

הרחבת המבט



צורת ההוכחה שהשתמש בה ארכימדס נקראת שיטת "המיצוי". כדי להוכיח טענה בדרך זו בודקים את כל האפשרויות ("ממצים" את האפשר) ופוסלים אותן אחת-לאחת עד שנותרים עם אפשרות אחת – ואותה מקבלים כנכונה. שיטת המיצוי יכולה להזכיר את שיטת "ההוכחה בדרך השלילה", שגם היא הייתה נפוצה בקרב המדענים ההלניסטים. בימי הביניים קיבלה שיטה זו את הכינוי "הגעה לאבסורד" (reductio ad absurdum). על פי שיטה זו מניחים טענה הפוכה לטענת הבסיס ומגיעים לסתירה. כך מסיקים את אי-נכונותה של הטענה ההפוכה. האם זה מספיק להוכחת הטענה הראשונה? "כן", כאשר יש רק טענה הפוכה אחת – ו"לא בהכרח", כשישנן אופציות שונות. במקרה זה ניתן לנסות את שיטת המיצוי. ארכימדס היה ידוע בזכות ה"אלגנטיות" והתחכום המיוחדים בשיטות ההוכחה שהשתמש בהן.

הרחבת המבט



בעבר תיארו המדענים את האור רק באמצעות קרניים והאמינו שהאור מורכב מקרניים ממש. כך היה נוח ופשוט יותר לתאר את האור (יצירת אלומה ממוקדת המזכירה "קרן אור" הפכה אפשרית רק מאוחר יותר). אף על פי שהבנתנו את האור השתנתה שינוי גדול מאז אותה תקופה, אנו עדיין ממשיכים להשתמש באותן "קרני אור" לתיאורו של האור. זוהי השיטה המדעית במיטבה – להשתמש בכלים נוחים ללא קשר עם המהות "האמיתית" שלהם – וזאת כדי לפשט את התופעות ולהבין אותן. ברור שבדרך זו יש לנקוט זהירות כדי לא להתנתק לחלוטין מהמציאות.

2. הירון: רעיון המסלול המינימלי

הירון, מדען הלניסטי ידוע שחי באלכסנדריה במאה הראשונה לספירה, היה מתומכיה הנלהבים של תאוריית קרני הראייה והוכיח את חוק ההחזרה של האור. בהוכחתו הסתמך על קרני הראייה. למרות זאת, מאחר שקיבלנו את עיקרון ההפיכות, הוכחתו קבילה גם לקרני אור. ראשית הסביר הירון מדוע יש החזרה ממשטחים חלקים: לדעתו, במשטחים מחוספסים יש נקבוביות שבהן פוגעות הקרניים ולכן הן אינן מוחזרות. בפעולת הליטוש מתמלאות הנקבוביות באבק עדין, וכך מתאפשרת החזרת הקרניים. וכך הוא כתב:

"בדיוק כמו שאבן המוטלת בחוזקה נגד עצם קשה כמו לוח עץ או קיר מקפצת בחזרה, ואבן המוטלת נגד משטח רך כמו צמר וכד' לא עושה זאת... כך הקרניים הנפלטות מעינינו במהירות כה רבה... גם הן מוחזרות כאשר הן פוגעות בגוף בעל משטח קשה".

באותו הנימוק השתמש הירון כדי להסביר מדוע החזרה ממים ומזכוכית אינה כה טובה כמו החזרה ממראה.

הירון ניסה להסביר הסבר פיזיקלי את תופעת ההחזרה, ולא רק לתאר חוקיות שלה.



לאחר שהציג את הסיבות להחזרה, פנה הירון להוכחה זאת: מדוע זווית הפגיעה חייבת להיות שווה לזווית ההחזרה? הירון טען, כי בתנועתו "בוחר" האור (קרני הראייה) במסלול הקצר ביותר האפשרי. הוא נימק זאת בכך שהואיל והאור עובר מיידית ממקום למקום הוא חייב לנוע במסלול הקצר ביותר האפשרי בין נקודת המוצא לבין נקודת הסיום. שאם לא כן יהיה זמן תנועתו ארוך יותר, כלומר המעבר שלו ממקום למקום לא יהיה מידי.

סוגיות למחשבה ולדיון ?

1. על איזה עיקרון התבסס ארכימדס בהוכחתו?
2. תארו את שיטת המיזוי להוכחת טענה כלשהי.
3. תארו את שיטת השלילה להוכחת טענה כלשהי.
4. מהו ההבדל בין שיטת ה"שלילה" לבין שיטת ה"מיזוי"?
5. תנו דוגמאות נוספות להפיכות האור.

הרחבת המבט

קל להמחיש את תכונת ההפיכות של האור באמצעות מערכת מראות המסודרות בזוויות שונות: אם אני מתבונן במראה אחת ומצליח לראות את עיני חברי, הרי שגם הוא יוכל לראות אותי. האור המגיע מהחבר אלי עובר בדיוק באותו המסלול שעובר האור המגיע ממני אליו.

