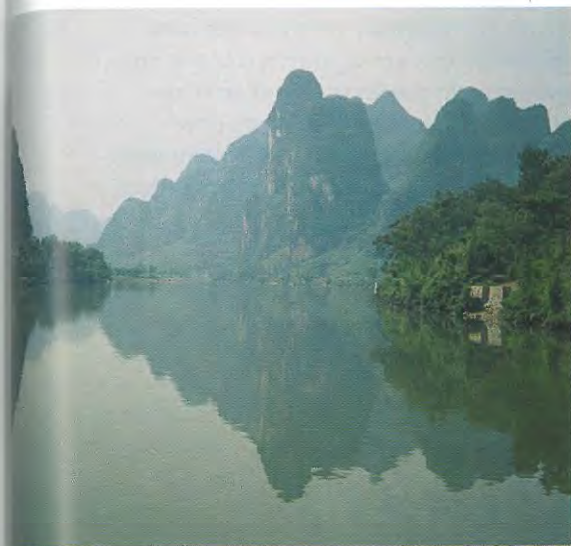


אור

חמש משגד! פוטוניק צגריי אנהיה מאר
 השמש מצורחין גנודו בהלחני האלקטרוניק של
 מולקולות הדלה הזה. אלק מהגנודו הן כה
 עצוב שהן גורמות להמחמות, ואלקן עציוני
 יוגר וגורמות לפלטת פוטוניק אחרים, הולמים
 אנו לא רק אה צורח הכללי של הדלה, אלא גם
 אה שקיפוט ואה פריטי פריטי העציוני. וא
 ממשבו שהם הגנודים
 בדצנוני האלקטרוניק! הם
 חוקרים בקצב המוצד של
 10¹⁶ גנודו בשנייה -
 ואכן הדלה ירוק!



תכונות האור



האור הוא הדבר היחיד שאותו אנו באמת יכולים לראות. אך מהו האור? אנו יודעים כי במשך היום מקור האור העיקרי הוא השמש, ומקור האור המשני הוא בהירות השמים. מקורות אור שכיחים אחרים הם להבות שונות, ובזמנים המודרניים - תילי להט מלובנים בנורות חשמל וחומרים זוהרים בשפופרות פלואורסצנטיות. בכל המקרים הללו נמצא כי מקורו של האור הוא בתנועתם המואצת של אלקטרונים. האור הוא תופעה אלקטרומגנטית, והוא מהווה אך חלק זעיר של מכלול גדול בהרבה - התחום הרחב של הגלים האלקטרומגנטיים המכונה הספקטרום האלקטרומגנטי. נפתח את דיוננו בחקירת תכונותיו האלקטרומגנטיות של האור. בפרק הבא נדון בתכונות המכונה צבע. בפרק 27 נלמד כיצד מתנהג האור במעבר בין חומרים - כיצד הוא מוחזר וכיצד הוא נשבר. בהמשך נלמד על טבעו הגלי של האור בפרק 28, ועל אופיו הקוונטי בפרקים 29 ו-30.

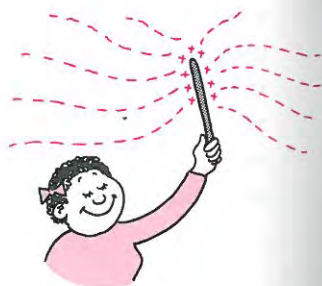
נדנדו קצה של מקל קדימה ואחורה בשלולית מים שקטה, ועל פני המים ייווצרו גלים מתפשטים. אם, בדומה לכך, תנדנדו מוט טעון במטען חשמלי הלוך ושוב בחלל הריק, ייווצרו בחלל גלים אלקטרומגנטיים (איור 25.1). זאת מפני שמטען נע הוא למעשה זרם חשמלי. מה מקיף את הזרם החשמלי? התשובה היא: שדה מגנטי. ומה מקיף זרם חשמלי משתנה? התשובה היא - שדה מגנטי משתנה. זיכרו כי בפרק הקודם למדנו ששדה מגנטי משתנה מְשִׁךְ שדה חשמלי משתנה, לפי חוק פאראדיי. ושדה חשמלי משתנה, מה הוא מחולל? לפי מקסוול, בהקבלה לחוק פאראדיי, שדה חשמלי משתנה מְשִׁר שדה מגנטי משתנה. השדה החשמלי והשדה המגנטי המתנדודים בונים ללא הרף זה את זה ויוצרים בכך גל

גלים אלקטרומגנטיים

אלקטרומגנטי, הבוקע ומתפשט מן המטען המתנווד כלפי חוץ. עוצמתם של השדות המושרים תלויה במידה רבה במהירות התפשטותם. הבה נראה מדוע.

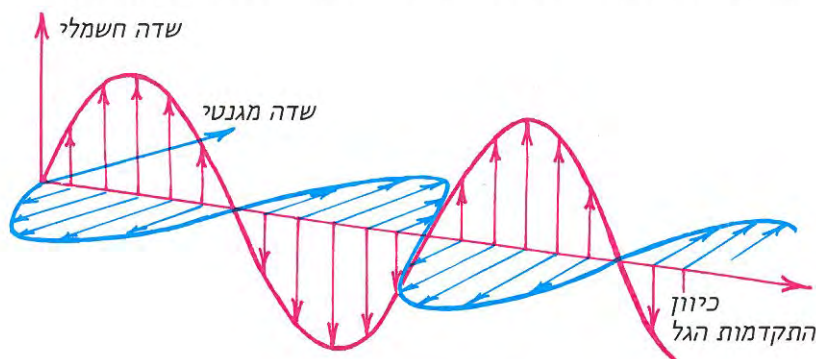
מהירות הגל האלקטרומגנטי

עוצמתו של כל אחד מהשדות המושרים אינה תלויה רק בקצב התנודות, אלא גם בתנועתם של השדות - במהירות שבה הם מתפשטים מן המטען המתנווד. ככל שהמהירות גדולה יותר, כך גדולה יותר עוצמתו של השדה המושרה: שדה מגנטי משתנה שמהירותו גבוהה משרה שדה חשמלי חזק יותר משדה מגנטי משתנה שמהירותו נמוכה, ולהיפך. אם מהירות ההתפשטות נמוכה, עוצמתו של השדה המושרה חלשה. אם המהירות נמוכה מדי, השדות המושרים הדדיים יגוועו. אך מה יעלה בגורלה של האנרגיה במקרה כזה? השדות מכילים אנרגיה שמקורה במטען המתנווד; אם השדות פשוט נעלמים מבלי להעביר את האנרגיה לצורה אחרת, פירוש הדבר הוא אנרגיה שנעלמת. מכאן שהתפשטות איטית של שדות חשמליים ומגנטיים אינה מתיישבת עם חוק שימור האנרגיה. לעומת זאת, אילו היתה מהירות ההתפשטות גדולה מדי, היו השדות המושרים גדלים והולכים, בתוך שהאנרגיות גדלות והולכות - גם זאת בניגוד מוחלט לחוק שימור האנרגיה. והנה, במהירות אחת מוגדרת תימשך ההשראה



איור 25.1

נדנדו גוף טעון במטען חשמלי - ותיצרו שדה אלקטרומגנטי.



איור 25.2

השדה החשמלי והשדה המגנטי בגל אלקטרומגנטי מאונכים זה לזה, ושניהם מאונכים לכיוון התקדמות הגל.

ההדדיות ללא הרף, בלא שאנרגיה תאבד או תגדל. ממשוואות ההשראה האלקטרומגנטיות שלו חישב מקסוול את ערכה של המהירות האחת והיחידה הזאת, ומצא כי היא שווה ל-300,000 קילומטרים בשנייה. אך זו בדיוק מהירות האור! מקסוול הבין עד מהרה כי הוא גילה את הפתרון לאחת התעלומות הגדולות של היקום - מהו טבעו של האור. שכן, אם יגרמו למטען החשמלי להתנווד בתחום התדירויות העצומות שבין 4.3×10^{14} ל- 7×10^{14} תנודות בשנייה, הגל האלקטרומגנטי שייוצר יפעיל את "האנטנות החשמליות" שברשתית העין. האור אינו אלא גלים אלקטרומגנטיים בתחום תדירויות זה! האור בתדירות הנמוכה נראה לנו כאדום ואילו האור בתדירות הגבוהה נראה סגול*.

* נהוג לתאר גלי קול וגלי רדיו באמצעות התדירות ואת האור באמצעות אורך הגל. אך בספר זה ניצמד לשימוש בתדירות לצורך תיאור האור.

בערבו של היום שבו גילה מקסוול את תגליתו הוא בילה עם גברת צעירה אחת, שאחר כך נשא אותה לאישה. בעת שטיילו בגן הָעִירָה הנערה כמה יפים וקסומים הם הכוכבים. על כך שאל אותה מקסוול מה היתה תחושתה אילו ידעה כי היא מטיילת עם האדם היחיד עלי אדמות היודע מהו באמת אור הכוכבים. שכן אלה היו פני הדברים. באותו זמן היה ג'יימס קלרק מקסוול האדם היחיד שידע כי אור מכל סוג שהוא הוא אנרגיה הנישאת בגלים של שדות חשמליים ומגנטיים שבונים זה את זה ללא הרף.

שאלה

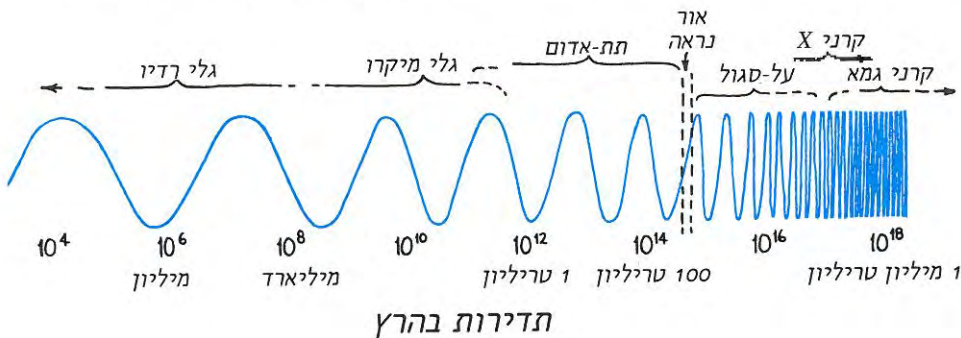
גודלה של המהירות הקבועה של הגלים האלקטרומגנטיים הוא תוצאה מרשימה של אחד העקרונות המרכזיים בפיסיקה. מהו העיקרון?

