה יותר. בדעיכה משתחרר חלק שני זה של האנרגיה כפוטון אור. הואיל ופוטון זה נושא רק חלק מהאנרגיה של הפוטון העל-סגול, הרי שתדירותו נמוכה יותר והוא נמצא בתחום הנראה של הספקטרום (איור 29.10).



איור 29.10

בתהליך הפלוואורסנציה חלק מהאנרגיה של הפוטון העל-סגול שנבלע מופנה לעירור האטום והשאר הופך לחום. לכן, הפוטון הנפלט בתהליך הוא בעל אנרגיה פחותה, ותדירותו נמוכה מתדירות הפוטון העל-סגול.

אלקטרון שעוֹרָר לרמה גבוהה יותר על ידי פוטון על-סגול עשוי לשוב לרמתו היציבה במספר שלבים. מכיוון שאנרגיית הפוטון המשתחרר בכל שלב קטנה מהאנרגיה הכוללת של הפוטון העל-סגול המקורי, הרי שתדירותם של הפוטונים הנפלטים נמוכה יותר (איור 29.11). לפיכך, אור על-סגול המוקרן על חומר גורם לו לזהור בסיכומו של דבר בצבע אדום, בצהוב או בצבע אחר האופייני לחומר. לכולנו מוכרים חפצים צבעוניים ובדים שמוסיפים להם חומרי צבע פלוואורסנטיים הזוהרים כשפוגעים בהם פוטונים על-סגולים מקרינת השמש או מתאורה על-סגולה.



איור 29.11

אטום מעורר יכול לדעוך בצירופים שונים של קפיצות.

שאלה

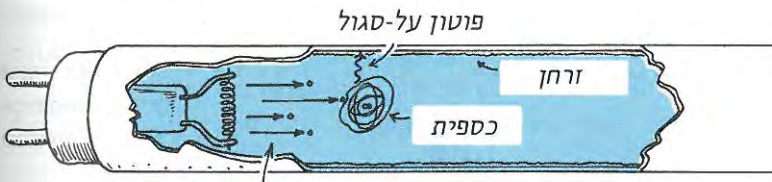
מדוע לא ייתכן שחומר פלואורסנטי שיזאר באור תת-אדום יפלוט אור על-סגול?

באבקות כביסה המתיימרות לכבס את בגדיכם כך שיהיו "לבנים יותר מלבן" מנצלים את תכונת הפלואורסנציה. אבקות כביסה אלו מכילות צבען פלואורסנטי ההופך את האור העל-סגול שבקרינת השמש לאור כחול נראה, ולכן נראה שהבגדים שנצבעו בהם מחזירים יותר אור כחול מהרגיל. כך נראים הבגדים לבנים יותר*.

אם יזדמן לכם לבקר במוזיאון למדע, גשו לאגף הגיאולוגיה וחפשו את המחצבים המוארים באור על-סגול. תבחינו כי מינרלים שונים קורנים בצבעים שונים. אין תמה בכך, שכן מינרלים שונים מכילים יסודות שונים שלהם מערכים שונים של רמות אנרגיה לאלקטרונים. הידיעה על המתרחש בעולם התת-מיקרוסקופי של האטום הופכת את חוויית הצפייה במינרלים הקורנים למופלאה עוד יותר. פוטונים בתחום העל-סגול, בעלי אנרגיה גבוהה, פוגעים בפני המינרלים וגורמים לעירור האטומים במבנה המחצב; האנרגיה המוקרנת מתאימה בדיוק להפרשים הזעירים בין רמות האנרגיה, וכל אטום מעורר פולט את התדירות האופיינית לו, כך שאין שני מינרלים שונים הפולטים בדיוק אותו צבע. היופי נחזה הן בעיניו של המתבונן והן במוחו.

נורות פלואורסנטיות

הנורה הפלואורסנטית הרגילה מורכבת משפופרת זכוכית גלילית שבקצותיה אלקטרודות (איור 29.12). בנורה, כמו בשפופרת שלטי הניאון, האלקטרונים נפלטים מהאלקטרודות המחוממות ומתח החילופין מאלצם לנוע הלך ושוב בתוך השפופרת במהירויות גבוהות. השפופרת ממולאת באדי כספית בלחץ נמוך ביותר, שהאלקטרונים המהירים, המתנגשים בהם, מעוררים אותם. מכיוון שרמות האנרגיה של הכספית מרווחות יחסית, תדירות האור הנפלט גבוהה למדי ונמצאת בעיקר בתחום העל-סגול. זהו מגנון העירור הראשוני.



אלקטרונים הנפלטים מתיל הלהט

איור 29.12

מנורה פלואורסנטית. אור על-סגול נפלט מהגז שבשפופרת, המעורר באמצעות זרם החילופין החשמלי. האור העל-סגול מעורר את הזרחן שעל המשטח הפנימי של שפופרת הזכוכית, והוא פולט אור לבן.

תשובה:

במקרה זה אנרגיית הפוטון הנפלט תעלה על אנרגיית הפוטון הנבלע, בסתירה לחוק שימור האנרגיה.

* מעניין לציין שבארצות מסוימות מותאמות אותן אבקות כביסה להעניק לבדים צבע ורדרד יותר, היוצר תחושה חמימה יותר.