הירון מאלכסנדריה הגאון של המדע והטכנולוגיה בתקופה ההלניסטית



מבט אל העבר

הירון [Heron] (57-?) מאלכסנדריה הקדים את בני תקופתו בהישגיו המדעיים בתחומי המתמטיקה, המכניקה, ההידראוליקה, האופטיקה והחום. הוא פיתח נוסחה ידועה לחישוב שטח המשולש ונוסחת חישוב של השורש הריבועי המיושמת גם בימינו. בפרסומו הגדול זכה הודות להמצאות שלו: מערכות אוטומטיות שפתחו דלתות של מקדשים, הדליקו אש במזבח והפעילו עוגבים, משאבת מים ומנוע סילון (הראשון בתולדות המדע). בתחום האופטיקה עסק הירון בהתפשטות האור, בתופעת ההחזרה ובתאוריית קרני הראייה. גורלן של ההמצאות של הירון דומה לגורל המצאותיו של לאונרדו דה-וינצ'י – רובן נשכחו ולא יושמו מאחר שהקדימו מאוד את זמנן.

מבט אל העבר

דעתם של הירון ושל מדענים רבים אחרים בעבר הייתה שמהירותן של קרני הראייה היא אינסופית, וזאת מהנימוק הבא: כשאנו פוקחים את עינינו, אנו מבחינים מייד גם בעצמים קרובים וגם בעצמים רחוקים ביותר, למשל הכוכבים. מצב זה מתאפשר רק אם קרני הראייה נעות במהירות אינסופית. לא הכול הסכימו עם טענה זו. מחלוקות היו גם בנושא של מהירות האור, והן נמשכו עד שיכלו המדענים למדוד מהירות זו. התברר שמהירות האור היא אכן גבוהה ביותר, כך שבהתנסויות היום-יומיות ניתן להניח שהתפשטות האור היא מיידית.

שער ספר ההמצאות של הירון

הירון הצדיק את בחירת המסלול המינימלי בטענה שהטבע בפעולותיו נוהג לפי עיקרון של "חיסכון":

"אם הטבע לא פועל לשווא עם קרני הראייה שלנו, אזי הכיפוף של הקרניים חייב להתרחש בזוויות שוות. זה נראה ברור במקרה של קרני השמש אשר מתכופפות בזוויות שוות".
אנו רואים שכמו שארכימדס התבסס על עקרון ההפיכות של האור, מבסס הירון את טענותיו על עקרון המסלול המינימלי של אור, כלומר נכונות הטענה לגבי חוק ההחזרה מותנית בעיקרון זה. נציין כאן כי עקרון המסלול הקצר ביותר אינו נכון תמיד, הוא תקף רק בתנאי שהאור נע בתווך אחיד (על כך נרחיב בהמשך).

נציין גם שמהירותו הסופית של האור נובעת בעקיפין מהעיקרון שניסח הירון (אף שהוא בעצמו סבר כי מהירות האור היא אינסופית). זאת משום שאם אכן האור מתפשט מיידית, אין זה משנה באיזו דרך ינוע - קצרה או ארוכה.

עקרון המסלול המינימלי של האור: האור "בוחר" את המסלול הקצר ביותר בין שני המקומות שביניהם הוא עובר.



סוגיות למחשבה ולדיון



- מדוע ההוכחה של הירון, שהוכחה לגבי קרני הראייה, תקפה גם לגבי האור?
- אילו תכונות נוספות העניק הירון לקרני הראייה של אוקלידס?
- מהו ההבדל בין זיהוי התופעה, הסברה ומציאת החוקיות שלה?
- כיצד נימק הירון את טענתו לגבי תכונת המסלול המינימלי של האור?
- מהי דעתכם באשר לטענה בדבר המהירות האינסופית של האור?
- האם יש חשיבות למהירות האור בהוכחה של הירון? נמקן.
- מה המשותף להוכחות של ארכימדס ושל הירון?
- מהן הנחות היסוד של כל אחד מהם?

הירון הוכיח, כי רק אם זווית הפגיעה תשתווה לזווית ההחזרה, יתקבל המסלול הקצר ביותר הדרוש.

