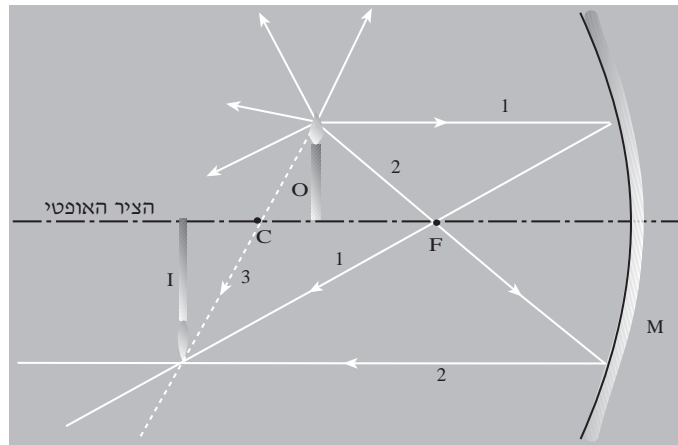
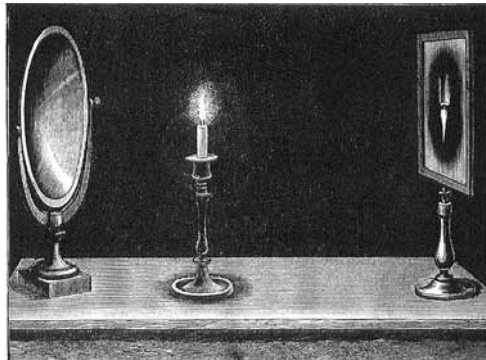


2. גוף הנמצא בין מרכז המראה ובין מוקדה

הניסוי מלמד שבניגוד למראה קמורה שבה מיקום הגוף השפיע רק על גודל הדמות, הרי שבמראה קעורה למרחק הגוף יש השפעה רבה יותר. נציב עתה את הגוף בין נקודת המוקד (כזכור: $R=2f$) ובין מרכז המראה הכדורית (איור 8-10). אופן ההיעזרות בקרניים המיוחדות הוא דומה (קרניים 1 ו-2). באשר לקרן 3 – מסלולה מתלכד עם כיוון הרדיוס של המראה. לאחר הבנייה מתקבלת דמות שהיא ממשית, מוגדלת והפוכה לעומת הגוף המקורי. ההבדל לעומת המקרה הקודם (סעיף 1) הוא ביצירת דמות מוגדלת.

דמותו של גוף הנמצא בין המוקד לבין מרכז העקמומיות של מראה קעורה היא ממשית, הפוכה ומוגדלת.

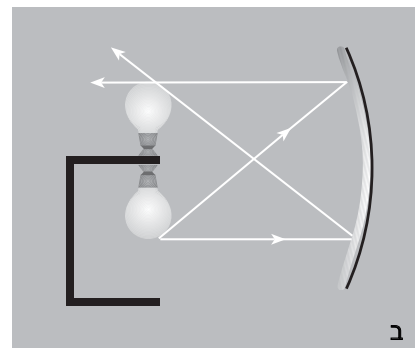
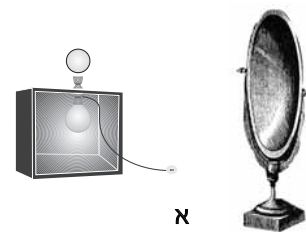


איור 8-10: בניית הדמות של גוף המצוי בין המוקד לבין מרכז העקמומיות של המראה (מוצגות רק שתי קרניים מיוחדות).

3. לראות - כן, לגעת? - לא...

הדגמה מעניינת של דמות ממשית במראה קעורה מוצאים כמעט בכל מזיאון מדע בערים רבות בעולם. חפץ מואר או מקור אור נמצא בתוך קופסה הפתוחה מצד אחד (איור 10-9א). במרחק מסוים מול פתח הקופסה מציבים מראה קעורה (כשפתח הקופסה כלפי המראה), כך שהדמות הממשית של הגוף נוצרת בדיוק מעל הקופסה (איור 10-9ב). אצל הצופה במראה נוצרת האשליה כי הגוף עומד על הקופסה. מובן שהניסיונות לגעת בו עולים בתוהו: אף שהדמות היא דמות ממשית, הרי שעדיין זוהי רק דמות, והגוף עצמו נמצא בתוך הקופסה. את ההסבר לתופעה ניתן להבין מאיור (10-9ב). ההסבר הוא פשוט ומתבסס על מה שנאמר לגבי הדמות הממשית של עצם במראה קעורה. כדאי לשים לב שישנן שתי דרכים לצפות בדמות הממשית: האחת – על המסך (ואז ניתן לראות את הדמות מכל כיוון) השנייה – בצפייה ישירה, כאשר העין קולטת את האור לאחר שיצר את הדמות הממשית. במקרה זה הדמות הממשית "צפה באוויר" ממש. ההדגמה שתוארה לעיל ממחישה צפייה בדמות ממשית בדרך השנייה.