העירור המשני מתרחש כאשר האור פוגע בחומר זרחני בצורת אבקה המכסה את הדופן הפנימית של השפופרת. החומר הזרחני מעורר עקב בליעת הפוטונים העל-סגולים ודועך תוך כדי פליטת קרינה במגוון תדירויות נמוכות יותר, היוצרות יחדיו אור לבן. ניתן להשתמש בסוגים שונים של חומרים זרחניים ליצירת צבעי אור שונים.

גבישים מעוררים מסוימים וכן חלק מהמולקולות האורגניות הגדולות נותרים ברמה המעוררת זמן ממושך למדי - האלקטרונים שהועלו למסלולים גבוהים יותר "דבקים" בהם. כתוצאה מכך קיים הפרש זמן בין תהליך העירור לתהליך הדעיכה. חומרים בעלי תכונה מיוחדת זו נקראים חומרים **פוספורסנטיים**. היסוד זרחן ("פוספור" בלועזית), המשמש במחוגי שעונים מאירים ובעצמים אחרים המיועדים לזהור בחשיכה, הוא דוגמה טובה לחומר כזה. שלא כבחומרים פלואורסנטיים, הדועכים מיד, כשמעוררים אטומים ומולקולות של חומרים אלה באמצעות אור נראה, רוב האטומים אמנם דועכים במהירות גבוהה למדי, אך אטומים רבים נותרים במצב המעורר - לעיתים במשך שעות. אם מסלקים את מקור העירור - למשל, מכבים את האורות - רואים מעין דמדומי זוהר שעה שמיליוני אטומים דועכים לאיטם באורח ספונטני.

מסך טלוויזיה הוא מעט פוספורסנטי: זוהרו דועך מהר למדי, אך הדעיכה איטית דיה כך שסריקות עוקבות של התמונה מתערבבות זו בזו. הזוהר הפוספורסנטי הבוקע ממפסקי אור מסוימים בבתים עשוי להימשך שעה ויותר. כך הדבר גם במחוגי שעונים מאירים, המעוררים על ידי אור נראה. המחוגים והספרות בשעונים ישנים אף יותר זוהרים בחשיכה ללא הפסק, לא בשל משך הזמן הארוך שבין העירור לדעיכה, אלא מפני שהם מכילים רדיום או חומר רדיואקטיבי אחר המספק בהתמדה אנרגיה השומרת על המשך תהליך העירור. שעונים כאלה אינם מקובלים עוד בגלל הנזק העלול להיגרם למשתמש בהם, במיוחד אם השעון הוא שעון יד או שעון כיס.

בגופם של יצורים חיים רבים - ובהם חיידקים, גחליליות ואף בעלי חיים גדולים יותר כמדוזות - מצויות מולקולות המעוררות באופן כימי ופולטות את אנרגיית העירור כאור. תכונה זאת נקראת נהורנות ביולוגית (ביולומינסנציה). יש דגים שבתנאים מסוימים זוהרים כשהם נעים אך אינם זוהרים כשאינם נעים. כשלהקות של דגים כאלה שרויות בלא נוע הן אינן נראות, אך כאשר הדגים נבהלים ונעים לפתע הם יוצרים במעמקים שובל של אור, הנראה כעין זיקוקי דינור תת-ימיים. מנגנון הנהורנות הביולוגית טרם הובן כהלכה ונחקר עתה.

תופעות העירור, הפלואורסנציה והפוספורסנציה עומדות ביסוד פעולתו של אחד המכשירים המופלאים ביותר שהומצאו בתקופתנו - **הלייזר** (השם מורכב מראשי התיבות של המילים באנגלית שמובן "הגברת אור בפליטה מאולצת של קרינה", LASER - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). אף שאיינשטיין חזה את תהליך הפליטה המאולצת עוד ב-1917, יישומו חדש יחסית. כדי להבין את אופן פעולת הלייזר, עלינו לדון תחילה במושג האור הקוהרנטי.

פוספורסנציה

לייזרים

אור הנפלט מנורה רגילה אינו קוהרנטי; כלומר, פוטונים נפלטים בתדירויות רבות ובמופעים רבים (איור 29.13). האור אינו קוהרנטי - או מתואם - בדומה לצעדים של המון הפוסע בערבוביה על רצפת אולם. אור לא קוהרנטי אינו מסודר. אלומת אור לא קוהרנטי מתרחבת במרחק קצר ממקום הפליטה שלה, וככל שהמרחק גדל היא מתרחבת עוד ועוד ועוצמתה נחלשת.



איור 29.13

אור לבן לא-קוהרנטי מורכב מגלים בעלי תדירויות רבות (ואורכי גל רבים) המצויים במופעים שונים זה מזה.

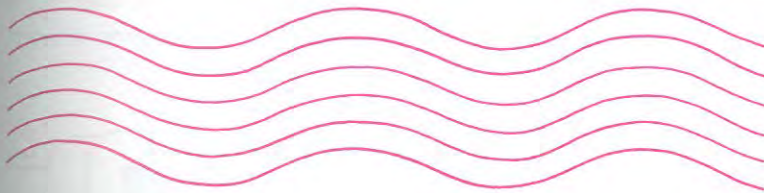
גם אם נעביר את האלומה דרך מסנן תדירויות המעביר תדירות אחת בלבד (אלומה מונוכרומטית), היא עדיין לא תהיה קוהרנטית, מפני שהגלים לא יהיו במופע שווה (איור 29.14). ההבדלים בכיווני הגלים, ולו הזעירים ביותר, יגרמו להתרחבות האלומה ככל שיגדל המרחק.



