



החזרה ושבירה

רוב הדברים שאנו רואים סביבנו אינם פולטים אור מכוח עצמם. הם נראים לעינינו מפני שהם שולחים בחזרה את רוב האור שמגיע אל פניהם ממקור ראשוני, כמו השמש או מנורה, או ממקור משני, כמו השמים הבהקים. כשאור נופל על משטח פניו של חומר, על פי רוב הוא מוחזר בלא שינוי בתדירותו או נבלע בחומר והופך לחום*. לרוב מתרחשים שני התהליכים גם יחד בדרגות שונות. כשהאור שב ונפלט אל התווך שממנו הגיע, אומרים שהוא מוחזר, והתהליך נקרא **החזרה**. אם האור ששב ונפלט ממשיך לנוע בקו ישר ממולקולה למולקולה בתוך חומר שקוף אך בכיוון שונה מכיוונו המקורי, אומרים שהאור נשבר והתהליך נקרא **שבירה**.

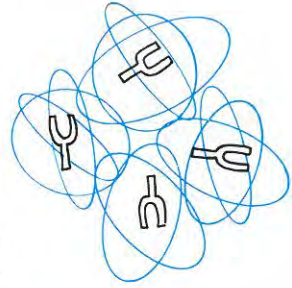
אם נאיר דף זה באור השמש או במנורה, תחל תנודה כוללת של האלקטרונים המצויים במצבי האנרגיה הרגילים של האטומים; ענני אלקטרונים שלמים יתנוודו תוך היענות לשדות החשמליים המתנוודים של האור הפוגע. אפילו באור שמש בהיר, משרעות התנודות האלה אינן עולות על אחוז אחד מרדיוס גרעין האטום. תנודות אלקטרונים זעירות אלה הן ששבות ופולטות את האור שבאמצעותו אנו רואים את הדף. אם מאירים את הדף באור לבן, הוא ייראה

החזרה

* האור עשוי גם להיבלע בחומר ולהפוך בחלקו לאנרגיה כימית ואף להיפלט לאחר מכן בתדירות נמוכה יותר בתהליך של פלואורסנציה, אך זה נדיר בהרבה.

לנו לבן, עובדה המלמדת כי האלקטרונים שבחומר החלו להתנווד בכל תדירויות האור הנראה. אור מועט בלבד נבלע. צבע הדפוס שעל הנייר, לעומת זאת, הוא כבר סיפור אחר. מלבד החזרה מועטת ביותר הוא בולע את כל תדירויות האור הנראה, ולכן הוא נראה לנו שחור.

ענני האלקטרונים של האטומים שעל פני כל החומרים שמסביבנו מתנוודים, איפוא, בתנוודות קלות בהשפעת האור שמאיר אותם. תנוודות זעירות אלה, המתרחשות בתחום רחב של תדירויות, משדרות את צבעי האור השונים וכך אנו רואים את העצמים. אומרים בקיצור כי אנו רואים את העצמים באמצעות האור שהם מחזירים.



איור 27.1

פעולת הגומלין בין האור לאטומים דומה לזו שבין קול לקולנים מוסיקליים.

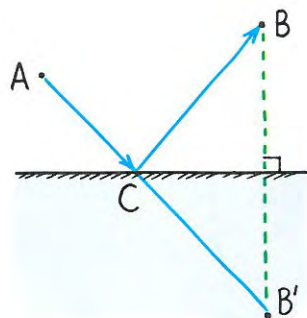
עקרון הזמן המזערי*

כולנו יודעים כי בתנאים רגילים האור מתקדם בקווים ישרים. כשאור עובר ממקום למקום הוא נע במסלול הקצר ביותר, לאורך קו ישר. כאלה הם פני הדברים אם אין כל גורם מפריע במסלולו של האור בין שתי הנקודות הנדונות. אם האור מוחזר ממראה, ניתן לתאר את הסטייה ממסלולו בעזרת נוסחה פשוטה. אם האור נשבר, כמו בזמן מעברו מאוויר למים, גם אז - בעזרת נוסחה אחרת - ניתן לתאר את סטיית האור ממסלולו הישר. אך תחילה, בטרם ננסה להבין את מסלול האור בעזרת נוסחאות אלו, נדון ברעיון העומד ביסוד כל הנוסחאות המתארות את מסלולי תנועתו של האור. את הרעיון גילה המדען הצרפתי פייר פרמה בסביבות 1650, והוא קרוי **עקרון הזמן המזערי של פרמה**. הרי הרעיון: מבין כל המסלולים שהאור עשוי לנוע בהם בדרכו מנקודה לנקודה, הוא "יבחר" במסלול שבו יידרש למעבר זמן-מזערי (מינימלי).

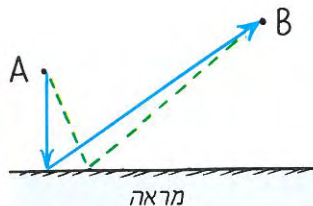
חוק ההחזרה

נוכל להבין את תופעת ההחזרה בסיועו של עקרון הזמן המזערי. נתבונן במצב המתואר באיור 27.2. אנו רואים שתי נקודות A ו-B ומראה מישורית רגילה מתחתיהן. כיצד ניתן להגיע מ-A ל-B בזמן הקצר ביותר? התשובה פשוטה למדי - צריך לעבור הישר מ-A ל-B! אך אם נוסיף את התנאי כי על האור לפגוע במראה בעת מעברו מ-A ל-B בזמן מזערי, התשובה כבר לא תהיה פשוטה כל כך. אפשרות אחת היא להגיע מהר ככל האפשר אל המראה וממנה אל B, כמתואר בקו המלא באיור 27.3. כך מתקבל מסלול קצר אל המראה אך מסלול ארוך מאוד מהמראה ל-B. אם, לעומת זאת, נתבונן בנקודה הנמצאת מעט ימינה על המראה, נראה כי במקרה זה גדל מעט המרחק הראשון אך המרחק השני קטן, וכך קטן יותר אורכו של המסלול הכולל המתואר בקו המקוטע, ואיתו קטן יותר גם זמן המעבר. כיצד נמצא את הנקודה המדויקת על המראה שלמעבר דרכה יידרש הזמן הקצר ביותר? נוכל למצוא אותה בקלות בעזרת תחבולה גיאומטרית נאה.

* חומר זה ורבות מן הדוגמאות לעקרון הזמן המזערי אומצו מספר הרצאותיו של הפיזיקאי המבריק, חתן פרס נובל, ריצ'רד פיינמן: *The Feynman Lectures on Physics*, Vol. I & II by Feynman, Leighton & Sands. Copyright © 1963, 1964 by California Institute of Technology. באישור המו"ל.



איור 27.4



איור 27.3

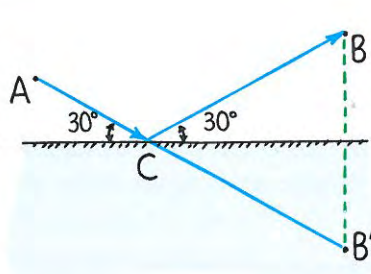
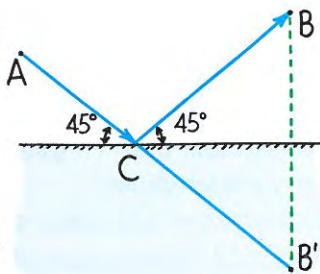
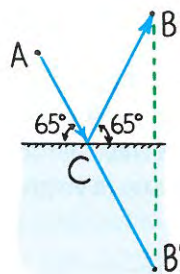


איור 27.2

נבנה בצידה השני של המראה נקודת עזר B' , שמרחקה מתחת למראה שווה למרחקה של B מעליה (איור 27.4). את המרחק הקצר ביותר בין A לבין נקודת העזר B' קל מאוד למצוא: הוא פשוט הקו הישר ביניהן. הקו הישר הזה "חותך" את המראה בנקודה C , שהיא נקודת ההחזרה המדויקת במסלול הקצר ביותר, ולכן במסלול הדורש זמן מזערי למעבר האור מ- A ל- B . אם נבדוק נראה שהמרחק מ- C ל- B שווה למרחק מ- C ל- B' . אנו רואים שאורך המסלול מ- A ל- B' דרך C שווה לאורך המסלול מ- A ל- B כשהאור מוחזר במסלולו בנקודה C .

אם נוסיף ונבדוק את העניין בסיוע מעט ידע בגיאומטריה, נמצא שזווית הפגיעה של האור מ- A ל- C שווה לזווית ההחזרה מ- C ל- B . זהו חוק ההחזרה, והוא נכון בכל זווית (איור 27.5):

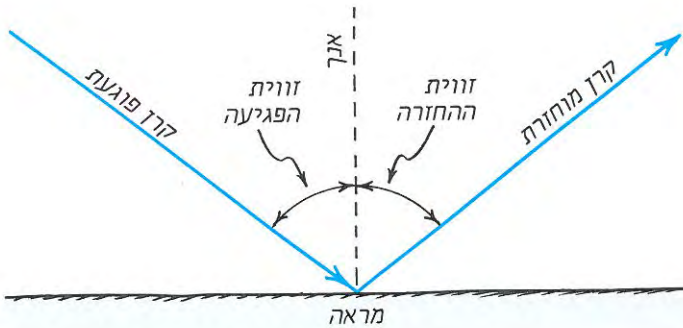
זווית הפגיעה שווה לזווית ההחזרה.



איור 27.5
החזרה.

חוק ההחזרה מומחש בעזרת חיצים המייצגים קרני אור באיור 27.6. במקום למדוד את זווית הפגיעה ואת זווית ההחזרה בין הקרניים לבין המשטח המחזיר, נהוג למדוד זוויות אלה ביחס לקו היוצר זווית בת 90 מעלות עם מישור ההחזרה - האנך למישור ההחזרה. הקרן הפוגעת, האנך והקרן המוחזרת נמצאים כולם במישור אחד.