איור 9-10: (א) מקור אור מותקן בתוך קופסה ומולו המראה הקעורה; (ב) בעקבות החזרת האור נוצרת דמות ממשית אשר ניתנת לצפייה.





סוגיות למחשבה ולדיון



המראות העקומות
המלוות אותנו יום
יום...

1. ניסוי: השתמשו במראה קעורה כדי לקבל את דמותו של נר דולק על מסד, שנו בהדרגה את מרחקו של הנר מהמראה. מה מתקבל על המסד? מה נראה במראה? הסבירו את התופעות שצפיתם בהן.
2. באיזו מראה משתמש רופא השיניים בעבודתו? מדוע דווקא במראה כזו?
3. באילו דרכים אפשר לצפות בדמות ממשית במראה קעורה? תארו אותן והסבירו את ההבדל ביניהן.

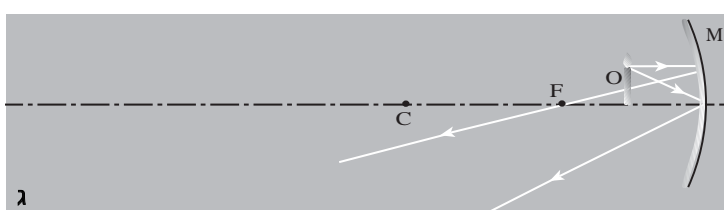
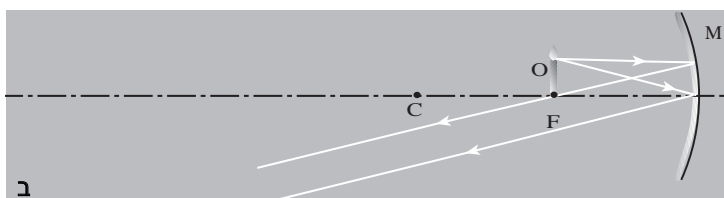
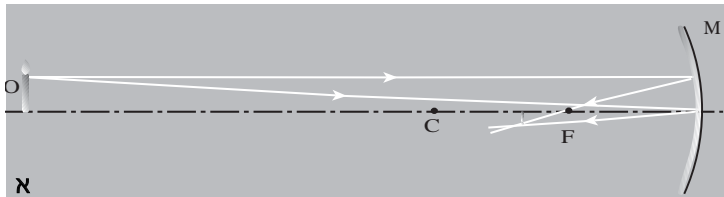
4. מה קורה כשמקרבים מאוד את הגוף למראה קעורה?

נמשיך ונקרב את הגוף לעבר המראה. כאשר נעבור את מוקד המראה ישתנה המצב שינוי של ממש. נוכל להבין את הסיבה לכך כאשר נעקוב אחרי שתי קרניים שתי קרניים נתונות היוצאות מראש החץ (איור 10-10). נתחיל מהמצב שבו הגוף רחוק מהמראה (איור 10-10א). הקרניים (הציריות) מוחזרות כך שהן יוצרות את הדמות בקרבת המוקד. ככל שהגוף הולך ומתקרב למוקד, הצטלבות הקרניים מתרחקת מן המראה. כאשר מגיע הגוף למוקד, הקרניים מוחזרות כמקבילות ואינן נפגשות כלל (איור 10-10ב). וכשהגוף מתקרב למראה עוד יותר, הקרניים מוחזרות כמתבדרות, כלומר אינן נפגשות (איור 10-10ג).

