

4. משהו מתהפך במראה

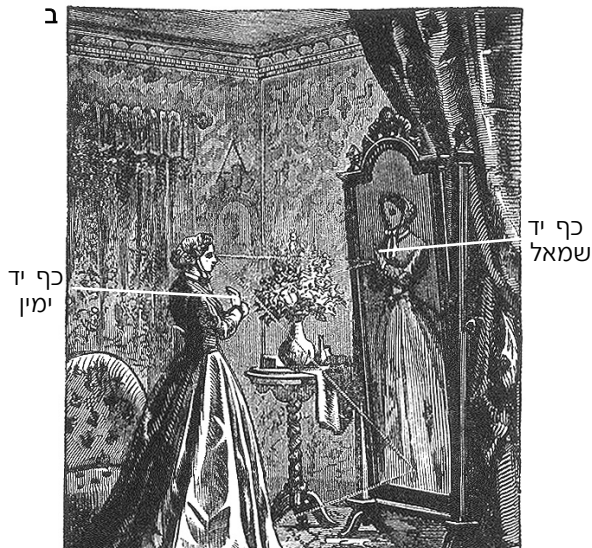
א



למרות הדמיון הרב בין הגוף ובין דמותו במראה מישורית, אין הדמות מהווה העתק מדויק של המקור. כאשר צופה עומד מול מראה ומרים את ידו הימנית, גם דמותו מרימה את היד (איור 8-5), אבל איזו יד? ימנית או שמאלית? אמנם היד תהיה ב"אותו" הצד (בדיוק מול המקור), אך למעשה זוהי היד השמאלית של הדמות. מסובך? – אמנם כן. נתמקד בניסוי.

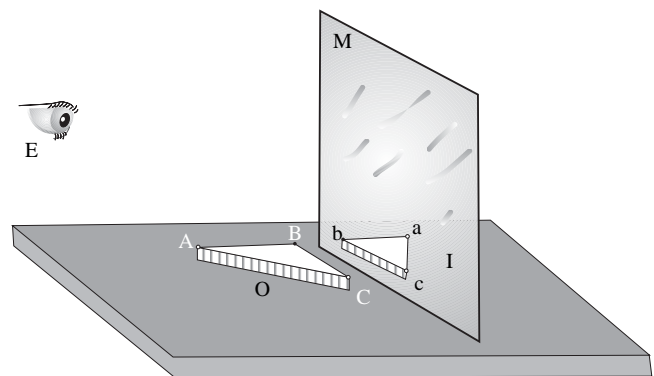
"נראה" למראה את כף יד ימין. במראה נראה את כף יד שמאל של הדמות (איור 8-5). תעלומה

זו התמיהה את בני האדם במשך אלפי שנים: המראה מציגה דמות מושלמת של הגופים העומדים מולה ועם זאת היא גורמת להם שינוי מהותי: הדמות מרימה יד באותו הצד, אבל הופכת אותה מיד ימין ליד שמאל. כך נוצרה הסברה כי המראה "הופכת בין ימין לשמאל". האמנם כך הם פני הדברים? כמו שקורה בדרך כלל התשובה היא אינה חד-משמעית: במובן מסוים – כן, במובן אחר – לא. נבחיר את התופעה.



איור 8-5: (א) העומד לפני המראה מרים את יד שמאל. הדמות "מגיבה" ומרימה יד באותו צד, אבל זאת היא היד הימנית; (ב) יד ימין של הגוף מתקבלת במראה מישורית כיד שמאל.

כדי להסביר את התופעה נחזור לכלל ההשתקפות במראה המישורית. הכלל קבע שנקודת גוף בודדת תיראה בעומק המראה במרחק השווה למרחקה מהמראה. ניעזר בידע זה כדי להסביר את ההשתקפות של גוף תלת-ממדי: הגוף מוצג כאוסף נקודות, מכך אנו יכולים להסיק על השינויים שקורים בהשתקפות הגוף במראה. לצופה O, הנמצא מאחורי הגוף (איור 8-6), מתהפך הסדר של חלקי הגוף כפי שהוא נראה במראה: נקודות הגוף שהיו קרובות יותר לצופה ייראו כרחוקות יותר בדמות. עם זאת, חלקי הגוף ה"ימניים" עבור הצופה, יישארו כאלה גם בדמות שבמראה. במילים אחרות: בהשתקפות במראה יראה הצופה את הדמות עם אותו סידור יחסי של חלקיו בכיוון המקביל למישור המראה (ימין-שמאל) ובסידור הפוך בכיוון הקרוב-רחוק ממנו (ניצב למראה). כשם שהמראה אינה הופכת את הדמות בכיוון ימין-שמאל, היא גם אינה הופכת אותה בכיוון מעלה-מטה.



איור 8-6: בהשתקפות הגוף (מנסרה O) במראה מישורית M הניצבת לרצפה, הצופה E רואה חלקים של הגוף שהיו קרובים אליו (נקודה A, למשל) כרחוקים יותר (a), חלקים של הגוף שהיו ימינה יותר או למעלה יותר (נקודה C, למשל) יישארו באותו מצב גם בדמות I (נקודה c).

ההיפוך "ימין-שמאל" שחל בהשתקפות כף היד הוא אכן היפוך אמיתי (איור 8-5א), אך הוא נובע מההבדל בצורת היד שנוצר עקב ההיפוך במרחק (קרוב-רחוק) של חלקי היד ביחס לצופה. חשוב להבהיר את הטענה: אם נתבונן בבורג ימני שנציג אותו לפני המראה, נזהה בהשתקפותו במראה בורג שמאלי (שההברגה בו היא בכיוון ההפוך). לכן לשינוי זה, הקורה בדמות במראה מישורית, נהוג לכנות בפיזיקה בשם שינוי בורגיות. מכאן שההבדל בין היד של הצופה ובין השתקפותה במראה הוא שינוי הבורגיות. זהו ההבדל בין יד ימין ובין יד שמאל.

נסביר עתה את התופעה שרבים התנסו בה – מראה "הופכת" את כיוון הכתוב מימין לשמאל. כאשר נכתוב את המילה "AMBULANCE" על דף ניר ונציב את הדף לפני מראה, נבחין כי הכתוב התהפך במראה מימין לשמאל. לעתים תופעה זו מפורשת כעדות לכך שהמראה אכן "הופכת את ימין לשמאל" ולהפך.

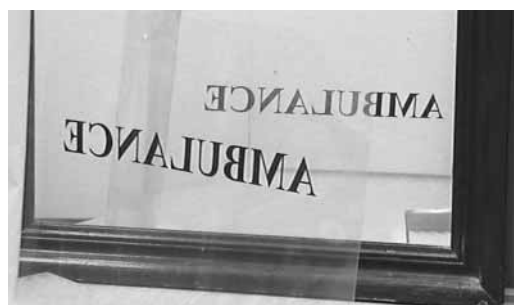
כדי להבהיר שאין הדבר כך נערוך את הניסוי הבא: ניקח שקף ונצמיד אליו קרטון. נכתוב את המילה "AMBULANCE" על השקף ונציב אותו מול המראה. הכתוב התהפך. כאשר נסיר את הקרטון מהשקף, נראה שחל אותו היפוך במילה שלום שעל שקף כמו שנראה במראה (איור 8-7). המסקנה: המראה אינה הופכת את הכתוב מימין לשמאל. אנו סובבנו את הדף כדי "להראות אותו למראה" ובכך הפכנו את נקודת התצפית שלנו בכתוב. כל השינויים בכיוון הכתוב הנראים במראה נגרמים משינויים בנקודת התצפית של הצופה. המראה יכולה לגרום לשינוי בנקודת התצפית. כך קורה, למשל, כאשר אמבולנס נוסע מאחורי הרכב שבו אנו נוהגים. אם נתבונן ישירות באמבולנס נראה כי המילה AMBULANCE כתובה בסדר אותיות הפוך, אך אם נתבונן בכתוב מבעד למראת הנהג, נראה את המילה כתובה בצורה הנכונה. תוצאה זהה תתקבל אם נכתוב על דף את המילה AMBULANCE בכתב הפוך, אך נקרא את המילה מאחורי הדף ללא כל שימוש במראה.