איור 27.6 חוק ההחזרה.

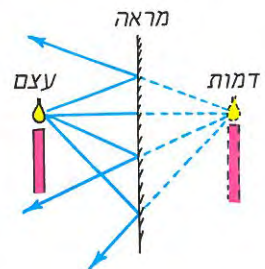


תרגיל

בניית נקודות העזר B' באיורים 27.4 ו-27.5 מראה כיצד האור פוגע בנקודה C כשהוא מוחזר מ-A ל-B. בעזרת בנייה דומה הראו שאור היוצא מ-B ומוחזר ל-A פוגע באותה נקודה עצמה, C.

מראות מישוריות

נניח שהצבנו נר בוער לפני מראה מישורית. קרני אור יוצאות מן הלהבה לכל הכיוונים. באיור 27.7 מתוארות רק ארבע מאין-סוף הקרניים הבוקעות מאין-סוף הנקודות שעל פני הנר. כשקרניים אלה פוגעות במראה, הן מוחזרות בזוויות השוות לזוויות הפגיעה שלהן. הקרניים מתפזרות מן הנר ובעקבות פגיעתן במראה הן מתפזרות ממנה והלאה. קרניים מתרחקות אלה נראות כאילו הן מגיעות כולן מנקודה אחת מאחורי המראה הממוקמת במקום שממנו, כביכול, יצאו הקרניים (הקווים המקוטעים). צופה שיתבונן במראה יראה בנקודה זאת בבואה - או דמות - של הנר. קרני האור אינן יוצאות בפועל מנקודה זאת, לכן הדמות שרואים נקראת דמות מדומה. מרחק הדמות מאחורי המראה הוא בדיוק כמרחק העצם לפניו; כמו כן, גודל הדמות שווה בדיוק לגודל העצם. לדוגמה, אם תתבוננו בדמותכם במראה, גודל הדמות יהיה שווה בדיוק לגודל שבו היה נראה תאומכם הזהה אילו עמד מאחורי המראה באותו מרחק שבו אתם עומדים לפניו. זאת - כל עוד המראה אכן שטוחה, מישורית. לעומת זאת, אם המראה עקומה, גודל הדמות ומרחקה אינם שווים לגודל העצם ולמרחקו. לא נרחיב את הדיון במראות עקומות בספר זה, ורק נציין שחוק ההחזרה עדיין תקף. מראה עקומה פועלת כרצף של מראות מישוריות

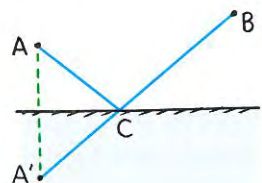
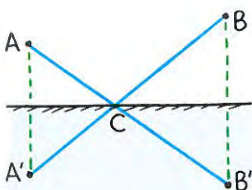


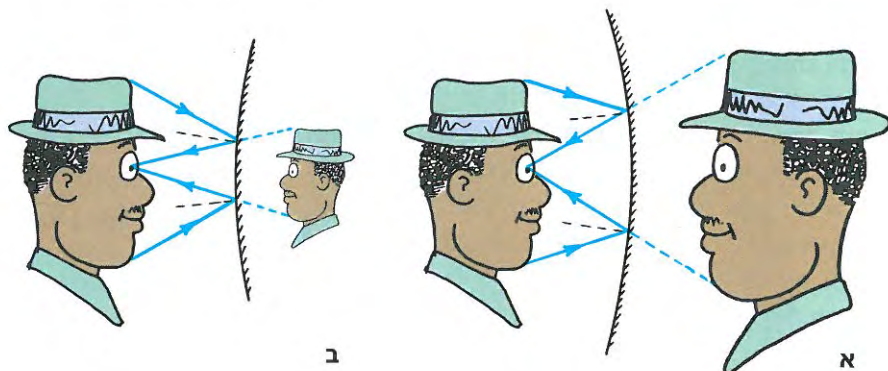
איור 27.7

דמות מדומה נוצרת מאחורי המראה, במקום שבו המשכי הקרניים המוחזרות (הקווים המקוטעים) נפגשים.

פתרון:

בבנה נקודת עזר A' שמרחקה מתחת למראה שווה למרחקה של A מעליה. אחר כך נעביר קו ישר מ-B ל-A' למציאת הנקודה C, כמתואר באיור מימין. אם נצרף עתה את שני האיורים, כמתואר משמאל, נראה שהנקודה C משותפת לשניהם. מכאן עולה כי האור ינוע במסלול שווה הלך ושוב. בכל פעם שאתם רואים מישהו במראה, דעו כי גם הוא יכול לראות אתכם.





איור 27.8

(א) כשהעצם קרוב למראה קעורה (מראה המתעקמת כלפי פנים כקערה), הדמות המדומה גדולה מן העצם ומרחקה מן המראה גדול יותר ממרחק העצם ממנה.
(ב) הדמות המדומה שנוצרת במראה קמורה (מראה המתעקמת כלפי חוץ) קטנה מן העצם וקרובה ממנו אל המראה. בשני המקרים חוק ההחזרה מתקיים לכל קרן.

זעירות, שכל אחת מהן מוטה בזווית קטנה ביחס למראה הזעירה הסמוכה לה. בכל נקודה זווית ההחזרה שווה לזווית הפגיעה (איור 27.8). שימו לב שבמראה עקומה, שלא כבמראה המישורית, האנכים בנקודות שונות על פני המראה (המתוארים בקווים שחורים מקוטעים) אינם מקבילים זה לזה.
בין שמדובר במראה מישורית ובין שמדובר במראה עקומה, בדרך כלל אין המערכת עין-מוח מסוגלת להבחין בין עצם לבין דמותו המשתקפת. לכן, האשליה כאילו עצם אמיתי מצוי מאחורי המראה (ובמקרים מסוימים לפני מראה קעורה) מקורה פשוט בעובדה שהאור מן העצם מגיע לעין בדיוק באותה תבנית פיסיקלית שבה היה מגיע אילו באמת היה העצם מצוי במקומה של הדמות.

שאלות

1. התוכלו להצדיק את הטענה שתדירות האור אינה משתנה בהחזרה?
2. אם רצונכם לצלם את עצמכם כשאתם עומדים במרחק 2 מ' לפני מראה מישורית, לאיזה מרחק עליכם לכוון את המצלמה כדי לקבל מיקוד חד?

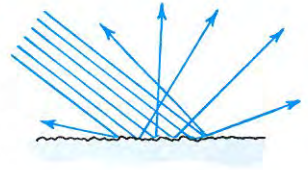
רק חלק של האור הפוגע במשטח מוחזר ממנו. כשאור פוגע במאונך במשטח של זכוכית שקופה רגילה, למשל, רק 4 אחוזים מן האור מוחזרים מכל אחד מן המשטחים, הקדמי והאחורי, ואילו ממשטח כסף או אלומיניום נקי ומלוטש מוחזרים כ-90 אחוזים מן האור הפוגע. יתר האור עובר דרך המשטח או נבלע בו.

תשובות:

1. פשוט עימדו לפני המראה והשוו את הצבעים של חולצתכם לצבעים של דמותה. העובדה שהצבעים שווים היא הוכחה לכך שתדירות האור אינה משתנה בהחזרה.
2. יש לכוון את המצלמה למרחק 4 מ'; המצב שווה לזה שבו אתם עומדים במרחק 2 מ' לפני חלון פתוח ומתבוננים בתאומכם הזהה שנמצא במרחק 2 מ' מאחורי החלון.

החזרה מפוזרת

אור הפוגע במשטח מחוספס מוחזר ממנו בכיוונים רבים. זו **החזרה מפוזרת** (החזרה דיפוזית, איור 27.9). אם המשטח חלק במידה כזו שהמרחק בין גבושיות סמוכות על פניו קטן מכשמינית אורך הגל של האור, ההחזרה המפוזרת תהיה מועטה ביותר; במצב זה אומרים שהמשטח מלוטש. משטח עשוי להיות, איפוא, מלוטש עבור קרינה בעלת אורכי גל ארוכים אך בלתי מלוטש לקרינה בגלים קצרים. אנטנת ה"צלחת" העשויה רשת שבאיור 27.10 מחוספסת מאוד לגלי אור ואינה דומה כלל למראה. אך לגלי רדיו בעלי אורכי גל ארוכים היא בהחלט "מלוטשת" ומהווה משטח מחזיר מצוין.



איור 27.9

החזרה מפוזרת. כל קרן בודדת מוחזרת בהתאם לחוק ההחזרה, אך הזוויות השונות של משטחי ההחזרה הזעירים שהקרניים פוגעות בהם במשטח שאינו מלוטש גורמות להחזרה בכיוונים שונים.

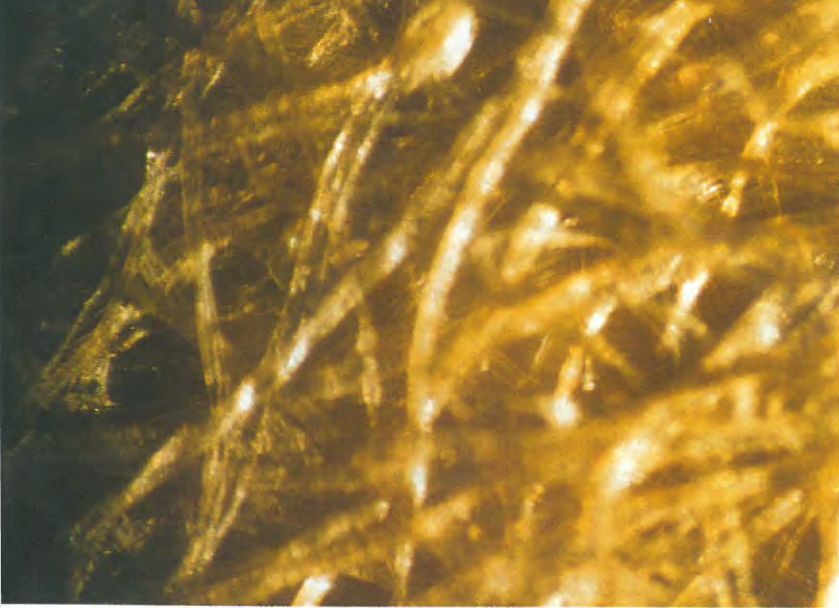


איור 27.10

אנטנת צלחת פרבולית העשויה רשת מתכת גורמת להחזרה מפוזרת של גלי האור הקצרים אך פועלת כמשטח מלוטש לגלי הרדיו הארוכים.

