פרק 8.   גלי אור

§59 מהירות האור

באופטיקה גיאומטרית חוקרים את הכיוונים בלבד של קרני האור. השאלה: כיצד מתרחש תהליך התפשטות האור בזמן? היא מחוץ למסגרתה של האופטיקה הגיאומטרית. תכונות האור והשפעתו על החומר נחקרים באופן מפורט יותר באופטיקה פיזיקלית (גלית). נתחיל את הפרק בסיפור: כיצד נמדדה מהירות האור?

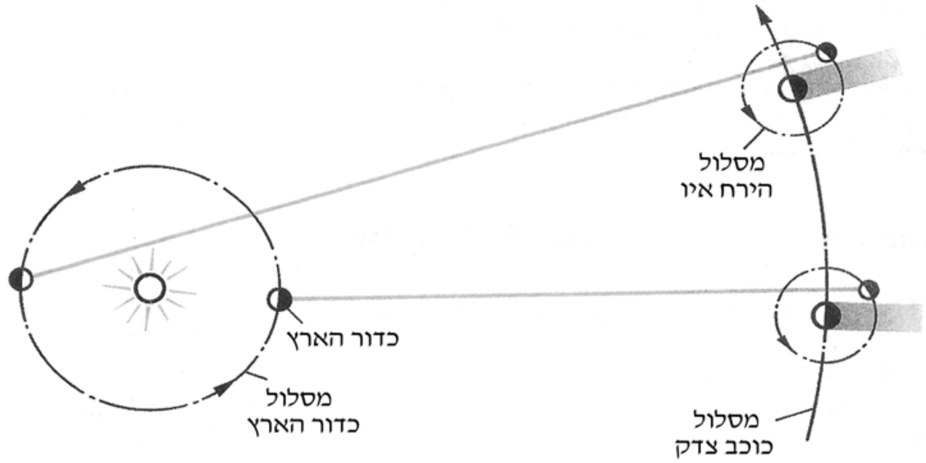
כאשר מדליקים אור בחדר, מתמלא כולו באור מיד, ונראה שלאור אינו דרוש זמן כדי להגיע לקירות. נעשו ניסויים רבים כדי למדוד את מהירות האור. לשם כך ניסו למדוד על-פי שעון מדויק זמן התפשטות של אות אור למרחקים גדולים (כמה קילומטרים), אולם נסיונות אלה לא הניבו תוצאות. בעקבות כך התחילו לחשוב שהתפשטות האור אינה דורשת זמן כלל, כלומר שהאור מגיע לכל מרחק בן-רגע. אולם הסתבר שמהירות האור אינה גדולה אינסופית, ובסופו של דבר היא נמדדה.

השיטה האסטרונומית של מדידת מהירות האור

לראשונה הצליח למדוד את מהירות האור המדען הדני **א' רוֹמר** בשנת 1676. **רוֹמר** היה אסטרונום, והצלחתו מוסברת בכך שהמרחקים שעבר האור במדידות שלו היו גדולים מאוד. היו אלה מרחקים בין כוכבי הלכת של מערכת השמש.

רוֹמר צפה בליקויי הירחים של כוכב צדק – כוכב הלכת הגדול ביותר במערכת השמש. לכוכב צדק 14 ירחים. הירח הקרוב ביותר אליו הוא **איו**, ואחריו עקב **רוֹמר**. הוא ראה כיצד הירח עבר לפני הכוכב, אחר כך נכנס לאזור הצל ונעלם משדה הראייה, ושוב הופיע כמו נורה שנדלקה. פרק הזמן בין שתי ההופעות היה 42 שעות ו-28 דקות. ובכן ירח זה עובד כמו שעון שמימי ענק, השולח את אותותיו לכדור הארץ בפרקי זמן שווים.

תחילה נעשו המדידות כאשר בתנועתו סביב השמש התקרב כדור הארץ לצדק למרחק הקטן ביותר (ציור 147). אותן מדידות נעשו כעבור כמה חודשים, כאשר כדור הארץ התרחק מכוכב צדק, והן הראו במפתיע שהירח איחר "לצאת" מצלו במשך זמן של 22 דקות שלמות לאחר הרגע, שצפוי היה להתגלות על-פי מדידות זמן מחזור תנועתו.



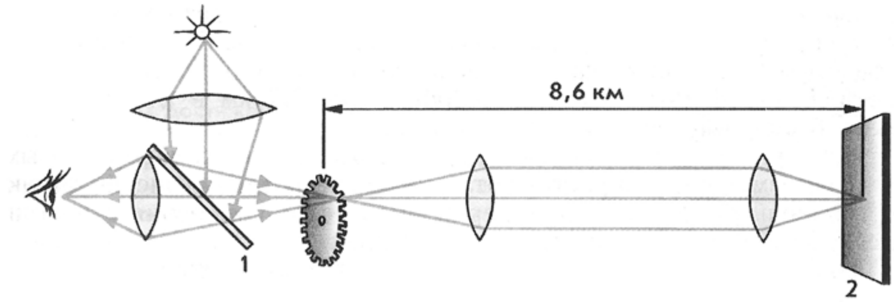
ציור 147

רֹוֹמר הסביר את התופעה כך: "...אילו יכולתי להישאר בצדו השני של מסלול כדור הארץ, היה הירח מופיע כל פעם בזמן המחושב, והצופה הנמצא שם היה רואה את איו 22 דקות מוקדם יותר. האיחור קורה עקב משך הזמן בן 22 הדקות, שאורכת דרכו של האור להגיע ממקום הצפייה הקודם למקומי הנוכחי". אם יודעים את זמן האיחור של הירח איו ואת המרחק הנוסף הגורם לאיחור, אפשר לחשב את מהירות האור על-ידי חלוקת המרחק בזמן האיחור. המהירות שהתקבלה היתה עצומה וגדולה מאוד: קרוב ל-300,000 ק"מ/שנייה. זו הסיבה שקשה מאוד למדוד את זמן התפשטות האור בין שתי נקודות – אף אם מרוחקות הן – על פני כדור הארץ: הרי בשנייה אחת עובר האור מרחק הגדול פי 7.5 מאורכו של קו המשווה!

שיטות מעבדה למדידת מהירות האור

הראשון שהצליח למדוד את מהירות האור במעבדה היה המדען הצרפתי **י' פיזו** בשנת 1849.

בניסוי של **פיזו** פגע האור מהמקור (לאחר שעבר דרך העדשה) בלוחית חצי שקופה 1 (ציור 148). לאחר החזרתו מהלוחית הופנתה הקרן הממוקדת אל בין שיניו של גלגל שיניים סובב. האור עבר במרווח שבין השיניים והגיע למראה 2, הנמצאת במרחק כמה קילומטרים מהגלגל. לאחר ההחזרה מהמראה המרוחקת, ולפני שהגיע לעין הצופה, עבר האור פעם נוספת בין השיניים.



ציור 148

כאשר סובב הגלגל בקצב כלשהו, האור המוחזר מהמראה נראה היטב; אך עם הגברת מהירות הסיבוב נעלם האור, כי בעוברו בחזרה מן המראה נתקל האור בשן שחסמה אותו.

אם גדלה מהירות הסיבוב עוד יותר, הופיע האור שוב, משום שבזמן התפשטות האור למראה ובחזרה ממנה הספיק הגלגל להסתובב, ובמקום המרווח הקודם הופיע מרווח אחר.

על סמך מהירות סיבוב הגלגל והמִפתח שבין מרווח למרווח שבגלגל השיניים, וביודעו את המרחק שבין המראה לבין גלגל השיניים, חישב **פיזו** את מהירות האור. בניסוי **פיזו** היה המרחק שבין גלגל השיניים לבין המראה 8.6 ק״מ, ומהירות האור שחושבה היתה בערך 313,000 ק״מ/שנייה.

בהמשך פותחו שיטות מעבדה אחרות ומדויקות יותר למדידת מהירות האור. הפיזיקאי האמריקאי **א' מייקלסון** פיתח שיטה מדויקת מאוד למדידת מהירות האור, המבוססת על מראות סובבות.

מהירות האור נמדדה בחומרים שקופים שונים. מהירות האור במים נמדדה בשנת 1856. הסתבר שהיא קטנה פי 4/3 מאשר מהירות האור בריק. גם בכל החומרים השקופים האחרים נמוכה היא מאשר בריק.

לפי המידע העדכני מהירות אור בריק שווה ל- 299,792,458 מ׳/שנייה בדיוק

של 1.2 מ׳/שנייה,[1] ובקירוב שווה היא ל- $c = 3 \cdot 10^8$ m/sec. ערך זה של מהירות האור יש לזכור.

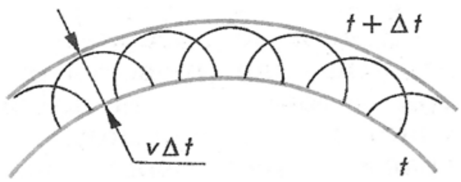
למדידת מהירות האור תפקיד חשוב ביותר בהתפתחות המדע, כי היא תרמה באופן משמעותי להבנת טבעו של האור. למהירות האור משמעות מיוחדת, משום שאין מהירות העולה על מהירותו בריק. עובדה זאת התבררה לאחר פיתוח תורת היחסות של **איינשטיין**, שעליה ידובר בפרק הבא.

§60 עקרון הויגנס

את חוקי ההחזרה ואת חוקי שבירת האור ניתן לפתח מעיקרון כללי אחד, המתאר את התנהגות הגלים. עיקרון זה הוצע לראשונה על ידי **כריסטיאן הויגנס**, בן זמנו של **ניוטון**.