איור 29.14

אור בעל תדירות יחידה ואורך גל אחד אך במופעים שונים.

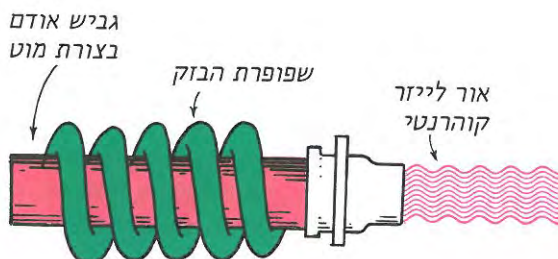
אלומה של פוטונים בעלי תדירות שווה, מופע שווה וכיוון מדויק אחד, כלומר אלומה של פוטונים שלכולם תנועה זהה - נקראת אלומה קוהרנטית (איור 29.15). רק אלומה של אור קוהרנטי אינה מתפזרת או מתרחבת בשיעורים ניכרים.



איור 29.15

אור קוהרנטי. כל הגלים זהים ובעלי מופע שווה.

לייזר הוא מכשיר ליצירת אור קוהרנטי. אחד הדגמים של הלייזר, למעשה הראשון שבהם, מורכב מגביש גלילי של אודם (רובי) שאורכו סנטימטרים אחדים, אשר "אולח" בסיגים - באטומי כרום. מוט האודם מוקף בשכופרת הפולטת לתוכו הבזקי אור ירוק בעוצמה רבה (איור 29.16). עירור אטומי הכרום שבגביש מתרחש עם מעבר האלקטרונים החיצוניים לרמות אנרגיה גבוהות יותר. האלקטרונים דועכים לרמת ביניים ומשם, בקצב איטי יותר, לרמתם הנמוכה. בשלב אחרון זה הם פולטים פוטון אדום; גביש האודם מאיר בתהליך של פלואורסנציה.



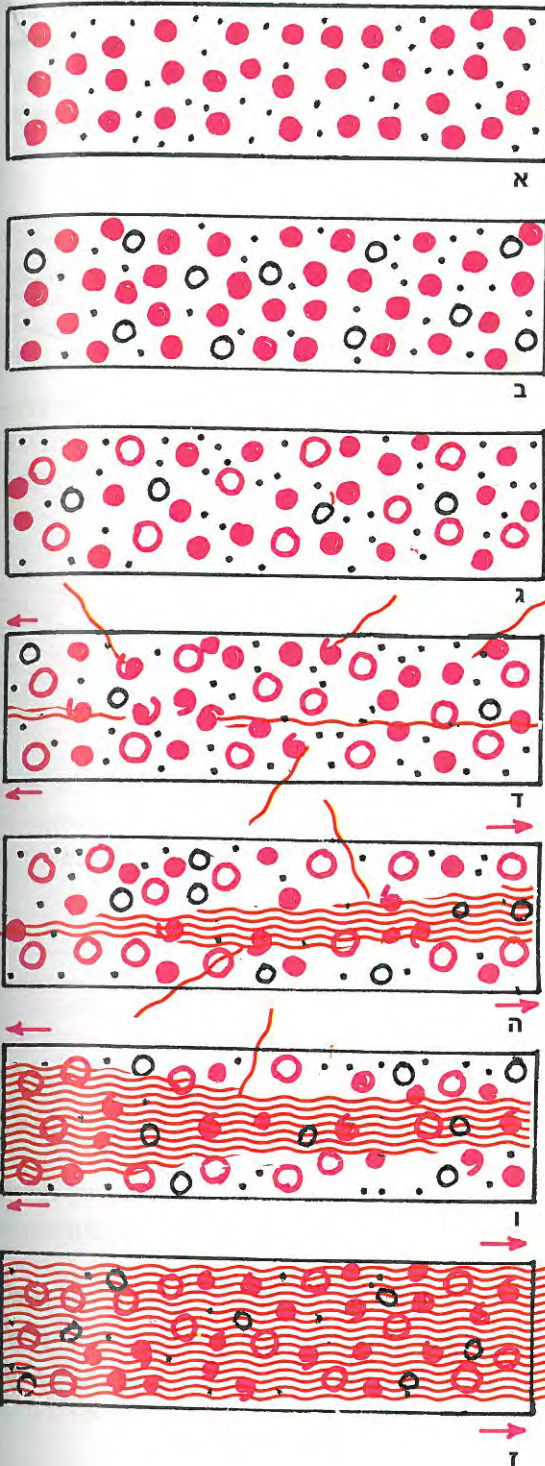
פוטוני האור האדום הנעים בגביש גורמים לדעיכה מאולצת של אטומים מעוררים סמוכים. הפוטונים הנפלטים בתהליך זה זהים לפוטונים הפוגעים בתדירותם, במופע שלהם ובכיוון תנועתם. פוטונים אלה עשויים לאלץ פליטה מאטומים מעוררים נוספים, וכך תיווצר אלומה של אור קוהרנטי. בתחילה נפלט אור זה ברובו מצידי הגביש בכיוונים אקראיים. ואולם, האור הנע לאורך ציר הגביש מוחזר משתי מראות שצופו בציפוי הגורם להחזרה של אורך הגל הרצוי בלבד. אחת המראות היא מראה מחזירה לחלוטין ואילו השנייה היא מראה מחזירה למחצה. הגלים המוחזרים לאחר המסע הלך ושוב בין המראות מחזקים זה את זה ויוצרים מצב של תהודה שבו עוצמת האור גדלה והולכת במידה רבה. האור הנפלט בדפקים (פולסים) דרך המראה המחזירה למחצה יוצר את אלומת הלייזר.