הספקטרום האלקטרומגנטי

ברִיךְ (ואקום) נעים כל סוגי הגלים האלקטרומגנטיים במהירות שווה, שנהוג לסמנה באות c (האות הראשונה של המילה האנגלית שפירושה "קבוע"). הגלים נבדלים זה מזה בתדירותם. סיווגם של הגלים האלקטרומגנטיים לפי תדירות הוא **הספקטרום האלקטרומגנטי** (איור 25.3). גלים אלקטרומגנטיים נתגלו בתדירויות נמוכות ביותר, החל ב-0.01 הרץ. גלים אלקטרומגנטיים שתדירויותיהם מצויות בתחום אלפי הרץ (כלומר כמה קילו-הרץ) מסווגים כגלי רדיו. תחום גלי הטלוויזיה של תדר גבוה מאוד (VHF) מתחיל בתדר של כ-50 מיליון הרץ (50 מגה-הרץ). גלים בתדרים גבוהים עוד יותר מכונים גלי מיקרו; בעקבותיהם באים הגלים בתת-אדום, שאותם מכנים לעיתים קרובות "גלי חום". תדרים גבוהים אף מאלה יש לאור הנראה, המהווה פחות ממיליונית האחוז של הספקטרום האלקטרומגנטי. התדר הנמוך ביותר של אור שאנו מסוגלים לראות נראה לנו אדום. התדירויות הגבוהות ביותר שהעין מסוגלת להבחין בהן גדולות כמעט כפליים מתדירות האדום ונראות לעינינו כסגול. תדירויות גבוהות יותר הן בתחום העל-סגול. לגלים גבוהי-תדר אלה

איור 25.3

הספקטרום האלקטרומגנטי הוא תחום רציף של גלים המשתרע מגלי הרדיו ועד קרני גמא. השמות שהוענקו לקטעי הספקטרום השונים נובעים בעיקר מסיווג היסטורי, שכן כל הגלים שווים במהותם, והם נבדלים זה מזה בתדירותם ובאורך הגל שלהם; כולם אותה מהירות בריק.



תדירות בהרץ

תשובה:

העיקרון היסודי שמכתיב את מהירות האור ואת מהירותם של כל יתר הגלים האלקטרומגנטיים הוא עקרון שימור האנרגיה.

אנרגיות גבוהות יותר והם עשויים לגרום כוויות-שמש לעור. תדירויות גבוהות עוד יותר, מעבר לעל-סגול, משתרעות אל תחום קרני X וקרני הגמא. לא קיימים גבולות חדים בין תחומים אלה, ולמעשה קיימת חפיפה חלקית ביניהם. עם זאת, נוה לחלק את הספקטרום לתחומים - שרירותיים במידה מסוימת - לצורך הסיווג.

המושגים והקשרים ביניהם שדנו בהם בעת שעסקנו בתנועה הגלית (פרק 18) ניתנים ליישום גם כאן. כזכור, תדירותו של גל שווה לתדירות תנודותיו של מקור הגל. כך גם כאן: תדירותו של הגל האלקטרומגנטי בעת שהוא מתנווד בחלל שווה לתדירותו של המטען החשמלי המתנווד שמחולל אותו. תדירויות שונות מתבטאות באורכי גל שונים - תדירויות נמוכות יוצרות גלים בעלי אורכי גל ארוכים ותדירויות גבוהות יוצרות אורכי גל קצרים. לדוגמה, מכיוון שמהירות הגל היא $300,000$ ק"מ בשנייה, מטען חשמלי המתנווד פעם אחת בכל שנייה (1 הרץ) ייצור גל בעל אורך גל של $300,000$ קילומטרים. זאת משום שבכל שנייה נוצר רק אורך גל אחד. לו היתה תדירות התנודות 10 הרץ, 10 אורכי גל היו נוצרים בכל שנייה, ולפיכך אורך הגל היה $30,000$ ק"מ. תדירות של $10,000$ הרץ היתה יוצרת אורכי גל של 30 קילומטרים. וכך, ככל שתדירות המטען המתנווד גדולה יותר, אורך הגל של הקרינה קצר יותר*.

אנו נוטים לחשוב על החלל שמסביבנו כריק מכל - אך זאת רק מפני שאיננו מסוגלים לראות את שפע הגלים האלקטרומגנטיים המחלחלים לכל פינה. חלק מן הגלים הללו אנו רואים, כמובן, בצורת אור. אך גלים אלה מהווים רק חלק זעיר של הספקטרום האלקטרומגנטי. איננו חשים בגלי הרדיו האופפים אותנו בכל רגע. האלקטרונים החופשיים בכל פיסת מתכת שעל פני כדור הארץ מחוללים ללא הרף לקצב הגלים הללו. הם מקפצים במתואם עם האלקטרונים המונעים מעלה-מטה לאורך אנטנות הרדיו והטלוויזיה בתחנות השידור. מקלט רדיו או טלוויזיה הוא פשוט התקן הממייך את הזרמים הזעירים הללו ומגבירים לפי הצורך. הקרינה מצויה בכל מקום. הרושם הראשון שנוצר בעת התבוננות ביקום הוא של חומר מחד וריקנות מאידך, אך בפועל היקום הוא אוקיינוס צפוף של קרינה, שבו צפים פה ושם גושים צפופים של חומר.

שאלה

האם נכון לומר שגל רדיו הוא גל אור בתדירות נמוכה? האם גל רדיו הוא גם גל קול?

תשובה:

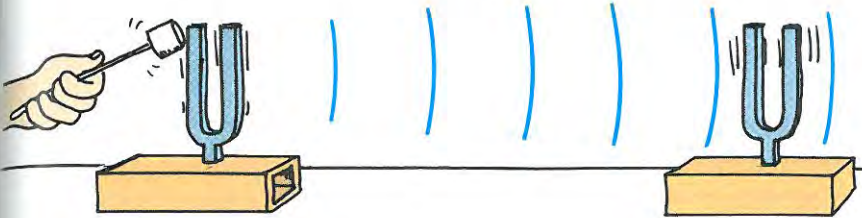
הן גל רדיו והן גל אור הם גלים אלקטרומגנטיים שמקורם בתנודות של אלקטרונים. לגלי רדיו תדירויות נמוכות יותר מלגלי אור, ולכן, מבחינה פיסיקלית אפשר להגדיר גל רדיו כגל אור בעל תדירות נמוכה (וגל אור כגל רדיו בעל תדירות גבוהה). אך גל קול הוא תנודה מכנית של חומר ואינו גל אלקטרומגנטי כלל. גל קול שונה באופן בסיסי מגל אלקטרומגנטי. גל רדיו בהחלט אינו גל קול.

* זיכור מלימודינו על גלי הקול כי מהירות הגל $v = f\lambda$. אם מהירות הגל היא המהירות הקבועה של האור c , אזי $c = f\lambda$, באשר f היא תדירות האור ו- λ אורך הגל.

חומרים שקופים

האור הוא אנרגיה הנישאת כגל אלקטרומגנטי שיוצא מאלקטרונים מתנדדים באטומים. כשהאור פוגע בחומר, חלק מן האלקטרונים שבחומר מאולצים להתנדוד. באופן כזה תנודות בגוף הפולט מועברות לתנודות בגוף הקולט. הדבר דומה לאופן שבו מועברים גלי קול (איור 25.4).

לפיכך, האופן שבו מגיב החומר הקולט בעת שהאור פוגע בו תלוי בתדירות האור ובתדירותם הטבעית של האלקטרונים בחומר. האור הנראה מתנדד בקצב גבוה ביותר - מעל מאה מיליוני מיליונים פעמים בשנייה (10^{14} הרץ). כדי שעצם טעון כלשהו ייענה לתנודות שתדירותן עצומה כל כך, עליו להיות בעל התמדה קטנה מאוד-מאוד. האלקטרונים קלים במידה מספקת להתנדוד בקצב כזה.

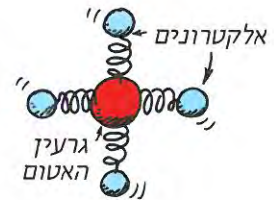


איור 25.4

כשם שגלי קול מסוגלים לעורר תנודות מאולצות בהתקן לקליטת קול, כך גל אור יכול לעורר תנודות מאולצות באלקטרונים שבחומר.

חומרים כמו זכוכית או מים מאפשרים לאור לעבור דרכם בקווים ישרים. אנזומרים שחומרים אלה **שקופים** לאור. כדי להבין כיצד עובר האור דרך חומר שקוף, נדמה לעצמנו את האלקטרונים שבאטום כאילו היו מחוברים באמצעות קפיצים (איור 25.5)*. כשפוגע באלקטרונים גל אור, הוא גורם להם להתנדוד.

חומרים קפיציים (אלסטיים) מגיבים לתנודות בתדירויות מסוימות יותר מלאחרות (פרק 18). פעמונים מצלצלים בתדירות מסוימת, קולנים מתנדדים בתדירות מסוימת, וכך נוהגים גם האלקטרונים באטומים ובמולקולות. תדירויות התנודה הטבעיות של אלקטרון תליות בחוזק הקשר שלו לאטום או למולקולה שבה הוא מצוי. למולקולות ולאטומים שונים "עוצמות קפיץ" שונות. תדירויות התנודה הטבעיות של האלקטרונים בזכוכית הן בתחום העל-סגול. כאשר קרניים על-סגולות פוגעות בזכוכית, מתרחשת תהודה שעה שהגל בונה ומקיים תנודה במשרעת גבוהה בין האלקטרונים לבין גרעיני האטומים שלהם, ממש כשם שדחיפת מישו היושב על נדנדה בתדירות התהודה גורמת למשרעת הולכת וגדלה. האנרגיה שקולט האטום עשויה לעבור לאטומים שכנים בהתנגשויות ביניהם, או לחזור ולהיפלט ממנו. אטומים בתהודה בזכוכית עשויים להחזיק



איור 25.5

ניתן לראות את האלקטרונים של אטומי הזכוכית כאילו הם קשורים לגרעין האטום באמצעות קפיצים.