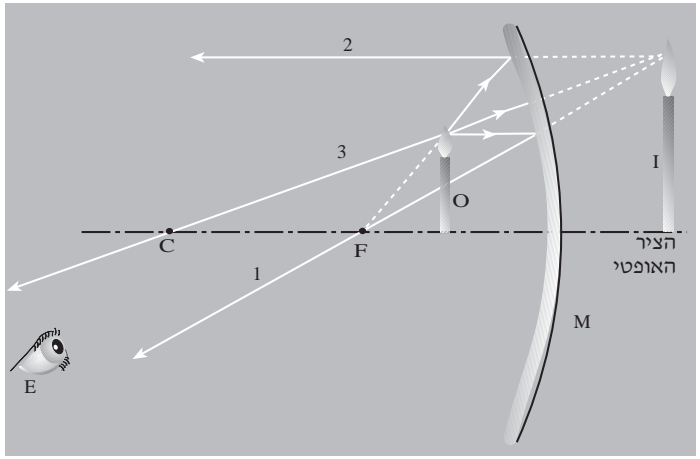


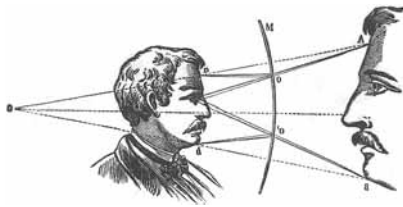
IG

איור 10-10: (א) כאשר הגוף נמצא במרחק גדול, הקרניים נפגשות כמעט במוקד; (ב) כאשר הגוף נמצא במוקד, אותן הקרניים מוחזרות כמקבילות; (ג) כאשר הגוף עובר את המוקד, הקרניים מתבדרות.



איור 10-11: הדמות הנצפית במראה קעורה, כאשר הגוף נמצא בין המוקד ובין משטח המראה.





כפי שנאמר, במקרה האחרון המראה הקעורה אינה מסוגלת לגרום להתכנסות הקרניים היוצאות מאותה נקודת גוף, והדמות הממשית אינה נוצרת. אך נוכחות הצופה יכולה לשנות את המצב. הצופה המתבונן במראה יפרש את הקרניים המתפזרות כאילו יוצאות מנקודה שמאחורי המראה, שהיא נקודת המפגש של המשכי הקרניים (איור 10-11). כפי שלמדנו, במצב זה נוצרת דמות **מדומה**. זוהי אשליה אופטית, תוצאה של פירוש הניתן לאור על ידי הצופה. הדמות מתקבלת במקרה זה היא ישרה ומוגדלת.

כשהגוף נמצא במרחק קצר מאורך המוקד או שווה לו – המראה הקעורה אינה מסוגלת למקד את האור המוחזר. במקרה זה הצופה המתבונן במראה יראה דמות **מדומה**, ישרה ומוגדלת (אך על גבי מסך לא תקבל דמות).



ד. נוסחת המראות הכדוריות

כפי שרואים, שימוש בקרני אור מסייע להבין את תופעת הדמויות, אך זוהי הבנה **איכותית** בלבד שאינה עונה על הדרישה לדיוק כמותי, וודאי שלא על צורכי הטכנולוגיה. גם במדע קיימת שאיפה מתמדת לתיאור כמותי מדויק של התופעות. הבנה כמותית לא פחות חשובה מאשר הבנה איכותית. מה הסיבות לכך? סיבה אחת היא שההסבר הכמותי, המבוסס גם הוא על התאוריה, אמור להיות מדויק יותר מאשר ההסבר האיכותי. כאשר יש אי-התאמה בין התוצאה החישובית לבין התוצאה הנמדדת בניסוי, מידת הגמישות בהסבר של אי-ההתאמה הזאת היא מוגבלת ואזי עולה השאלה: אולי יש מקום לשנות את התאוריה?

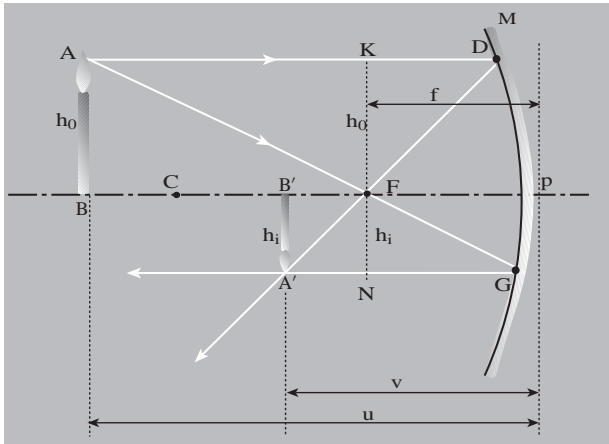
הסיבה השנייה חשובה גם היא: בחינת תולדות מדע האופטיקה מלמדת שהניסיונות להבין איכותית תופעות שונות הביאו לבניית יותר מתאוריה אחת (כמו התאוריות המתחרות באשר לתהליך הראייה). ומכאן עולה השאלה: כיצד לבחור בין תאוריות אלו? איך להפריד אחת ולהשתכנע בנכונותה של השנייה? אחת הדרכים היא להשוות את יכולתן של כל אחת מהתאוריות לתאר את התופעה תיאור כמותי מדויק. תאוריה שאינה עומדת בדרישה זו – נפסלת. בעקבות הדברים שלעיל נבדוק עתה האם הדרך שבה נקטנו לתיאור הדמויות במראות מאפשרת גם תיאור כמותי מדויק. התיאור הכמותי הזה מכונה גם תיאור "אנליטי". הוא מכוון לפיתוח ביטויים מתמטיים: נוסחאות לחישוב מיקום הדמות וגודלה.