עקרון הויגנס

על-פי עקרון **הויגנס**, ***כל נקודה בתווך, שמגיעה אליה הפרעה, הופכת עצמה למקור של גלים משניים***. כדי למצוא את מקומו של משטח הגל ברגע $t + \Delta t$, כאשר ידוע מקומו ברגע t, יש להסתכל על כל נקודות המשטח כעל מקור גלים משניים. המשטח, המשיק לכל הגלים המשניים, הוא משטח הגל ברגע הבא (ציור 149). עיקרון זה מתקיים בגלים מכל הסוגים: מכניים, גלי אור וכדומה. **הויגנס** ניסח עיקרון זה בגלי אור.



ציור 149

בגלים המכניים קיים לעקרון **הויגנס** פירוש מוחשי: חלקיקי התווך, שאליהם מגיעות התנודות, הם שמניעים חלקיקי תווך שכנים בפעולה הדדית.

[1] בישיבת הוועדה, המנהלת את מערכת התקנים הבינלאומית, בשנת 1983 הוחלט על הגדרה תקנית של המטר: ״מטר הוא המרחק שעובר האור בריק במשך הזמן $\frac{1}{299{,}792{,}458}$ שנייה״.

מההגדרה נובע שמהירות האור שווה בדיוק ל- 299,792,458 מ׳/שנייה.

כריסטיאן הויגנס

(1629–1695) – פיזיקאי ומתמטיקאי הולנדי. ניסח לראשונה את תורת האור הגלית. את עקרונות תורתו פרסם בספרו "ספר האור" (1690). **הויגנס** השתמש לראשונה במטוטלת כדי להבטיח פעולה מדויקת של שעון, ופיתח את הנוסחאות למחזור המטוטלות המתמטית והפיזיקלית. במתמטיקה חקר **הויגנס** חתכי חרוט, ציקלואידות ועקומות אחרות. הוא כתב את אחת העבודות הראשונות בתורת ההסתברות. באמצעות הטלסקופ המשוכלל שבנה גילה את טיטאן, הירח הגדול ביותר של שבתאי.

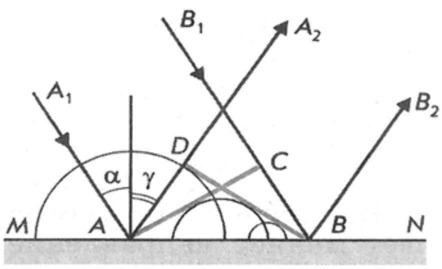
חוק ההחזרה

בעזרת עקרון **הויגנס** ניתן להיווכח בחוק, שלפיו מתנהגים גלים כאשר הם מוחזרים מהגבול שבין סוגי תווך שונים.

נסתכל בתהליך ההחזרה של גל מישורי. הגל מכונה **מישורי**, כאשר משטחים שווי-מופע (משטחי גל) הם מישורים. בציור 150 MN הוא המישור המחזיר; הקווים A_1A ו- B_1B הם שתי קרניים של הגל המישורי הפוגע, והן מקבילות זו לזו; ומישור AC הוא המשטח של הגל הפוגע.

הזווית α בין הקרן הפוגעת לבין האנך למשטח, המחזיר בנקודת הפגיעה, מכונה **זווית פגיעה**.

את משטח הגל של הגל המוחזר ניתן לבנות אם נעביר קו, המשיק לכל הגלים המשניים, שמרכזם על הגבול בין שני סוגי התווך.



ציור 150

אזורים שונים של משטח הגל AC מגיעים לגבול המחזיר בזמנים שונים. בנקודה A יתחילו התנודות לפני שהם יתחילו בנקודה B בהפרש זמנים של $\Delta t = \dfrac{CB}{v}$ (v – מהירות הגל).

ברגע שיגיע הגל לנקודה B ויתחילו בה תנודות, תהיה צורתו של הגל המשני, שמרכזו בנקודה A, חצי כדור שרדיוסו $r = AD = v\Delta t = CB$. הרדיוסים של הגלים המשניים, הנמצאים בין הנקודות A ו- B, משתנים כמתואר בציור 150. המשטח המשיק לגלים המשניים הוא המישור DB, המשיק למשטחים הכדוריים ומהווה את משטח הגל של הגל המוחזר. הקרניים המוחזרות AA_2 ו- BB_2 מאונכות למשטח הגל DB. הזווית γ שבין האנך למשטח המחזיר לבין הקרן המוחזרת מכונה **זווית החזרה**.

מכיוון ש- $AD = CB$ והמשולשים ADB ו- ACB ישרי זווית, אזי: $\angle DBA = \angle CAB$; אולם $\alpha = \angle CAB$ ו- $\gamma = \angle DBA$ עקב היותן כלואות בין צלעות המאונכות בהתאמה, ולכן **זווית ההחזרה שווה לזווית הפגיעה:**

$$\alpha = \gamma \qquad (8.1)$$

בנוסף, כנובע מתהליך הבנייה של הויגנס, **הקרן הפוגעת, הקרן המוחזרת והאנך למשטח בנקודת הפגיעה נמצאים במישור אחד**.

משפטים אלה מהווים את **חוק החזרת האור**.

אם נהפוך את מגמת התפשטותן של קרני האור, תהפוך הקרן המוחזרת לקרן פוגעת, והפוגעת תהפוך למוחזרת. תכונה זו, היפוך מגמת הקרניים, היא תכונה חשובה מאוד של קרני האור.

בסעיף הבא נעסוק בכללי בניית מהלך הקרניים במראה מישורית.

בפרק זה נוסח עקרון **הויגנס** – עיקרון כללי של התפשטות גלים מכל סוג שהוא. עיקרון זה מאפשר למצוא בעזרת בניות גיאומטריות פשוטות את משטח הגל בכל רגע על-פי משטח גל ידוע ברגע הקודם. באמצעות עקרון **הויגנס** פותח חוק החזרת הגלים.

?

1. **כיצד ניתן לבנות דמות של מקור אור נקודתי במראה מישורית בעזרת חוק ההחזרה?**
2. **מדוע אי-אפשר להשתמש במראה מישורית כמרקע קולנוע?**

60א § החזרת אור

את חוקי החזרת האור ניתן לפתח מעקרון הויגנס. גילוְּיָם והשימוש בהם בכל תחומי החיים הופיעו שנים רבות לפני כן.

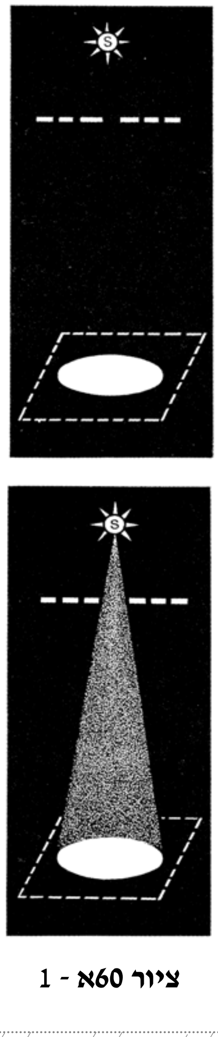
בכל תקופה סִקרנה ואִתגרה את המדענים תופעת החזרת האור, כאשר עסקו בתחושת הראייה, בצבעי העצמים, בדמויותיהם המשתקפות במראות למיניהן ועוד.

כאשר אור פוגע בעין האדם, הוא מתגלה על-ידי חיישנים מסוימים; אולם אין זה מעיד שניתן לראות אור, כפי שאנו רואים עצמים אחרים. יכולים אנו לראות את מקור האור, אך לא את האור עצמו.

כדי להוכיח זאת נערוך ניסוי: נדליק נורה S, ניצור אלומת אור באמצעות חור קטן במסך, ונשליך את האלומה על המסך. המסך יהיה מואר, אולם לא נראה מאום בינו לבין הנורה. את אותו ניסוי נערוך בתווך, שנמצא בו אבק או עשן, ונוכל לראות את האלומה. האם ניתן אפוא לראות את האור? גם במקרה זה אין אנו רואים את האור עצמו, אלא את חלקיקי האבק או העשן, המחזירים והמפזרים אותו. למַרְאָה יכולת החזרה טובה (היא יכולה להחזיר עד 90% מאנרגיית האור, ופיזור האור בה מזערי), ולכן משתמשים בה במקרים רבים, כשיש צורך להפנות את אלומת האור בשלמותה לכיוון אחר.

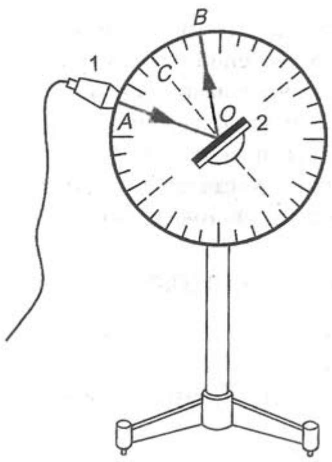
החזרת אור מתרחשת על-פי חוק מסוים, המבוסס תיאורטית על עקרון **הויגנס**; אולם לראשונה התגלה חוק זה לפני כאלפיים שנה על-ידי המדען והפילוסוף היווני **אוקלידס**.

כדי להדגים את חוק ההחזרה נשתמש במתקן המכונה "דִסקה אופטית". המתקן כולל מקור אור (1), היוצר אלומה צרה, המכונה "קרן אור". במרכז הדסקה נמצאת מראה (2). נכוון אליה את הקרן (הקרן הפוגעת) AO.