האור מוחזר מדף זה כשהוא מפוזר. הנייר אולי חלק לגבי גלי רדיו ארוכים, אך לגבי גלי האור הזעירים הוא מחוספס (איור 27.11). קרני האור הרבות הפוגעות בדף פוגשות מיליוני משטחים חלקים זעירים הפונים לכל הכיוונים. האור הפוגע מוחזר, לכן, בכל הכיוונים. זה מצב רצוי בהחלט. הוא מאפשר לנו לראות עצמים מכל כיוון ובכל מצב. אנו רואים את סביבתנו בעיקר באמצעות החזרה מפוזרת.

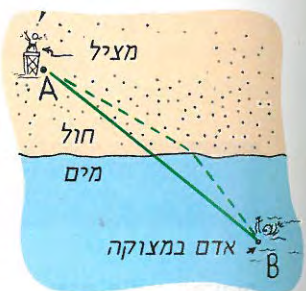
בהחזרה מפוזרת בלתי רצויה אנו נתקלים, למשל, כשמופיעות דמויות כפולות ("דמויות רפאים") על מרקע הטלוויזיה, וזאת כשגלי השידור מוחזרים ממבנים סמוכים. אותות מוחזרים אלה מגיעים לאנטנה בשיהוי זמן מסוים לאחר האותות המגיעים אליה ישירות מתחנת השידור, משום שהמסלול שהם עוברים ארוך מעט יותר. לרוב מוסטות דמויות הרפאים מעט ימינה על המרקע, משום שזהו כיוון הסריקה בשפופרת המסך. כאמור, האות המוחזר מגיע לאנטנה הקליטה מעט אחרי שמגיע אליה האות הישיר. אם ישנן החזרות מרובות עלולות להופיע כמה דמויות רפאים.



שבירה

בפרק 25 למדנו כי מהירות האור הממוצעת בזכוכית ובשאר חומרים שקופים קטנה ממהירות האור בחלל ריק. האור מתקדם במהירויות שונות בחומרים שונים*. הוא נע במהירות 300,000 ק"מ בשנייה בריק, במהירות קטנה אך במעט מזו באוויר, ובמהירות שהיא כשלושה רבעים מערך זה במים. מהירות האור ביהלום היא 40 אחוזים לערך ממהירותו בריק. כשקרני האור עוברות באלכסון מתווך אחד למשנהו הן נוטות מכיוון המקורי. תופעה זאת נקראת שבירה. תופעה מוכרת היא שקרן אור הפוגעת בזכוכית או במים בזווית שטוחה מתכופפת ועוברת מסלול ארוך יותר. אך זאת יש לדעת: המסלול הארוך יותר שבו עוברת קרן האור הוא המסלול שבו זמן המעבר הוא הקצר ביותר. אילו היה המסלול קו ישר היה נדרש זמן ארוך יותר למעבר האור. נמחיש זאת בעזרת הדוגמה הבאה.

תארו לעצמכם שאתם מצילים על שפת הים, והנכם מבחינים באדם במים השרוי במצוקה. באיור 27.12 תוכלו לראות את המקום היחסי שלכם, של קו החוף ושל האדם שבמצוקה. אתם נמצאים בנקודה A והאדם בנקודה B. מהירות הריצה שלכם גדולה ממהירות השחייה. האם עליכם לנוע בקו ישר ממקום הימצאכם אל הנקודה B? אם נקדיש לכך מעט מחשבה ניווכח שתנועה לאורך קו ישר לא תהיה הבחירה הטובה ביותר; אם תקדישו מעט יותר זמן בתנועה על החוף לנקודה רחוקה יותר, תחסכו זמן רב שכן המרחק שתצטרכו לשחות במים יהיה קצר יותר. המסלול המהיר ביותר מבחינת הזמן מסומן באיור בקו המקוטע, והוא בבירור אינו המסלול הקצר ביותר מבחינת המרחק.



איור 27.12

שבירה.

* השיעור שבו מהירות האור בחומר שונה ממהירותו בריק ניתן על ידי מקדם השבירה, n , של החומר; n הוא היחס בין מהירות האור בריק למהירות האור בחומר:

$$\frac{\text{מהירות האור בריק}}{\text{מהירות האור בחומר}} = n$$

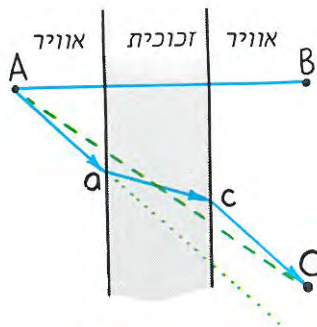
לדוגמה, מהירות האור ביהלום היא $c(1/2.4)$, לכן $n = 2.4$. מקדם השבירה של הריק הוא 1.

שיעור ההטיה בקו המים תלוי, כמובן, ביחס שבין מהירות ריצתכם למהירות שחייתכם. כשקרן אור פוגעת במים נוצר מצב דומה, כמתואר באיור 27.13. זווית הפגיעה גדולה מזווית השבירה בשיעור התלוי ביחסי המהירויות של האור באוויר ובמים.



איור 27.13
שבירה.

נתבונן בלוח הזכוכית העבה של החלון שבאיור 27.14. כשאור עובר מנקודה A דרך הזכוכית לנקודה B, הוא נע בקו ישר. במקרה זה האור פוגע בזכוכית במאונך, וקל לראות שהמרחק הקצר ביותר דרך האוויר והזכוכית גם יחד הוא גם המסלול המהיר ביותר. עתה נתבונן באור העובר מהנקודה A לנקודה C; מה יקרה כאן? האם ינוע האור לאורך הישר המתואר באמצעות הקו המקוטע? התשובה שלילית, שכן אילו היה האור נע במסלול זה הוא היה שווה זמן רב יותר בתוך הזכוכית, שבה מהירותו נמוכה ממהירותו באוויר. לכן, בתוך הזכוכית יעבור האור במסלול פחות נטוי. שיעור הקיצור בזמן עקב המעבר במסלול הקצר יותר בזכוכית רב משיעור הארכת הזמן הנובעת ממעבר האור במסלול הארוך במעט באוויר. המסלול הכולל הוא מסלול הזמן המזערי. התוצאה הסופית היא העתקה מקבילה של אלומת האור, מפני שהזוויות בכניסה לזכוכית וביציאה ממנה שוות. תוכלו להבחין בהעתקה זו אם תתבוננו דרך זוגית עבה בזווית משופעת. ככל שזווית הצפייה חדה יותר, ההעתקה בולטת יותר.



איור 27.14

שבירה בלוח זכוכית. הקו המקוטע AC הוא אומם המסלול הקצר ביותר, ואולם האור עובר מסלול ארוך במעט באוויר מ-A ל-a, אחר כך מסלול קצר יותר בזכוכית אל c, ולבסוף משם ל-C. הקרן הבוקעת מהזכוכית מועתקת אך מקבילה לכיוונה של הקרן הפוגעת.

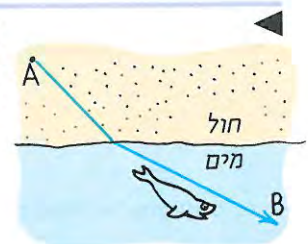
בדוגמה שבאיור 27.12, אילו היה המציל כלב ים ולא אדם, במה היה שונה מסלול הזמן המזערי מהנקודה A לנקודה B?

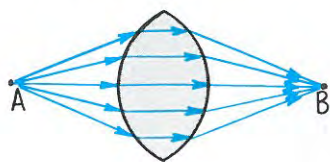
שאלה

דוגמה מעניינת אחרת היא המנסרה המשולשת שבה פאות הזכוכית הנגדיות אינן מקבילות זו לזו (איור 27.15). אור העובר מהנקודה A לנקודה B לא ינוע לאורך המסלול הישר המתואר בקו המקוטע מפני שבמקרה כזה היה

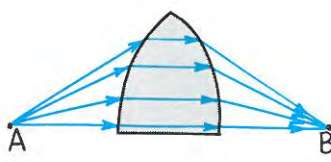
תשובה:

שחיתו של כלב ים מהירה יותר מריצתו ולכן נטייתו של המסלול תהיה כמתואר באיור; כזה יהיה גם מסלולה של קרן אור היוצאת מגוש זכוכית לאוויר.

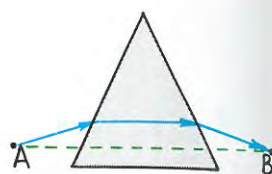




איור 27.17
עדשה מכנסת.



איור 27.16
מנסרה עקומה.

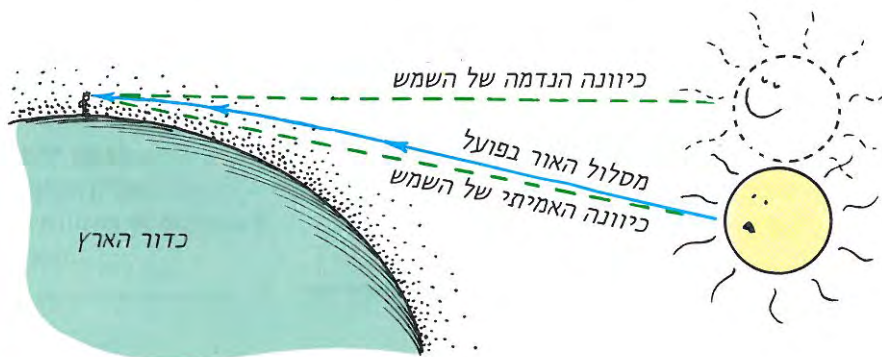


איור 27.15
מנסרה.