באיור 10-12 מתואר גוף AB שגובהו h_0 . הגוף ניצב במרחק u מול מראה קעורה בעלת אורך מוקד f , ודמותו בגובה h_1 מתקבלת במרחק v מהמראה.

הרחבת המבט



בתחילה הייתה הבנת התופעות במדע הבנה איכותית (מדע הלני), ורק לאחר מכן ניתנו הסברים תיאוריים כמותיים לתופעות (מדע הלניסטי), החל במאה השלישית לפנה"ס). קיימת בעיה עקרונית כאשר מסבירים את הטבע הסבר תאורטי. החופש במתן הסבר מסוג זה הוא בלתי נמנע: המדען יכול להוסיף הנחות ופרטים כדי שהסברו יתאים לתופעה. כך נהגו מדענים בעבר ויש הנוהגים כך גם כיום. הם אף כינו פעולה זו בשם המעניין: "**שמירת התופעה**", זאת משום שמדובר במאמצים מלאכותיים, בתוספות ובשינויים בתאוריה שהוכנסו כדי **שתישמר** יכולתה להסביר את **התופעה** (נעשה מאמץ "לשמור" על התופעה כך שתוסבר במסגרת התאוריה הנוכחית). לתיאור הכמותי יש חשיבות רבה, כי הוא מסייע לקבוע אם תתקבל התאוריה המשופרת ואולי תידחה.



איור 10-12: שלבי מציאת נוסחת המראות הכדוריות.

הרחבת המבט



פיתחנו את נוסחת המראה עבור מקרה מסוים של מיקום הגוף ומוקד המראה הקעורה (איור 10-12) אפשר להראות שכאשר מרחק הגוף קצר ממרחק המוקד (המקרה של דמות מדומה) הנוסחה נשארת תקפה. קל גם להראות (למשל בהצבת המספרים בנוסחה) שבמקרה זה v , מרחק הדמות מהמראה, הוא בערכים שליליים.

יותר מכך, ניתן לחזור אל הפיתוח עבור מראה קמורה ולהראות שגם אז נשמרת הנוסחה, אך הפעם שני הגדלים, v ו- f , הם בערכים שליליים. אנו יכולים לסכם את הכלל עבור הגדלים המופיעים בנוסחה: u , מרחקו של הגוף מהמראה – תמיד חיובי; f , מרחק המוקד של המראה – חיובי במראה קעורה ושלילי במראה קמורה; v , מרחק הדמות מהמראה – חיובי בדמות ממשית ושלילי בדמות מדומה.

הואיל ו- $\angle AFD = \angle A'FG$ (זוויות קדקודיות),

וכן: $\angle ADF = \angle GA'F$ (זוויות מתחלפות) הרי שמתקיים

דמיון המשולשים: $\triangle AFD \sim \triangle A'FG$. ולכן:

$$(1) \quad \frac{h_o}{h_i} = \frac{u}{v}$$

כאשר v הוא מרחק הדמות מהמראה ו- u הוא מרחק הגוף מהמראה. קיים גם דמיון משולשים אחר: $\triangle AKF \sim \triangle GNF$, ולכן:

$$(2) \quad \frac{h_o}{h_i} = \frac{u-f}{f}$$

אם נשווה בין שני הביטויים, (1) ו-(2), נקבל:

$$\frac{u}{v} = \frac{u-f}{f}$$

נחלק את שני האגפים ב- u :

$$\frac{1}{v} + \frac{1}{u} = \frac{1}{f}$$

נהוג לכנות את המשוואה האחרונה בשם "נוסחת המראות הכדוריות". חשוב לזכור את ההגבלה שנקבעה בפיתוח הנוסחה: מסלול האור קרוב לציר האופטי של המראה (קרניים ציריות).