א



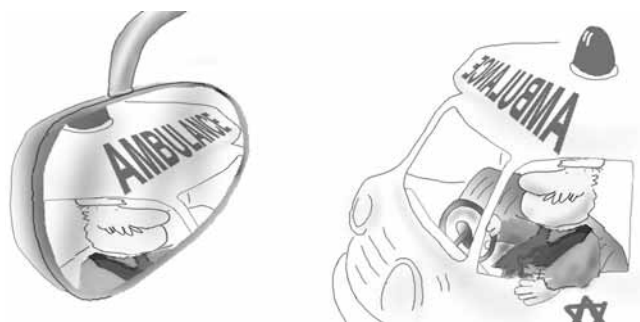
ב



ג

10

איור 8-7: (א) מילה מודפסת על שקף; (ב) המילה נראית במראה כאחרי היפוך "ימין-שמאל"; (ג) אך גם על השקף התהפכה המילה. מסקנה: הסיבוב של השקף כלפי המראה גרם להיפוך של הכתוב.



"היפוכי הכתב" במראה נוצרים אך ורק בגלל שינוי נקודת התצפית של הצופה במראה, והם יתכנו גם ללא מראה.



הרחבת המבט



כידוע נהג לאונרדו דה-וינצ'י לתעד את המצאותיו בכתב "ראי", על מנת למנוע גניבת רעיונותיו על ידי המתחרים. כפי שהארנו כתב זה ניתן לקריאה בקלות כאשר נעזרים במראה. כתב הראי אינו המצאה של לאונרדו. באיור 8-7 מופיע טקסט עברי מימי הביניים הכתוב בכתב ראי.



איור 8-7: טקסט עברי מימי הביניים ובו משתעשעים הכותבים בכתב "ראי". נסו לקרוא את הכתוב בעזרת מראה

לסיכום: הטענה ש"המראה הופכת ימין לשמאל" היא טענה מורכבת: במובן מסוים טענה זו אינה נכונה, אבל במובן אחר זוהי אמת. מורכבות התשובה משקפת את הגישה המדעית המקובלת: להבהיר מאיזו בחינה טענה מסוימת היא נכונה ומאיזו – שגויה.

בשיקוף הגוף במראה מישורית לא משתנה סדר החלקים של הגוף בכיוון מקביל למראה.



סדר זה מתהפך רק בכיוון המאונך למראה ("קרוב-רחוק" ביחס לצופה). היפוך זה גורם ליד ימין להיראות לצופה כיד שמאל.

הרחבת המבט



על סמך מה שלמדנו, ניתן לטעון שהשתקפות במראה גורמת למולקולות החומר היפוך בבורגיות. האם זה מעיד על קיום עולם אחר, בעל בורגיות הפוכה? מתברר שהיפוך אמיתי של הבורגיות גורם למוות של כל היצורים החיים. כל יצור חי המוכר לנו מורכב ממולקולות שיש להן בורגיות מסוימת. החלפתן של מולקולות אלו במולקולות "זהות", אך בעלות בורגיות הפוכה תגרום להפסקת תפקודן של האורגניזם החי! מדוע? המדענים עדיין אינם יודעים את התשובה לכך. כנראה שכדי לחשוף את סוד החיים צריך להבין טוב יותר את חוקי היסוד של הפיזיקה. בכל מקרה, ברור כי בעיית הבורגיות אינה פוגמת ביופיו של הסיפור "עליזה בארץ המראה" בו מתואר עולם שלם אחר, הקיים בתוך מראה.



IG

סוגיות למחשבה ולדיון



1. האם אפשר לראות את הדמות המשתקפת במראה כהעתק מדויק של המציאות, מעין "כפיל" שרק הסתובב ביחס אלינו? הסבירו.
2. מה ניתן להסיק לגבי "העולם המצוי במראה"?
3. הסבירו מאיזו בחינה מבצעת המראה היפוך "ימין-שמאל".



IG היפוך "מעלה - מטה" ב"מראה"



IG

פינה של שתי מראות יוצרת תמונות חדשות...

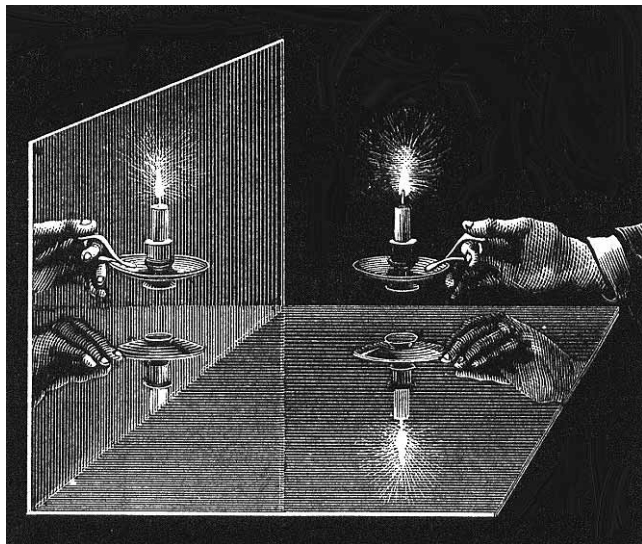


IG

4. נכיר את התכונה המוזרה של הדמות המופיעה במפגש הפינתי של שתי מראות מאונכות זו לזו. זוהי הדמות המופיעה בצילום מימין. הצלם מחזיק בידו את המצלמה, קו המפגש של שתי המראות עובר בדיוק בפתח של המצלמה. האם זה מקרה? לא ממש. נסו להסתכל בפינה של שתי מראות מאונכות. הקו המחבר את שתי המראות עובר בדיוק דרך אחת העיניים שלכם. עצמו אחת העיניים. האם הקו עדיין עובר דרך העין? החליפו את העין הצופה - כלומר עצמו את העין השנייה. למרבה הפלא כל הדמות "קופצת" מעט הצידה כך שהגבול בין המראות שוב עובר דרך העין הצופה. כיצד זה ייתכן?



דמות הצופה במפגש הפינתי של שתי מראות מאונכות זו לזו. הגבול בין שתי המראות עובר בדיוק בפתח המצלמה.