שוהה זמן רב מדי בתוך הזכוכית; האור ינוע לאורך המסלול המתואר בקו הרציף - מסלול ארוך מעט יותר באוויר - שבו הוא יעבור דרך קטע דק יותר של הזכוכית בדרכו לנקודה B. לפי אותו היגיון יכולנו לחשוב שהאור יבחר קטע קרוב עוד יותר לראש המנסרה, שבו הזכוכית דקה עוד יותר. אך אילו היה המסלול כזה, המרחק הנוסף באוויר היה גורם להתארכות זמן המעבר הכללי. זוויות השבירה הן הקובעות באופן חד משמעי את מסלול הזמן המזערי.

מעניין לציין כי במנסרה עקומה הבנויה בצורה מתאימה, זמן המעבר של האור שווה לאורך מסלולים רבים מנקודה A בצידה האחד של המנסרה לנקודה B בצידה האחר (איור 27.16). עיקום המנסרה מקטין את עובי הזכוכית בדיוק במידה המתאימה כדי לפצות על תוספת המסלול שהאור צריך לעבור בדרכו לנקודות גבוהות יותר על פניה. עבור נקודות נגדיות A ו-B מתאימות ואם עיקום הפנים של מנסרה מיוחדת זו נעשה כראוי, כל מסלולי האור יהיו בעלי זמן שווה בדיוק. במצב זה, כל האור מן הנקודה A שיפגע בפני הזכוכית ימוקד בנקודה B. קל לראות שצורה זאת היא פשוט חציה העליון של עדשה מכנסת (שנעסוק בה ביתר פירוט בהמשך הפרק).

אם נתבונן בשמש השוקעת נוסיף לראות אותה דקות אחדות לאחר ששקעה בפועל מתחת לאופק. אטמוספירה כדור הארץ דלילה בחלקה העליון וצפופה בחלקה התחתון. מכיוון שהאור נע מהר יותר באוויר דליל מאשר באוויר צפוף, אור השמש מגיע אלינו במהירות רבה יותר כאשר במקום לנוע אלינו פשוט בקו ישר הוא מתרחק מתחום האוויר הצפוף ונע במסלול גבוה וארוך יותר, וחודר אל האטמוספירה בשיפוע תלול יותר (איור 27.18). הואיל וצפיפות האטמוספירה משתנה בהדרגה, גם מסלול האור מתכופף בהדרגה וכך נוצר מסלול עקום. התוצאה הראויה לציון של מסלול הזמן המזערי הזה היא



איור 27.18
בשל שבירת הקרניים באטמוספירה, כאשר השמש נמצאת סמוך לאופק היא נראית גבוה יותר בשמים.

איור 27.19

צורת השמש מעוותת בגלל
שבירה הדרגתית.



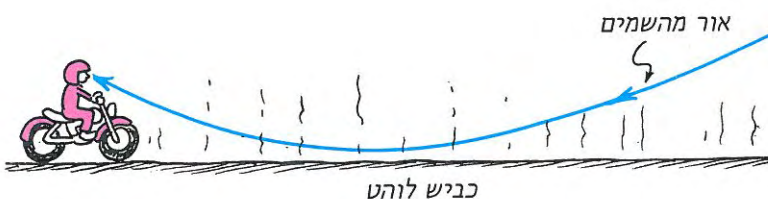
שבכל יום אנו זוכים לתוספת קצרה של אור יום. יתר על כן, כשהשמש (או הירח) נמצאים סמוך לקו האופק, הקרניים מן הקצה התחתון מתכופפות יותר מהקרניים שמן הקצה העליון. עקב כך מתקצר הקוטר האנכי והשמש נראית אליפטית (27.19).

כולנו מכירים את מראה ה"פאטה מורגנה" המופיע כאשר נוסעים על כביש לוחט בשמש. השמים נראים כאילו הם משתקפים בשכבת מים שעל הכביש במרחק, אך כשמתקרבים מתברר כי הכביש יבש לחלוטין. מהו הגורם לתופעה? סמוך ממש לפני הכביש האוויר לוחט, ואילו גבוה יותר הוא קריר יותר. האור נע מהר יותר דרך האוויר הלוהט, שצפיפותו פחותה מצפיפות האוויר באזור הקריר יותר. וכך האור מן השמים מגיע אלינו לא בקו ישר בלבד אלא גם במסלול של זמן מזערי שבו הוא יורד תחילה לתחום האוויר החם הסמוך לכביש, שם הוא מתכופף בטרם יגיע לעינינו (איור 27.20). "פאטה מורגנה" אינה תעתוע המתרחש במוחנו, כפי שסבורים רבים. זוהי תופעה שמקורה אור אמיתי המגיע לעינינו וש אפשר לצלמה, כפי שניתן לראות באיור 27.21.

אם נתבונן בעצם המצוי מעבר לתנור לוחט או למדרכה חמה, נראה אותו כדמות גלית מרצדת. הדבר נובע ממגוון מסלולי הזמן המזערי הנוצרים בעת מעברו של האור דרך אזורי הטמפרטורות המשתנות הגורמות לצפיפויות אוויר

איור 27.20

תופעת ה"פאטה מורגנה"
היא תוצאה של שבירת האור
באוויר.



שאלה

אילו היתה מהירות האור שווה בצפיפויות שונות ובטמפרטורות שונות של האוויר, האם עדיין היה אור היום מתארך מעט והשמש היתה נראית פחוסה סמוך לשקיעה? האם היו הכוכבים מרצדים בלילה? האם היינו צופים בתופעת הפאטה מורנגה?

איור 27.21

"פאטה מורנגה". המראה של הכביש הרטוב לכאורה ושל השתקפות השמים אינו נגרם בגלל מים, אלא הוא תוצאה של שבירת האור המגיע מהשמים באוויר החם והצפוף פחות הנמצא סמוך לכביש.



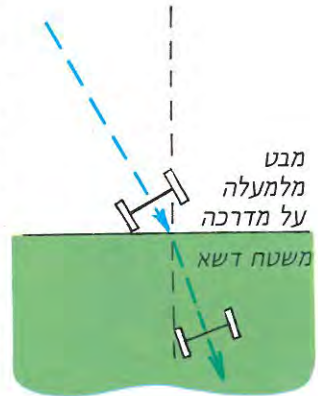
משתנות. נצנוץ הכוכבים בשמי הלילה נובע גם הוא מתופעה דומה של מעבר האור דרך שכבות בעלות צפיפויות משתנות באטמוספירה.

בדוגמאות שתיארנו, כיצד "יודע" האור מהם התנאים השוררים באזורים השונים ואיך "כדאי לו" לנוע כדי לעבור במסלול הזמן המזערי? כשהאור מתקרב בזווית אל זוגית החלון, כיצד הוא "יודע" לנוע למרחק גדול במעט באוויר כדי לחסוך זמן בבחירתו בזווית פגיעה תלולה יותר ולכן במסלול קצר יותר דרך לוח הזכוכית? כשהאור מתקרב למנסרה משולשת או לעדשה, כיצד הוא יודע לנוע למרחק רב יותר באוויר כדי להגיע לאזור צר יותר של הזכוכית? כיצד יודע האור המגיע מן השמש לנוע דרך ארוכה יותר מעל לאטמוספירה בטרם יפנה לדרך קיצור, החוצה את האוויר, תוך חיסכון בזמן? כיצד יודע האור מן השמים שלמעלה שביכולתו להגיע אלינו בזמן מזערי אם יסטה לעבר הכביש הלוהט בטרם ישוב ויפנה כלפי מעלה לעבר עינינו? דומה שעקרון הזמן המזערי אינו מציית לחוקי הסיבתיים. דומה שלאור יש מעין תבונה משלו, שהוא יכול "לרחרח" את המסלולים האפשריים, לחשב את זמן המעבר בכל אחד מהם, ולבחור בזה הדורש זמן מזערי. האומנם זהו המצב? שאלות אלו, מעוררות מחשבה ככל שיהיו, נוגעות לכעין תכונה מסתורית שיש כביכול לאור. אך הן פשוט אינן נדרשות כשמפרשים את תופעת השבירה בדרך פיסיקלית ישירה ובהירה יותר.

הסיבה לשבירת האור

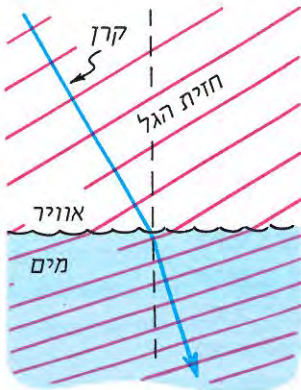
כשהאור נוטה ממסלולו הישר בעת מעבר אלכסוני מחומר אחד לחומר אחר, התופעה המתרחשת נקראת שבירה. הסיבה לשבירה היא השינוי במהירות האור הממוצעת בזמן מעבר מתווך שקוף אחד למשנהו. נוכל להבין זאת אם נתבונן בפעולתם של זוג גלגלים של מכונית צעצוע המחוברים לציר ומתגלגלים ממדרכה חלקה אל משטח דשא. אם הגלגלים פוגעים בדשא בזווית (איור 27.22), הם יסטו ממסלולם הישר. כיוון התנועה של הגלגלים המתגלגלים מתואר בקו המקוטע. שימו לב לכך שעם הפגיעה בדשא, שעליו הגלגלים נעים לאט יותר בשל התנגדות העשב, הגלגל השמאלי יואט ראשון. הסיבה לכך היא שגלגל זה פוגע בדשא בעוד הגלגל הימני עדיין נע על המדרכה החלקה. הגלגל הימני, המהיר יותר, נוטה להסתובב סביב הגלגל השמאלי האיטי יותר, המשמש לו מעין ציר. בפרק הזמן שבו הגלגל השמאלי עובר מרחק קצר יותר בדשא, הגלגל הימני יעבור מרחק רב יותר. תהליך זה גורם לנטיית כיוון התנועה של הגלגלים המתגלגלים "לעבר האנך" - הקו השחור המקוטע הניצב לקו הגבול שבין המדרכה לדשא.