ומה לגבי גודל הדמות? מהם גורמי ההשפעה וכיצד הם משפיעים עליה? "הגדלת המראה" מוגדרת כיחס בין אורך הדמות ובין אורך הגוף. זוהי **ההגדלה הקווית**, כי מדובר ביחס בין אורכי הדמות ובין הגוף. על פי ביטוי (1) לעיל, מקבלים את ההגדלה:

$$m = \frac{h_i}{h_o} = \frac{v}{u}$$

הגודל m הוא ההגדלה הקווית של המראה. ברור שבמקרה של הגדלה נקבל ערכים של m גדולים מאחד ($m > 1$). נשים לב כי גם במקרים של **הקטנה** אנו מכנים זאת **הגדלה**, אלא שאז ערכה קטן מאחד ($m < 1$).

f – אורך המוקד של המראה, u – מרחקו של הגוף מהמראה, v – מרחק הדמות מהמראה.

נוסחת המראה הכדורית
 $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$

h_o – גובהו של הגוף, h_i – גובהה של הדמות.

נוסחת ההגדלה של מראה כדורית
 $\frac{h_i}{h_o} = \frac{v}{u}$



סוגיות למחשבה ולדיון



IG

1. נסו להוכיח באופן דומה את נוסחת המראות למראה קמורה.
2. האם נוסחת המראות הכדוריות נכונה גם לגבי מראה מישורית? נמקו.
3. מהו אורך המוקד של מראה מישורית? מהי ההגדלה שלה?
4. פתחו את הנוסחה של המראה הקעורה עבור המקרה של דמות מדומה ($u < f$). הראו שמרחק הדמות בנוסחה חייב להיות שלילי.
5. הראו שבמקרה של מראה קמורה מרחק הדמות ומרחק המוקד חייבים להיות שליליים כדי לקיים את הנוסחה.
6. אם נגדיר: גובה הדמות וגובה הגוף הם חיוביים מעל הציר האופטי ושליליים מתחתיו, מה תהיה משמעות סימנו של מקדם ההגדלה?
7. הבלון (בתמונה משמאל) צולם באולם שבו היו מנורות תקרה רבות. הסבירו את התופעה שכל מנורת תקרה משתקפת פעמיים בבלון.

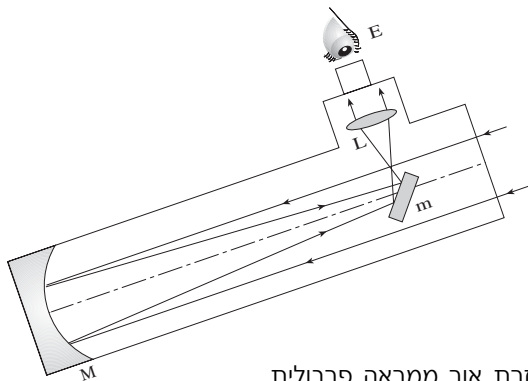
ה. שימושים במראות קעורות

השימושים במראה קעורה אינם מוגבלים רק לריכוז האור בנקודה או ליצירת אלומת אור מקבילה (המראה הפרבולית). יכולתה של המראה הקעורה ליצור דמויות מוגדלות וישרות מאפשרת להשתמש בה כמראה מגדילה, למשל: לאיפור או לגילוח. במקרים אלו מתבוננים במראה ממרחק קצר יותר ממרחק המוקד.

שימוש אחר במראה הקעורה נעשה בתחום המדע באחד מהמכשירים החשובים באסטרונומיה – **הטלסקופ המחזיר**. הטלסקופ הראשון הומצא בסוף המאה ה-16. טלסקופ זה הורכב מעדשות והתבסס על שבירת האור (על כך נלמד בהמשך). באותה התקופה הסביר דקארט, מדען צרפתי, את תופעת הקשת – הופעת צבעים כתוצאה משבירת האור. הופעת הצבעים בשבירה אינה רצויה במכשירים אופטיים כי היא פוגמת באיכות הדמויות. כיצד להימנע מכך? כשישים שנה לאחר דקארט, הציע ניוטון (מדען אנגלי) דרך להתגבר על הופעת הצבעים באמצעות טלסקופ המבוסס על החזרת האור ולא על שבירתו. לריכוז האור השתמש ניוטון במראה קעורה במקום בעדשה. אף על פי שמאוחר יותר התברר כי

ניתן להתגבר על הבעיה גם בעזרת עדשות, הרי שהדגם של טלסקופ מראה נשאר בשימוש. כיום בנויים הטלסקופים האופטיים הגדולים ביותר לפי דגם זה, המכונה "טלסקופ מחזיר".