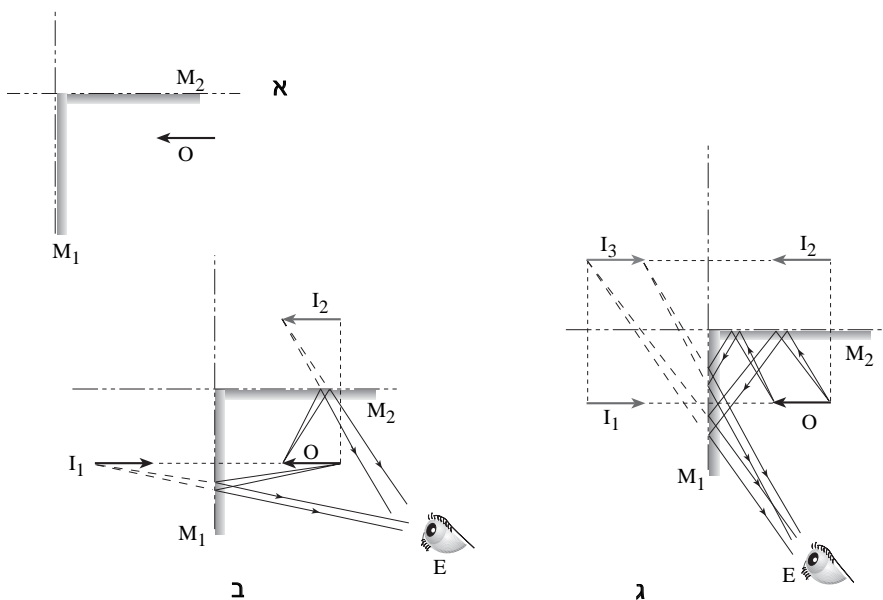


5. השתקפות בשתי מראות


דברים חשובים ומעניינים על השתקפות במראה נוכל ללמוד מהמצב שבו נראות דמויות הנוצרות מהשתקפות בו-זמנית בשתי מראות. במקרה הפשוט נתבונן בשתי מראות מישוריות הניצבות זו לזו ויוצרות "פינה" (איור 8-8א). נבחן באמצעות איור 8-8ב מה קורה כשמתבוננים בחץ המצוי ב"פינה" כזאת. כפי שלמדנו על השתקפות האור, בכל אחת מהמראות נראה דמות אחת של החץ. כך נראה את דמויות I-1 ו-I-2 כל אחת במראה אחרת. אבל אין זה הכול. בפירת המראות נראה דמות שלישית I-3. דמות זאת נוצרת מהחזרת אור כפולה: האחת - מהמראה הראשונה, והאחרת - מהמראה השנייה. החזרת האור

הנוספת גורמת ליצירת הדמות השלישית (איור 8-8ג). כפי שניתן להבחין, בנוסף לחילוף הסדר "קרוב-רחוק" בדמות זאת, מתחלף גם סידור חלקי הגוף בכיוון "ימין-שמאל". לעומת זאת יד ימין בדמות השלישית נשארת יד ימין (הבורגיות נשמרת). ראו תרשים למעלה.

העיקרון לקביעת מקומה של הדמות השלישית דומה לזה שנקטנו בו במציאת הדמויות אחרי החזרה אחת של האור מהמראה. הדבר השונה בגישה זו הוא שניתן לראות את הדמות הנוצרת במראה הראשונה כמקור לקרני האור הפוגעות במראה השנייה. זהו "הפטנט" לפתרון כל הבעיות באשר לקביעת מקום הדמויות במראות לאחר החזרות מרובות של האור. חשוב לזכור כי כל הדמויות הנוצרות בהחזרות מרובות במראות המישוריות הן דמויות **מדומות**, כלומר הן נוצרות בתודעת הצופה לאחר שהאור חדר לעיניו.



איור 8-8: (א) השתקפות חץ O בפינה הנוצרת כאשר שתי מראות מישוריות ניצבות זו לזו: M_1 ו- M_2 ; (ב) הדמויות הנוצרות אצל הצופה בעקבות החזרת אור אחת: I_1 ו- I_2 ; (ג) הדמות הנוצרת אצל הצופה בעקבות החזרה כפולה של האור: I_3 .

ניתן לקבל את מקומה של הדמות לאחר ההחזרה במראה השנייה כאשר מתייחסים אל הדמות הנוצרת בהחזרה הראשונה של האור כאל מקור. 



סוגיות למחשבה ולדיון



IG

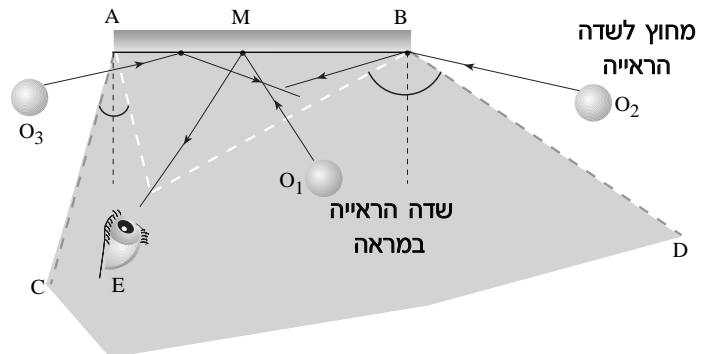
1. בעזרת סרטוט מדויק, בדומה לאיור 8-8ג, הדגימו את הכלל הקובע את המיקום של הדמות השלישית בפינת המראות.
2. האם על סמך פתרון השאלה הקודמת ניתן להגיע לניסוח כלל לגבי השתקפות של "מראה" בתוך מראה? נמקו.
3. מה קורה לדמות השלישית, הנוצרת בפינת המראות, כאשר משנים את גודל הזווית בין המראות?
4. כיצד ייראה שעון מחוגים וכיצד ייראה שעון דיגיטלי כשיוצבו בפינת המראות?
5. איך ייראה בורג ימני בדמותו השלישית? האם הוא יישאר בורג ימני? נמקו.
6. איזו יד מוצגת בצילום משמאל? ימין או שמאל, מדוע קשה לענות על שאלה זו?

6. שדה הראייה במראה מישורית

כשמתבוננים במראה רואים בה השתקפות של חלק מן הסביבה. מהו גודלו של חלק זה? התשובה לשאלה זו מגדירה את המושג המכונה **שדה הראייה**. זהו חלקה של הסביבה המשתקף במראה. מה נכלל בשדה הראייה? כיצד ניתן לקבוע את תחום המרחב המשתקף במראה? שאלות אלו נושאות משמעות יישומית חשובה כאשר מתכננים מכשירים אופטיים. בסעיף זה נענה עליהן בהקשר למראה מישורית.

נתחיל בניסוי: התבוננו במראה מישורית קטנה ובדקו איזה חלק ממרחב החדר משתקף במראה. שנו בהדרגה את זוויות המראה ואת מרחקה מהעיניים. בדקו האם משתנה שדה הראייה במראה לאחר השינויים שעשיתם, וכיצד הוא משתנה.

חזרו על הניסוי עם מראה גדולה יותר. האם השתנה שדה הראייה? עד מהרה אנו מגיעים למסקנה ששדה הראייה הנראה במראה תלוי בגודלה, במיקומה וכיוונה ביחס לצופה. באמצעות איור 8-9 נדגים איך קובעים במדויק את הגבולות המרחב המשתקף במראה.



איור 8-9: גבולות שדה הראייה במראה נקבעים על פי הקרניים הקיצוניות המגיעות לעיני הצופה. כיוון של הקרניים הגבוליות נקבע על פי חוק ההחזרה של האור. המרחב הכלוא בין קרניים אלו הוא שדה הראייה.