גם גל האור משנה את כיוונו באופן דומה (איור 27.23). שימו לב לכיוון האור המסומן באמצעות החץ המלא (קרן האור) ולחזיתות הגל היוצרות זווית ישרה עם הקרן. (אילו היה מקור האור קרוב, חזיתות הגל היו נראות כקשתות של מעגלים; אך אם נניח שהשמש המרוחקת היא מקור האור, חזיתות הגל הן למעשה קווים ישרים). חזיתות הגל מאונכות לכיווני הקרניים. באיור, הגל פוגע בפני המים בזווית, וכך חלקו השמאלי של הגל מאט בעוד חלק הגל שעדיין באוויר נע במהירות נע במהירות נע. קרן האור עדיין מאונכת לחזית הגל, והיא נוטה בפני המים כפי שגלגלים משנים את כיוונם כאשר הם מתגלגלים מן המדרכה החלקה אל משטח הדשא. בשני המקרים הסטייה נובעת מן השינוי במהירות*.



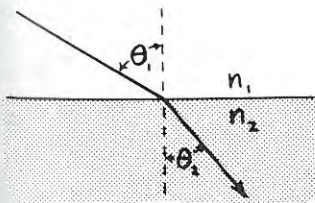
איור 27.22

כיוון התנועה של הגלגלים המתגלגלים משתנה כשגלגל אחד מאט לפני הגלגל האחר.

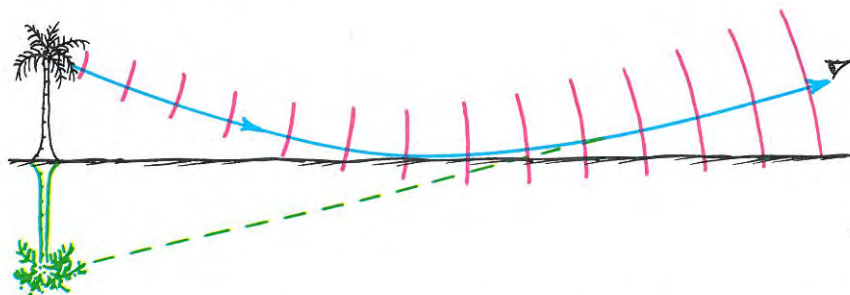


איור 27.23

כיוון ההתקדמות של גלי האור משתנה כשחלק של הגל מאט תחילה.



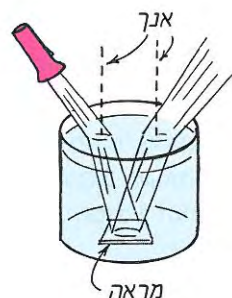
* חוק השבירה הכמותי, חוק סנל, שנתגלה לראשונה ב-1621 בידי האסטרונום והמתמטיקאי ההולנדי וי סנל, הוא: $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$, כאשר n_1 ו- n_2 הם מקדמי השבירה של החומרים שמשני צידי המשטח. θ_1 היא זווית הפגיעה ו- θ_2 היא זווית השבירה. אם ידועים שלושה מן הערכים האלה, ניתן לחשב את הרביעי מן המשוואה.



איור 27.24

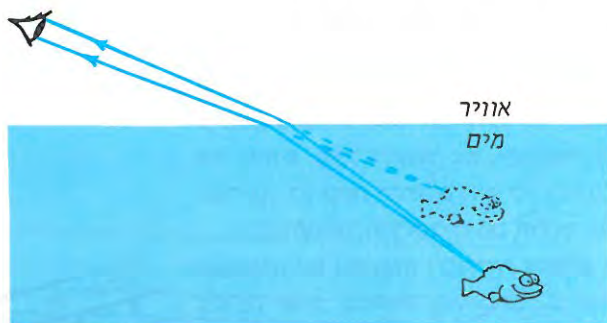
הסבר גלי לתופעת הפאטה מורגנה. חזיתות הגל נעות מהר יותר באוויר הלוהט הסמוך לקרקע ומתכופפות כלפי מעלה.

חזיתות גל אחדות של האור המוחזר מצמרת של עץ מתוארות באיור 27.24. אילו היתה טמפרטורת האוויר אחידה, מהירות האור הממוצעת היתה שווה בכל חלקי האוויר; האור הנע לעבר הקרקע היה פוגע בקרקע. אך בפועל האוויר הסמוך לפני הקרקע חם יותר וצפוף פחות; לפיכך מהירותן של חזיתות הגל גדלה עם ירידתן וכתוצאה מכך הן נוטות כלפי מעלה. מערכת הראייה של הצופה מפרשת את האור כאילו הגיע, כרגיל, בקו ישר (הקו המקוטע), ולכן הוא רואה מחזה תעתועים - פאטה מורגנה. שבירת האור היא הסיבה לתופעות רבות של תעתועי ראייה; אחת מהן היא כיפופה המדומה של כפית השקועה בחלקה במים. החלק השקוע נראה קרוב יותר לפני המים מכפי שהוא באמת. כך גם אם תתבוננו בדג בבריכה - הוא ייראה קרוב יותר אליכם ממקומו האמיתי (איור 27.26). בשל השבירה, עצמים שקועים נראים מוגדלים. אם נצפה הישר למטה אל תוך המים, עצם השקוע 4 מ' מתחת לפני המים ייראה לנו כאילו הוא מצוי בעומק 3 מ'.



איור 27.25

כשמהירות האור פוחתת במעבר מתווך לתווך, למשל מאוויר למים, האור נשבר לעבר האנך. כשמהירות האור גדלה במעבר מתווך לתווך, למשל ממים לאוויר, האור נשבר ומתרחק מן האנך.



איור 27.26

בשל השבירה, עצם השקוע במים נראה קרוב יותר לפני המים מכפי שהוא באמת.

ניתן איפוא לפרש את נטיית האור בפני המים בשתי דרכים לפחות. אפשר לומר שהאור המוחזר מן הדג ומגיע אל עין הצופה עושה זאת בפרק הזמן המזערי בבחירתו במסלול קצר יותר כלפי מעלה לעבר פני המים ובהתאם לכך במסלול ארוך יותר באוויר. מנקודת ראות זאת, הזמן המזערי הוא שמכתיב את המסלול. לעומת זאת אפשר לומר כי גלי האור שבמקרה מכוונים כלפי מעלה בזווית מתאימה נוטים ממסלולם הסדיר כשמהירותם גדלה לפתע עם יציאתם לאוויר, וכי גלים אלה הם המגיעים בסופו של דבר לעין הצופה. לפי דרך הסתכלות זאת, השינוי במהירות המתרחש בעת המעבר ממים לאוויר הוא שמכתיב את המסלול, ובדיעבד מתברר כי מסלול זה הוא מסלול של זמן מזערי. תהיה נקודת הראות שבה נבחר אשר תהיה, התוצאות תהיינה זהות.

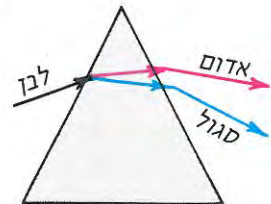
שאלה

אילו היתה מהירות האור שווה בכל החומרים, האם היתה תופעת השבירה מתרחשת בעת מעבר אור מתווך אחד למשנהו?

נפיצה

מהירות האור הממוצעת בתווך שקוף קטנה מ- c . בכמה היא פחותה מ- c ? - הדבר תלוי בסוג התווך ובתדירות האור. מהירות האור בתווך שקוף תלויה בתדירות. בוודאי זכור לכם מפרק 25 שאור שתדירותו תואמת אחת מתדירויות התהודה הטבעיות של האלקטרונים שבאטומים ובמולקולות, נבלע בחומר. אור שתדירותו קרובה לתדירות התהודה נבלע ונפלט מחדש לעיתים קרובות יותר ולכן התקדמותו איטית יותר. הואיל ותדירויות התהודה הטבעיות של רוב החומרים השקופים נמצאות בתחום העל-סגול של הספקטרום, אור נראה שתדירותו גבוהה יותר יתקדם בחומרים אלה לאט יותר מאשר אור שתדירותו נמוכה יותר. האור הסגול מתקדם בזכוכית רגילה במהירות הקטנה בכאחוז אחד ממהירות האור האדום. יתר האורות, שתדירויותיהם בין האדום לבין הסגול, מתקדמים במהירויות ביניים.

אורות בעלי תדירויות שונות מתקדמים, איפוא, במהירויות שונות בתווך שקוף. ומכיוון שהם מתקדמים במהירויות שונות, קרניהם נשברות באופן שונה ונוטות בזוויות שונות. במקרים שבהם האור נשבר פעמיים, כמו למשל במנסרה משולשת, ההפרדה בין צבעי האור השונים עשויה להיות בולטת למדי. הפרדה זו של האור לצבעיו בהתאם לתדירויותיהם נקראת נפיצה (איור 27.27).



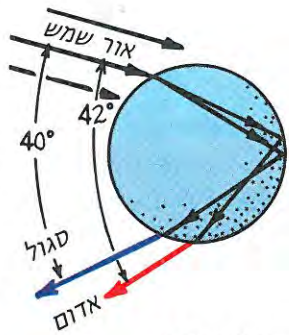
איור 27.27

נפיצה במנסרה מאפשרת לנו לראות את רכיבי האור.