זמן קצר לאחר שפותח לייזר האודם פיתחו הפיסיקאים לייזר גזי שאלומתו רציפה. בלייזר הראשון מסוג זה השתמשו בתערובת של הגזים הליום וניאון. כאשר מפעילים מתח חילופין בין האלקטרודות שבקצות השפופרת המכילה את תערובת הגזים, ההתפרקות החשמלית דרך גז ההליום מעוררת את אטומי הניאון לרמה מעוררת שמשך השעות בה ארוך במידה המאפשרת את התרחשות תהליך הלזירה (איור 29.17). מלבד הלייזרים של מצב מוצק והלייזרים הגזיים נוספו למשפחת הלייזרים סוגים חדשים: לייזרים של זכוכית, לייזרים כימיים ונוזליים ולייזרים של מוליכים למחצה. דגמים עכשוויים יוצרים אלומות מתחום התת-אדום ועד לתחום העל-סגול. יש דגמים של לייזרים שניתן לכווננם לתחומי תדירות שונים. מלהיבים במיוחד הם המאמצים לבנות לייזר של קרינת X.

הלייזר אינו מקור אנרגיה. זהו פשוט מתמר אנרגיה המנצל את תהליך הפליטה המאולצת לריכוז חלק מהאנרגיה המסופקת לו (בדרך כלל כאחוז אחד) לאנרגיה של קרינה שהיא בעלת תדירות יחידה ונעה בכיוון אחד. ככל מכונה אחרת, גם לייזר אינו יכול להפיק יותר אנרגיה מזו שמספקים לו. מגוון השימושים בלייזר עצום. בשימושיה הפשוטים ביותר, אלומת הלייזר היא סרט מידה שאינו נמתח וסרגל שאינו מתכווץ; היא מבטיחה דיוק למכונאי, מהירות לבנאי וחיסכון בעבודה לאיש המדידות. לייזרים משמשים במבצעים הנדסיים מורכבים כמו הנחת צינורות תת-ימיים וחפירת מנהרות. אלומות לייזר שהוחזרו מפני הירח שימשו למדידה מדויקת של המרחק בינו לבין כדור הארץ ולאיסוף מידע על נדידת היבשות.

איור 29.17

פעולת ליזר הליום-ניאון. (א) הלייזר מורכב משפופרת צרה העשויה זכוכית פיירקס ומכילה תערובת גזים שבה 85% הליום (הנקודות השחורות הקטנות) ו-15% ניאון (העיגולים האדומים הגדולים). (ב) כאשר חולף בשפופרת זרם במתח גבוה, הוא מעורר את ההליום ואת הניאון כאחד לרמות גבוהות שהדעיכה מהן היא מיידית, פרט לרמה אחת של הליום, המאופיינת במשך דעיכה ארוך. רמה זו נקראת רמה יציבה-למחצה. מכיוון שרמה זו יציבה יחסית, אטומי הליום רבים יחסית מצויים בה (אומרים שהיא מאוכלסת במידה ניכרת, העיגולים השחורים החלולים). אטומי ההליום הללו נעים בשפופרת אנה ואנה ופועלים כמקור אנרגיה לאטומי הניאון, שלהם רמת אנרגיה יציבה-למחצה הקרובה לאנרגיית הרמה היציבה-למחצה של ההליום, אך קשה יחסית להגיע אליה. (ג) כאשר אטומי הליום מעוררים מתנגשים באטומי ניאון הנמצאים ברמת היסוד, ההליום מוסר לניאון אנרגיה ומעלה אותו לרמתו היציבה-למחצה (עיגולים אדומים חלולים). התהליך נמשך ועד מהרה נוצר מצב שבו מספר האטומים ברמה היציבה-למחצה עולה על מספר האטומים הנמצאים ברמת היסוד. האטומים, המצויים כעת במצב של "היפוך אוכלוסייה", ממתנים להקרנת האנרגיה שלהם. (ד) בסופו של דבר דועכים כמה אטומי ניאון וקורנים פוטונים אדומים. כאשר האנרגיה המוקרנת עוברת ליד אטומי ניאון מעוררים היא מאלצת אותם לפלוט פוטונים במופע שווה לזה של הקרינה המאלצת. הפוטונים הנפלטים מהשפופרת בכיוונים כלשהם מעניקים לה את זוהר הניאון המוכר. (ה) פוטונים המקבילים לדפנות השפופרת מוחזרים ממראות מקבילות הנמצאות בקצות הגביש הגלילי ומצופות בציפוי מיוחד. הפוטונים המוחזרים מאלצים פליטה באטומי ניאון נוספים, ובכך נוצר "אשד" של פוטונים שלכולם אותה תדירות ואותו מופע, וכולם שווי כיוון. (ו) הפוטונים נעים הלוך ושוב בין המראות ובכל מעבר הולך מספרם וגדל. (ז) חלק מהפוטונים "דולפים" החוצה דרך אחת המראות, שהיא מראה מחזירה למחצה. הם יוצרים את אלומת הלייזר.