הצופה E מתבונן במראה מישורית M (איור 8-9). התחום הנראה לצופה במראה (שדה הראייה) נקבע על פי חוק ההחזרה של האור. ישירים EA ו-EB מייצגים את אלומות האור הקיצוניות של התחום שממנו האור יכול להגיע לעיני הצופה. זהו שדה הראייה של צופה E במראה מישורית M. הצופה מסוגל לראות את כל העצמים המצויים בשדה הראייה הזה (גוף O_1), ואינו יכול לראות את הגופים בחוץ לתחום (גופים O_2 ו- O_3). אם ישנה הצופה על פי חוק את גודל המראה, או אם יסובב אותה, ישתנה שדה הראייה שלו במראה.

הדרך הקצרה ביותר להגדרת שדה ראייה באופן מעשי עבור מראה נתונה במיקום, בכיוון ובגודל, היא להיעזר בקרני הראייה "היוצאות" מהעין. במקרה זה אנו מעבירים את הקרניים EA ו-EB מהעין לקצוות המראה וקובעים את כיווני ההחזרה שלהן מן המראה – AC ו-BD, אלו יהיו גבולות שדה הראייה במקרה הנתון. ההוכחה לשיטה זו מסתמכת, כמובן, על עיקרון ההפיכות של האור, אשר מצדיק את השימוש בקרני ראייה במקום בקרני אור. מעיקרון ההפיכות של האור נובעת מסקנה נוספת: שדה הראייה של צופה במראה מסוימת הוא גם אותו האזור שכל מי שמצוי בו יראה את הצופה (הצופה המצוי ב-O₁ יראה את E, אך הצופים ב-O₂ ו-O₃ – לא).

הרחבת המבט

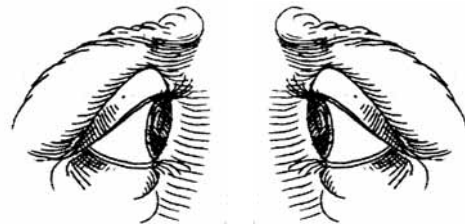


בחיי היום-יום משתמשים במונח "שדה ראייה" כדי להגדיר את המרחב הניתן לראייה בעינו של הצופה במצב מסוים. לעומת זאת באופטיקה משתמשים במונח "שדה ראייה" בהקשר למכשירים אופטיים, כאשר רוצים להגדיר את התחום הנצפה על ידי הצופה המשתמש במכשיר אופטי מסוים. כשמעבירים קרני אור לקצוות מראה מישורית וקובעים את המשכן, קובעים את שדה הראייה במראה, כלומר את התחום שהגופים הנמצאים בו יראו במראה. זוהי חשיבותו של חוק ההחזרה בקביעת הגבולות של שדה הראייה במראה.

סוגיות למחשבה ולדיון



1. נסו למצוא את שדה הראייה במראה בעזרת קרני האור ולא בעזרת קרני הראייה.
2. מה הקושי בשיטה זו?
3. מדוע השימוש בקרני הראייה נוח יותר?



7. מהו גודל המראה הנדרשת? – "פרדוקס המראה"

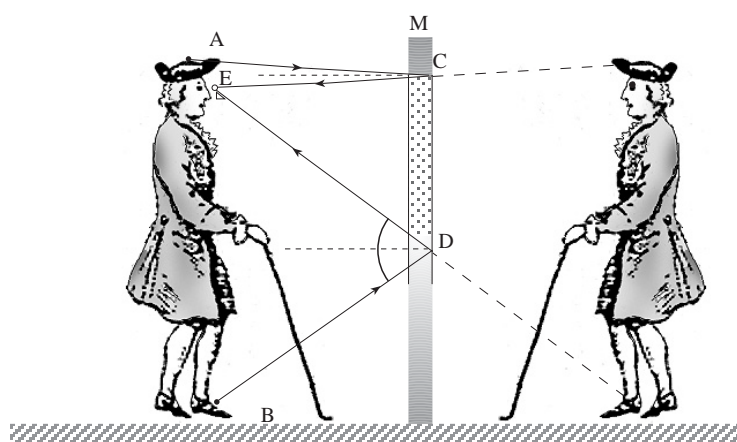
היכן עלינו לעמוד מול המראה כדי שנוכל לראות בה את כל גופנו? שאלה זו מופיעה בספרי אופטיקה זה מאות בשנים. אולי מראהו של העומד מול המראה השתנה, אך השאלה נותרה כפי שהייתה, מן הסתם, אולי בגלל שהתשובה לה מפתיעה.

שאלה דומה אך מנקודת מבט שונה: "מה צריך להיות גודלה של מראה כדי לשקף את כל גופו של האדם העומד מולה?" גם כאן התשובה מפתיעה את אלה שבתמימותם מניחים, כי המראה הדרושה לכך שווה בגודלה לגובהו של האדם (כי הרי גודל הדמות במראה מישורית זהה לגודלו של הגוף). שאלה זו מעניינת, אולי, גם את בעלי חנויות הבגדים שמטעמי חיסכון מעוניינים להתקין בחנותם מראה בגודל מינימלי שתשקף את הקונה בכל גובהו.

נניח שאדם (AB באורך 10-8) צופה במראה על הקיר (MN) כדי שהאדם יוכל לראות את כל גופו במראה, האור מקצה רגליו ומקצה ראשו צריך להגיע אל העין E. נסמן ב-C את נקודה שבה תוחזר מהמראה אל העין האור היוצאת מ-A. נקודה C תגדיר את הקצה העליון של המראה הדרושה. באותה מידה נקודה D, מקום ההחזרה של האור מ-B, תגדיר את הקצה של התחתון של המראה הדרושה. כיוון שהתייחסנו לנקודות הגבוליות של הגוף, המראה בגודל CD תאפשר

לראות את הגוף של הצופה כולו - AB. חישוב גאומטרי פשוט מלמד שאורך המראה הדרושה הוא **מחצית** מגודל AB. קביעה זו התקבלה ללא שימוש במרחק הצופה מהמראה. מכאן נובע שמראה שגודלה מחצית מגובהו של הצופה תשקף את כל גופו ואין הדבר תלוי במרחקו של הצופה מן המראה. מעניין המקרה שבו הצופה רואה רק חלק מגופו במראה. על סמך המסקנה לעיל, נובע שגם אם הצופה יתקרב או יתרחק מהמראה לא ישתנה גודלו של חלק הגוף המשתקף לגביו במראה.

כדי שכל גופו של הצופה במראה מישורית אנכית ישתקף דרושה מראה שאורכה המינימלי שווה למחצית גובהו של הצופה. אורך המראה אינו תלוי במרחק הצופה מהמראה.



איור 8-10: השתקפות הצופה (AB) במראה מישורית (M) הניצבת לרצפה. האורך המינימלי הדרוש לקבלת כל גופו של הצופה במראה הוא מחצית גובהו של האדם (CD).

אנשים רבים הנשאלים מהו האורך המינימלי של מראה הנדרש לשקף את כל גופם, סבורים כי האורך תלוי במרחק מהמראה והם מציעים להתרחק ממנה או להתקרב אליה. זוהי טעות מעניינת, ותיקונה חשוב מאוד להבנת המתרחש. נשאל את עצמנו מהו מקורה של הטעות? נשים לב שכאשר אנו מתקרבים למראה אנו מבחינים ביותר פרטים. אנו גם יודעים שכאשר מתרחקים מהגוף רואים יותר. זהו הבסיס האינטואיטיבי להבנת הנראה. משהו מיוחד, אם כן, קורה כשאנו רואים במראה את עצמנו: הצופה והגוף הנצפה - **חד הם**.