* האלקטרונים כמובן אינם מחוברים באמצעות קפיצים. אנו מתארים "מודל קפיצים" של האטומים פשוט כדי להציג תמונה מוחשית שתקל עלינו להבין את פעולת הגומלין שבין אור לחומר. הפיסיקאים נוהגים להמציא מודלים מושגיים כאלה כדי להבין את הטבע, בפרט בתחומים שהם זעירים מכדי שנוכל לצפות בהם ישירות. ערכו של מודל אינו נעוץ במידת "אמינותו" אלא במידה שהוא מועיל. מודל טוב לא רק תואם את התצפיות ומסביר אותן, אלא גם חוזה תופעות העשויות להתרחש. אם תחזיות המודל נוגדות את המתרחש בפועל, יש לשפר את המודל או לזנוח אותו. המודל הפשטני שאנו מציגים כאן - של אטומים שהאלקטרונים שלהם מתנדדים כאילו היו מחוברים בקפיצים, תוך שחולף פרק זמן מסוים בין בליעת האנרגיה לבין פליטתה מחדש מן החומר - הוא מודל שימושי למדי להבנת האופן שבו אור עובר דרך חומרים שקופים.

באנרגיית האור העל-סגול למשך זמן לא מבוטל (כמאה מיליוניות השנייה). במשך זמן זה האטום מתנודד כמאה מיליון תנודות, והוא מתנגש בשכניו האטומים בתוך שהוא מוסר את האנרגיה שקלט בצורת חום. משום כך הזכוכית אינה שקופה לקרינה על-סגולה.

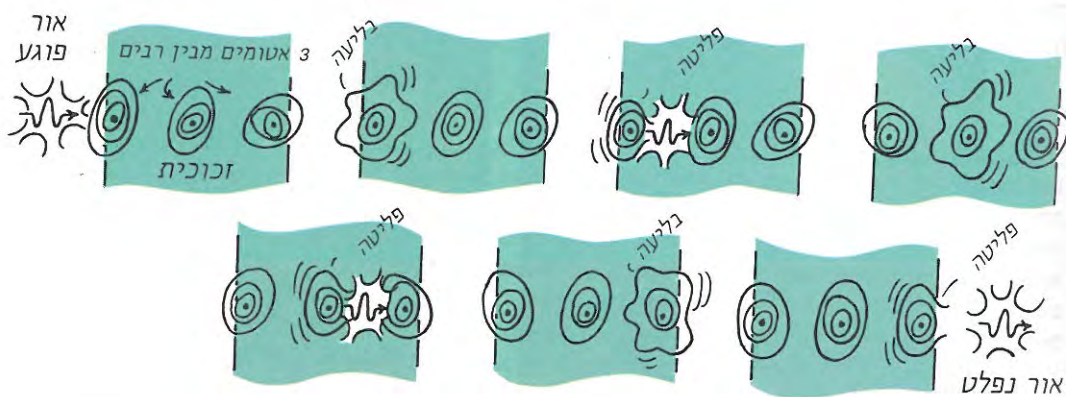
בתדירויות גל נמוכות יותר, כמו אלה של האור הנראה, האלקטרונים בזכוכית אמנם מאולצים להתנודד, אך במשרעות קטנות יותר. האטום או המולקולה מחזיקים באנרגיה לפרק זמן קצר יותר והסיכוי שיתנגשו באטומים או במולקולות שכנים קטן יותר, וכתוצאה מכך פחות אנרגיה הופכת לחום. אנרגיית האלקטרונים המתנודדים חוזרת ונפלטת בצורת אור. זכוכית בהירה הינה שקופה לכל תדירויות האור הנראה. תדירות האור הנפלט העובר ממולקולה למולקולה שווה בדיוק לתדירות האור שגרם לתנודות המקוריות. ההבדל העיקרי ביניהם הוא בפרק זמן קצר שחולף בין בליעת האור לבין פליטתו לאחר מכן.

עיקוב קצר זה בזמן הוא הגורם לכך שמהירות האור קטנה מעט במוצע בחומר השקוף (איור 25.6). האור מתקדם במהירויות ממוצעות שונות דרך חומרים שונים. אמרנו מהירות ממוצעת, מכיוון שמהירות האור בריק - בין שזהו הריק שבחלל החיצון ובין שזהו הריק שבין שתי מולקולות סמוכות בפיסת הזכוכית - היא גודל קבוע השווה ל-300,000 ק"מ בשנייה. הסימן המוסכם למהירות האור הוא האות c *. מהירות האור באטמוספירה של כדור הארץ קטנה במעט מערך זה, אך לרוב אפשר להתעלם מן ההבדל הזעום שבין מהירות האור באטמוספירה לבין c . מהירות האור במים היא 75 אחוזים ממהירותה בריק, או $0.75c$. מהירות האור בזכוכית היא בערך $0.67c$ - תלוי בסוג הזכוכית. ביהלום, האור מתקדם במהירות הקטנה ממחצית מהירותו בריק - רק $0.41c$. אך עם יציאתו של האור מן החומר השקוף לאוויר, הוא שב ומתקדם במהירותו המקורית, c .

גלים בתחום התת-אדום, שתדירויותיהם נמוכות מאלה של האור הנראה, אינם גורמים לתנודות של האלקטרונים בלבד אלא של מולקולות שלמות בגוף

איור 25.6

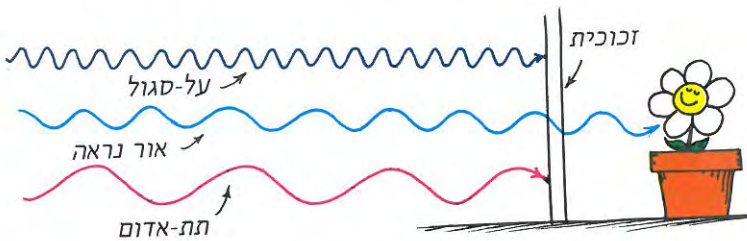
גל אור הפוגע בלוח זכוכית מעורר תנודות במולקולות, היוצרות שרשרת של בליעות ופליטות; בדרך זו אנרגיית האור עוברת דרך החומר ויוצאת מצידו השני. מכיוון שחולף זמן בין בליעת האור במולקולה לפליטתו ממנה, מהירות האור הממוצעת קטנה יותר בזכוכית.



* הגודל המדויק המוסכם של מהירות האור הוא 299,792,458 ק"מ/ש. אם יחולו שינויים בגודל זה עקב מדידות חדשות של מהירות האור, יגרום הדבר לשינוי בהגדרתו של המטר התקני אך לא לשינוי בערך מספרי זה של מהירות האור.

איור 25.7

הזכוכית חוסמת הן את הקרינה בעל-סגול והן את הגלים בתת-אדום, אך היא שקופה לכל תדירויות האור הנראה.



הזכוכית. תנודות אלו מגדילות את האנרגיה הפנימית ואת הטמפרטורה של החומר, וזו הסיבה לכך שלעיתים קרובות מכונים הגלים בתת-אדום גם גלי חום. הזכוכית שקופה לאור הנראה אך לא לאור על-סגול או לאור תת-אדום. (איור 25.7).

שאלות

- מדוע שקופה הזכוכית לאור הנראה אך אטומה לקרינה על-סגולה ותת-אדומה?
- תארו לעצמכם שאתם עוברים בחדר מצד לצד ומדי פעם עוצרים לרגע כדי לומר שלום למכרים "המכוונים לתדר" שלכם. כיצד דומה הדבר לאור העובר בזכוכית?
- במה שונה המצב המתואר בדוגמה מן התופעה האמיתית?

רוב העצמים שמסביבנו הם **אטומים** - הם בולעים את האור או מחזירים אותו, ואינם שבים ופולטים אותו. ספרים, שולחנות, כיסאות ובני אדם הם אטומים. תנודות שגורם האור לאטומים ולמולקולות בחומרים הבולעים אור הופכות לאנרגיה פנימית או לאנרגיה קינטית אקראית, דהיינו חום, ולעיתים לאנרגיה כימית. גם המתכות אטומות. מעניין לציין כי האלקטרונים החיצוניים של אטומי המתכות אינם קשורים כלל לאטומים מסוימים. הם חופשיים לנוע דרך החומר כמעט ללא מגבלות (וזו הסיבה לכך שמתכות מוליכות חשמל וחום היטב). כשאור פוגע במתכת וגורם לאלקטרונים החופשיים להתנווד, האנרגיה שלהם אינה "מדלגת" מאטום לאטום בחומר אלא מוחזרת לאחור. זו הסיבה לברק המתכתי.

חומרים אטומים

תשובות:

- לתנודות הטבעיות של האלקטרונים בזכוכית אותה תדירות כמו לאור העל-סגול, וכך מתרחשת תהודה בזכוכית בשעה שפוגע בה אור על-סגול. התנודות הנמרצות של האלקטרונים גורמות להיווצרות חום ואינן שבות ופולטות גלים, וכך הזכוכית אטומה בתדירויות גבוהות אלה. בתחום האור הנראה, התנודות המאולצות של האלקטרונים בזכוכית קלות יותר, כלומר - בעלות משרעות קטנות יותר, והם שבים ופולטים אור ואינם מייצרים חום; לפיכך הזכוכית שקופה לאור הנראה. גלים בתחום התת-אדום, שתדירותם נמוכה עוד יותר, גורמים לתנודה תהודתית של מולקולות שלמות ולא של אלקטרונים. במצב זה שוב נוצר חום - הזכוכית אטומה לקרינה זו.
- מהירות הממוצעת שבה תעברו את החדר תפחת בשל העיכובים הנובעים מן העצירות הקצרות. בדומה לכך, מהירות האור בזכוכית נמוכה ממהירותו בריק, בשל העיכובים הנובעים מפעולות הגומלין בין האור לבין אטומי הזכוכית.
- במקרה של מעבר בחדר, מי שהתחיל במעבר הוא גם זה שמגיע לקצהו האחר של החדר. לעומת זאת, כשאור עובר דרך חומר שקוף, האור הנפלט מאטום שבו נגרמה תנודה לאלקטרונים אינו אותו האור שגרם לתנודה, אף כי - בדומה לתאומים זהים - אי אפשר להבחין ביניהם.