ציור 60א - 1

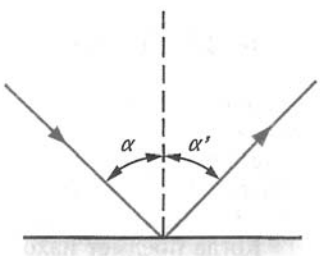
האור יוחזר מהמראה כקרן מוחזרת OB. שתי הקרניים AO ו- OB נמצאות במישור אחד, המכונה **מישור הפגיעה**, ובו נמצא גם האנך OC למראה בנקודת הפגיעה O. הזווית שבין האנך לבין הקרן הפוגעת מכונה **זווית הפגיעה**, והזווית שבין האנך לבין הקרן המוחזרת מכונה **זווית ההחזרה**. מדידת הזוויות מוכיחה ש**זווית ההחזרה שווה לזווית הפגיעה**.



ציור 60א - 2

שתי העובדות מהוות את **חוק ההחזרה**: **הקרן המוחזרת נמצאת במישור הפגיעה, וזווית ההחזרה שווה לזווית הפגיעה**.

אם נסמן את זווית הפגיעה באמצעות α, ואת זווית ההחזרה ב- α', נוכל לרשום: $\alpha = \alpha'$**.**



ציור 60א - 3

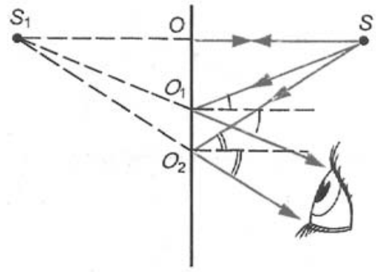
אחת ההשלכות החשובות של חוק ההחזרה היא העובדה, שאם נכוון את הקרן הפוגעת בכיוון BO, יוחזר האור בכיוון OA. כלומר: קיימת **הפיכות בין הקרן הפוגעת לבין הקרן המוחזרת**, והיא מאפשרת להפוך את מהלך הקרניים במערכת, כלומר לקבל מהלך קרניים, הנענה גם הוא לחוק ההחזרה.

60ב § דמות במראה מישורית

מַרְאָה, שמשטח ההחזרה שלה מישורי, מכונה **מראה מישורית**. למרְאָה כדורית או פרבולית צורת משטח אחרת. מראות מישורית שימושיות מאוד בחיי היומיום: כולנו ראינו את דמותנו במראה. בדמות זו אין ממשות; הציצו אל מאחורי המראה, ותיווכחו שאין שם מאום.

כיצד רואים אנו את העצם במָקום שאינו קיים?

כדי להשיב לשאלה זו נברר כיצד נוצרת דמות במראה מישורית. נציב אל מול המראה נקודה מוארת S. מכלל הקרניים, היוצאות מהנקודה S והפוגעות במראה, נעקוב רק אחר שלוש: SO, ‏SO_1 ו- SO_2. כל אחת מקרניים אלה מוחזרת מהמראה על-פי חוק ההחזרה, כלומר באותה זווית שבה היא פוגעת בה.



ציור 60ב-1

לאחר ההחזרה פוגעות הקרניים בעין. העין משחזרת את הנקודה S_1 כמקור, שממנו יצאו הקרניים. נקודה זאת היא **הדמות** של נקודה S, וזה המקום שבו יראה הצופה בּמַרְאָה את מקור האור.

קל להוכיח שבנקודה S_1 יתכנסו המשכי **כל הקרניים**, היוצאות מהמקור S והמוחזרות מהמראה לעין הצופה.

הדמות S_1 מכונה **דמות מדומה**, מכיוון שהיא נוצרת ממפגשי קרניים דמיוניות, שאינן נמצאות מאחורי המראה, אלא מהוות המשכי קרניים אמיתיות הפוגעות בעין. אילו היתה הדמות מתקבלת במפגש קרניים אמיתיות, היתה הדמות **ממשית**.

ובכן, הדמות במראה המישורית תמיד מדומה. לכן כאשר צופים אתם במראה, צופים אתם בדמות מדומה, שאינה ממשית.

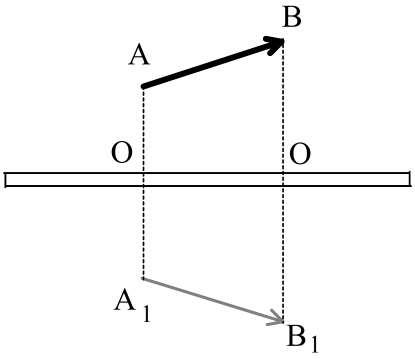
ניעזר בחוקי חפיפת משולשים, ונראה ש- $S_1O = OS$. אם כן, הדמות במראה מישורית מרוחקת מהמראה כמידת מרחקו של המקור מהמראה.

אם המקור הוא עצם שאינו נקודתי, מהווה כל נקודה מקור אור שדמותו מדומה, כמתואר קודם. קל להוכיח שבמקרה זה יהיו צורתה של הדמות וגודלה כאלה של עצם המקור.

אם כן, דמות העצם במראה מישורית היא: 1. מדומה; 2. ישרה, כלומר אינה הפוכה; 3. שווה בגודלה לעצם המקור; 4. נמצאת מאחורי המראה במרחק כמרחקו של עצם המקור הניצב לפני המראה. במילים אחרות: **הדמות סימטרית למקור ביחס למישור המראה**.

כדי לבנות את דמותו של החץ AB במראה מישורית, יש לבצע את הפעולות הבאות:

1. להעביר אנך מנקודה A למישור המראה, להמשיך אותו אחרי מישור המראה למרחק השווה ל- AO, ולסמן את הנקודה A_1;
2. לבצע אותה הפעולה עבור נקודה B;
3. לחבר בין הנקודות A_1 ו- B_1.



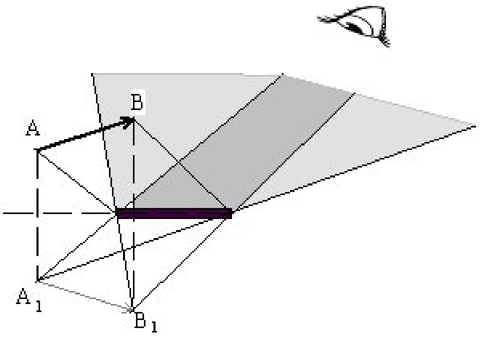
ציור 60ב - 2

הקטע A_1B_1 שיתקבל הוא הדמות המדומה של החץ AB.

במבט ראשון נראה שאין כל שוני בין המקור לבין דמותו במראה מישורית; אך אין זה כך.

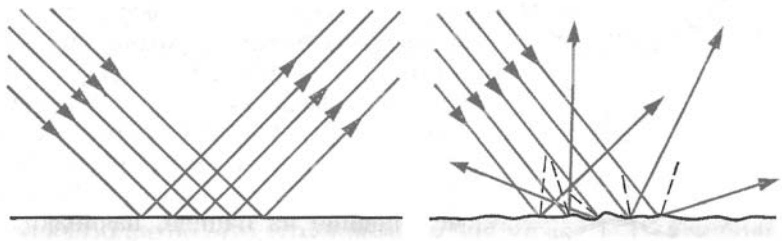
התבוננו בדמותה של כף ידכם הימנית במראה – ותראו שהאצבעות מסודרות בה כאילו זו כף ידכם השמאלית. אין זה מקרי: בדמות שבמראה מוחלף הימין לשמאל, ולהפך.

כדי שהעין תוכל לראות את הדמות המשתקפת במראה, עליה להימצא בתחום **שדה הראייה,** המוגבל על-ידי הקרניים המוחזרות מקצות המראה. אם העין נמצאת מחוץ לשדה הראייה, לא תפגענה בה הקרניים המוחזרות, ולא תיווצר תחושת ראייה של הדמות המדומה.



ציור 60ב - 3

אלומת אור מקבילה, הפוגעת במראה מישורית, אינה מתפזרת ונשארת כזו גם לאחר ההחזרה. החזרה זו מכונה **מראתית**. כאשר אלומת אור מקבילה פוגעת במשטח מסוים, ולאחר ההחזרה מתפזרת בגלל חספוסי המשטח לכיוונים שונים, תהיה זו החזרה **דיפוזיבית**, והיא אופיינית למשטחים מחזירים שאינם חלקים: מחוספסים ומשטחי מט. הודות להחזרה דיפוזיבית רואים אנו את העצמים שמסביבנו מכל כיווני ההסתכלות, ללא מגבלת תחום שדה ראייה.



ציור 60ב - 4

§61 חוק שבירת האור

נעסוק בתופעת שבירת קרני אור. נפתֵח את חוק השבירה באמצעות העיקרון שפיתח **הויגנס**.

צפייה בשבירת האור

על הגבול שבין שני תווכים שקופים משנה האור את כיוון התפשטותו. חלק מאנרגיית האור מוחזרת לתווך הראשון, כלומר מתרחשת החזרת אור ; וחלק אחר מאנרגיית האור יחדור לתווך האחר דרך משטח הגבול, וככלל ישנה את כיוון התפשטותו.

תופעה זאת מכונה **שבירת האור**.

בעקבות השבירה משתנים צורתם הנראית של גופים, מקומם וגודלם. תצפיות פשוטות יכולות לשכנע אותנו במסקנות אלה: נניח מטבע בתחתית כוס ריקה שאינה שקופה. נזיז את הכוס כך, שמרכז המטבע, שפת הכוס והעין יהיו בקו אחד. מבלי להזיז את הראש נמלא את הכוס במים. עם עליית מפלס המים ייראה המטבע כמתרומם ותחתית הכוס עִמו. המטבע, שנגלה קודם באורח חלקי, ייראה עתה במלואו.

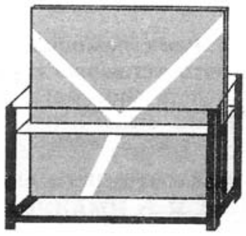
נעמיד עיפרון במכל המלא במים. נתבונן במכל במבט מהצד – ונראה שחלקו של העיפרון הנמצא בתוך המים מוזז הצידה, כאילו נשבר העיפרון בקו פני המים.