נבחין בשתי אפשרויות שאנשים מתמודדים עם בעיה זו. אחדים סבורים כי הואיל והדמות אינה "נכנסת" כולה במראה, יש להתרחק וכך היא תקטן ותשתקף במלואה. הם טועים. הטעות היא שכאשר מתרחקים שדה הראייה של הצופה במראה קטן גם הוא - ובאותה מידה מוקטנת הדמות. הדמות במראה נותרת לא שלמה והמטרה לא הושגה. אחרים סבורים כי הואיל והדמות אינה "נכנסת" במראה יש להתקרב וכך יגדל שדה הראייה שלהם במראה והדמות תשתקף במלואה. גם הם טועים. הטעות היא שכאשר מתקרבים למראה גם הדמות מתקרבת לצופה (ולכן גדלה) ועדיין משתקפת באופן חלקי, כמו קודם. על פי שיטת "המיצוי" של ארכימדס שלמדנו להכיר - השיקולים שהבאנו לעיל הם הוכחה לכך שאם לא רואים את כל הדמות במראה תזוזת הצופה לא תעזור. לכן הפתרון הוא **להגדיל** את המראה.

"פרדוקס המראה" נובע מכך שצופה במראה זז יחד עם הגוף שבו הוא צופה: הוא עצמו!!



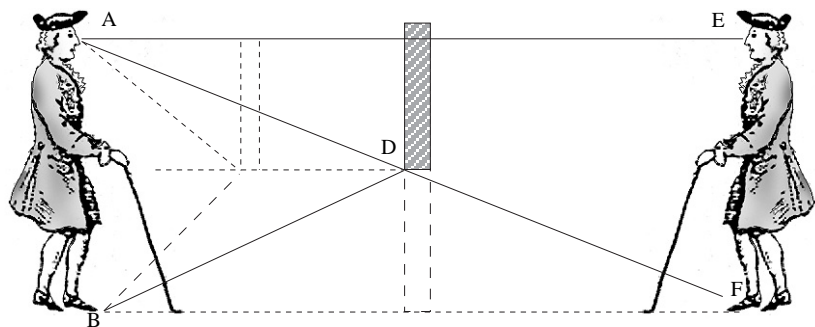
סוגיות למחשבה ולדיון



1. אנו צופים במראה שאורכה אינו מספיק כדי לשקף את כל גופנו (תמונה למטה משמאל), מה עלינו לעשות כדי שנוכל לראות את כל הגוף, להתקרב אל המראה או להתרחק ממנה? האם יש פתרונות אחרים? הסבירו.
2. האם התשובה לשאלה הקודמת תשתנה לגבי מראה שאינה ניצבת לרצפה? נמקו.
3. איזה יתרון יש בהתקרבות למראה?
4. איזה חיסרון יש בהתקרבות למראה?
5. מה אנו יכולים להסיק מ"פרדוקס המראה" על חשיבותו של תפקיד הצופה באופטיקה?
6. לפניכם איור מספר אופטיקה משנת 1771 (תמונה מימין). באיור ניסה המחבר להסביר את הסוגיה שדנו בה בשאלה מס' 1. האם אתם מבינים את ההסבר שהציע המחבר? הסבירו את האיור.



IG



8. האם הדמות המדומה אכן קיימת תמיד?

תארו לעצמכם מצב שבו אתם נמצאים לבד בחדר שיש בו מראה. אם תעמדו לפני המראה, תוכלו לראות את דמותכם. אולם אם תעמדו מחוץ לשדה הראייה שלכם במראה, לא תוכלו לראות את דמותכם משתקפת בה. עם זאת, האור המוחזר מגופכם ממשיך להגיע אל המראה. נשאלת השאלה: האם במצב זה דמותנו עדיין קיימת במראה?

התשובה לכך שבה ומחזירה אותנו לשאלת מהותה של הדמות המדומה. הדמות במראה נוצרת בעקבות החזרת האור מהגוף הנשקף במראה והחודר אל העין. כפי שלמדנו, דמות מדומה היא למעשה הפירוש שניתן לאור זה על ידי הצופה. כלומר, התחושה שהגוף הנצפה נמצא אי-שם "בתוך" המראה היא האשליה האופטית. קיומה של הדמות המדומה תלוי גם בהימצאות עין הצופה המפרש את תחושת הראייה. **בלי עין ובלי צופה דמות זו אינה קיימת.**

הדמות במראה מישורית נוצרת על ידי הצופה בעקבות האור המוחזר מהמראה. יצירת הדמות במראה וצפייה בה הן תהליך אחד.





סוגיות למחשבה ולדיון

1. אנו עומדים לפני מראה וצופים בדמותנו בה. האם תישאר הדמות במראה גם אם נעצום את עינינו או אם נפנה את מבטנו לכיוון אחר? נמקו.
2. יש המשווים את המצב שתואר בשאלה הקודמת למצב אחר: האם נפילת עץ ביער שאין בו אנשים יוצרת רעש ביער? האם שני המקרים דומים? במה כן ובמה לא?
3. כיצד ניתן לוודא שהדמות הנצפית במראה היא אשליה בלבד?

ג. יישומים של מראה מישורית

בני האדם השתמשו במראות זמן רב לפני שהבינו כיצד נוצרות בהן הדמויות. כאשר הצליחו המדענים להבין כיצד נוהג האור הפוגע במשטח חלק וכאשר השתכללו שיטות הייצור של המראות, למד האדם להיעזר במראות לצרכים שונים. נכיר עתה כמה דוגמאות לשימוש במראות מישוריות (בפרק הבא נכיר שימושים כאלה במראות מסוג אחר – מראות כדוריות).

1. המחזיר המושלם

מוסכם על כולם כי מראה מחזירה את האור, האם זה נכון בכל מקרה? כמו בשאלות רבות אחרות, גם כאן התשובה היא "כן" ו"לא".

נתחיל מהפשוט. אכן, המראה האידיאלית מחזירה את כל האור הפוגע בה, אולם מראה אידיאלית אינה בנמצא, ומכאן נובע שמראות אינן מחזירות את כל האור.

ומה באשר לכיוון החזרת האור? כשם שהמראה אינה מחזירה את כל האור הפוגע בה, כך גם בדרך כלל משנה המראה את כיוונו. רק במקרה אחד, כאשר האור פוגע בניצב למישור המראה, היא "מחזירה" אותו במובן הפשוט של המילה: בדיוק בכיוון הנגדי, כלומר הקרן חוזרת במסלול של הקרן הפוגעת.

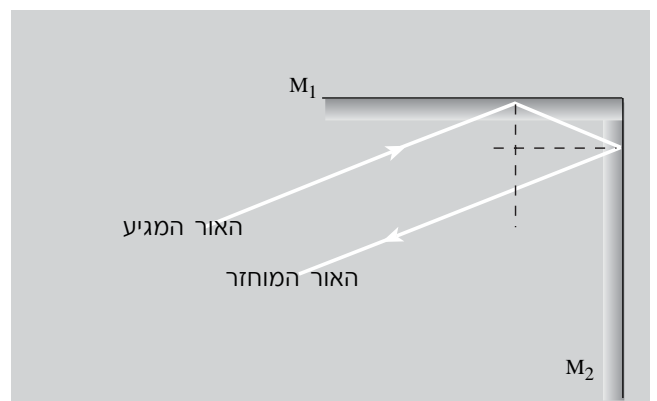
כאמור, פרט למקרה של פגיעה אנכית, האור המוחזר מהמראה משנה את מסלולו. האם ניתן "לאלץ" את המראה המישורית להחזיר את האור תמיד בדיוק לכיוון הנגדי? ובכן, מראה מישורית אחת לא תעשה זאת, אך שתי מראות מישוריות – בהחלט כן יעשו זאת. איור 8-11 מציג את המקרה. באיור מוצגות שתי מראות מישוריות הניצבות זו לזו. מתקן זה יחזיר את אלומת האור הפוגעת בו לכיוון שממנו היא הגיעה בכל מצב. ההוכחה לכך היא גאומטרית ומתבססת על חוק ההחזרה.