עוצמתם של לייזרים מסוימים כה רבה (והם כה מרוכזים) שמנתחי עיניים משתמשים בהם כדי ל"הלחים" למקומן רשתיות עין שלקו בהיפרדות הרשתית בלא להזדקק לאיזמל המנתחים. פשוט ממקדים את האור באזור שבו יש לבצע את ההלחמה.

אורך גלי הרדיו הוא מאות מטרים ואורכם של גלי הטלוויזיה סנטימטרים רבים; לעומתם, אורכי הגל של הלייזרים נמדדים במיליוניות המילימטר. לפיכך ניתן להעביר בגלים קצרים אלו מספר עצום של מסרים בפס צר של תדירויות. ניתן לקיים תקשורת באמצעות אלומות לייזר העוברות בחלל, באטמוספירה או בסיבים אופטיים (צינורות אור) שניתן לכופפם כתילים.

לייזרים משמשים גם במערכות מחשבים. רובה לייזר יוצר חורים מיקרוסקופיים על קלטת או על תקליטון של מחשב, וכל אחד מהם מייצג סיבית מידע אחת. לייזר שני "קורא" מידע זה לאחר מכן. בדרך זו ניתן לאגור מיליארדי סיביות של מידע על סליל אחד של סרט מחשב או מאות מיליוני סיביות על תקליטון אחד. על סרט כזה ניתן לאחסן מדריך טלפון של אוכלוסיית העולם כולה.

הלייזר משמש גם בקופות המרכולים, במכשירים המפענחים את קוד הפסים המוטבע על המוצרים, כדוגמת זה שבאיור 29.20. עם סריקת הקוד



איור 29.18
לייזר הליום-ניאון.



איור 29.19

הלייזר "נוֹבָה", המצוי במעבדות הלאומיות לורנס ליוורמור שבארה"ב, משמש לחקר ההיתוך הגרעיני בשיטת הכליאה ההתמדית. נובה, בעל עשר האלומות, הוא הלייזר הגדול ביותר ובעל העוצמה הרבה ביותר בעולם; הוא מסוגל לייצר עד מאה מיליוני מיליונים ואטים של הספק בפרץ אור הנמשך מיליארדית השנייה.



מוחזר אור הלייזר מהפסים ומהמרווחים ומומר לאות חשמלי. האות עולה לערך גבוה כשהאור מוחזר מהמרווח הבהיר ויורד לערך נמוך כשהאור מוחזר מהפס הכהה. הערכים הגבוהים והנמוכים מתורגמים, בהתאמה, לסדרה של תווי 0 ו-1, והמידע המקודד בינרית מוכן לעיבוד במחשב.

לייזרים משמשים לגילוי מזהמים בגזי הפליטה של מכוניות ולמידת כמותם. גזים שונים בולעים אור בתדירויות אופייניות ומשאירים את "טביעות אצבעותיהם" על האלומה המוחזרת של אור הלייזר. בעזרת מחשב מנתחים את אורכי הגל ואת כמות האור שנבלעה, והוא פולט מיד את רשימת המזהמים. אלומת לייזר משמשת מחט אופטית "שאינה שוחקת" לתקליטי וידאו ולתקליטורים, סכין חיתוך מדויקת ומהירה לחיתוך בדים בתעשיית האופנה, ושיטה משוכללת ביותר לגילוי טביעות אצבעות וליצירת הולוגרמות. והרשימה מתארכת והולכת.

שימוש אחד של הלייזר הצופן בחובו סיכויים גדולים הוא ריכוז כמויות עצומות של אנרגיה על כדוריות מימן והבאתן לטמפרטורות תרמו-גרעיניות. אולי יבוא יום שבו יאפשר הלייזר ליצור תהליך מבוקר של היתוך תרמו-גרעיני ולפתור בכך את בעיות האנרגיה של האנושות. ב-1958, מיד לאחר המצאת הלייזר, ראו בו רבים "פתרון המחפש בעיה". ואכן, לא צריך היה לחפש הרחק או להמתין זמן רב. הלייזר בישר את הופעתה של טכנולוגיה חדשה לגמרי - הבטחה שרק התחלנו לנצל. שימושי הלייזר העתידיים נראים בלתי מוגבלים.

איור 29.20

קוד פסים "יחודי המאפשר זיהוי של כל מוצר (כאן - קוד המהדורה האנגלית המקורית של הספר) נקרא בקופה הרושמת באמצעות קרן לייזר.

פלאורסנציה

התכונה של בליעת קרינה בתדירות אחת ופליטת קרינה בתדירות נמוכה ממנה. חלק מהאנרגיה הנבלעת הופך לחום וחלק אחר גורם לעירור, ולכן האנרגיה הנפלטת פחותה מהאנרגיה הנבלעת ותדירותה נמוכה מתדירות הקרינה הנבלעת.