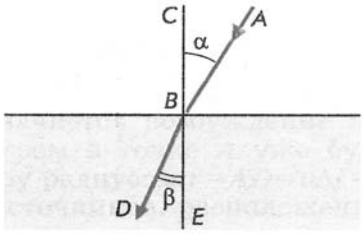
מחזות אלה הם תולדה של שינוי כיוון הקרניים בגבול המעבר שבין שני תווכים שקופים שונים, כלומר **שבירת האור**.

חוק **שבירת האור** מגדיר את המקום היחסי של הקרן הפוגעת AB (ציור 151), הקרן הנשברת DB והאנך CE למשטח הגבול שבין התווכים בנקודת הפגיעה.

הזווית α מכונה **זווית הפגיעה**, והזווית β – **זווית השבירה**.

ניתן לראות את מהלך הקרן הפוגעת במראה והמוחזרת ממנה, אם ניצור אלומת אור צרה ונמלא בעשן את אזור הניסוי. האלומה הנשברת נראית טוב במים, שהכניסו בהם צבע פלואורסצנטי (ציור 152).


ציור 152



ציור 151

פיתוח חוק שבירת האור

חוק שבירת האור נוסח באופן ניסויי במאה ה-17. נפתֵח אותו באמצעות עקרון **הויגנס**.

בעוברו מתווך שקוף אחד לתווך שקוף אחר נשבר האור בגלל השוני במהירויות ההתפשטות שלו בשני סוגי התווכים. נסמן את מהירות גל האור בתווך הראשון ב- v_1, ובשני – ב - v_2.

נניח שבמשטח הגבול המישורי שבין שני סוגי התווך (לדוגמה: אוויר ומים) פוגע גל אור מישורי, הנע מהאוויר למים (ציור 153). משטח הגל AC מאונך לקרניים A_1A ו- B_1B. למשטח MN תגיע ראשונה הקרן A_1A, והקרן B_1B תגיע למשטח כעבור זמן:

$$\Delta t = \frac{CB}{v_1}$$

לכן ברגע שהגל המשני בנקודה B יתחיל להיווצר, תהיה כבר צורתו של הגל, שמרכזו בנקודה A, חצי כדור שרדיוסו:

$$AD = v_2\Delta t$$

את חזית הגל השבור ניתן לבנות בשרטוט כמשטח, המשיק לכל הגלים המשניים שמעוֹרָרים בתווך השני, ושמרכזיהם על משטח הגבול שבין שני התווכים. במקרה הנדון זה מישור BD, המשיק לגלים המשניים.

זווית פגיעת הקרן α שווה לזווית CAB במשולש ABC (הצלעות של אחת מהזוויות האלה מאונכות לצלעות הזווית האחרת). לכן:

$$CB = v_1\Delta t = AB \sin\alpha \qquad (8.2)$$

זווית השבירה β שווה לזווית ABD של המשולש ABD. לכן:

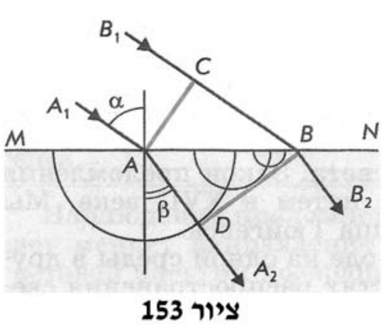
$$AD = v_2\Delta t = AB \sin\beta \qquad (8.3)$$

מחלקים את האגפים המתאימים של (8.2) ב- (8.3), ומקבלים:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2} = n \qquad (8.4)$$

כאשר n – גודל קבוע, שאינו תלוי בזווית הפגיעה.

הבנייה (ראו ציור 153) מראה, ש**הקרן הפוגעת, הקרן הנשברת והאנך בנקודת הפגיעה נמצאים במישור אחד**. משפט זה והמשוואה (8.4), הטוענת: **היחס שבין סינוס זווית הפגיעה לסינוס זווית השבירה הוא גודל קבוע עבור שני סוגי התווכים הנתונים**, מהווים את **חוק שבירת האור**.



ציור 153

אפשר להיווכח בחוק השבירה באופן ניסויי במדידת זוויות הפגיעה והשבירה וחישוב יחסי הסינוסים עבור זוויות פגיעה ושבירה שונות. יחס זה יימצא ללא שינוי.

מקרה מיוחד הוא כאשר חזית הגל מקבילה למשטח הגבול שבין התווכים, כלומר הקרן פוגעת במשטח **בניצב לו**.

במקרה זה הקרן אינה נשברת במעבר בין התווכים. את ההוכחה הגיאומטרית של מקרה מיוחד זה – שוב, באמצעות עקרון **הויגנס** – נשאיר לקורא הנבון.

מקדם השבירה

הגודל הקבוע n, המופיע בחוק שבירת האור, מכונה **מקדם השבירה היחסי** או **מקדם השבירה של תווך אחד יחסית לתווך האחר.**

מעקרון **הויגנס** נובע חוק השבירה ומתגלה גם המשמעות הפיזיקלית של מקדם השבירה: הוא שווה ליחס שבין מהירויות האור בשני סוגי התווך, שעל הגבול שביניהם מתרחשת השבירה:

$$n = \frac{v_1}{v_2} \qquad (8.5)$$

אם זווית השבירה β קטנה מזווית הפגיעה α, אזי בהתאם ל-(8.4) נמוכה מהירות האור בתווך השני מזו שבתווך הראשון.

מקדם השבירה של התווך יחסית לריק מכונה **מקדם השבירה המוחלט של התווך**, והוא שווה ליחס שבין סינוס זווית הפגיעה לבין סינוס זווית השבירה במעבר של קרן אור מהריק לתווך הנתון.

באמצעות הנוסחה (8.5) אפשר לבטא את מקדם השבירה היחסי דרך מקדמי השבירה המוחלטים n_1 ו- n_2 של התווך הראשון והשני.

מכיוון ש- $n_1 = \frac{c}{v_1}$ ו- $n_2 = \frac{c}{v_2}$, כאשר c – מהירות האור בריק, אזי:

$$n = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_1}{n_2} \qquad (8.6)$$

תווך בעל מקדם שבירה מוחלט קטן יותר מכונה **תווך בעל צפיפות אופטית נמוכה יותר.**

מקדם השבירה המוחלט של תווך שקוף תלוי במהירות התפשטות האור בו, וזו תלויה במצב חומר התווך: טמפרטורת החומר, צפיפותו, קיום מתחים אלסטיים בו ועוד. מקדם השבירה תלוי גם בתכונות האור עצמו: עבור אור אדום הוא קטן יותר מאשר עבור אור ירוק, ועבור אור ירוק – קטן יותר מאשר עבור אור סגול.

בטבלאות הערכים של מקדמי השבירה המוחלטים לחומרים השונים מציינים אפוא בדרך כלל לאיזה אור מתייחס הערך הנתון n, ומהו מצבו של חומר התווך. אם לא צוין כזאת, המשמעות היא שהתלות בקובעים אלה זניחה.

ברוב המקרים עוסקים במעבר אור דרך משטח הגבול שבין אוויר לחומר מוצק או בין אוויר לנוזל – ולאו דווקא במעבר שבין הריק לבין החומר; אולם מקדם השבירה המוחלט n_2 של חומר מוצק או נוזל שונה מעט מאוד ממקדם השבירה של אותו חומר יחסית לאוויר.

כך מקדם השבירה המוחלט של האוויר עבור אור צהוב הוא: $n_1 \approx 1.000292$, ולכן:

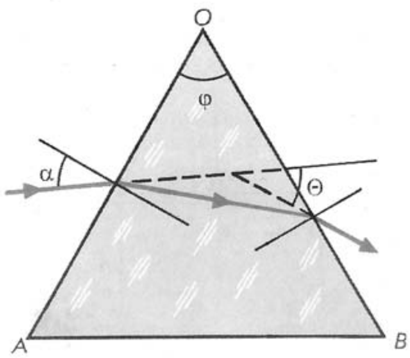
$$n = \frac{n_2}{n_1} \approx n_2 \qquad (8.7)$$

ערכי מקדם השבירה עבור חומרים שונים יחסית לאוויר מובאים בטבלה מטה (עבור אור צהוב).

מהלך קרניים במנסרה משולשת

חוק שבירת האור מאפשר לחשב את מהלך הקרניים במכשירים אופטיים שונים – לדוגמה: במנסרה משולשת, העשויה מזכוכית או מחומר שקוף אחר.

בציור 154 מתואר חתך של מנסרה משולשת. הקרן הפוגעת נשברת בכניסתה למנסרה לכיוון בסיס המנסרה, ונשברת שוב ביציאתה (בפאות OA ו- OB, בהתאמה).



ציור 154

הזווית φ שבין פאות אלה מכונה **זווית ההטיה** של המנסרה. **זווית הסטייה** θ של הקרן תלויה בזווית ההטיה φ של המנסרה; במקדם השבירה n של חומר המנסרה; ובזווית הפגיעה α. ניתן לחשב אותה באמצעות חוק השבירה (8.4).

את חוק השבירה יש לזכור. הנוסחה (8.4) מתארת אינסוף מקרים של שבירה, והחוק מאפשר לחשב בכל מקרה את מהלך הקרניים – במקום לערוך ניסוי ולמדוד את הזוויות. מכאן חשיבותו.