אכן שתי מראות מישוריות יוצרות את המחזיר "המושלם" במקרה "המישורי" – הקרן המגיעה והקרן המוחזרת הן באותו המישור. מתברר שההכללה למקרה המרחבי אינה

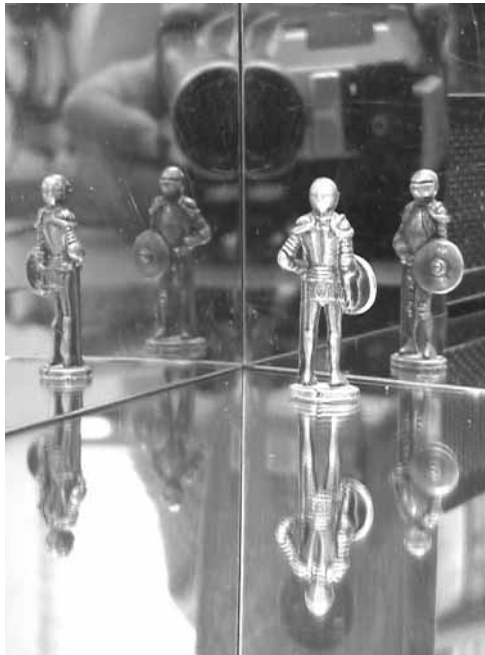
הרחבת המבט



העובדה שאור יכול לנוע בו-זמנית באותו מסלול בכיוונים הפוכים חייבת "להדליק נורה אדומה" אצל מי שרוצה להבין את מהות האור: נניח שהאור מורכב מחלקיקים קטנים, אזי איך ייתכן שזרם החלקיקים ינוע בו-זמנית באותו המסלול אך בכיוונים הפוכים ללא הפרעות והתנגשויות? (לתופעה מוזרה זו נחזור בהמשך הלימוד).



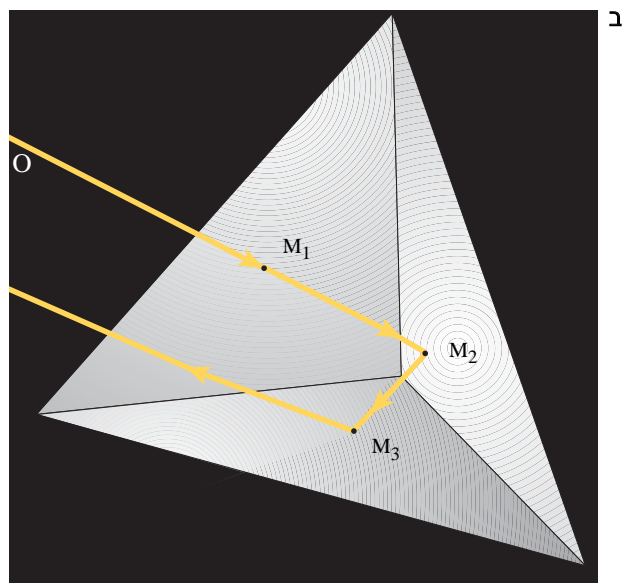
איור 8-11: שתי מראות ניצבות זו לזו מחזירות כל אלומת אור ממוקדת לכיוון הנגדי לכיוון הפגיעה ובמקביל לו.



IG

קשה. המתקן שמבצע זאת נקרא "מחזיר אור פינתי" (איור 8-12). במתקן זה יש שלוש מראות מישוריות היוצרות פינה של קובייה. קרן אור הפוגעת בזווית כלשהי באחת המראות, תעבור שתי החזרות ותחזור בכיוון המקביל בדיוק לכיוונה של הקרן הפוגעת. ההוכחה הגאומטרית במקרה זה קצת יותר מורכבת, אך היא מבוססת על אותן הטענות כשהן מותאמות למקרה התלת-ממדי.

יכולתו הייחודית של מחזיר האור הפינתי מאפשרת שימושים לצרכים חדשים. כך למשל רצוי שבנסיעה בלילה, האור הבוקע מפנסי המכונית יוחזר מהמכונית הנוסעת לפנינו. מראה מישורית אינה טובה למטרה זו כלל. הפתרון הפשוט הוא מחזיר אור פינתי. החלק האחורי של רכבים שונים, כמו גם עיקולי כביש מסוכנים, מסומנים על-ידי "פנסים עיוורים". אלה הם תבניות פלסטיק המורכבות מהרבה פינות קטנות כמו באיור 8-12. אורות כלי הרכב הפוגעים במתקן זה מוחזרים לכיוונו של הנהוג ברכב, ומזהירים אותו מפני סכנה.



ב

איור 8-12: (א) מחזיר אור פינתי מורכב משלוש מראות. (ב) קרן אור המגיעה מ-O פוגעת במראה ראשונה M_1 , מוחזרת למראה שנייה M_2 , ממשיכה למראה שלישית M_3 ומשם החוצה, חזרה לכיוון המקורי (מוססת קצת הצידה).

בעיה דומה (מבחינה רעיונית) ניצבה בפני חוקרי הירח. האסטרונוטים של "אפולו 11" השאירו על הירח מראה שתחזיר אותות שיישלחו מכדור הארץ בדיוק אל המשדר. ה"מראה" מורכבת מפינות קובייה רבות המחזירות את קרן הלייזר לבסיס שעל הארץ, משם היא משוגרת. בעזרת מתקן זה בוצעה מדידה מדויקת של המרחק בין הירח לכדור הארץ. שיטה זו מאפשרת למדוד מרחקים גדולים במיוחד בדיוק של סנטימטרים בודדים.

ועוד דוגמה: מחזיר אור פינתי עזר לבדוק את מידת התזוזה של היבשות. נתונים מדויקים על המרחק הושגו באמצעות קרן לייזר ששוגרה הלוך ושוב בין שני מחזירי אור פינתיים שמוקמו בשתי יבשות שונות. התברר כי המרחק בין היבשות אינו קבוע, והן נעות כל הזמן (הדבר מזכיר את פירושו של תאלס מלפני כ-2500 שנה, כאשר סבר כי רעידות האדמה הן תוצאה של ציפת היבשות על פני המים).

מחזיר אור פינתי מחזיר את האור הפוגע בו היישר לכיוון המקור.





סוגיות למחשבה ולדיון



IG

1. אין נוהגים להדליק אור בתוך מכונית הנוסעת בלילה. מדוע?
2. הוכיחו כי קרן אור הפוגעת בזווית כלשהי במחזיר אור פינתי תוחזר בכיוון המקביל לכיוונה של הקרן הפוגעת.
3. באילו מקרים יש יתרון בשימוש במחזיר אור פינתי?
4. מדוע קשה להחזיר אור מהירח אל הארץ באמצעות מראה מישורית?
5. מדוע עדיף להשתמש במקרה זה בקרן לייזר?