הטלסקופ של ניוטון היה בנוי בצורת גליל שבקצהו התחתון מראה פרבולית (איור 10-13). אלומת האור המגיעה מעצם מרוחק מוחזרת מהמראה M אל מראה מישורית m, המטה את האור לכיוונה של עדשה L. עינו של הצופה E נמצאת מאחורי העדשה.



איור 10-13: טלסקופ ניוטוני המבוסס על החזרת אור ממראה פרבולית.

הרחבת המבט



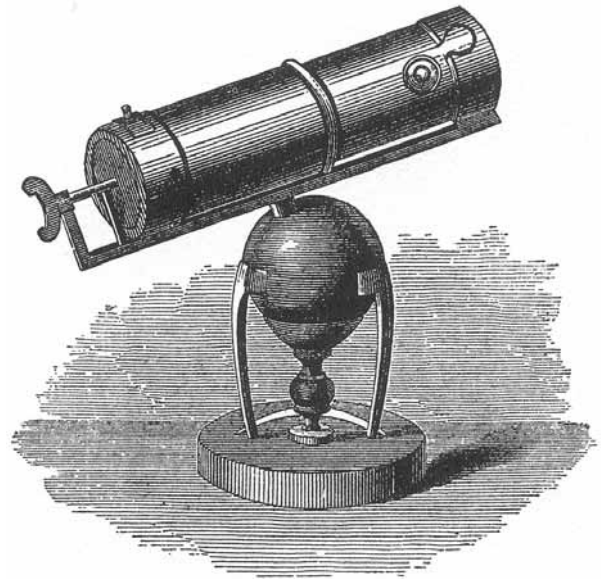
מאחר שמראה גדולה קל יותר לבנות מאשר עדשה גדולה, מבוססים רוב הטלסקופים האסטרונומיים הגדולים של ימינו על העיקרון שהוצע על ידי ניוטון. הטלסקופ המחזיר הגדול הפעיל בימינו ניצב בהווה. קוטר המראה שלו – עשרה מטרים. טכנולוגיית הבנייה של מראות מסוג זה מורכבת מאוד ומצריכה דיוק רב וידע מעמיק בתכונות החומרים. להמחשת מידת הדיוק הרבה של המראות ניתן לומר שאם נגדיל את שטח מראת הטלסקופ בהר פלומר שבארה"ב (קוטר "רק" 5 מטר) לגודלו של הים התיכון, הרי שגובה הגבשושיות שעל פניה לא יעלה על 10 ס"מ.

המראה הפרבולית מחליפה את העדשה הגדולה בטלסקופ הראשון ובכך מפחיתה משמעותית את הופעת הצבעים (הופעת הצבעים בשבירת אור – אברציה כרומטית [chromatic aberrations] תילמד בהמשך).

כפי שלמדנו, הראייה מתרחשת כאשר אור מגיע מהגוף הנצפה וחודר אל העין דרך האישון. חדות הראייה ובהירות התמונה המתקבלת תלויה בכמות האור החודרת לעין. כשכמות האור קטנה מאוד (למשל מעצמים מרוחקים כמו כוכבים), איכות הראייה נמוכה. כאשר משתמשים במראה פרבולית בעלת שטח פנים גדול ניתן לאסוף כמות אור גדולה יותר ולרכז אותה בנקודה אחת. הטלסקופ המחזיר מצויד במראה פרבולית, ולכן אפשר לקבל באמצעותו דמויות בהירות באיכות גבוהה. בטלסקופים משוכללים שבהם משתמשים כיום מותקנת מצלמה אלקטרונית מיוחדת המאפשרת לשפר את איכות התמונה שיפור של ממש הודות לכך שחושפים את סרט הצילום לזמן ממושך וכך אוספים כמות אור רבה ביותר.