מקדם השבירה יחסית לאוויר	החומר
1.33	מים (ב- 20 °C)
1.46	שמן זית (ב- 20 °C)
1.36	כוהל
1.47	גליצרין
מ- 1.47 עד 2.04	זכוכית
1.31	קרח
1.56	סוכר
2.42	יהלום
1.76	רובי
1.54	מלח שולחן

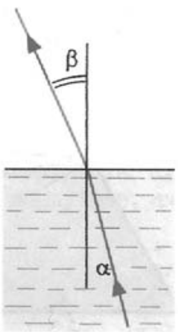
?

1. **מהי המשמעות הפיזיקלית של מקדם השבירה?**
2. **מה ההבדל בין מקדם השבירה היחסי לבין מקדם השבירה המוחלט?**

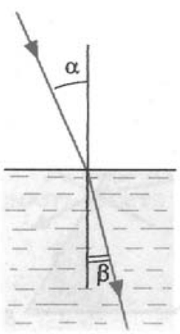
§62 החזרה גמורה

חוק השבירה מאפשר לנו להסביר תופעה מעניינת וחשובה מבחינה יישומית: ההחזרה הגמורה.

כאשר עובר אור מתווך בעל צפיפות אופטית כלשהי לתווך בעל צפיפות אופטית גבוהה יותר (לדוגמה: מאוויר לזכוכית או מאוויר למים), אזי $v_1 > v_2$, ובהתאם לחוק השבירה (8.4) מקדם השבירה $n > 1$. לכן $\alpha > \beta$ (ציור 155): הקרן הנשברת מתקרבת אל האנך למשטח הגבול בין שני התווכים.



ציור 156



ציור 155

אם נשלח קרן במגמה ההפוכה, כלומר מתווך צפוף יותר מבחינה אופטית לתווך צפוף פחות (ציור 156), יירשם חוק השבירה כך:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}=\frac{v_2}{v_1}=\frac{1}{n} \qquad (8.8)$$

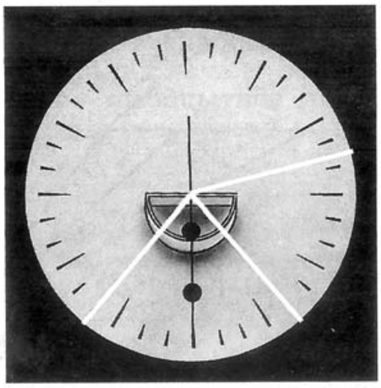
ביציאה מהתווך הצפוף יותר תעבור הקרן הנשברת בדרכה של הקרן הפוגעת במקרה הקודם, ולכן $\alpha<\beta$, כלומר הקרן הנשברת תתרחק מהאנך. עם הגדלת הזווית α תגדל גם זווית השבירה β – תמיד גדולה מהזווית α. לבסוף, עבור זווית פגיעה מסוימת תתקרב זווית השבירה ל- $90°$, והקרן הנשברת תעבור כמעט במישור הגבול שבין שני החומרים (ציור 157). לזווית השבירה הגדולה ביותר האפשרית מתאימה זווית הפגיעה הגבולית α_0.

נברר מה יקרה כאשר $\alpha>\alpha_0$. כאשר קרן אור פוגעת במשטח גבול שבין שני סוגי תווך, עובר חלק ממנה לתוך התווך השני (נשברת), והחלק האחר מוחזר. כאשר $\alpha>\alpha_0$, השבירה בלתי אפשרית. והקרן חוזרת במלואה. תופעה זו מכונה **החזרה גמורה**.

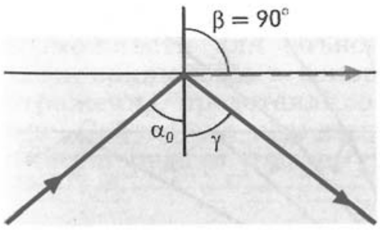
כדי לצפות בהחזרה גמורה ניתן להשתמש בפרוסת גליל זכוכית, החתוך לאורך צירו (חצי גליל), כאשר משטח הבסיס האחורי מחוספס (מט). את חצי הגליל מרכיבים על דיסק, כך שציר הסיבוב יעבור דרך אמצע המשטח החתוך (ציור 158). את אלומת האור הצרה מהמקור מכוונים אל מעטפת המשטח הגלילי ובניצב אליה. על המשטח הזה אין הקרן נשברת משום כיוונהּ הרדיאלי (הניצב למשטח באתר הפגיעה). על המשטח החתוך חלקית הקרן נשברת, וחלקית מוחזרת. ההחזרה מתרחשת בהתאם לחוק ההחזרה, והשבירה – בהתאם לחוק השבירה (8.4).

אם נגדיל את זווית הפגיעה, ניתן יהיה להבחין שהבהירות (ולכן גם האנרגיה) של הקרן המוחזרת הולכת וגדלה, ובו-בזמן הבהירות (האנרגיה) של הקרן העוברת פוחתת.

ככל שזווית השבירה מתקרבת ל-$90°$, הולכת האנרגיה של הקרן וקטנה. לבסוף, כאשר זווית הפגיעה מגיעה לערך הגבולי, כלומר כשהאלומה העוברת כיוונהּ לאורך משטח הגבול (ראו ציור 157), אחוז האנרגיה המוחזרת מגיע כמעט



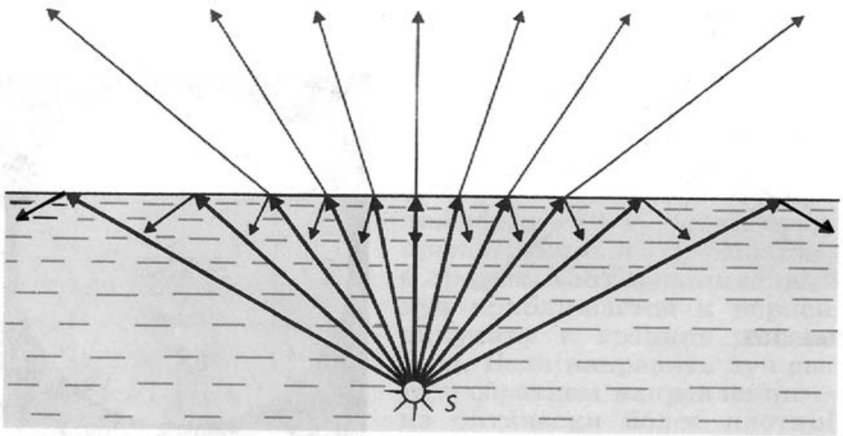
ציור 158



ציור 157

ל- 100%. נסובב את הדסקה כך שזווית הפגיעה α תהיה גדולה מ- α_0, ונגלה שהאלומה העוברת נעלמה, וכל האור מוחזר ממשטח הגבול, דהיינו מתרחשת החזרה גמורה של האור.

בציור 159 מתוארת אלומת קרניים ממקור הנמצא בתוך המים ולא הרחק מפניהם. בהירות גדולה יותר של אור מתוארת על-ידי הקו העבה יותר, המתאר את הקרן המתאימה.



ציור 159

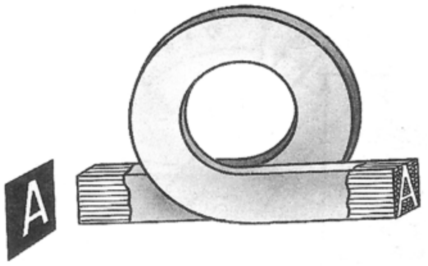
זווית הפגיעה α_0 , המתאימה לזווית שבירה של $90°$, מכונה **הזווית הגבולית של ההחזרה הגמורה**. כאשר $\sin\beta = 1$, נראית כך הנוסחה (8.8) :

$$\sin\alpha_0 = \frac{1}{n} \qquad (8.9)$$

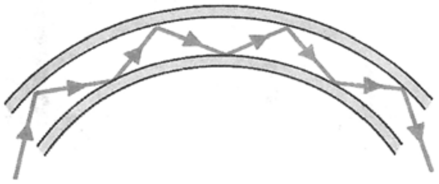
משוויון זה ניתן למצוא את ערך הזווית הגבולית α_0 של ההחזרה הגמורה. עבור מים $(n = 1.33)$ ערכה שווה ל- $48°35'$, עבור זכוכית $(n = 1.5)$ – $41°51'$, ועבור יהלום $(n = 2.4)$ – $24°40'$. לכל המקרים האלה התווך השני הוא אוויר.

בתופעת ההחזרה הגמורה קל להבחין בניסוי פשוט: נמלא מים בכוס שקופה ונרים אותה מעט גבוה יותר מקו העין. בהסתכלות מלמטה נראים פני המים נוצצים, כמוכספים, עקב החזרת אור גמורה.

בתופעת ההחזרה הגמורה משתמשים באופטיקת הסיבים להעברת אור ודמות דרך אלומת סיבים גמישים ושקופים, המכונים "סיבים אופטיים". סיב אופטי בנוי מסיב זכוכית גלילי, המצופה במעטפת מחומר שקוף בעל מקדם שבירה קטן מזה של הזכוכית. כתוצאה מהחזרות גמורות מרובות ניתן להוביל אור בכל דרך שהיא, ישרה או עקומה (ציור 160). סיבים בודדים מאוחדים בכבל, המכיל רבבות סיבים, וכך ניתן להעביר קטע של דמות (ציור 161). בכבל אופטי מסוג זה משתמשים ברפואה כדי לבחון במראה עיניים חללי גוף פנימיים בלא שימוש באִזְמֵל מנתחים.



ציור 161



ציור 160

תחום אחר, שרב היישום בו בסיבים אופטיים, הוא תחום התקשורת האופטית: טלפון, טלוויזיה ואינטרנט.