2. החזרה מרובה – חגיגה של דמויות

כשעסקנו בדמות הנוצרת במראה מישורית הגענו לכלל הקובע את מיקומה, כפי שנתפס על ידי הצופה: בתוך המראה וסימטרי ביחס למראה. בהמשך הרחבנו וקבענו כיצד ניתן לקבוע את מיקומה של הדמות לאחר החזרה ממראה מישורית נוספת. הכלל במקרה זה היה לראות את הדמות הראשונה כמקור האור עבור המראה השנייה. דוגמה יפה ומוכרת להחזרה מרובה היא ריבוי דמויות בשתי מראות מקבילות. סידור זה של מראות גורם לצופה תחושה שהוא רואה "אינסוף" דמויות (איור 8-13א+ב) אנו ממחישים את הכלל ביצירת הדמות השלישית I_3 באיור 8-13 ברור שניתן להמשיך ולחשוב על היווצרות הדמויות גם לאחר החזרים נוספים של האור.

לעומת זאת, כאשר הצופה מתבונן בדמותו שלו במראות מקבילות תתקבל רק דמות אחת. הסיבה לכך היא התלכדותם של גוף הצופה ודמותו במראה (איור 8-13 עוזר להבין את התופעה). יש לדמיין את מהלך הקרניים כאשר נקודה O מתקרבת בהדרגה לנקודה E. ברגע ההתלכדות לא נראה אינסוף דמויות – הן פשוט תתלכדנה. כדי לראות אותן בכל זאת יש להסיט מעט את המראות כדי שלא יהיו מקבילות.

דוגמה אומנותית יפה ביותר לתופעה זו רואים בהיכל הזיכרון לילדי השואה ביד-ושם בירושלים. נרות נשמה ספורים הדולקים באולם ענקי שקירותיו מכוסים במראות, יוצרים מיליוני דמויות של נרות הדולקים לזכר הילדים שנספו בשואה.

איור 8-13: (א) השתקפות מרובה של נר דולק בשתי מראות מקבילות מישוריות; (ב) השתקפות מרובה של שעון בשתי מראות מקבילות מישוריות. צילום זה מוסיף פרטים על מה שקורה לדמויות מבחינת ההיפוך.



IG

ב



א

הרחבת המבט



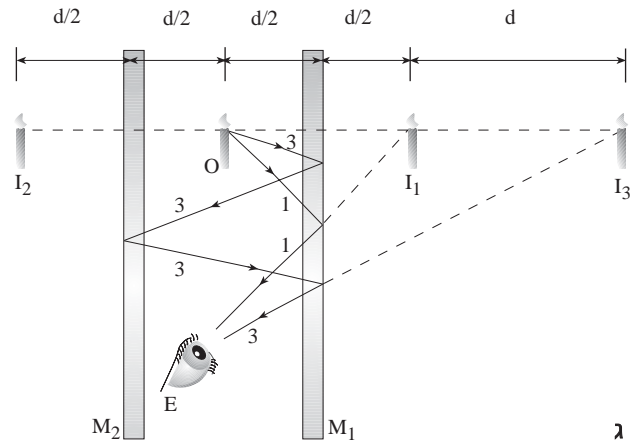
ראיית דמויות מרובות מזכירה לרבים את הקלדוסקופ, כנראה הצעצוע האופטי העתיק מכולם. קלדוסקופ היה ידוע כבר ביוון העתיקה, כי המילה מורכבת משלוש מילים ביוונית ופרושה "כלי שבו יכולים לראות דברים יפים". ב-1817 הפיסיקאי הסקוטי הידוע, סר דוד ברוסטר, חזר והמציא את הקלדוסקופ ופרסם על כך מאמר מיוחד "מחקר על קלדוסקופ". לאחר הפרסום הפך הקלדוסקופ במהרה לצעצוע המפורסם ביותר.

IG



קלדוסקופים שונים בחלון הראווה של חנות העתיקות

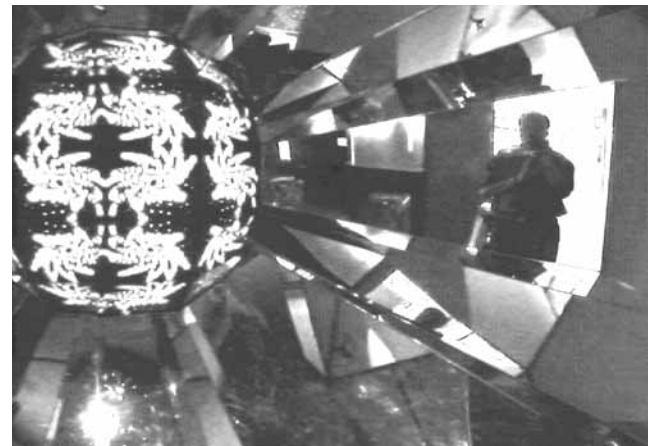
בצורתו הפשוטה ביותר יש בקלדוסקופ שתי מראות שטוחות הצמודות בזווית של 60° . בין המראות, המצויות בתוך גליל, מניחים מספר פיסות זכוכית צבעונית, סוגרים צד אחד של השפופרת וצופים בפתח שבצד השני (עיינו באיורים). החוש הטבעי שלנו מעריך מאוד את הסימטריה שבצורות. הקלדוסקופ מספק שפע של הזדמנויות לראות דגמים סימטריים נפלאים שמתחלפים באינסוף אפשרויות.



ג

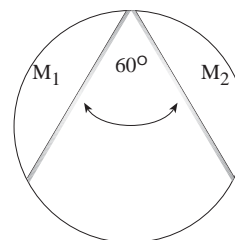
(ג) החזרה מרובה בין שתי המראות המקבילות M_1 ו- M_2 (המרוחקות במרחק d) גורמת לראיית דמויות מרובות של גוף O אצל הצופה E . בצירור נראים שני מסלולי האור המציינים את היווצרות הדמויות I_1 (מסלול 1-1), ו- I_3 (מסלול 3-3-3). מבלי לפרט את מסלולי האור ניתן לקבל את מיקומה של הדמות I_2 כסימטרית לגוף O ביחס למראה M_2 . שימו לב, דמות I_3 מתקבלת מיידית (ללא מסלול האור) כשיקוף סימטרי של דמות I_2 במראה M_1 .

IG



קלדוסקופ ענקי במוזאון המדע.

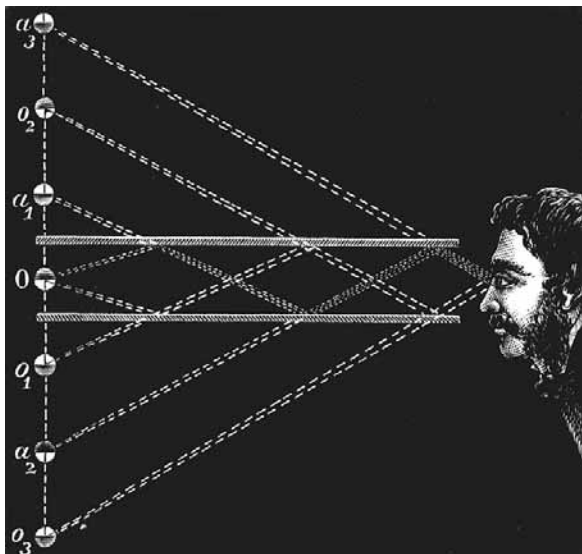
(זהו את הדגם המקורי ואת ההשתקפויות שלו)



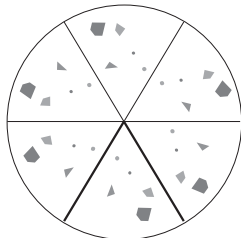
מבנה של קלדוסקופ פשוט

סוגיות למחשבה ולדיון ?