אטמוספירת כדור הארץ שקופה לאור הנראה ולחלק מן הקרינה התת-אדומה. אך, למזלנו, היא אטומה למדי לגלים העל-סגולים בעלי התדירות הגבוהה. אותו חלק של הקרינה העל-סגולה שמצליח לעבור דרכה הוא הגורם לכוויות השמש. אילו היתה קרינה זו עוברת בשלמותה היינו נצלים כטוגנים (צ'יפס). שכבת האוזון שבאטמוספירה ממלאת תפקיד חשוב בחסימת הקרינה העל-סגולה. אחת הסכנות הסביבתיות החמורות שאנו נחשפים אליהן באחרונה היא הידלדלות שכבת האוזון. העננים שקופים למחצה לקרינה העל-סגולה, ולכן אפשר בהחלט להשתזף - ואף לספוג כוויות שמש - גם ביום מעונן. הקרינה העל-סגולה מזיקה לא רק לעור אלא גם לציפוי הזפת של גגות הבתים, לכן יש לסייד את שכבת הזפת או לכסותה בחול.

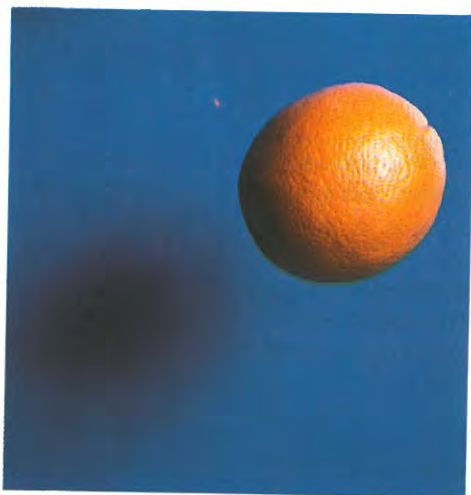
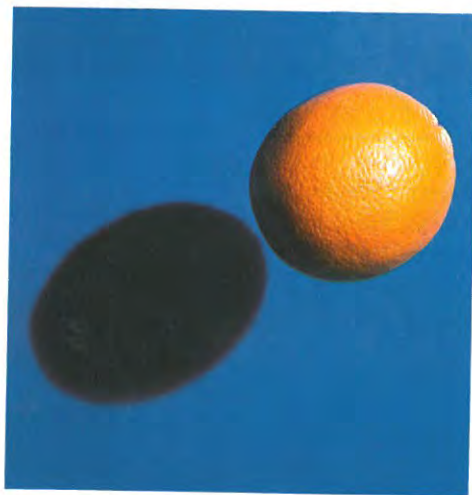


איור 25.8

למתכות יש ברק מתכתי מפני שאור שפוגע בהן גורם לתנודות באלקטרונים החופשיים, והם בתורם פולטים את גלי האור "שלהם" בצורת אור מוחזר.

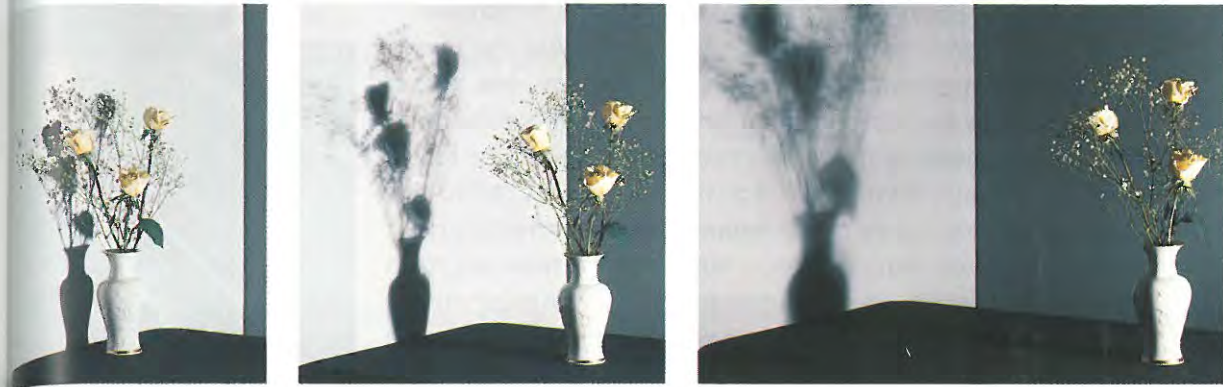
אלומה דקה של אור מכונה בשם קרן. כשאנו עומדים באור השמש, חלק מן האור נעצר בעוד הקרניים האחרות ממשיכות במסלוליהן הישרים. אנו מטילים **צל** - אזור שקרני השמש אינן יכולות להגיע אליו. אם הצל קרוב לגוף שמטיל אותו הוא יהיה חד, מכיוון שהשמש רחוקה מאוד. מקור אור גדול אך רחוק או מקור אור קרוב אך קטן ייצרו צל חד. אולם מקור אור גדול וקרוב ייצור צל מטושטש במידת מה (איור 25.9). בצל כזה יהיה, בדרך כלל, אזור כהה יותר במרכז ואזור בהיר יותר סמוך לשולי הצל. האזור שאור אינו מגיע אליו כלל נקרא **צל מלא** והאזור המוצל רק בחלקו נקרא **צל חלקי**. צל חלקי נוצר במקום שבו נחסמת דרכו של חלק מן האור אך חלק אחר של אור מגיע אליו. מצב כזה

אור וצל



איור 25.9

מקור אור קטן יוצר צל חד יותר ממקור אור גדול.



איור 25.10

עצם הסמור לקיר מטיל עליו צל חד מכיוון שהאור אינו יכול "להתגנב" מן הצד וליצור צל חלקי. אם מרחיקים את העצם מן הקיר נוצר צל חלקי על חשבון הצל המלא. אם העצם רחוק מאוד כלל לא נבחין בצל, מכיוון שהצללים החלקיים מתערבבים כולם אלה באלה ויוצרים תבנית מטושטשת על הקיר.

עשוי להתרחש במקום שבו האור ממקור אחד נחסם אך האור ממקור אחר מגיע (איור 25.10). צל חלקי נוצר גם במקום שבו האור ממקור רחב נחסם רק בחלקו.

הן הירח והן כדור הארץ מטילים צל בשל אור השמש הנופל עליהם. כשמסלולו של אחד מהגופים האלה מביא אותו אל תחום הצל שמטיל האחר, מתרחש ליקוי (איור 25.11). תופעה שהיא דוגמה מרשימה של הצל המלא והצל החלקי מתרחשת כשצילו של הירח נופל על כדור הארץ בשעת **ליקוי חמה**. בגלל גודלה העצום של השמש, הירח מטיל צל ההולך וקטן בצורת חרוט, כך שבהגיעו לכדור הארץ נותר רק אזור קטן מאוד של צל מלא ומסביבו אזור של צל חלקי (25.12). אם תעמדו באזור הצל המלא תזכו להתנסות בחוויה של חושך באמצע היום - ליקוי חמה מלא. אם תימצאו באזור הצל החלקי תראו ליקוי חמה חלקי, מפני שפיסת שמש דמוית מגל תהיה גלויה לעיניכם*. בזמן **ליקוי ירח** הירח נכנס לתחום הצל שמטיל כדור הארץ.

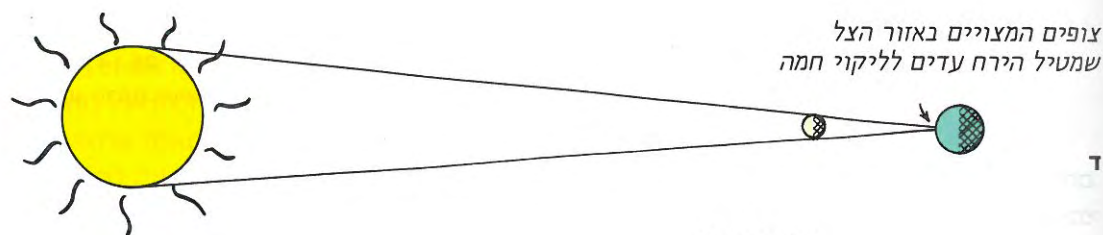
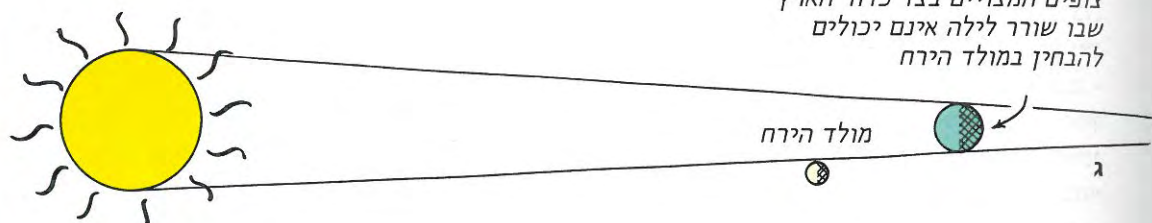
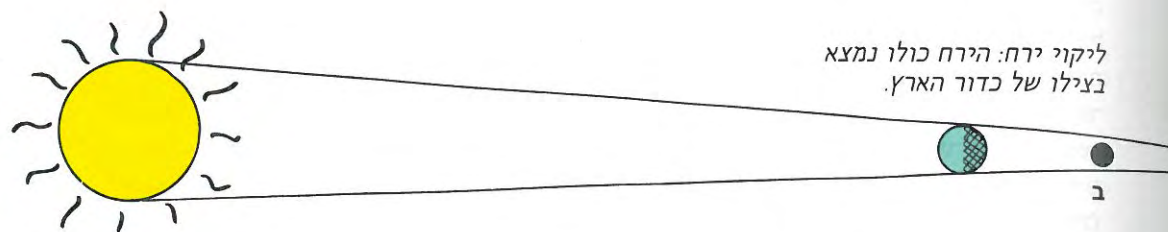
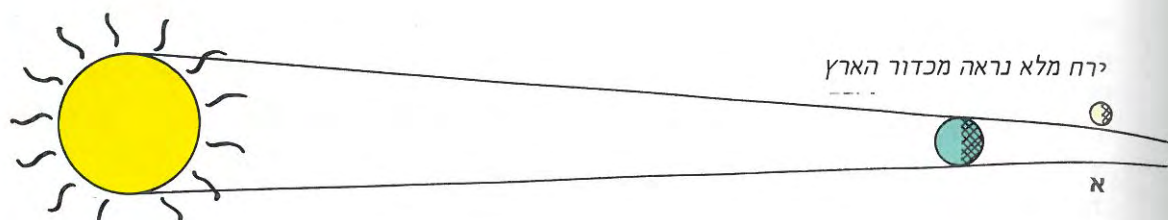
שאלות

1. באיזה ליקוי מסוכן לצפות בעיניים שאינן מוגנות - בליקוי חמה או בליקוי ירח? מדוע שכחים יותר ליקוי ירח מליקוי חמה?