ההחזרה הגמורה צופנת בחובה תופעות רבות ומגוונות, שמקורן בחוק השבירה. תחילה נחשבה תופעת ההחזרה הגמורה לשעשוע יפה, אך היום היא מהווה בסיס למהפכה בהעברת מידע בתקשורת ולסיוע באבחנה ובטיפול רפואיים.

---

1. מהי הזווית הגבולית להחזרה גמורה במשטח הגבול יהלום-אוויר?
2. הביאו דוגמאות נוספות של החזרה גמורה.

דוגמאות לפתרון תרגילים

נפתור כמה תרגילים, הקשורים להתפשטות האור, לחוק ההחזרה ולחוק השבירה.

1. בניין, המואר בשמש (ציור 162), מטיל צל שאורכו $L = 36\ m$. עמוד אנכי, שגובהו $h = 2.5\ m$, מטיל צל שאורכו $l = 3\ m$. מצאו את הגובה H של הבניין.

<u>פתרון</u>

קרני שמש פוגעות בקרקע בזווית α. מהציור 162 רואים ש- $\tan\alpha = \frac{L}{H}$ וגם ש- $\tan\alpha = \frac{l}{h}$.

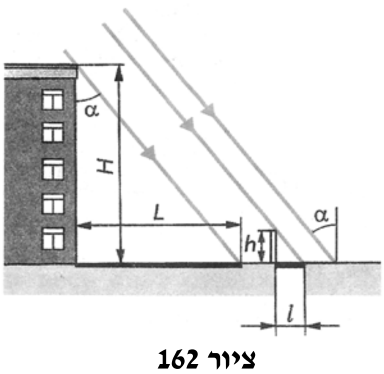
לכן:

$$\frac{L}{H} = \frac{l}{h}$$

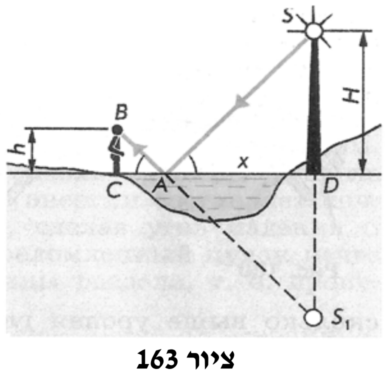
מכאן מחלצים:

$$H = \frac{L}{l}h = 30\ m$$

2. בגדה האחת של אגם קטן מוצב עמוד ופנס בקצהו, ובאחרת ניצב אדם. קרן אור מהפנס פוגעת בעין האדם לאחר חזרתה מפני המים. בסיוע בניית קרני האור מצאו את מקום הנקודה על פני האגם, שבה מוחזרת הקרן הפוגעת. מהו המרחק מנקודה זו לעמוד, אם ידוע שגובהו H, גובה האדם h, והמרחק בין העמוד לאדם l?



ציור 162



ציור 163

פתרון

נבנה דמות S_1 של הפנס S, הנוצרת על-ידי משטח CD של פני המים (או של המשכם) (ציור 163). כדי לעשות זאת נוריד אנך מהנקודה S למשטח CD. הדמות S_1 נמצאת בהמשך אנך זה, סימטרית לנקודה S ביחס למשטח CD, כלומר $S_1D = SD$. הקרן המוחזרת מפני המים מכוונת כך, שהמשכה לכיוון המים עובר דרך הנקודה S_1. כדי לדעת את כיוון הקרן המוחזרת יש אפוא להעביר קו מנקודה S_1 לנקודה B, שם נמצאת עין האדם. קו זה חותך את פני המים בנקודה המבוקשת A.

המשולשים ADS ו- ACB דומים (ישרי זווית, בעלי זווית חדה שווה). לכן,

$$\frac{DA}{AC} = \frac{SD}{BC}$$

או:

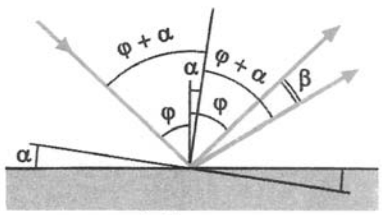
$$\frac{x}{l - x} = \frac{H}{h}$$

מכאן מחלצים x:

$$x = \frac{lH}{H + h}$$

3. **מראה מישורית סובבה לזווית $\alpha = 17°$ סביב הציר הנמצא במישור המראה. לאיזו זווית תסתובב הקרן המוחזרת, אם כיוון הקרן הפוגעת לא השתנה?**

פתרון



ציור 164

נניח שזווית פגיעת הקרן היא φ (ציור 164). לפי חוק ההחזרה גם זווית ההחזרה שווה ל- φ, ולכן הזווית בין הקרן הפוגעת לבין הקרן המוחזרת שווה ל- 2φ.

כאשר תסובב המראה בזווית α לאותה הזווית, יסתובב גם האנך למראָה בנקודת הפגיעה, ולכן זווית הפגיעה החדשה תהיה $\varphi + \alpha$. זו תהיה גם זווית ההחזרה החדשה.

לכן הזווית בין הקרן הפוגעת לבין המוחזרת תהיה שווה ל- $2(\varphi + \alpha)$, כלומר תשתנה לעומת הקודמת ב- 2α. אי לכך תסובב הקרן המוחזרת בזווית $\beta = 2\alpha = 34°$.

4. מצאו את זווית הסטייה θ של קרן אור מכיוונה ההתחלתי במעבר מאוויר למים, אם זווית הפגיעה $\alpha = 75°$.

<u>פתרון</u>

ציור 165 מראה ש: $\theta = \alpha - \beta$.

בהתאם לחוק השבירה:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$$

כאשר n – מקדם השבירה של המים.

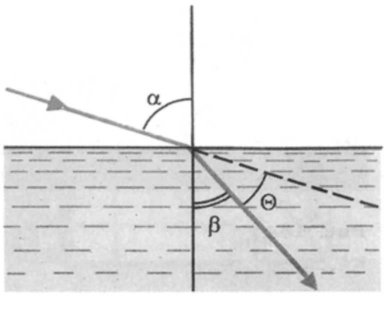
מכאן:

$$\sin \beta = \frac{\sin \alpha}{n} \approx 0.727$$

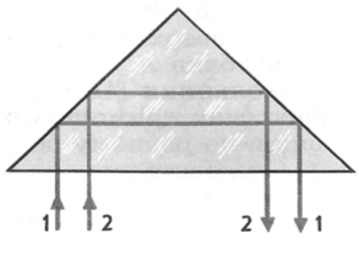
בעזרת המחשבון מוצאים את גודל הזווית: $\beta \approx 46°33'$.

לכן התשובה הסופית היא:

$$\theta \approx 75° - 46°33' \approx 28°27'$$



ציור 165



ציור 166

5. שרטטו את מהלך הקרניים במנסרת זכוכית משולשת (ציור 166). חתך המנסרה הוא משולש ישר-זווית ושווה-שוקיים. הקרניים פוגעות בבסיס המנסרה בניצב למישור הבסיס.

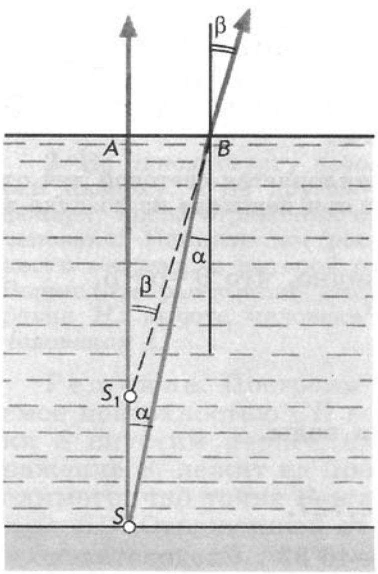
פתרון

במעבר דרך הבסיס אין הקרניים משנות את כיוונן, מכיוון שזווית הפגיעה שווה לאפס (ציור 166). על הפאות הצרות מתרחשת החזרה גמורה, מכיוון שזווית הפגיעה, $45°$, גדולה יותר מהזווית הגבולית של החזרה גמורה עבור זכוכית. לאחר ההחזרה מהפאה השמאלית פוגעות הקרניים בפאה הימנית, מוחזרות בהחזרה גמורה ממנה, ויוצאות מהמנסרה דרך הבסיס בכיוון הניצב לבסיס. סיכומו של דבר: כיוון האלומה משתנה ב-$180°$. במהלך קרניים מסוג זה משתמשים במשקפות שדה כדי להאריך את מהלך הקרן לאורך מערכת העדשות במשקפת.

6. **מצאו פי כמה גדול העומק האמיתי של אגם מהעומק המדומה, כאשר מסתכלים ישר כלפי למטה.**

פתרון

נשרטט את מהלך הקרניים, היוצאות מנקודה S על קרקעית האגם ופוגעות בעין הצופה (ציור 167). מכיוון שהתצפית נעשית בכיוון האנך, נכוון את אחת מהקרניים SA במאונך לפני המים, ואת האחרת SB – בזווית α קטנה לאותו האנך (קרניים שעוברות בזוויות גדולות לא יפגעו בעין הצופה; מדוע?). לאחר השבירה על פני המים מתקדמות הקרניים באלומה מתבדרת, ובמפגש אלומה זו נמצאת הדמות המדומה S_1 של הנקודה S.



ציור 167

הזווית ASB שווה לזווית הפגיעה α (כזוויות פנימיות, הנוצרות על-ידי הישר החותך קווים מקבילים), והזווית AS_1B שווה לזווית השבירה β (כזוויות מתאימות, הנוצרות בחיתוך קווים מקבילים). למשולשים ישרי-הזווית ASB ו- AS_1B ניצב משותף AB, הניתן לביטוי באמצעות העומק האמיתי של האגם

$SA = H$, או על-ידי העומק המדומה $S_1A = h$:

$$AB = H \tan \alpha = h \tan \beta$$

מכאן מקבלים:

$$\frac{H}{h} = \frac{\tan \beta}{\tan \alpha}$$

מכיוון שהזוויות α ו- β קטנות, אזי:

$$\frac{\tan \beta}{\tan \alpha} \approx \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = n$$

לכן:

$$\frac{H}{h} = n$$

העומק האמיתי של האגם גדול מהעומק המדומה פי $n = 1.3$.