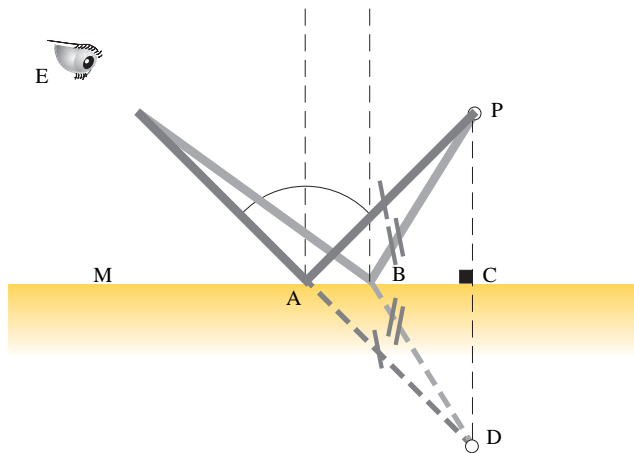
ההוכחה של הירון מוצגת באיור 7-7: שתי קרני ראייה נובעות מעינו של הצופה ב-E. במסלול EAP קרן האור מוחזרת בזווית השווה לזווית הפגיעה, ובמסלול EBP הקרן מוחזרת ללא שוויון הזוויות. נוכיח כי מסלולה של הקרן השנייה ארוך יותר, כלומר: $EBP > EAP$.

לשם כך נעביר את PC, אנך למראה M ונאריך אותו ואת EA עד שייפגשו בנקודה D. נקשר גם את הנקודה B עם הנקודה D. מתקיים: $\angle EAM = \angle PAC$ (הודות לשוויון בין זוויות הפגיעה וההחזרה) וגם $\angle EAM = \angle CAD$ (זוויות קדקודיות). שוויון זה גורם לכך שהמשולשים PAC ו- DAC חופפים. מכאן נובע שמשולש PAD הוא שווה שוקיים ($AP = AD$) ובו AC אנך אמצעי. העובדה האחרונה גורמת לכך שגם $BP = BD$. עתה אנו יכולים להשוות בין שני המסלולים EAP ו-EBP:

$$EAP = EA + AP = EA + AD = EAD$$

$$EBP = EB + BP = EB + BD$$

מאחר ש-EAD הוא קו ישר, הרי ש- $EBP > EAP$, כפי שרצינו להוכיח.



איור 7-7: הוכחת הירון לחוק ההחזרה

לחיזוק הוכחתו ציין הירון, שאם נסתיר את נקודה A על המראה, לא תיראה הדמות (קרן ראייה, או קרן אור, לא יוכלו לחזור מהמראה).

הדמות במראה מישורית נראית במראה במרחק שווה למרחק הגוף מהמראה.



אף על פי שהנחת היסוד השלישית נובעת ישירות משתי הראשונות, הרחיב תלמי את מספר ההנחות. למעשה הוא ניסח בנפרד את חוק ההחזרה של האור (טענה 3) ואת חוק מיקום הדמות במראה מישורית (טענות 1 ו-2). אולם החידוש המהותי בגישה של תלמי היה קביעתו שיש צורך לבדוק את ההנחות ולאמת אותן בניסוי:

הרחבת המבט



ההוכחות של חוק ההחזרה אשר הוצעו על ידי ארכימדס והירון מעוררות התפעלות, מכיוון שהם יכלו להסיק כבר בתחילת דרכו של המדע שני עקרונות חשובים ביותר בהתנהגות האור, עקרונות המקובלים גם כיום:

- עקרון ההפיכות של מסלול האור
- עקרון המסלול המינימלי של האור

הרחבת המבט



רק כעבור יותר מ-1600 שנה לאחר הירון הצליח פרמה, איש מדע צרפתי, להרחיב את עקרון המסלול "המינימלי" כך שיהיה תקף גם במקרה של מעבר אור מתווך אחד לתווך אחר (או בתנועתו בתווך שאינו אחיד). התברר כי האור לא "בוחר" תמיד במסלול הקצר ביותר, אלא לעתים בארוך ביותר דווקא (מסלול אקסטרימלי), וזאת לא מבחינת המרחק אלא מבחינת הזמן. (נדון בנושא זה בהרחבה בהמשך).

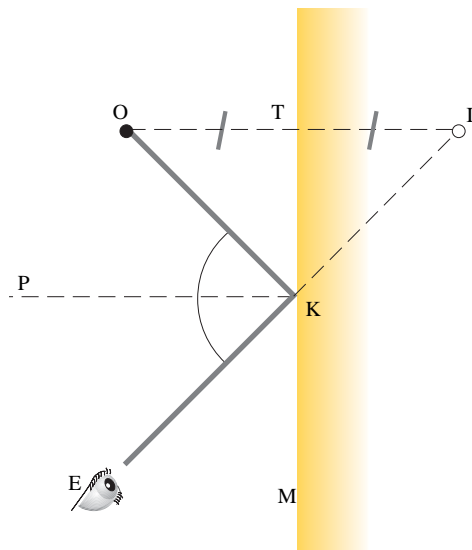
1. תלמי: אימות של חוק ההחזרה בדרך הניסוי

תלמי, אחד המדענים המפורסמים שחיו באלכסנדריה ההלניסטית, תמך גם הוא ברעיון קרני הראייה וחקר תופעות אור שונות. תלמי קיבל את הגישה של עמיתו, ארכימדס והירון, באשר לצורך להסתמך על עקרונות בסיסיים בהסקת הטענות המדעיות:

"בחיפוש אחר ידע בתחום כלשהו אנו חייבים לצאת מתוך עקרונות כלליים מסוימים ולהניח הנחות מוגדרות וברורות מאליהן, הן מבחינת ההיבט המעשי והן מבחינת ההיגיון הפנימי שלהן. רק מתוך הנחות כאלו ניתן היה להסיק את המסקנות המוצגות להלן...."