תשובות:

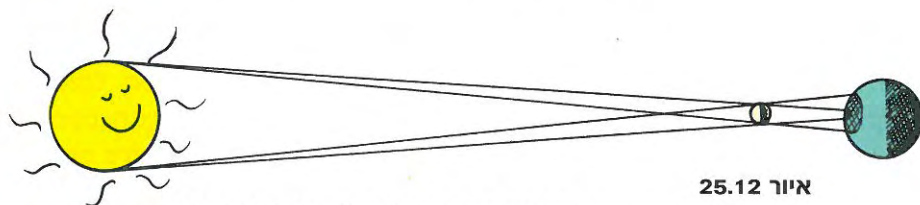
1. רק ליקוי חמה הוא מסוכן אם צופים בו ישירות. בזמן ליקוי ירח אנו מתבוננים בירח כהה מאוד. הוא אינו אפל לחלוטין מפני שאטמוספירת כדור הארץ פועלת כעדשה ומטה חלק מאור השמש אל תחום הצל. מעניין לציין שאור זה הוא האור הצובע את הזריחות והשקיעות באדום, ולכן הירח נראה בצבע אדום עמוק וחיוור בזמן ליקוי ירח.
2. צילו של הירח הקטן מכסה אזור קטן ביותר על פני כדור הארץ, הגדול ביחס אליו. לכן רק מעטים יימצאו בצל הירח בזמן ליקוי חמה. אך צילו של כדור הארץ מכסה לחלוטין את הירח בזמן ליקוי ירח מלא, ולכן כל מי שיצפה בשמי הלילה יוכל לראות את צילו של כדור הארץ על הירח.

* מסוכן לצפות בשמש בזמן ליקוי חמה, מפני שהאור הבהיר והקרניים העל-סגולות של קרינת השמש הישירה עלולים לגרום נזק חמור לעיניים. עצה טובה זאת מטעה לעיתים, ויש הסבורים שקרינת השמש מזיקה במיוחד בזמן ליקוי חמה. למען האמת, התבוננות בשמש הנמצאת גבוה בשמים מסוכנת תמיד! למעשה היא מסוכנת יותר כשהשמש כולה גלויה, אך האזהרה זוכה להדגשה יתרה בזמן ליקוי חמה, מפני שאז רבים מעוניינים לצפות בשמש; והיות שאז גם קל יותר לעשות זאת מבלי לעצום מיד את העין כתגובת החזר (רפלקס), הסיכון גובר אף יותר.



25.11 איור

(א) הירח נראה מלא כאשר כדור הארץ נמצא בינו לבין השמש. (ב) כאשר שלושתם נמצאים בדיוק על קו ישר, הירח מצוי בצילו של כדור הארץ ומתרחש ליקוי ירח. (ג) מולד הירח נראה כאשר הירח מצוי בין השמש לכדור הארץ. (ד) במצב זה, אם שלושת הגופים נמצאים בדיוק על קו ישר, צילו של הירח נופל על חלקו של כדור הארץ ומתרחש ליקוי חמה.



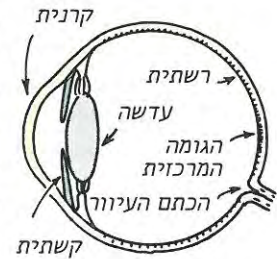
25.12 איור

פרטיו של ליקוי חמה. צופים המצויים באזור הצל המלא רואים ליקוי חמה מלא ואילו אלה המצויים באזור הצל החלקי רואים ליקוי חמה חלקי. רוב תושבי כדור הארץ אינם מבחינים כלל בליקוי.

אור הוא הדבר היחיד שאנו מסוגלים לראות באמצעות המכשיר האופטי המשוכלל שהטבע צייד אותנו בו - העין. תרשים של עין האדם מובא באיור 25.13.

לראות את האור: העין

האור נכנס לעין דרך שכבת כיסוי שקופה הקרויה קרנית, ובה חלה הטיה ניכרת של הקרניים - לערך 70 אחוזים מן ההטיה הדרושה. אז עובר האור דרך האישון, שהוא הפתח שבקשתית. אחר כך הוא עובר דרך העדשה, המטה את הקרניים הטיה נוספת. הטיה זו דרושה לצורך מיקוד דמותם של עצמים קרובים על השכבה שבאחורי חלל העין. שכבה זו - הרשתית - רגישה ביותר; רק לאחרונה הצליחו ליצור גלאי אור מלאכותיים רגישים יותר. אזורים שונים של הרשתית קולטים אור מחלקים שונים של שדה הראייה שבחוץ. הרשתית אינה אחידה. במרכז שדה הראייה ישנו כתם - הגומה המרכזית - מקום שבו כושר הראייה הוא החד ביותר. כאן אנו יכולים להבחין בהרבה יותר פרטים מאשר באזורי השוליים של הרשתית. לעומת זאת יש ברשתית אזור שבו יוצאים העצבים הנושאים את כל המידע שנקלט בעין. אזור זה הוא הכתם העיוור. תוכלו להיווכח בקיומו של הכתם העיוור בכל עין אם תחזיקו את הספר במרחק של זרוע פשוטה, תעצמו את עין שמאל ותתבוננו באיור 25.14 בעין ימין בלבד. ממרחק זה תוכלו לראות הן את העיגול והן את צורת ה-X. אם עתה תקרבו את הספר באיטיות אל פניכם כשעניכם הימנית מרוכזת בעיגול, תגיעו למצב - כשהספר במרחק 20-25 ס"מ מן העין - שבו ה-X יעלם. בתנאים רגילים העין השנייה "מעניקה גיבוי" בתחום שלו עיוורת העין האחת. למזלנו ניחנו בשתי עיניים. אך גם בהתבוננות רגילה בעין אחת, מערכת הראייה שלנו "משלימה" את החסר בשל הכתם העיוור באמצעים שונים, שאם לא כן היה נוצר "חור" בשדה הראייה שלנו בכל פעם שהיינו עוצמים עין אחת.



איור 25.13
עין האדם.

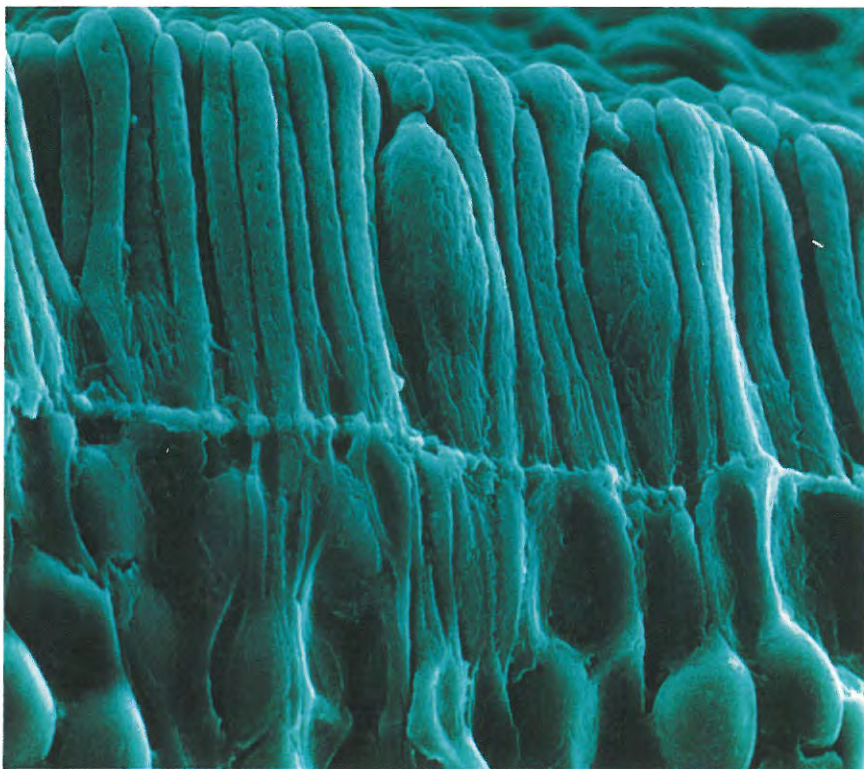


איור 25.14
ניסוי הכתם העיוור.

הרשתית מורכבת מקולטנים זעירים המגיבים בתהודה לאור הפוגע בהם. קיימים שני סוגים של קולטנים - "קנים" ו"מדוכים" (איור 25.15). כפי שמרמזים השמות, הקולטנים מן הסוג האחד הם מבנים דקים וארוכים, והאחרים, דמויי חרוט, קצרים ועבים יותר. ישנם שלושה סוגי מדוכים: מדוכים שאותם מעורר אור בתדירויות נמוכות, כאלה שמעוררות תדירויות ביניים, ומדוכים שמעורר אור נראה בתחום התדירויות הגבוהות. הקנים מרוכזים בקרבת שולי הרשתית ואילו המדוכים מרוכזים בקרבת הגומה המרכזית. בגומה המרכזית עצמה צפיפותם של המדוכים גדולה במיוחד, ולכן באזור זה הם צרים ועדינים הרבה יותר מאשר בשאר אזורי הרשתית. המדוכים הם המאפשרים ראיית צבעים. לכן נראה צבעים באופן ברור ביותר אם נמקד את הדמות בגומה המרכזית, שם אין קנים. הפרימאטים - המינים הקרובים לאדם בממלכת החי - ומין אחד של סנאים שוכני קרקע הם היונקים היחידים שלהם שלושה סוגי מדוכים ולפיכך ניחנו בראיית צבע מלאה. רשתיות היונקים האחרים מורכבות בעיקר מקנים, המסוגלים להבדיל בין אור לחושך בלבד, בדומה לתצלום או לסרט שחור-לבן.