מקבץ תרגילים 8

1. אלומת אור נכנסת לתיבה דרך חריר בדופן הצדית ויוצאת דרך חריר בדופן שממול. האם אפשר לראות את האלומה בתוך הקופסה, אם נציץ לתוכה דרך חריר בדופן הקדמית, בתנאי שהאוויר שבתוך הקופסה נקי מכל חלקיקי אבק?

2. באחד מסיפוריו של הסופר הרוסי גוגול נכתב: "...החדר שאליו נכנס איבן היה חשוך לגמרי, משום שתריסיו היו מוגפים; רק קרן אור אחת, שחדרה לחדר דרך חריר קטן שבתריס, היתה מוארת בכל צבעי הקשת. היא פגעה בקיר שממול לתריס וציירה בו נוף מרהיב של גגות, עצים וכבסים התלויים בחצרות, אולם הכול הפוך, מעלה מטה". האם טעה הסופר בתיאורו?

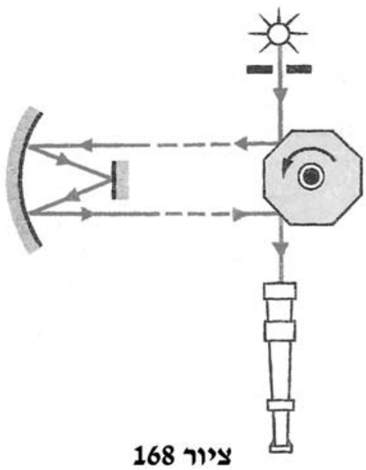
3. מדוע צל הרגליים של אדם, העומד בסמוך לעמוד תאורה, הוא חד – ואילו צל הראש מטושטש?

4. בציור 168 מתואר ניסוי מייקלסון למדידת מהירות האור. באיזו תדירות צריכה לסוב מנסרת מראות בעלת 8 פאות, כדי שהמקור ייראה דרך המשקפת, אם ידוע שקרן האור עוברת מרחק השווה ל-71 ק"מ?

5. אלומת קרניים מקבילות מוקרנת בכיוון אופקי. באיזו זווית למישור האופקי יש להעמיד מראה מישורית, כדי שלאחר ההחזרה תופנה האלומה כלפי מעלה? האם תישאר האלומה מקבילה?

6. עצם קטן נמצא בין שתי מראות מישוריות, אשר הזווית ביניהן $\alpha = 30°$.

העצם נמצא במרחק $L = 10$ cm מקו החיתוך של שתי המראות ובמרחק שווה מכל אחת מהן. מהו המרחק בין שתי הדמויות המדומות של העצם?

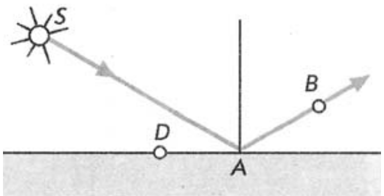


ציור 168

7. קרן, היוצאת ממקור נקודתי S, פוגעת במראה מישורית בנקודה A, ולאחר ההחזרה עוברת דרך נקודה B (ציור 169).

יש להוכיח: אילו היתה קרן מאותו מקור עוברת דרך הנקודה B לאחר ההחזרה בנקודה D, השוכנת ליד הנקודה A, אזי:

1. לא היה מתקיים חוק ההחזרה;
2. דרכה של הקרן SDB היתה ארוכה יותר מדרכה SAB.



ציור 169

8. מה צריך להיות גובהה של מראה מישורית, התלויה אנכית, על מנת שאדם, שגובהו H, יראה את עצמו בגובהו המלא?

9. מהו מקדם השבירה של מים יחסית ליהלום, ושל גופרית דו-פחמנית – יחסית לקרח?

10. זווית הפגיעה של קרניים מקבילות בלוחית מישורית היא $60°$.

מה המרחק בין נקודות יציאת הקרניים מהלוחית, אם ידוע שהמרחק בין הקרניים שעברו דרך הלוחית הוא 0.7 ס"מ?

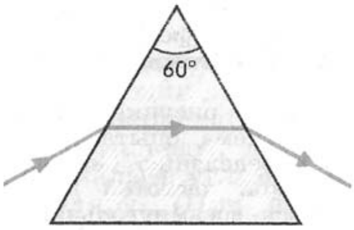
11. אם נסתכל על עצם כלשהו דרך מנסרה משולשת, נראית דמותו מוסטת. לאיזה צד?

12. קרן אור, המתקדמת מתחת לפני המים, מוחזרת במלואה לאחר הפגיעה בפני המים.

האם תצא הקרן לאוויר, אם על פני המים נמצאת שכבה דקה של שמן זית?

13. חתך המנסרה מהווה משולש שווה-צלעות. קרן אור עוברת דרך המנסרה ונשברת בנקודות, הנמצאות במרחק שווה מהקודקוד (ציור 170).

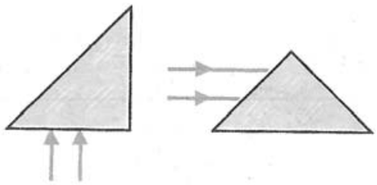
מהו הערך המרבי n של החומר, ממנו עשויה המנסרה?



ציור 170

14. שרטטו את מהלך הקרניים הפוגעות במנסרה משולשת, שבסיסה משולש ישר זווית ושווה-שוקיים. הקרניים פוגעות במנסרה כפי שמתואר בציור 171 א ו-ב.

האם יישאר מהלך הקרניים ללא שינוי, אם נטביל את המנסרה במים?



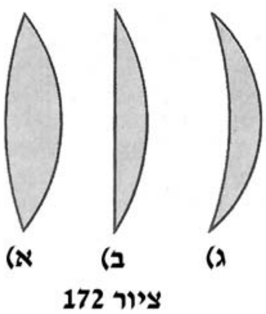
ציור 171

§63 העדשה

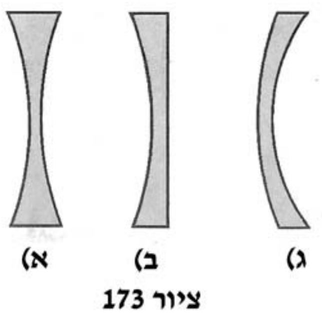
עד כה דיברנו על שבירת אור על גבול מישורי שבין שני סוגי תווך שקופים. במערכות אופטיות רבות משתמשים בשבירת אור בגבול משטחים כדוריים. גוף שקוף, התָחום על-ידי משטחים כדוריים, מכונה **עדשה**.

סוגי עדשות

העדשה עשויה להיות תחומה על-ידי שני משטחים כדוריים קמורים (עדשה דו-קמורה – ציור 172א), על-ידי משטח כדורי קמור ומישור (עדשה קמורה-מישורית – ציור 172ב), או על-ידי משטח כדורי קמור וקעור (ציור 172ג). עדשות אלה עבות יותר באמצעו מאשר בקצותיהן, והן מכונות **קמורות**.



ציור 172

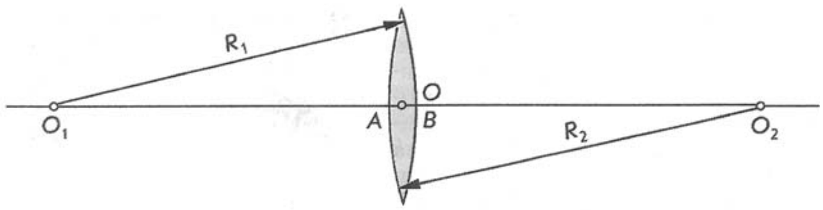


ציור 173

עדשות, אשר באמצעיתן צרות יותר מאשר בקצותיהן, מכונות **קעורות**. בציור 173 מתוארות שלושה סוגים של עדשות קעורות: דו-קעורה – א; קעורה-מישורית – ב; קעורה-קמורה – ג.

עדשה דקה

נחקור את המקרה הפשוט ביותר – כאשר עובי העדשה $l = AB$ קטן בהרבה יחסית לרדיוסים R_1 ו-R_2 של משטחי העדשה (ציור 174) ולמרחק העצם מהעדשה. עדשה זו מכונה **עדשה דקה**. כשנדבר בהמשך על עדשות, נתכוון תמיד לעדשה דקה.



ציור 174

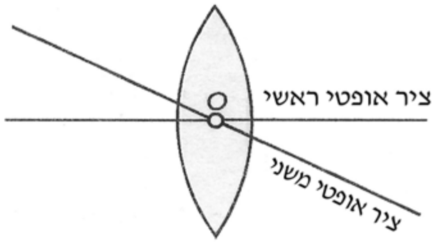
הנקודות A ו- B, הנמצאות בראש כיפה כדורית, הן כה קרובות בעדשה דקה, שניתן להחליף אותן בנקודה אחת, המכונה **המרכז האופטי של העדשה** והמסומן באות O. קרן אור, העוברת דרך המרכז האופטי של העדשה, אינה נשברת באופן מעשי (מכיוון שאזור המרכז מהווה, בקירוב טוב, חלק של לוח דק בעל דפנות מקבילות).

הקו O_1O_2, העובר דרך מרכזי המשטחים הכדוריים היוצרים את העדשה, מכונה **ציר אופטי ראשי**. הציר האופטי הראשי של עדשה דקה עובר דרך מרכז העדשה. כל ישר אחר, העובר דרך מרכז העדשה, מכונה **ציר אופטי משני** (ציור 175).