1. מקור אור קטן מצוי בנקודה $x=a/2$ ושתי מראות מקבילות ניצבות במרחקים שונים משני צדדיו: אחת ב- $x=a$ והשנייה ב- $x=-a$. היכן תימצאנה 4 הדמויות הקרובות ביותר למקור האור שיווצרו על ידי שתי המראות?
2. תארו לעצמכם חדר שקירותיו מכוסים במראות, ובמרכזו ניצב נר דולק. האם חדר זה יהיה מואר יותר מחדר זהה שקירותיו אינם מכוסים במראות? נמקו תשובתכם.
3. אלומת אור ליזר פוגעת במראה מישורית. באיזו זווית ביחס לקרן האור יש להציב את המראה כך שהקרן תוסט ממסלולה המקורי ב-90 מעלות? ב-20 מעלות? מהו הכלל?
4. תנו את הדעת: האם אנו אכן רואים אינסוף דמויות במראות מקבילות? הסבירו.
5. הסבירו כיצד ניתן לקבל ללא סרטוט את אינסוף הדמויות הנראות במראות מקבילות.
6. כאשר אנו רואים דמויות רבות של עצמנו צריך לדייק ולומר: "אנו רואים אותן בזוג מראות כמעט מקבילות" ולא ב"זוג מראות מקבילות". הסבירו את הסיבה לתיקון.
7. לפניכם איור מספר אופטיקה משנת 1881 (מצד שמאל). המחבר ניסה להסביר את תופעת הדמויות המרובות בשתי מראות שטוחות ומקבילות. האם האיור מדויק? מדוע כן ומדוע לא? כיצד ניתן לשפר את האיור? בצילום מימין אכן רואים דמויות מרובות של הצלם. מהו ההבדל בין הדמויות?

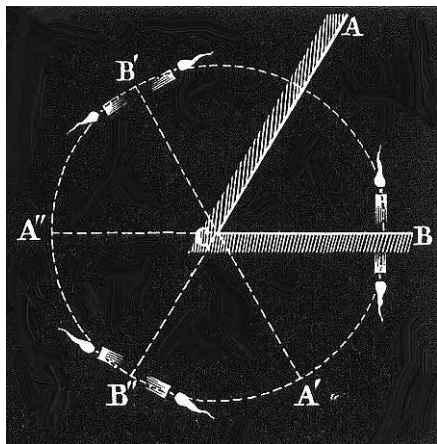


IG



8. לפניכם איור המציג את הדגם הנצפה בקלדוסקופ. הסבירו את הסימטריה שבציור ואת הדרך בה נוצר הדגם. (מסלולי האור).

9. מה לדעתכם רצה להסביר המחבר של ספר לימוד האופטיקה משנת 1881 בעזרת האיור הבא?
10. הסבירו את ההיפוך של דמויות השעון באיור 8-13 ב.
11. הסבירו את ההיפוך של דמויות השעון הנמצא בפינת שתי מראות מישוריות כפי שמופיע בצילום בסוף סעיף 4 (" משהו מתהפך במראה").



אלי לא עף, זה רק נדמה לנו, והכול בגלל המראה.

הרחבת המבט

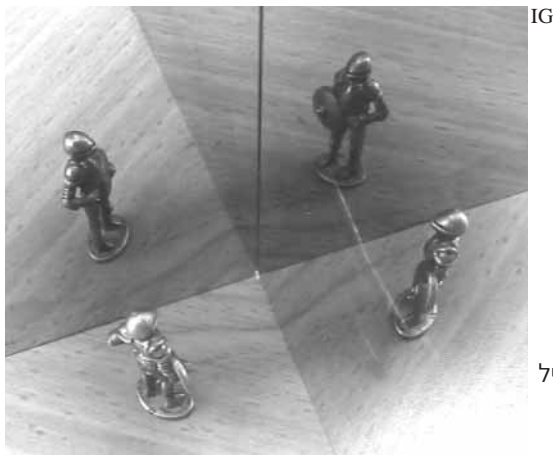


כיצד מייצרים מראות? מראות רבות משמשות לציווד מדעי במכשירים אופטיים רבים ומגוונים: טלסקופים, מצלמות, מיקרוסקופים, מתקני לייזר וכו'. המראות לשימושים אלו צריכות להיות מדויקות ביותר והן מיוצרות בשיטה של אידוי מתכת בחלל שרוקן מאוויר (ואקום). בתהליך זה החומר המתכתי המשמש כמחזיר אור במראה מחומם עד לרתיחה בתא ואקום. לאחר מכן מוזרמים אדי החומר על המשטח הנושא (זכוכית או חומר חלק אחר), ועליו הם מתקררים ומתעבים. כך מתקבל ציפוי אחיד. החומר המחזיר הנפוץ ביותר הוא אלומיניום. אמנם כושר ההחזרה שלו קטן במעט מזה של הכסף, אך שכבת האלומיניום עמידה יותר. כדי להגן על משטח הזכוכית מוסיפים עליו לעתים שכבת סיליקון שקופה. בשימושים מדעיים במראות הדורשים דיוק רב ביותר משתמשים בקוורץ, משום שחומר זה מתפשט מעט מאוד בחום.



עיקרי הדברים שנלמדו בפרק זה

- תכונת ההחזרה של האור באה לביטוי בולט כשהאור מוחזר ממשטחים חלקים, למשל מראות.
- החזרת האור מן המראה המישורית אינה משנה את אופי האלומה: ממוקדת, מתבדרת או מתכנסת.
- תכונה זו גורמת לכך שהצופה הקולט אור הנובע מהגופים ומוחזר במראה רואה את הדמות כאילו היא נמצאת בתוך המראה, במקום סימטרי למקור שממנו הגיע האור.
- דמויות הנצפות במראה מישורית הן מדומות, אשליה אופטית של השתקפויות גופים בסביבה.
- כדי למצוא את הדמות במראה אנו משתמשים בטכניקה של סרטוט קרני אור היוצאות מנקודות שונות על פני הגוף, פוגעות במראה ומוחזרות ממנה על פי חוקי ההחזרה.
- את המיקום של הדמות המדומה ניתן למצוא כאשר ממשיכים את קרני אור הפוגעות במראה עד הצטלבותן מאחורי המראה.
- הדמות במראה מישורית נראית כמצויה מאחורי המראה במרחק השווה בדיוק למרחק הגוף מהמראה. גם גודלה של הדמות שווה לגודלו של העצם, ולכן מראה מישורית אינה יוצרת דמויות מעוותות. יחד עם זאת, הדמויות במראה מתהפכות בכיוון של "קרוב-רחוק" ביחס לצופה שמאחורי הגוף.
- דמות המראה מתהפכת מבחינת הבורגיות (בורג ימני נראה כבורג שמאלי, ולהפך).
- הואיל והדמות המדומה היא אשליה אופטית של הצופה, אין להפריד בין יצירת הדמות והצפייה בה. זהו תהליך אחד. הדמות במראה אינה נוצרת ללא הצופה הקולט את האור המוחזר ומפרש אותו כדמות.



IG

בשני התצלומים חייל אחד נמצא בפינה של שתי מראות

IG