פוספורסנציה

סוג של פליטת אור הדומה לפלאורסנציה, אלא שבין שלב העירור לשלב הדעיכה חל עיכוב, ולכן הזוהר אינו נראה מיד. העיכוב נגרם משום שאטומים מעוררים לרמות אנרגיה שהדעיכה מהן איננה מהירה. משך ההארה תלוי בסוג החומר, בטמפרטורה ובגורמים אחרים, ועשוי להימשך משברירי שנייה ועד שעות ואף ימים.

לייזר מכשיר אופטי המייצר אלומת אור חד-צבעית וקוהרנטית.

תקציר מונחים

עירור התהליך שבו מועלה אלקטרון אחד או יותר באטום או במולקולה מרמת אנרגיה נמוכה לרמת אנרגיה גבוהה יותר. בדרך כלל, אטום ברמה מעוררת ידעך במהירות תוך כדי פליטת קרינה לרמה נמוכה יותר. אנרגיית הקרינה נמצאת ביחס ישר לתדירות $E \sim f$.

ספקטרום פליטה התפלגות אורכי הגל של אור הנפלט ממקור מאיר.

ספקטרוסקופ מכשיר אופטי המפצל את האור לתדירויות המרכיבות אותו ומציגן כקווי ספקטרום.

להט מצב שבו החומר מאיר בהיותו בטמפרטורה גבוהה; מצב זה נוצר בעקבות מעברים של אלקטרונים במולקולות ובאטומים מתנוודים מרמות האנרגיה היציבות לרמות מעוררות ובחזרה לרמות היציבות תוך כדי פליטת קרינה. התדירות שבה נפלטת האנרגיה המרבית מתכונתית לטמפרטורה המוחלטת של החומר הלוהט: $f \sim T$.

ספקטרום בליעה ספקטרום רציף, בדומה לספקטרום האור הלבן, הנקטע בקווים או בפסים אפלים שמקורם בבליעת תדירויות מסוימות של האור על ידי החומר שהקרינה עוברת דרכו.

שאלות חזרה

- כשגורמים לאלקטרונים להתנווד בתדירות של מספר אלפי הרץ, נפלטים גלי רדיו. איזה סוג של גלים ייפלטו אם יגרמו לאלקטרונים להתנווד בתדירות של מספר מיליוני מיליארדים הרץ?

להט

20. מהו "הצבע" של אור המורכב מכל תדירויות האור הנראה?

21. כאשר גז זוהר, נפליטים ממנו צבעים בדידים. כאשר מוצק זוהר, הצבעים מיטשטשים. מדוע?

22. מהו הקשר בין תדירות השיא, שבה נפלטת האנרגיה המרבית, לטמפרטורה של המקור הלוהט?

ספקטרום בליעה

23. מהו ההבדל בין ספקטרום פליטה לספקטרום בליעה?

24. מה הקשר בין תדירות האור הנפלט מחומר לתדירות האור שבוולע אותו חומר? (מהו הקשר בין תדירות גלי הרדיו המשודרים מאנטנה לתדירות גלי הרדיו הנקלטים באנטנה?)

25. אם הגז חוזר ופולט את האור שהוא בולע, מדוע יש קווים אפלים בספקטרום הבליעה? כלומר, מדוע האור ששב ונפלט אינו ממלא את הקווים האפלים?

26. היכן התגלה היסוד הליום?

27. כיצד יכולים האסטרונומים לקבוע אם כוכב מתרחק מכדור הארץ או מתקרב אליו?

פלאורסנציה

28. מנו שלוש דרכים לעירור אטום.

29. מדוע אור על-סגול יעיל יותר מאור אדום בגרימת פלאורסנציה בחומרים מסוימים?

30. מה קורה לאנרגיה "החסרה" כשאטום בולע אור על-סגול ופולט אור אדום?

נורות פלאורסנטיות

31. מה בין תהליכי העירור הראשוניים והמשניים המתרחשים במנורה פלאורסנטית?

32. מה מאפשר לנוה פלאורסנטית לפלוט אור לבן?

פוספורסנציה

33. מה ההבדל בין פלאורסנציה לבין פוספורסנציה?

34. מה גורם להיירה המאוחרת של חומרים פוספורסנטיים?

לייזרים

35. הסבירו את ההבדל בין אור מונוכרומטי לאור קוהרנטי.

36. מה מקור האור האדום הנפלט מלייזר ניאון-הליום, ההליום או הניאון?

2. כאשר אור פוגע במשטח ומוחזר ממנו, האלקטרונים בקליפות החיצוניות של המולקולות שבמשטח מתנוודים קלות. כיצד מתנהגים האלקטרונים כאשר אור נפלט ממשטח לוהט?

3. למה מתכוונים כשאומרים על רמת אנרגיה שהיא בדידה?

עירור

4. לאילו אלקטרונים אנרגיה גבוהה יותר ביחס לגרעין האטום, לאלקטרונים ברמות הפנימיות או לאלקטרונים ברמות החיצוניות?

5. למה מתכוונים כשאומרים שהאטום מעורר?

6. במה דומה כדור המתגלגל במדרגות לאלקטרון הדועך באטום?