הקשת בענן

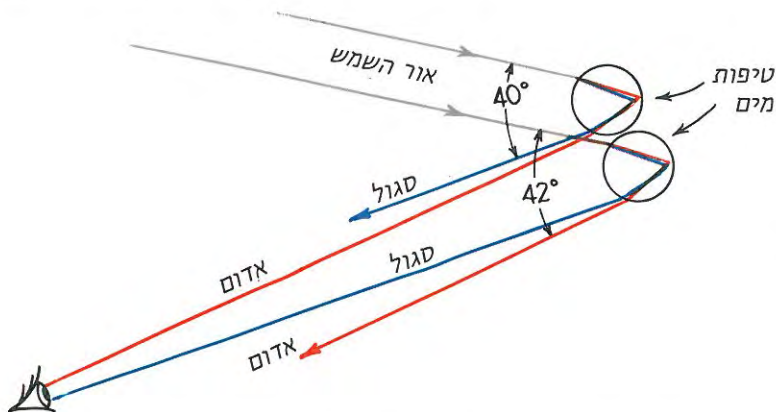
דוגמה מרהיבה לתופעת הנפיצה היא הקשת בענן. התנאים הדרושים להופעת הקשת הם הימצאות השמש נמוך בחלקם האחד של השמים וגשם שיורד בחלקם הנגדי של השמים. אם נפנה את הגב לשמש נראה את צבעי הספקטרום ערוכים בתבנית קשת. אם יזדמן לנו לצפות בקשת ממקום גבוה, למשל מחלון של מטוס, נוכל לראות את "הקשת" כמעגל שלם. אלמלא היתה הקרקע מפריעה, כל קשת היתה נראית לנו כמעגל.

צבעי הקשת המרהיבים הם תוצאה של נפיצת אור השמש במיליוני טיפות גשם כדוריות הפועלות כמנסרות זעירות. נוכל להבין זאת אם נתבונן במתרחש בטיפה אחת, כמתואר באיור 27.28. נעקוב אחר קרן השמש מרגע כניסתה לטיפת הגשם בחלקה העליון. חלק מן האור מוחזר בנקודת הכניסה (חלק זה אינו מתואר באיור) וחלקו נשבר אל תוך המים. בעת שבירה ראשונה זו מתרחשת נפיצה של האור לצבעי הספקטרום, שבה סטיית הסגול היא המרבית ואילו האדום נשבר בשיעור הקטן ביותר. כשמגיע האור לצידה הנגדי של הטיפה, חלקו עובר, תוך כדי שבירה, החוצה לאוויר (חלק זה אינו מתואר באיור) וחלקו מוחזר בתוך טיפת המים. בהגיע האור למשטח הפנים התחתון של הטיפה, שוב מוחזר כל צבע בחלקו אל תוך המים (אינו מתואר באיור) ובחלקו נשבר בשנית בעת יציאתו לאוויר. שבירה שנייה זו דומה למתרחש במנסרה, שבה השבירה במשטח היציאה מגדילה את הנפיצה שכבר התרחשה במשטח הכניסה.



איור 27.28

שבירת אור השמש בטיפת גשם יחידה.

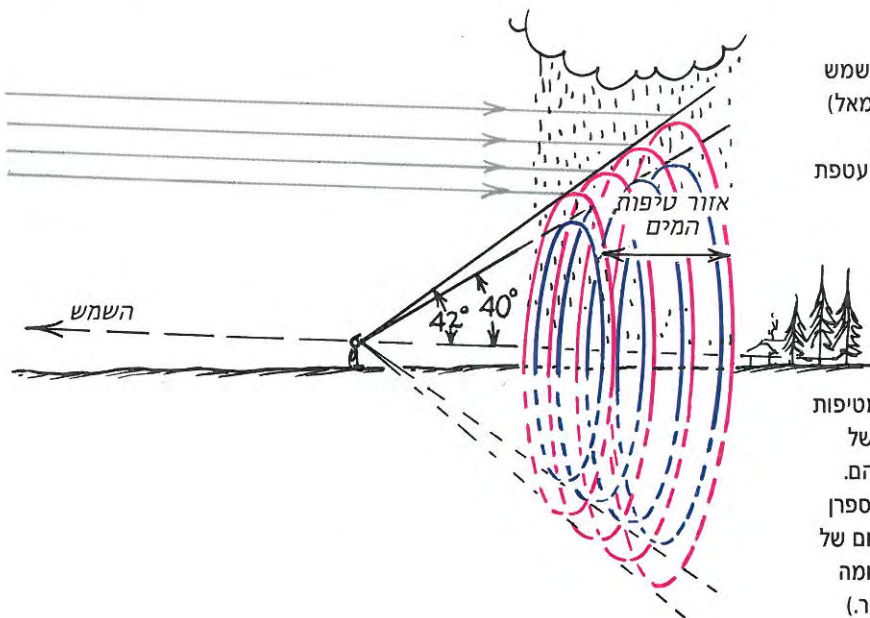


איור 27.29

קרני השמש פוגעות בשתי טיפות גשם ויוצאות מהן לאחר שעברו נפיצה. הצופה רואה את האור האדום מהטיפה הגבוהה יותר ואת הסגול מהטיפה הנמוכה יותר. טיפות שמספרן עצום יוצרות לעיני המתבונן את קשת הצבעים כולה.

כל טיפה אמנם גורמת לנפיצת ספקטרום הצבעים המלא, אך כל צופה נמצא בעמדה שממנה הוא יכול לראות רק צבע אחד היוצא מכל טיפה (איור 27.29). אם האור הסגול מטיפה מסוימת מגיע לעין הצופה, האור האדום מאותה טיפה יגיע לאזור אחר, קרוב יותר לרגליו. כדי לראות אור אדום עליו לצפות לעבר טיפה הנמצאת באותו רגע גבוה יותר בשמים. באור האדום מבחינים כאשר הזווית בין קרן השמש הפוגעת לבין הקרן האדומה שעברה נפיצה בטיפה היא 42° . באור הסגול מבחינים כאשר הזווית בין קרן השמש הפוגעת לבין הקרן שעברה נפיצה בטיפה היא 40° .

מדוע יוצר האור שעבר נפיצה בטיפות הגשם צורת קשת? התשובה לכך דורשת הסבר הכרוך במעט גיאומטריה. למעשה, צורתה של הקשת בענן אינה צורת קשת דו-ממדית שטוחה כפי שהיא נראית. היא נראית שטוחה מאותה סיבה שהתפוצצויות כדוריות של זיקוקי דינור גבוה בשמים נראות לנו כדיסקות שטוחות - עקב העדר סימנים להערכת המרחק. הקשת שאנו רואים היא למעשה חרוט תלת-ממדי שקודקודו נמצא בעינינו (איור 27.30). אם נתבונן



איור 27.30

כשהעין ממוקמת בין השמש (מחוץ לתמונה מצד שמאל) לבין אזור טיפות המים, הקשת שרואים היא המעטפת של חרוט תלת-ממדי המשתרע בכל תחום הטיפות. הסגול מגיע לעין לאחר שעבר נפיצה בטיפות המהוות משטח חרוטי של 40° ; האדום מגיע מטיפות היוצרות משטח חרוטי של 42° , ויתר הצבעים ביניהם. (שכבות של טיפות שמספרן עצום יוצרות מספר עצום של קשתות דו-ממדיות בדומה לארבע המתוארות באיור).

בחרוט זכוכית קטן דרך החוד, הזכוכית תיראה לנו כעיגול ולא כחרוט. כל הטיפות שהאור העובר נפיצה דרכן מגיע לעיניך מהוות צורת חרוט - חרוט בעל מספר שכבות. השכבה החיצונית מחזירה לעיניך את האור האדום, השכבה שמתחתיה את האור הכתום, וכך הלאה עד לאור הסגול, המגיע לעיניך מן השכבה הקונית הפנימית ביותר. ככל שתחום טיפות המים עבה יותר, כך עבה יותר דופן החרוט שדרכו מתבוננים והקשת נראית בצבעים עזים יותר.

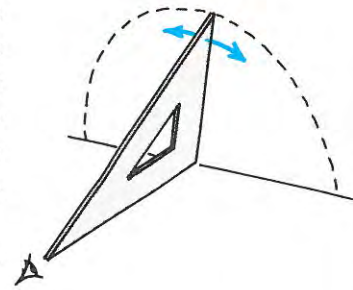
לשם הבהרה נוספת, נתבונן במהלך הנפיצה של האור האדום בלבד. את האדום רואים כשהזווית בין קרני השמש הפוגעות לבין הקרניים שעברו נפיצה היא בת 42° . קרני השמש מתפזרות, כמובן, בזווית של 42° מכל הטיפות שבשמים ובכל הכיוונים - כלפי מעלה, כלפי מטה ולצדדים. אך האור האדום היחיד שאתם רואים מגיע מטיפות המונחות על חרוט שהזווית בין צירו למעטפתו היא 42° . עיניכם הצופה נמצאת בקודקוד החרוט הזה, כמתואר באיור 27.30. כדי לצפות בסגול עליכם להתבונן בזווית של 40° מציר החרוט. לחרוט יש איפוא מעטפת בעלת עובי משתנה - היא דקה מאוד סמוך לקודקוד אך הולכת ועבה עם ההתרחקות ממנו.