1. נקודת המוקד למישור המוקדי

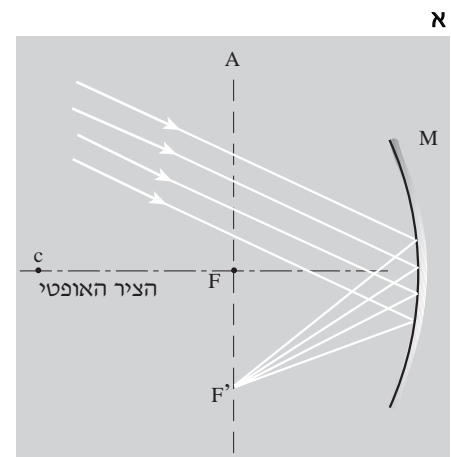
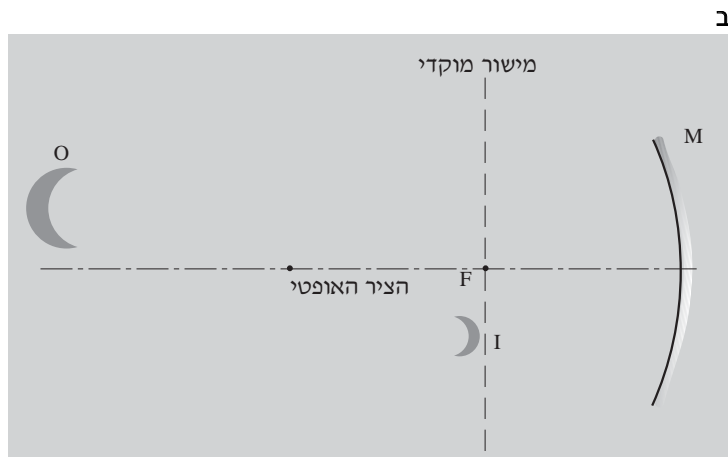
כיצד יוצרת מראת הטלסקופ את דמותם של הכוכבים? גוף נקודתי הנמצא על הציר האופטי במרחק רב מהמראה ישתקף במוקד המראה. במידה רבה של דיוק ניתן להגיד שאלומת האור מגיעה ממנו מקבילה לציר האופטי. נשאלת השאלה: מה קורה כשהגוף הנקודתי מוזז במקצת מהציר? הניסיון מלמד שבמקרה זה נקודת המיקוד של האור תוזז גם כן בכיוון הפוך יחסית לציר. נקודה זו מכונה בשם **מוקד משני** (F' באיור 10-14), וזאת בנוסף ל**מוקד הראשי**, F , של המראה שאותו הכרנו עד כה. אוסף של מוקדים משניים מגדיר את **המישור המוקדי** של המראה (AB). גרמי שמים, כמו שמש, ירח ואחרים, יוצרים דמויות המצויות במישור המוקדי של המראה, ובהן מתבוננים בעדשה מגדלת (איור 10-15). צורת המישור המוקדי תלויה בצורת המראה. נציין כי מה שטענו לגבי דמויות הכוכבים תקף לגבי כל



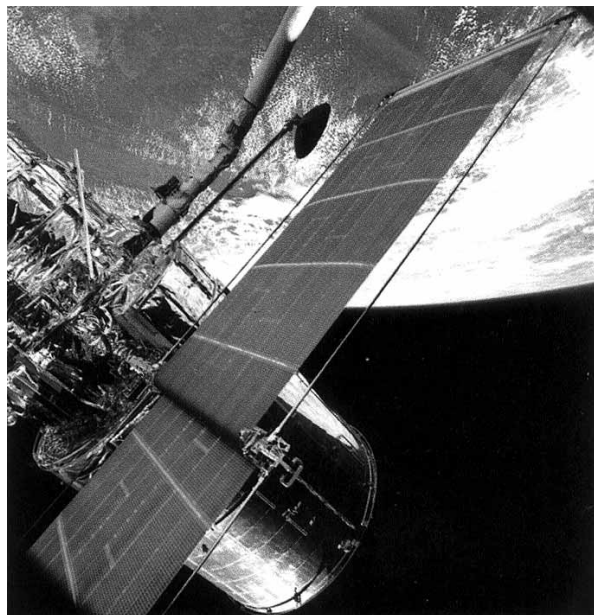
איור 10-14: הטלסקופ המחזיר שבנה ניוטון נשמר בקמברידז', האוניברסיטה שבה למד ועבד.

מקור אור הנמצא רחוק מספיק מהמראה (אינסוף פיזיקלי!). אנו יכולים לטעון בדיוק רב מאוד שדמויותיהם של גופים רחוקים ייווצרו במישור המוקדי של המראה (איור 10-15).

המישור המוקדי הוא מישור העובר דרך מוקד המראה בניצב לציר האופטי. במישור זה מתרכזות אלומות ישרות שאינן מקבילות לציר האופטי.



איור 10-15: (א) אלומת אור מכוכב מסוים פוגעת במראה קעורה M ומתמקדת בנקודה F' המצויה על המישור המוקדי AB של המראה; (ב) דמות של גוף הנמצא רחוק מהמראה הקעורה. ניתן לומר במידה רבה של דיוק שהדמות נמצאת במישור המוקדי של המראה.



איור 10-16: (א) מראה קעורה הדומה לזאת מותקנת בטלסקופ החלל על שם האבל; (ב) טלסקופ האבל מקיף את כדור הארץ בגובה של 600 ק"מ.