7. מהו השם שניתן לדופק של קרינה אלקטרומגנטית?

8. מהו הקשר בין הפרש האנרגיה שבין רמות האנרגיה לבין אנרגיית הפוטון הנפלט במעבר בין רמות אלו?

9. מהו הקשר בין האנרגיה של פוטון לתדירותו?

10. לאיזה אור תדירות גבוהה יותר, לאור אדום או לאור כחול?

11. למה אנרגיה רבה יותר, לפוטון של אור אדום או לפוטון של אור כחול?

12. אלקטרון הפוגע באטום ניאון הנמצא בשפופרת זכוכית מאבד חלק מהאנרגיה הקינטית שלו. מה קורה לאנרגיה זו?

13. האם ניתן לעורר אטום ניאון הנמצא בשפופרת זכוכית יותר מפעם אחת?

14. מה מייצגים הצבעים השונים הנראים בלהבה של כפיס עץ בוער?

15. היכן הופכת אנרגיה רבה יותר לחום, בנורת להט או בנורה של אדי כספית?

16. אם תתבוננו דרך מנסרה משולשת או דרך סריג עקיפה באור הנפלט מנורת אדי כספית, תבחינו באוסף של צבעים. מה מייצגים צבעים אלו?

ספקטרום פליטה

17. מה יש בכל יסוד הגורם לו לפלוט צבעי אור האופייניים לו?

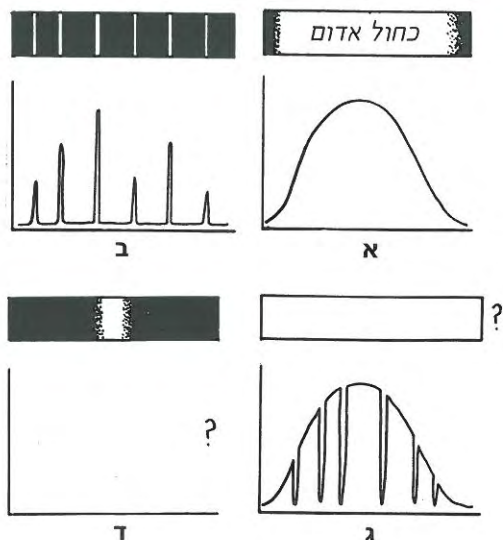
18. מהו ספקטרוסקופ ומהי פעולתו?

19. מדוע יש לקווים ספקטראליים "צורת קווים"?

37. מהי רמה יציבה למחצה?
38. מהי חשיבות יציבותה של הרמה היציבה-למחצה של ההליום לפעולת לייזר הליום-ניאון? (כיצד היתה דעיכה מהירה מדי של רמה זו משפיעה?) (היעזרו באיור 29.17)
39. מדוע חשוב לפעולת לייזר הליום-ניאון שהרמה היציבה-למחצה של ההליום תתאים לרמה היציבה-למחצה של הניאון, שאליה קשה יותר להגיע?
40. כיצד משיגים בלייזר הליום-ניאון מצב של היפוך אוכלוסיה באטומי הניאון המעוררים?
41. מה קורה כשפוטון בעל אנרגיה השווה לאנרגיית הרמה היציבה-למחצה של אטום הניאון פוגע באטום ניאון המעורר לרמה זו? מה קורה כששני הפוטונים הללו פוגעים בשני אטומי ניאון מעוררים נוספים?
42. מהי הנצילות האופיינית של לייזר רגיל?
-
- ## מטלת בית
- שאלו סריג עקיפה ממורה הפיסיקה שלכם. הסוג הנפוץ נראה כשקופית צילום, ובשל התאבכות האור העובר דרכו או מוחזר ממנו מתקבלים הצבעים המרכיבים את האור כאלפי קווים דקים. התבוננו דרך סריג העקיפה בפנס רחוב, באור של נורת אדי נתון. אם זוהי נורה בלחץ נמוך, "קו" הספקטרום הצהוב והנאה השולט באור הנתון ייראה בבירור (למעשה אלו שני קווים הסמוכים זה לזה). אם נורת פנס הרחוב עגולה, תראו מעגלים במקום קווים; במקרה כזה, התבוננו דרך סדק שתחתכו בלוח קרטון ותראו קווים. מעניין עוד יותר הוא מה שמתרחש בנורות הנתון בלחץ גבוה הנפוצות עתה. בשל ההתנגשויות בין האטומים המעוררים, תראו ספקטרום הקרוב להיות רציף, כמעט כמו הספקטרום של נורת להט. בדיוק במקום שבו ציפיתם לראות את הקו הצהוב יימצא אזור אפל. זהו פס הבליעה של הנתון. הוא נוצר בגלל הנתון הקר יותר המקיף את אזור הפליטה שלחצו גבוה. רצוי להתבונן בפנס ממרחק של גוש בניינים כדי שהקו או המעגל יהיו קטנים דיים באופן שההפרדה תישמר. ערכו את הניסוי, קל מאוד לראות זאת!
-
- ## תרגילים
1. האם אי-פעם התבוננתם במדורה והבחנתם שלעיתים, בעת בעירת חומרים שונים, נוצרות להבות בצבעים שונים? מה הסיבה לכך?
2. אור ירוק נפלט כשאלקטרונים בחומר עוברים מעבר אנרגיה מסוים. האם אור כחול שהיה נפלט מאותו חומר היה מתאים למעבר אנרגיה גדול יותר או קטן יותר?
3. אלקטרונים מאבדים אנרגיה קינטית כאשר הם פוגעים בגזים שבשפופרת זכוכית. אם נפלט מהשפופרת אור כחול ולא אור אדום, האם איבדו האלקטרונים יותר אנרגיה קינטית או פחות?
4. אור על-סגול גורם כוויית שמש, אך לא כן אור נראה. מדוע?
5. כשמכפילים את תדירות האור, האנרגיה שלו מוכפלת. מה יקרה לאנרגיית האור אם נכפיל את אורך הגל שלו?
6. מדוע האטומים המעוררים שבשלטי הניאון "אינם מתכלים" והאור הנפלט אינו מתעמעם והולך?
7. כיצד ייראו "הקווים" בספקטרוסקופ אם האור יועבר דרך פתח עגול ולא דרך סדק צר? מדוע פתח עגול פחות מתאים לעריכת הניסוי מסדק?
8. אם נבחן בעזרת מנסרה או סריג עקיפה אור משפופרת ניאון ואור מלייזר הליום-ניאון, איזה הבדל בולט יתגלה לעינינו?
9. מהי ההוכחה לטענה שהגז הקר המקיף את השמש מכיל ברזל?
10. כיצד ניתן להבחין בספקטרום של אור השמש בין קווי פראונהופר שמקורם בבליעה באטמוספירת השמש לבין קווים שמקורם בבליעה של גזים באטמוספירת כדור הארץ?
11. האם מתרחש עירור אטומי במוצקים כמו בגזים? במה שונה האנרגיה המוקרנת ממוצק לזהט מזו המוקרנת מגז מעורר?
12. תיל הלהט בנורה עשוי מהמתכת טונגסטן. ואולם, כשבוחנים בספקטרוסקופ את האור של נורת להט מתקבל ספקטרום רציף ולא ספקטרום קווי של טונגסטן. מדוע?
13. מדוע כה בהירים הצבעים הפלואורסנטיים?
14. מדוע מחצבים פלואורסנטיים שונים פולטים צבעים שונים כשהם מוארים באור על-סגול?
15. חברים טוען כי אם אור על-סגול יכול להפעיל את התהליך הנקרא פלואורסנציה אזי גם אור תת-אדום יכול לעשות זאת. מה תאמרו לו?
16. ללייזר קדם מכשיר שפעל בתחום גלי מיקרו ולא באור הנראה ונקרא מיזר. התוכלו לשער מהן המילים האנגליות שראשי התיבות שלהן מהווים את המילה מיזר?