איור 25.15

הקנים והמדוכים ברשתית
העין בהגדלה מרובה.



יש אנשים שראיית הצבעים שלהם לקויה; זאת בעיקר עקב חיסרון במדוכים או בשל פעילות לקויה שלהם. כאשר אנשים אלה - בעלי ראיית צבע לקויה - מתבקשים לבחור בגוון שיתאים לצבע המוצג בפניהם, הם יבחרו בגוון שונה מזה שבו נבחר רובנו. אף שהצבעים שהם רואים שונים מאלה שרואים רובנו, הם רואים צבעים, וזו הסיבה לכך שברוב המקרים לא מדויק להגדיר ליקוי זה כעיוורון צבעים. אנשים מעטים בלבד אינם רואים צבעים כלל והם עיוורי צבעים ממש, אך כ-10 אחוזים מאוכלוסיית הגברים - צעירים ומבוגרים - לוקים במידה זו או אחרת בראיית הצבעים שלהם. רוב הליקויים החלקיים בראיית צבע הם פגמים תורשתיים הקשורים לזוויג (זכר או נקבה): נשים מעטות בלבד לוקות בראיית הצבע שלהן, משום שהליקוי מופיע רק אם שני הורי האישה נשאו את הגן הפגום. הגברים, לעומת זאת, גם אם יירשו את הגן הפגום מהאם בלבד, גם אז יופיע הליקוי בנ.

הדרך הפשוטה ביותר לתאר ליקויים בראיית צבע היא באמצעות מספר הצבעים שעל האדם לערבב כדי להגיע להתאמה עם כל גוני הקשת. לבעלי ראייה רגילה דרושים שלושה אורות צבעוניים שונים כדי ליצור את כל הצבעים הנראים. שלושת סוגי המדוכים מתפקדים אצלם בשלמות. אצל בני אדם בעלי ליקוי בראיית צבעים לוקה לרוב אחד מסוגי המדוכים בתפקודו, ודרושים להם רק שני סוגי אורות צבעוניים כדי להתאימם עם כל הצבעים כפי שהם רואים אותם. למרבית הלוקים בראיית צבע די בתערובות שונות של הצבעים כחול



איור 25.16

בשוליו של שדה הראייה
תוכלו לראות עצם רק אם
הוא נע; בצבעו לא תבחינו
כלל.

וצהוב כדי לקבל את כל הגוונים שהם מסוגלים להבחין ביניהם. אין הם מסוגלים להבחין בין אדומים לירוקים, הנראים בעיניהם אפורים. (כמה תאונות דרכים ניתן היה למנוע אילו לקחו מהנדסי התחבורה בחשבון את לקויי הראייה בעת שתכננו את הרמזורים הראשונים?) מעטים מן הלוקים בראיית צבעים אינם מבחינים בצהוב ובכחול, ואת כל הצבעים שהם מכירים ניתן להתאים באמצעות אדום וירוק בלבד. לאותם מעטים שהם עיוורי צבעים לחלוטין דרוש צבע אחד בלבד (כל צבע שהוא - כולם שווים בעיניהם) כדי להתאים את מה שהם מסוגלים לראות. אנשים אלה אינם רואים צבעים כלל; העולם נראה בעיניהם כסרט שחור-לבן.

לרוב, ליקויי בראיית צבע אינו מצב של הכול או לא-כלום. אנשים רבים רואים למעשה את כל הצבעים וזקוקים לשלושה גוונים כדי להתאים את שלל צבעי הקשת, אך דרושה להם לשם כך כמות חריגה של אחד הצבעים. אדם הלוקה בראיית ירוק יראה את הדשא באביב כירוק-אפרפר, אך עדיין הוא מסוגל להכיר בירוק כצבע נפרד. לעומת זאת, מי שהינו עיוור לאדום-ירוק אינו מסוגל להבחין בירוק כלל, חוץ ככל שיהיה צבעו של המקור.

מספר המדוכים בעין האנושית קטן ככל שמתרחקים מן הגומה המרכזית. עובדה מעניינת היא שצבעו של עצם נעלם אם מתבוננים בו בשולי שדה הראייה. תוכלו להבחין בכך אם תבקשו מחברה להיכנס אל תחום שדה הראייה שלכם כשהיא מחזיקה בידה חפץ שצבעו בולט. תגלו שאתם מסוגלים לראות את החפץ לפני שתוכלו לזהות את צבעו.

עוד עובדה מעניינת ביותר היא ששולי הרשתית רגישים ביותר לתנועה. אף שאיננו רואים היטב בזווית העין, אנו רגישים לכל תנועה המתרחשת שם. אנו "מתוכנתים" להבחין בכל תזוזה קלה המתרחשת סמוך לגבולות שדה הראייה שלנו. לתכונה זו בוודאי היתה חשיבות רבה במהלך התפתחותנו האבולוציונית. בקשו איפוא מחברה לנדנד עצמים בעלי צבעים בולטים כשהיא מכניסה אותם לשולי שדה הראייה שלכם. אם אתם מסוגלים להבחין אך בקושי בעצמים כשהם מתנדנדים אך לחלוטין אינכם מבחינים בהם כשהם מוחזקים נייחים, אזי לא תוכלו לומר מה צבעם (איור 25.16). נסו ותיווכחו:

עוד תכונה שבה נבדלים המדוכים מן הקנים היא עוצמת האור שהם מסוגלים להגיב לה. למדוכים דרושה אנרגיה רבה יותר כדי שיוכלו לשגר דחף עצבי המודיע על קליטת האור. אם עוצמת האור נמוכה מאוד, העצמים שאנו רואים הם חסרי צבע. אנו רואים עוצמות אור נמוכות באמצעות הקנים. עיניים שהסתגלו לראות בחושך משתמשות באופן בלעדי כמעט בקנים, ואילו ראייה באור בהיר נעשית במדוכים. הכוכבים, למשל, נראים בעינינו לבנים, אך בפועל לרוב הכוכבים צבעים עזים למדי. אם נצלם את הכוכבים צילום ממושך בסרט צילום צבעוני, נקבל דמויות אדומות עד כתומות לכוכבים "הקרירים" יותר ודמויות כחולות עד סגולות לכוכבים "הלוהטים" יותר. אך אור הכוכבים חלש מלהפעיל את המדוכים, האחראיים לראיית הצבעים, ולכן אנו רואים את הכוכבים בקנים והם נקלטים בתודעתנו לבנים, ולכל היותר בעלי גוונים חיוורים. סף ההפעלה של המדוכים אצל הנשים נמוך במעט מזה שאצל הגברים, והן מסוגלות לראות מעט יותר צבע מהם. לכן, אם היא אומרת כמה יפים צבעי הכוכבים ואתה אינך מבחין בכך, קרוב לוודאי שהצדק איתה!

רגישותם של הקנים פוחתת באור בהיר. נמצא גם שהקנים מיטיבים "לראות" מן המדוכים בקרבת הקצה הכחול של הספקטרום. המדוכים רגישים לאור אדום יותר מאשר לאור כחול - הם מסוגלים לראות אדום עמוק שבו אין הקנים מבחינים כלל. ככל שהדבר נוגע לקנים, האור האדום הזה יכול היה שלא להתקיים כלל. לפיכך, אם לפניכם שני עצמים צבועים, האחד אדום והאחר כחול, הכחול יראה בהיר בהרבה מהאדום באור חיוור ואילו האדום עשוי להיות בהיר בהרבה באור חזק. זו תופעה מעניינת למדי. נסו לערוך את הניסוי הבא: בחדר אפל מיצאו כתב עת צבעוני או חפץ דומה, ובטרם תוכלו להבחין בוודאות בין הצבעים נסו להחליט אילו בהירים ואילו כהים יותר. אחר כך קחו את העיתון למקום מואר היטב. תבחינו כי ההבדלים בין הצבע הבהיר ביותר לחיוור ביותר מתחדדים*.

מעניין לציין כי הקנים והמדוכים שברשתית אינם קשורים ישירות לעצב הראייה, אלא מחוברים לתאי ביניים. רבים מן התאים האלה מקושרים ביניהם, אך רק מעטים מהם מעבירים מידע לעצב הראייה. באמצעות קשרים הדדיים אלה, מידע ממספר קולטני ראייה משולב ואף "מעובד" ברשתית. באופן זה אות האור שנקלט עובר מעין "חשיבה ראשונית" לפני שהוא מועבר לעצב הראייה ולמוח. כך מתבצעת מעין פעילות מוחית בעין עצמה. פעולת "חשיבה" מסוימת נעשית כבר בעין.