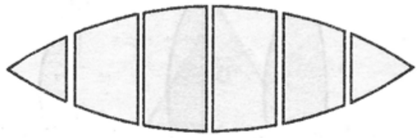
דמות בעדשה

בדומה למראה מישורית יוצרת העדשה דמות של מקור אור, כלומר אור, היוצא מנקודה כלשהי של הגוף (המקור), מתכנס לאחר השבירה בעדשה בנקודה אחת (דמות) ללא תלות בדרך (באיזה חלק של העדשה) שעברו הקרניים. אם לאחר היציאה מהעדשה מתכנסות הקרניים, הן יוצרות דמות ממשית. אם הקרניים

מתבדרות ביציאתן מהעדשה, מתכנסות הן בנקודה אחת במפגש המשכי הקרניים, ואז הדמות היא מדומה, ואפשר לצפות בה באמצעות העין או באמצעות מכשירים אופטיים.

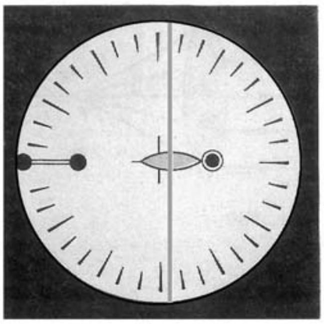


ציור 175



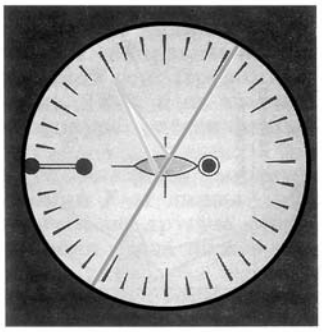
ציור 176

עדשה מרכזת



ציור 177

בדרך כלל מייצרים עדשות מזכוכית. עדשה קמורה מרכזת את קרני האור הנכנסות אליה. אפשר לתאר אותה כמורכבת ממנסרות זכוכית (ציור 176). כל מנסרה מטה את הקרניים לכיוון הבסיס, ולכן כל הקרניים, העוברות דרך העדשה, מוסטות כלפי הבסיס. כל הקרניים, העוברות דרך העדשה, מוסטות אפוא לכיוון הציר האופטי הראשי.



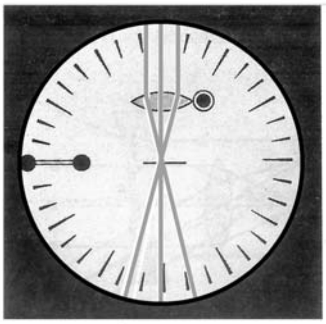
ציור 178

את שבירת הקרניים בעדשה מרכזת אפשר לראות בניסוי: מניחים את העדשה על דסקה. תחילה מכוונים את קרן האור לאורך הציר האופטי הראשי, ונוכחים לדעת שהיא עוברת את העדשה ללא שבירה (ציור 177). לאחר מכן מכוונים את הקרן לאורך ציר אופטי משני (כלומר גם הפעם דרך המרכז האופטי), וצופים בהעתקה מקבילה, כמעט שאינה ניכרת, של הקרן הנשברת (ציור 178).

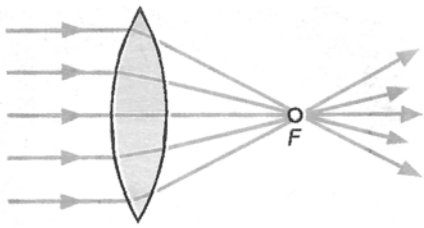
אחר-כך מטילים על העדשה קרניים מקבילות בכיוון הציר הראשי. לאחר השבירה הן מתכנסות בנקודה אחת (ציור 179).

הנקודה, שבה נפגשות קרניים מקבילות אלה לאחר עוברן דרך העדשה, מכונה **המוקד הראשי של העדשה**, והוא מסומן באות F (ציור 180).

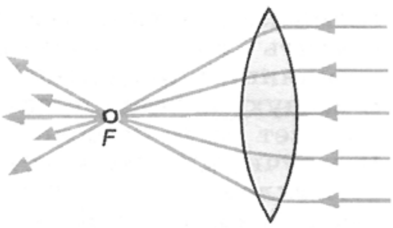
את הקרניים המקבילות לציר האופטי הראשי אפשר לכוון אל העדשה גם מהצד השני. הנקודה, שבה הן תתרכזנה לאחר השבירה, היא המוקד הראשי השני (ציור 181).



ציור 179



ציור 180

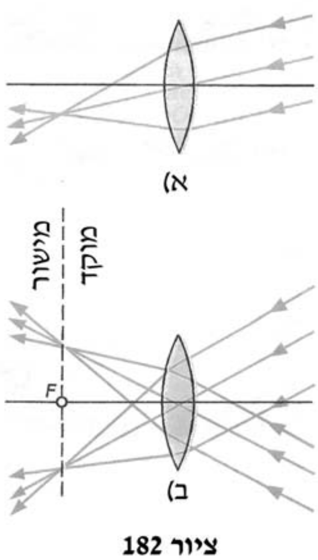


ציור 181

ובכן, לעדשה שני מוקדים ראשיים, והם נמצאים משני צדיה במרחק שווה ממנה – אם משני צדי העדשה נמצא אותו תווך. מרחקים אלה מכונים **מרחק המוקד של העדשה**, ומסמנים את שניהם באות F.

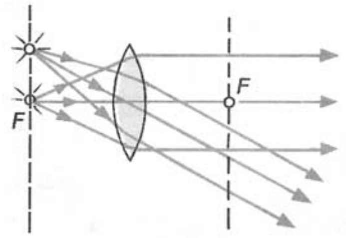
נכוון את הקרניים המקבילות בזווית לציר האופטי הראשי, ונראה שהן לא תיפגשנה במוקד הראשי, אלא בנקודה אחרת (ציור 182 א). ננסה וניווכח שנקודות ההתכנסות של כל אלומות הקרניים המקבילות, המושלכות אל העדשה בזוויות שונות, ממוקמות על המישור, המאונך לציר האופטי הראשי והעובר דרך המוקד הראשי (ציור 182ב). מישור זה מכונה **מישור המוקד**.

אם נמקם את נקודת האור במוקד העדשה (או בכל נקודה הנמצאת על מישור המוקד), ניווכח שלאחר השבירה בעדשה יוצאות

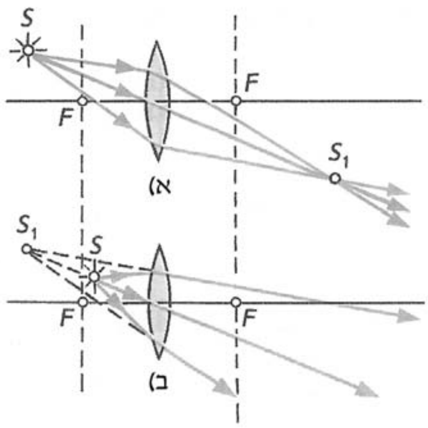


ציור 182

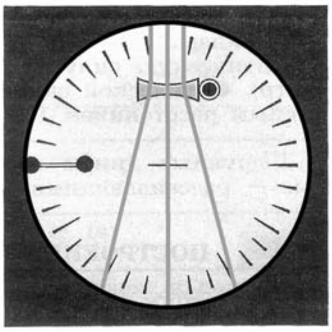
קרניים מקבילות (ציור 183). אם נרחיק את המקור ממישור מוקד העדשה, תתכנסנה הקרניים לאחר השבירה ותיצורנה דמות ממשית (ציור 184א). כאשר המקור נמצא מהעבר האחר של מישור המוקד, מתפזרות הקרניים, והדמות תהיה מדומה (ציור 184ב).



ציור 183



ציור 184

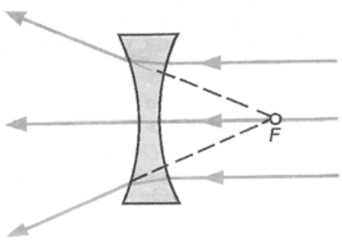


ציור 185

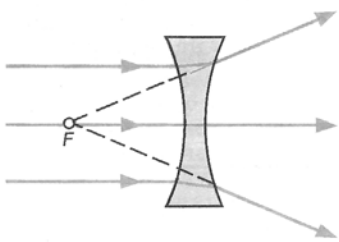
עדשה מפזרת

עדשות קעורות הן מפזרות. נניח עדשה על-גבי הדסקה ונכוון אליה קרניים המקבילות לציר האופטי. הקרניים היוצאות תתבדרנה (ציור 185), וההמשכים שלהן ייפגשו במוקד הראשי של העדשה המפזרת.

במקרה זה המוקד הראשי מדומה (ציור 186) והוא נמצא במרחק F מהעדשה. המוקד המדומה הראשי השני נמצא בצד האחר של העדשה באותו מרחק, אם משני צדי העדשה נמצא אותו תווך (ציור 187).



ציור 187



ציור 186

עוצמה אופטית של עדשה

הגודל ההפכי של מרחק המוקד מכונה **עוצמה אופטית** של עדשה. מסמנים אותה באות D:

$$D = \frac{1}{F}$$

ככל שמוקדיה של העדשה נמצאים קרוב יותר אליה, כן חזקה יותר השבירה, וגדולה יותר בגודלה עוצמתה האופטית של העדשה.

את העוצמה האופטית של העדשה מבטאים בדיאופטריות. לעדשה בעלת עוצמה של דיאופטריה אחת מרחק מוקד בן 1 מ'.

עדשות קמורות הן מרכזות, ועדשות קעורות הן מפזרות.