המולקולריות בכוכב? כיצד היתה נראית עקומת הקרינה שלו? הייתכן?

26. חלק (א) באיור שלמטה מציג את עקומת הקרינה של מוצק לוהט ואת תבנית הספקטרום שלו שהתקבלה בספקטרוסקופ. חלק (ב) מציג את "עקומת הקרינה" של גז מעורר ואת תבנית ספקטרום הפליטה שלו. חלק (ג) מתאר את העקומה הנוצרת כשגז קר נמצא בין המקור הלוהט לבין הצופה; עליכם לבנות את תבנית הספקטרום המתאימה. חלק (ד) מתאר את תבנית הספקטרום של מקור לוהט כפי שנראתה דרך זכוכית ירוקה; שרטטו את עקומת הקרינה המתאימה.



17. לייזר אודם משופעל באמצעות שפופרת הבזק הפולטת אור ירוק. מדוע לא ייתכן לייזר המורכב מגביש ירוק ומשפופרת הפולטת אור אדום?

18. סדרו את מקורות האור הבאים בסדר יורד של נצילות פליטת האור: לייזר, נורה פלואורסנטית, נורת להט.

19. במה שונה "אשד" הפוטונים באלומת לייזר מהמוני הפוטונים הנפלטים מנורת להט?

20. חברכם טוען שמדענים בארץ מסוימת פיתחו לייזר הפולט אנרגיה רבה יותר מהאנרגיה המושקעת בו. מה תשיבו לו?

21. לייזר אינו יכול לפלוט אנרגיה רבה יותר מהאנרגיה שהושקעה בו. אולם לייזר יכול ליצור דפקים של אור שהספקם גבוה מההספק המפעיל אותו. הסבירו.

22. ידוע שתיל להט בטמפרטורה 2500 קלווין פולט אור לבן. האם התיל פולט אנרגיית קרינה גם כשהוא בטמפרטורת החדר?

23. הואיל וכל עצם שרוי בטמפרטורה כלשהי, הרי שהוא קורן אנרגיה. מדוע, אם כך, איננו יכולים לראות עצמים רבים יותר בחשיכה?

24. מהו היחס המספרי בין הטמפרטורות של כוכבים אדמדים, כחלחלים ולבננים?

25. רוב האנרגיה הקורנת מכוכב אדום נפלטת בתחום התת-אדום. רוב האנרגיה הקורנת מכוכב סגול היא בתחום העל-סגול. מדוע אין כוכבים ירקרקים? (רמז: אילו היו כוכבים ירקרקים, מה הייתם מסיקים על התנודות