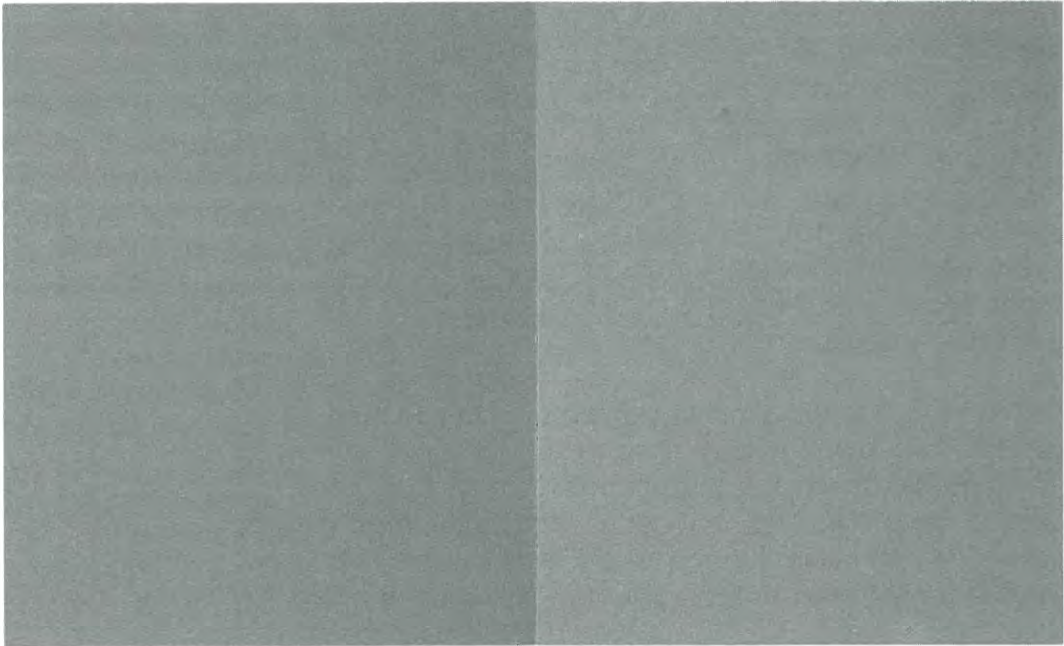
הקשתית, החלק הצבעוני שבקדמת העין, עשויה לשטות בפעולת חשיבה זאת. הקשתית היא שמרחיבה ומצרה את האישון וקובעת את כמות האור הנכנסת לעין בעקבות שינויים שחלים בעוצמתו. מתברר כי השיעור היחסי של הרחבת האישון או הצרתו תלוי גם ברגשותינו. כשרואים, מריחים, טועמים או שומעים דבר נעים, האישונים מתרחבים מעצמם. כשרואים, מריחים, טועמים או שומעים דבר דוחה, מיד מתכווצים האישונים מעצמם. קלפנים מומחים מסוגלים לשטות ביריביהם בדבר איכות הקלפים שברשותם באמצעות שליטה בגודל אישוניהם! (ישנו ענף מחקר מיוחד העוסק בקשר שבין מצב הרוח לגודל האישונים).



איור 25.17
גודל האישון תלוי במצב הרוח.

העין האנושית מסוגלת לקלוט דרגות בהירות המשתנות בטווח יחסי שבין 500 מיליון ל-1. יחס הבהירויות שבין השמש לירח, למשל, הוא 1 מיליון ל-1. ואולם, בשל תכונה של העין המכונה עכבה צידית איננו חשים בהבדל בין הבהירויות כפי שהוא. תכונה זו מונעת את השתלטותם של האזורים הבהירים ביותר על האזורים האחרים בשדה הראייה, בכך שעם שיגור אות בהירות חזק למוח מאחד התאים הקולטנים שברשתית, התא גם מעביר הוראה לתאים השכנים לו להחליש את תגובתם. בדרך זו מושג איזון בין האזורים הבהירים לכהים, המאפשר לנו להבחין בפרטים הן בתחומים הבהירים והן בתחומים

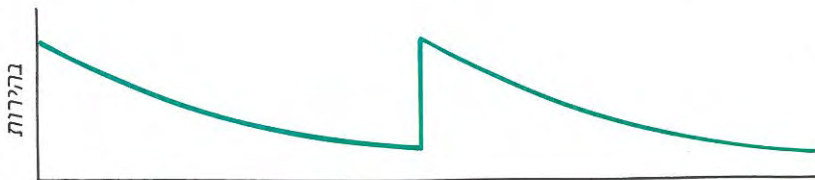
* התופעה נקראת אפקט פורקינייה, על שם הפיסיולוג הציכי שגילה אותה.



איור 25.18

שני המלבנים בהירים במידה שווה. כסו את הגבול ביניהם בעיפרון ותיווכחו.

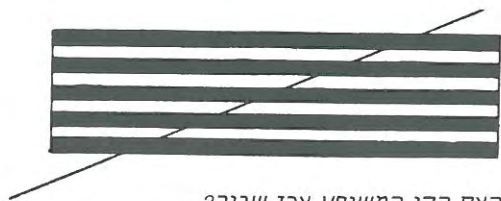
הכחים של שדה הראייה. העכבה הצידית מגדילה את הפרשי הבהירות, כפי שאנו תופסים אותה, בקצותיהם של אזורים בשדה הראייה. קצוות אלה הם, כמובן, הגבולות שבין דבר אחד למשנהו. הראייה מדגישה איפוא הבדלים ולא דברים דומים. באיור 25.18, המלבן האפור משמאל נראה כהה יותר מהמלבן האפור מימין כאשר אנו רואים את קו הגבול המפריד ביניהם. אך אם תכסו גבול זה בעיפרון או באצבע, שניהם ייראו בהירים במידה שווה. ואכן, שני המלבנים בהירים במידה שווה; כל אחד מן המלבנים משתנה בבהירותו - מבהיר לכהה - משמאל לימין. העין מתרכזת בגבול שבו קצהו הכהה של המלבן השמאלי פוגש בקצה הבהיר של המלבן הימני, והמערכת עין-מוח מניחה שזה המצב גם לגבי יתר המלבן. תשומת ליבנו מרוכזת בגבול על חשבון היתר.



איור 25.19

עקום המתאר את השתנות הבהירות של המלבנים שבאיור 25.18.

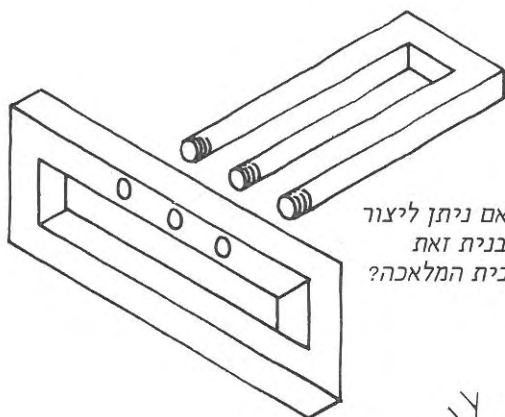
הרי לכם שאלות להרהר בהן. האם האופן שבו העין בוחרת להתרכז בקצוות ומניחה הנחות לגבי מה שמצוי מעבר להם דומה לאופן שבו אנו דנים לעיתים בני אדם שונים ותרבויות אחרות? האם איננו נוטים להפריז בהבדלים הנראים מבחוץ ולהתעלם מקווי הדמיון ומן ההבדלים הדקים שמתחת לפני השטח?



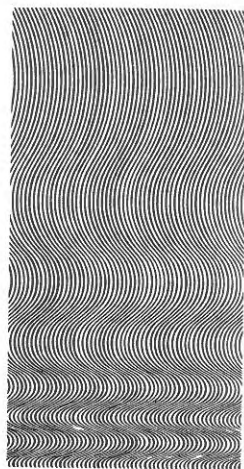
האם הקו המשופע אכן שבור?



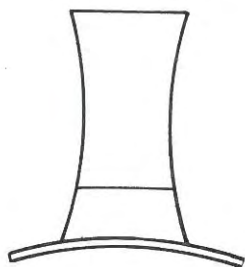
האם הקטעים מימין קצרים יותר?



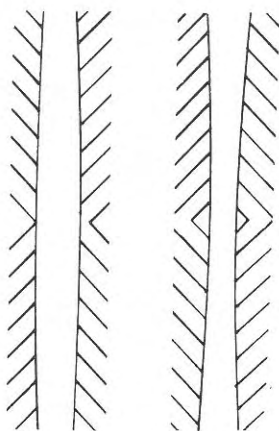
האם ניתן ליצור
תבנית זאת
בבית המלאכה?



האומנם הקווים
נעים?



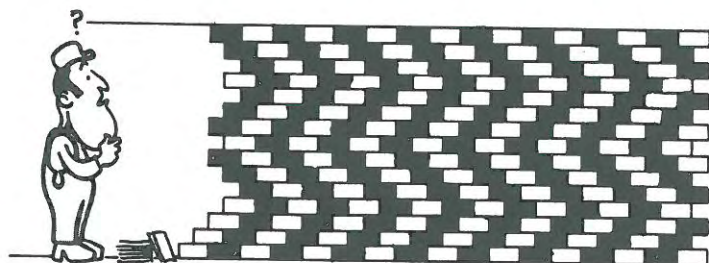
האם גדול יותר גובה
הכובע מרוחב שוליו?



האם הקווים האנכיים
מקבילים?



מה אומר התמרור?



האם אכן הלבנים מתעקלות?

8. מהו אור?

הספקטרום האלקטרומגנטי

9. מה ההבדל העיקרי בין גל רדיו לבין אור?

10. מה ההבדל העיקרי בין אור לבין קרני X?

11. איזה חלק של הספקטרום האלקטרומגנטי הנמדד מהווה האור?

12. מה צבעו של האור הנראה בתדירויות הנמוכות ביותר? ובגבוהות ביותר?

13. מה היחס בין תדירות האור לבין תדירותו של האלקטרון המתנדנד המחולל את האור?

14. מה הקשר בין אורך הגל של האור לבין תדירותו?

15. מהו אורך הגל של גל שתדירותו 1 הרץ ומהירותו 300,000 ק"מ/ש?

16. מהו אורך הגל של גל שתדירותו 10^{18} הרץ ומהירותו 300,000 ק"מ/ש?

17. באיזה מובן נכון לומר שהחלל החיצון למעשה אינו ריק?

חומרים שקופים

18. קולן מתנווד יכול לגרום לקולן שני, סמוך לו, להתחיל להתנווד. מהי ההקבלה כשמדובר באור?

19. באיזה תחום של הספקטרום האלקטרומגנטי נמצאת תדירות התהודה של האלקטרונים בזכוכית?

20. מה עולה בגורל האנרגיה של אור על-סוגל הפוגע בזכוכית?

21. מה עולה בגורל האנרגיה של אור נראה הפוגע בזכוכית?

22. מדוע התשובות לשאלות 20 ו-21 שונות זו מזו?