חרוט התצפית שלכם, שחותך את ענן הטיפות היוצרות את הקשת "שלכם", שונה מן החרוט של חבר או חברה העומדים לצידכם. לכן, אם יאמר לכם חבר: "תסתכלו בקשת הנפלאה הזאת", תוכלו לענות: "פנה את מקומך כדי שגם אני אוכל לראות". כל אחד ואחת מאיתנו רואה קשת אישית ופרטית שלו או שלה... הרי עוד עובדה מעניינת: הקשת תמיד ניצבת הישר מולכם, זאת בגלל העדר הסימנים להערכת המרחק שהזכרנו קודם. אם תזוזו ממקומכם, הקשת תזוז אתכם. לכן אף פעם לא תוכלו להתקרב אל הקשת בזווית או לצפות בה מן הצד בדומה למתואר בהגזמה באיור 27.30. אי אפשר לתפוס את הקשת מן הצד. הפתגם "לחפש את האוצר שבקצה הקשת" פירושו לשאוף לדבר שאינו ניתן להשגה.

לעיתים ניתן להבחין בקשת משנית גדולה יותר, שצבעיה מהופכים, מסביב לקשת הראשונית ובזווית רחבה ממנה. לא נדון כאן בקשת המשנית בפרוטרוט, נאמר רק שהיא נוצרת בנסיבות דומות וכי היא תוצאה של החזרה כפולה של הקרניים בתוך טיפות הגשם (איור 27.32). בשל החזרה נוספת זו (ואיבודי אור משבירה נוספת), הקשת המשנית חיוורת בהרבה וסדר הצבעים בה מהופך - הסגול למעלה והאדום למטה.

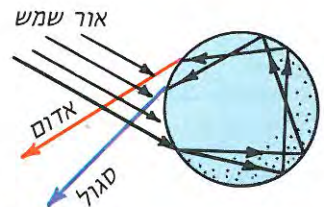
איור 27.32

החזרה כפולה בתוך טיפות המים יוצרת קשת משנית.



איור 27.31

רק טיפות המים שלאורך הקו המקוטע נמצאות בזווית 42° ביחס לצופה, ולכן קו זה מתאר את החלק האדום של הקשת.



שאלות

- הצביעו בזרוע מתוחה אל הקיר באופן שתיווצר זווית של 42° עם הכיוון המאונך לקיר, אחר כך סובבו את הזרוע בתנועה מעגלית מלאה תוך שמירה על זווית בת 42° בין הזרוע לאנך לקיר. איזו צורה גיאומטרית תתווה הזרוע בתנועתה? איזו צורה יתוו קצות האצבעות על הקיר?
- אילו היתה מהירות ההתקדמות של האור בטיפות הגשם שווה למהירות באוויר, האם עדיין יכלנו לראות קשת בענן?

תשובות:

- הזרוע תתווה מעטפת של חרוט וקצות האצבעות יתוו מעגל על הקיר, בדומה לקשת בענן. לא.



איור 27.33

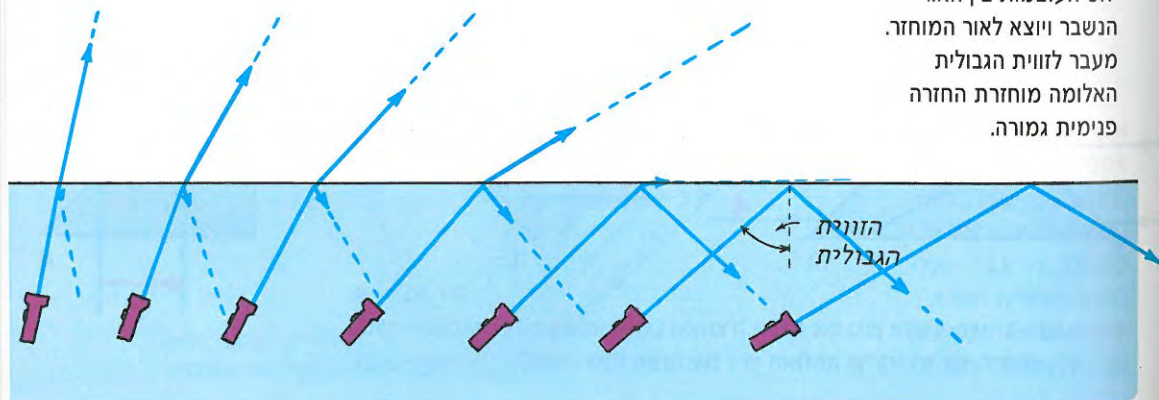
מתחת לקשת השמים
בהירים מפני שאלפי קשתות
חופפות מצטרפות ויוצרות
זוהר לבנבן.

החזרה פנימית גמורה

אם יזדמן לכם פעם לרחוץ באמבטיה בשעת לילה ויש לכם פנס צוללים אטום למים, נצלו את ההזדמנות וקחו אותו לתוך מי האמבטיה. כבו את האור בחדר האמבטיה, הדליקו את הפנס השקוע במים, כוונו אותו כלפי מעלה והתחילו להטות אותו בהדרגה הצידה. שימו לב כיצד נחלשת עוצמתה של קרן האור היוצאת מן המים וכיצד גדלה עוצמתה של האלומה המוחזרת מפני המים לכיוון קרקעית האמבטיה. תבחינו שבזווית מסוימת, הקרויה **הזווית הגבולית**, האלומה אינה בוקעת עוד לאוויר שמעל לפני המים. עוצמת הקרן היוצאת יורדת לאפס במצב שבו היא לוחכת את פני המים. אם תטו את הפנס מעבר לזווית הגבולית (48° מן האנך במקרה של מים), תראו שהאור מוחזר כולו אל תוך האמבט. זו החזרה פנימית גמורה. האור הפוגע במשטח הגבול בין המים לאוויר מקיים את חוק ההחזרה: זווית הפגיעה שווה לזווית ההחזרה. האור היחיד העולה מן המים הוא האור המוחזר החזרה מפורזת מקרקעית האמבטיה. התהליך כולו מתואר באיור 27.34. היחס בין עוצמת האור הנשבר לעוצמת האור המוחזר החזרה פנימית מסומן באמצעות האורך היחסי של החיצים.

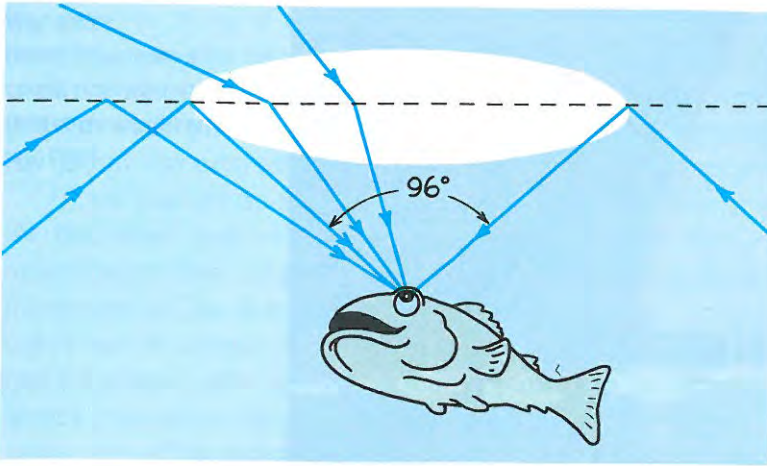
איור 27.34

אלומת אור הנשלחת במים
נשברת בחלקה, ובחלקה
מוחזרת משטח פני המים.
אורכי החיצים מציינים את
יחס העוצמות בין האור
הנשבר ויוצא לאור המוחזר.
מעבר לזווית הגבולית
האלומה מוחזרת החזרה
פנימית גמורה.



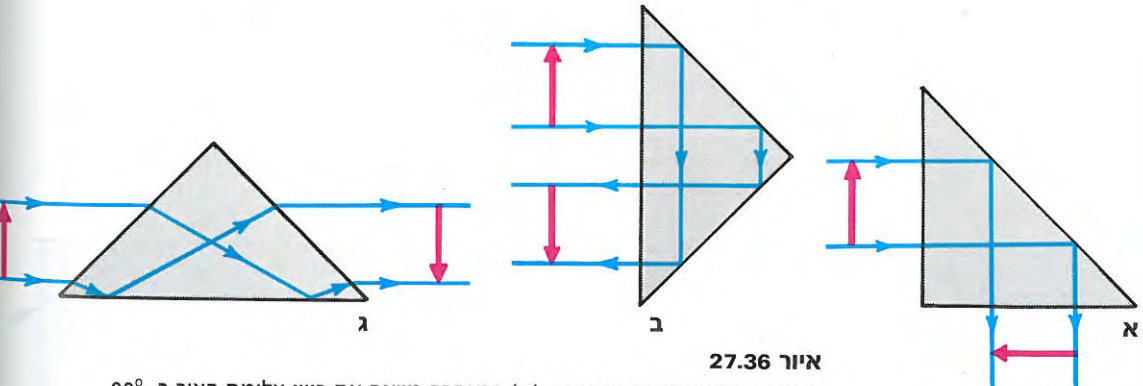
איור 27.35

הצופה מתוך המים רואה עיגול של אור בפני המים השקטים. מחוץ לחרוט בן 96° (כפליים מן הזווית הגבולית) הוא יראה השתקפות של פנים המים או של הקרקעית.



דג הזהב השוחה בקערה שעל השולחן מעיף מבט למעלה ורואה תמונה דחוסה של העולם שבחוץ (איור 27.35). את הנוף המשתרע על פני 180° מאופק לאופק הוא רואה בזווית בת 96° - פעמיים הזווית הגבולית. עדשה המכווצת באופן דומה את הנוף שממולה נקראת עדשת עין דג והיא משמשת לפעלולי צילום מיוחדים.