סוגיות למחשבה ולדיון



1. מדוע יש חשיבות לקוטר המראה של הטלסקופ?
2. שחזרו (חלקית) את עקרון הפעולה של הטלסקופ המחזיר. השתמשו במראה קעורה ובמראה מישורית:
 - הציבו את המראה הקעורה מול החלון, כך שניתן יהיה לראות בה את הנוף שבחוץ.
 - הציבו מראה מישורית בנקודת המוקד של המראה הקעורה בזווית של 45° לציר האופטי של המראה.
 - התבוננו במראה המישורית מהצד כך שלא תפריעו לאור להגיע אל המראה הקמורה וממנה אל מראה המישורית.
3. בשלושת האיורים הבאים (א, ב, ג) הוצגו שלוש דמויות כפי שהן משתקפות במראה עקומה (שלא צוינה). ציינו את המיקום של המראה הנדרשת לצפייה של הדמות בכל אחת מהמקרים ואת סוגה.



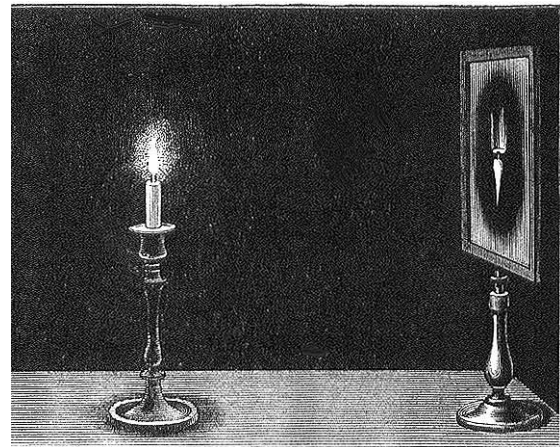
ב



א



IG



ג

4. בצילום משמאל ניתן לראות שתי דמויות של להבת נר על דפנות הקנקן (דמות ישירה והפוכה), הסבירו את טיבן ואת דרך היווצרותן.
5. כאשר מסתכלים על כלי זכוכית כדורי מלא מים ניתן לזהות שתי דמויות של מקור אור הנמצא בסביבה (בתופעה דומה ניתן לצפות גם כאשר מסתכלים על בלון מנופח). הסבירו את דרך היווצרותן של שתי דמויות אלו (רמז: ראו שתי תמונות בסוף הפרק).

עיקרי הדברים שנלמדו בפרק זה



- התבוננות במראה כדורית קמורה המפזרת את האור הפוגע בה מאפשרת לצפות בדמויות מדומות, ישרות ומוקטנות של הגופים.
- במראה קמורה משתמשים כמראה "פנורמית", כי היא מגדילה את שדה הראייה של הצופה לעומת גודלו הנראה במראה מישורית בעלת אותו שטח פנים.
- מראה כדורית קעורה המרכזת את האור הפוגע בה, יוצרת דמויות ממשיות והפוכות. הדמויות יכולות להיות מוגדלות ומוקטנות, על פי מרחק הגופים מהמראה.
- כאשר גוף נמצא מול מראה קעורה במרחק קטן מאורך המוקד, לא נוצרת דמות ממשית, כי האור המגיע מהעצם מתפזר לאחר ההחזרה. צופה הקולט את האור המפוזר רואה דמויות ישרות, מוגדלות ומדומות של הגופים המקוריים.
- נוסחת המראה הכדורית מקשרת כמותית את מרחקם של הגוף ושל הדמות מהמראה ואת מרחק המוקד שלה. מידת ההגדלה הקווית נקבעת על ידי המרחקים של הדמות ושל הגוף מהמראה.
- כאשר גוף מרוחק מאוד נצפה במראה, כל אחת מהנקודות שעל פניו מתקבלת ב"מוקד משני". אוסף המוקדים המשניים הוא ה"מישור המוקדי", ובו מתקבלת דמות הגוף.
- המראה הקעורה מאפשרת לבנות טלסקופ מחזיר היוצר דמויות של גופים רחוקים. ריכוזה של כמות האור הרבה המגיעה למשטח המראה, מאפשר לראות גם גופים שאינם נראים בעין בלתי מזוינת.

IG



כוס מים שקופה מהווה בו זמנית גם מראה קמורה וגם קעורה. לכן ניתן לצפות בשתי דמויות של להבת הנר. תופעה זו ראתה וציירה הציירת ההולנדית קלרה פיטרס במאה ה-17.