23. מה הקשר בין תדירותו של האור ששב ונפלט מחומר לבין תדירותו של האור שגרם לפליטתו?

24. מה הקשר בין מהירותו הממוצעת של האור בזכוכית לבין מהירותו בריק?

25. מדוע נוהגים לכנות את הגלים בתת-אדום גלי חום?

חומרים אטומים

26. מדוע מתחממים חומרים אטומים-בולעים כשנופל עליהם אור?

27. מה גורם לברק המתכתי של מתכות?

28. מדוע יש כמה תשובות לשאלה: האם שקופה אטמוספירת כדור הארץ?

תקציר מונחים**גל אלקטרומגנטי** גל נושא אנרגיה הבוקע מאלקטרון מתנווד ומורכב משדה חשמלי ומשדה מגנטי מתנוודים הבונים זה את זה הדדית.**הספקטרום האלקטרומגנטי** תחום הגלים האלקטרומגנטיים שטווח תדירותיו משתרע מגלי רדיו עד קרני גמא.**שקוף** חומר הוא שקוף אם אור יכול לעבור דרכו בקו ישר.**אטום** חומר אטום בולע את האור בלא לשוב ולפלוט אותו, או שהוא מחזיר את האור ולכן האור אינו יכול לעבור דרכו.**צל** התחום הכהה המופיע במקום שקרני האור שנחסמו על ידי גוף אינן מגיעות אליו.**צל מלא** חלקו הכהה של הצל, שכל קרני האור נחסמו מלהגיע אליו.**צל חלקי** האזור הבהיר יותר בצל, שחלק מקרני האור מגיעות אליו, והאחרות נחסמות ואינן מגיעות אליו.**ליקוי חמה** האירוע המתרחש כאשר הירח חוסם את אור השמש ומטיל את צילו על חלק מכדור הארץ.**ליקוי ירח** האירוע המתרחש כאשר הירח נכנס לתוך תחום הצל של כדור הארץ.**שאלות חזרה**

1. האם האור מהווה חלק גדול יחסית או קטן יחסית של הספקטרום האלקטרומגנטי?

גלים אלקטרומגנטיים

2. מה משרה שדה מגנטי משתנה?

3. מה משרה שדה חשמלי משתנה?

4. מהם שני רכיביו של השדה האלקטרומגנטי?

מהירות הגלים האלקטרומגנטיים

5. באילו שני גורמים תלויה עוצמתו של שדה מגנטי מושרה או של שדה חשמלי מושרה?

6. מה מכילים שדה מגנטי ושדה חשמלי?

7. מה הקשר בין שימור האנרגיה לבין המהירות שבה גלים אלקטרומגנטיים בוקעים ממטען מתנווד?

השנייה והפחתת כמות האור שמגיעה אליה גורמת להתרחבותם של שני האישונים, גם של זה המתבונן מבעד לנקב. תבחינו כי שני האישונים מתרחבים כשתראו את עיגול האור גדל תוך כדי התבוננות בנקב הסיכה.

אור וצל

29. מה ההבדל בין צל מלא לצל חלקי?

30. האם תמיד מטילים כדור הארץ והירח צל? כיצד נקרא האירוע שבמהלכו עובר אחד משני גופים אלה בתחום הצל של האחר?

לראות את האור: העין

31. מה ההבדל בין הקנים לבין המדוכים שברשתית העין, וכיצד הם נבדלים בתפקודם?

32. מהן שתי התכונות המיוחדות המאפיינות את הראייה בהיקף שדה הראייה של האדם?

33. מה הסיבה לכך שהן הכוכבים האדומים והן הכוכבים הכחולים נראים לעינינו לבנים?

34. מה הראיות לטענה כי כבר בעין מתבצעת פעולת "חשיבה" (עיבוד מידע) מסוימת?

35. כיצד מבליטה מערכת הראייה שלנו הבדלים בין אזורים שונים המצויים בשדה הראייה שלנו?

תרגילים

1. לאילו מן הגלים הבאים אורכי הגל הארוכים ביותר: גלי אור, קרני X או גלי רדיו?

2. אילו ראיות תוכלו להביא לטענה שהאור מסוגל להתקדם בריק (ואקום)?

3. מדוע ניתן לצפות לכך שמהירות האור באטמוספירה תהיה קטנה במעט ממהירותו בריק?

4. אם תירו קליע אקדח דרך עץ, מהירותו תפחת בתוך העץ והוא יצא מציודו השני במהירות קטנה מזו שבה נכנס אליו. האם, בדומה לכך, פוחתת גם מהירותו של האור בעת שהוא עובר דרך זכוכית, והוא יוצא מצידה האחר במהירות מופחתת? נמקו!

5. האם הזכוכית שקופה לאור שתדירותו תואמת את אחת מתדירויותיה הטבעיות? הסבירו.

6. מה קובע אם חומר הוא שקוף או אטום?

7. אתם עשויים ללקות בכוויות שמש ביום מעונן, אך לא תלקו בכוויות שמש אפילו בשמש חזקה אם תימצאו מאחורי זכוכית. הסבירו.

8. מדוע נבלעת קרינה על-סוגלה בזכוכית?

9. נניח שאור השמש פוגע בשני זוגות משקפיים: משקפי קריאה בהירים ומשקפי שמש. איזה משני הזוגות תצפו שיהיה חם יותר בשמש? נמקו.

10. מדוע, למעשה, אין מטוס מגביה טוס מטיל כל צל על הקרקע ואילו מטוס מנמך טוס מטיל צל ברור?

11. רק מעטים בציוד המואר של כדור הארץ יכולים לצפות בליקוי חמה בעת התרחשותו, אך כל מי שמצוי בציוד של כדור הארץ שבו שורר לילה יכול לצפות בהתרחשותו של ליקוי ירח. מה הסיבה לכך?

12. האם יכול ליקוי ירח להתרחש סמוך לזמן מולד הירח, כשצורתו צורת חרמש, או בעת שהוא חצי מלא? או שמא תמיד נמצא הירח במילואו בעת שצל כדור הארץ חולף עליו? הסבירו.

13. אור ממקור שאתם מרכזים בו את תשומת ליבכם נופל על הגומה המרכזית ברשתית עינכם, המכילה מדוכים

מטלות בית

1. השוו את גודלו של הירח באופק לגודלו גבוה בשמים. דרך אחת לערוך השוואה זו היא להחזיק ביד פשוטה לפנים עצם - למשל עט עבה - שבדיוק יכסה את הירח. נסו זאת עד שתמצאו את החפצים המתאימים. תגלו שרוחבו של עצם כזה קטן מסנטימטר אחד, והדבר תלוי באורך הזרוע. האם באמת גדול יותר הירח הסמוך לאופק?

2. באיזו עין אתם מרבים להשתמש? כדי לבחון איזו היא העין המועדפת, החזיקו אצבע זקופה במרחק של זרוע פשוטה. בשתי עיניים פקוחות צפו בעצם הנמצא הרחק מעבר לאצבע. עתה עיצמו את עין ימין. אם האצבע נראית כאילו קפצה לצד ימין, אזי אתם מרבים להשתמש בעין ימין.

3. הרי לכם דרך לעקוב אחר גודל האישונים בעיניכם. באמצעות אטב ניירות קטן (סיכה משרדית), נקבו חור בפיסת נייר. החזיקו את הנייר במרחק סנטימטרים אחדים מן העין וצפו דרכו באור שבתקרה או בשמים. אל תמקדו את המבט בחור אלא הניחו לעין להירגע בתוך שאתם מתבוננים בחור, וקרבו אותו במידה כזאת שבכל מקרה לא תוכלו להתמקד בו (אם אתם מרכיבים משקפיים הסירו אותם). תבחינו בעיגול נאה, אך עיגול זה אינו החור - זהו האישון! כדי להיווכח בכך כסו את העין השנייה ביד הפנויה. שני האישונים שווים זה לזה בגודלם; אם משתנה גודלו של האחד, משתנה גם גודלו של השני. כיסוי העין

בעיות

1. סמוך לשנת 1675 גילה האסטרונום הדני אולאוס רימר כי לאור מליקויי הירחים של כוכב הלכת צדק נדרשו 1000 שניות כדי לעבור את המרחק בן 300,000,000 ק"מ שהוא קוטר מסלולו של כדור הארץ מסביב לשמש. הסבירו כיצד סיפקה תגלית זו מדידה ראשונה בדיוק סביר של מהירות האור.

2. מרחק השמש מכדור הארץ הוא 1.50×10^{11} מ'. כמה זמן נדרש לאור השמש להגיע אל כדור הארץ?

3. כוכב השבת הקרוב אלינו ביותר מלבד השמש הוא פרוקסימה-קנטאורי, המרוחק מאיתנו 4×10^{16} מ'. אילו קלטנו היום מסר בגלי רדיו מכוכב זה, מתי שודר המסר?

4. תדירותו של אור כחול-ירקרק היא 6×10^{14} הרץ. בעזרת הקשר $c = f\lambda$ מיצאו את אורך הגל של אור זה באוויר.

5. אורך הגל של האור משתנה בעת שהאור עובר מתווך אחד לתווך אחר, ואילו תדירותו אינה משתנה. השוו את אורך הגל של אור במים לאורך הגל של אור בעל אותה תדירות באוויר.

בלבד. אולם אם רצונכם לצפות במקור אור חלש, כמו כוכב חיוור, לא כדאי לצפות קישר אליו. מדוע?

14. מדוע עצמים המוארים באור חלש - בלילה, למשל - הם חסרי צבע?

15. מדוע איננו רואים צבעים בשולי שדה הראייה שלנו?

16. לפי הניסויים שערכתם באיור 25.14, האם הכתם העיוור בעיניכם ממוקם בין הגומה המרכזית לאף או בין הגומה המרכזית לאוזן?

17. כשבן/בת זוגכם מסתכלת/בפניכם באישונים מכווצים ואומר/ת "אני אוהב/ת אותך", האם כדאי להאמין לו/לה?

18. האם ניתן להסיק כי אדם בעל אישונים גדולים הוא בדרך כלל מאושר יותר מאדם בעל אישונים צרים? מדוע לא?