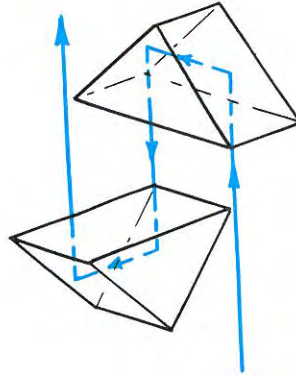
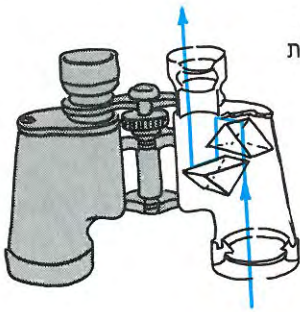
הזווית הגבולית בזכוכית היא 43° (בקירוב, בהתאם לסוג הזכוכית). משמעות הדבר היא שאור הפוגע בתוך הזכוכית בזווית גדולה מ- 43° יעבור החזרה פנימית גמורה. בזוויות גדולות יותר לא יימלט כל אור מהזכוכית - כולו יוחזר אל תוך הזכוכית. לעומת מראה מצופה כסף או שכבת אלומיניום, המחזירה רק כ-90 אחוזים מן האור הפוגע בה, הרי שמנסרות זכוכית כדוגמת אלה שבאיור 27.36 יעילות יותר. אמנם מעט מן האור אובד בהחזרה לפני כניסתו למנסרה, אך מרגע שנכנס לתוכה, ההחזרה בפניאה הנטויה בזווית 45° היא מלאה - 100 אחוזים של האור מוחזרים. יתר על כן, הימצאות של כתם או של אבק על משטח הזכוכית החיצוני אינה משבשת את ההחזרה המושלמת הזאת. זו הסיבה העיקרית לכך שבמכשירים אופטיים רבים משתמשים במנסרות ולא במראות.



איור 27.36

החזרה פנימית גמורה במנסרה. (א) המנסרה משנה את כיוון אלומת האור ב- 90° , (ב) ב- 180° , (ג) המנסרה אינה משנה את כיוון האלומה אך הופכת את הדמות.

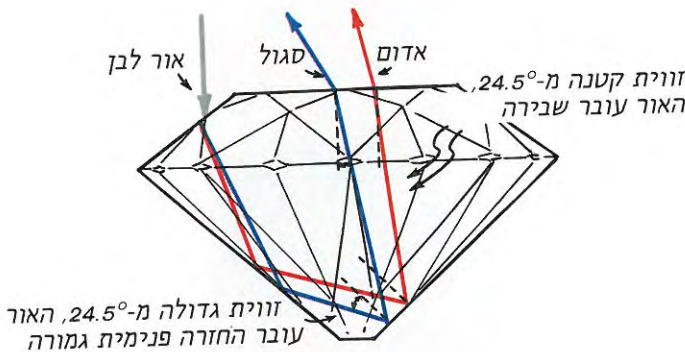
איור 27.38
משקפת בעלת
מנסרות.



איור 27.37
החזרה פנימית גמורה בזוג
מנסרות.

זוג מנסרות שכל אחת מהן מחזירה את האור ב- 180° מתואר באיור 27.37. זוג כזה של מנסרות משמש במשקפות שדה להארכת מסלול האור בין העדשות, ובכך נחסך הצורך בשפופרות ארוכות. כך יכולה משקפת שדה קטנה ונוחה לנשיאה להיות יעילה באותה מידה כמו טלסקופ ארוך (איור 27.38). יתרון נוסף שיש לשימוש במנסרות במשקפת שדה הוא שלעומת טלסקופ רגיל, שבו הדמות נראית הפוכה, ההחזרה במנסרות שבמשקפת הופכת את הדמות פעם נוספת וכך העצמים נראים ישרים. הדבר חשוב כשמתבוננים בעצמים מוכרים כמו בני אדם, בעלי חיים וכלי רכב באמצעות משקפת השדה, ופחות חשוב כשמתבוננים בגרמי שמים בטלסקופ.

הזווית הגבולית ביהלום היא 24.5° לערך - פחות מבכל חומר מוכר אחר. היא משתנה במעט מצבע לצבע, ממש כפי שמהירות האור בתוך היהלום שונה במקצת לצבעים השונים. משכנס האור לתוך יהלום מלוטש, רובו פוגע בצידה האחורי, המשופע, של האבן בזוויות גדולות מ- 24.5° ועובר החזרה פנימית גמורה (איור 27.39). עקב הירידה החדה במהירות האור בתוך היהלום, השבירה מודגשת ביותר ומתרחשת נפיצה גדולה. עוד נפיצה מתרחשת עם יציאת האור דרך המשטחים המלוטשים הרבים שבחלקו העליון של היהלום. כך אנו רואים הבזקים רבים ובלתי צפויים במגוון רחב של צבעים. מעניין לציין כי אם הבזקים אלה צרים דיים להיראות בעין אחת בלבד בכל פעם, היהלום נראה "מנצנץ".

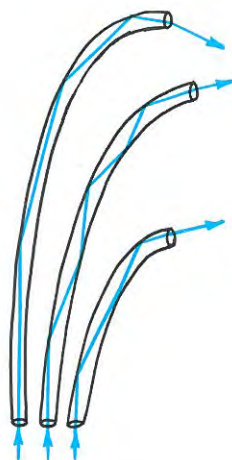


איור 27.39
מסלול האור ביהלום. קרניים הפוגעות במשטח הפנימי בזווית העולה על הזווית הגבולית, כ- 24.5° - תלוי בצבע, מוחזרות החזרה פנימית ובוקעות תוך שהן נשברות במשטח העליון.

החזרה פנימית גמורה עומדת גם ביסוד פעולתם של הסיבים האופטיים (איור 27.40). סיב אופטי מסוגל "לתעל" אור ממקום למקום במסלול נפתל בסדרה של החזרות פנימיות גמורות, כפי שקליע היה שב ונרתע תוך כדי התקדמותו בתוך צינור פלדה. קרני האור נרתעות מדפנות הסיב הפנימיות וכך הן מתקדמות במסלולו המתפתל של הסיב. סיבים אופטיים משמשים, בין השאר, במנורות שולחן מעוצבות, כמו גם להארת מצגי לוח המחוונים במכוניות באור מנורה יחידה. רופאי שיניים משתמשים בהם ובפנס חזק כדי להביא את האור למקום שבו הם זקוקים לו. צורות של סיבי זכוכית או פלסטיק דקיקים וגמישים מאפשרים צפייה במתרחש במקומות שהגישה אליהם קשה או בלתי אפשרית, כמו חלקיו הפנימיים של מנוע או פנים הקיבה של חולה בבית החולים. ניתן לעשותם דקים כל כך עד שאפשר להחדירם לכלי דם או לצינורות אחרים בגוף דוגמת דרכי השתן. האור מגיע דרך חלק מן הסיבים ומאיר את האזור, והוא מוחזר דרך סיבים אחרים ובכך מאפשר צפייה במתרחש.

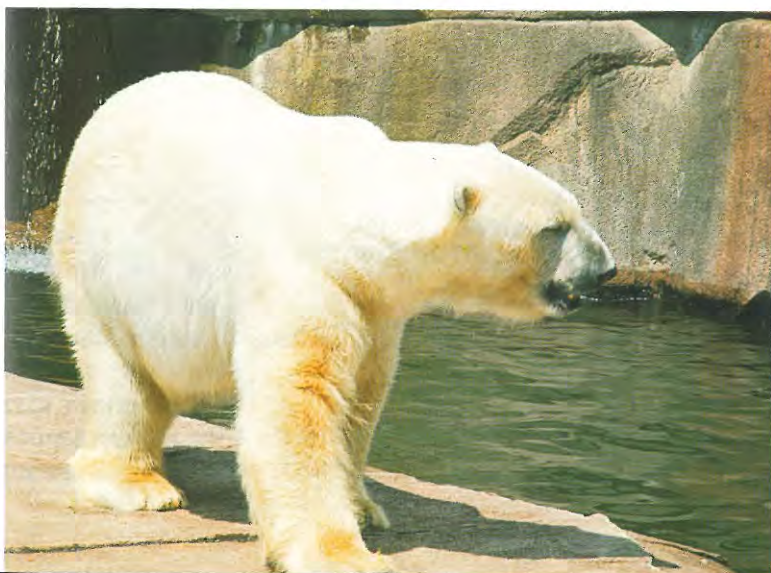
חשיבות רבה יש לסיבים האופטיים בתקשורת מפני שהם מהווים חלופה חשובה ביותר לכבלי הנחושת כאמצעי להעברת נתונים. באזורים צפופי אוכלוסייה, סיבים אופטיים דקים מחליפים כיום כבלי נחושת עבים, כבדים ויקרים להעברה בו-זמנית של אלפי שיחות טלפון בין מרכזות עמוסות. במטוסים רבים מוזנים כיום אותות הבקרה מהטייס אל משטחי הבקרה באמצעות סיבים אופטיים. האותות נישאים באפנון של אור לייזר. בניגוד לזרמי החשמל, האור אינו מושפע משינויי טמפרטורה או משינויים בשדות המגנטיים הסובבים אותו, ולכן האות המתקבל ברור יותר. ויתרון נוסף: הרבה יותר קשה לצותת לאות המועבר באמצעות אור ולא בזרמים חשמליים.

בטבע נוכל למצוא סיבים אופטיים בפרוותם של דובי הקוטב. שערות פרוותו של דוב הקוטב הן למעשה סיבים אופטיים שקופים. הפרווה נראית לבנה מפני שהאור הנראה מוחזר מפניה הפנימיים המחוספסים של כל שערה חלולה. אולם השערות לוכדות את האור העל-סגול. בדומה לאור שבתוך סיב אופטי, אנרגיית הקרינה הזאת מובלת דרך השערות אל עורו של הדוב. העור עצמו, שצבעו שחור, יעיל מאוד בבליעת אנרגיית השמש המגיעה אליו.



איור 27.40

(למעלה) האור מונחה למטה בסדרה של החזרות פנימיות גמורות עד ליציאתו בקצוות העליונים.



איור 27.41

שערותיו של דוב הקוטב הן צינורות אור שקופים שמעבירים אור על-סגול אל עורו, שצבעו הוא - נחשו מה? שחור! מהו לבן, שחור וחם כולו? דוב הקוטב תחת השמש הארקטית.