בדומה לאוקלידס, גם תלמי הסתמך על שלוש הנחות יסוד לפיתוח התורה שכונתה "מדע המראות" (Catoptrics):

1. הדמות המתקבלת במראה מצויה על המשכה של קרן הראייה הנובעת מהעין E (כלומר בנקודה I באיור 7-8).
2. הדמות מצויה על האנך היורד מהעצם למראה (OT ניצב ל-M) ובמרחק זהה למרחק של העצם מהמראה (IT=OT באיור 7-8).
3. הקרן הפוגעת והקרן המוחזרת מן המראה יוצרות זוויות שוות עם האנך, העובר דרך נקודת הפגיעה במראה ($\angle OKP = \angle EKP$ באיור 7-8).



איור 7-8: לפי תלמי, דמות I של גוף O מצויה על המשך הקו המחבר את העין ואת נקודת הפגיעה של קרן הראייה במראה בדרכה אל הגוף. הדמות הנצפית במראה היא במרחק השווה למרחק הגוף מהמראה.

הרחבת המבט

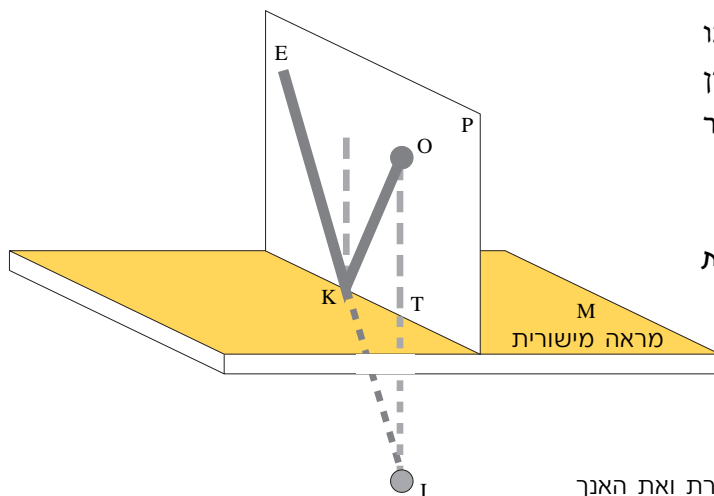


החיפוש אחר הנחות יסוד היה דרך שאפיינה את פעולתם של המדענים בכל התקופות. כך נהגו ארכימדס, הירון ותלמי בהחזרת האור (וקרני הראייה). אריסטו לימד שכהנחות יסוד יש להשתמש בטענות הנראות מובנות מאליהן. הנחות יסוד מאתר המדען על סמך האינדוקציה ועליהן הוא מתבסס בהסקת מסקנות. בשלב זה פעולת המדען היא דדוקטיבית (דרך חשיבה זו הכרנו בפרק זה בעבודתו של אוקלידס). שיטתו המדעית של אריסטו נקראת "אינדוקטיבית-דדוקטיבית".

הרחבת המבט



מהגאומטריה של אוקלידס אנו יודעים כי כל שני קווים נחתכים מגדירים מישור. אך שלושה קווים אינם חייבים להימצא באותו מישור. אולם במקרה של החזרת האור, הקרן הפוגעת במראה והקרן המוחזרת ממנה מגדירות מישור. מתברר שמישור זה כולל גם את האנך למראה בנקודת הפגיעה.



"האמת של הנחות היסוד אשר הצגנו לפניכם מתבססת על תופעות ממשיות כפי שנסביר להלן..."

ואכן, תלמי אימת את הנחותיו והתאימן לתופעות טבע:

- את ההנחה הראשונה אימת כאשר כיסה את הנקודה שבה נראית הדמות במראה (נקודת ההחזרה של האור), והדמות נעלמה. עובדה זו התאימה לטענה שהדמות מצויה על המשכה של קרן הראייה הנובעת מהעין.
- את ההנחה השנייה אימת תלמי בכך שהצמיד סרגל מאונך למראה. העצם, הסרגל, דמותו של הסרגל ודמותו של העצם היו על קו ישר רק כאשר הסרגל היה מונח בניצב למראה, וזאת ללא תלות במיקומו של הצופה. (בעזרת אותו הסרגל ניתן להראות גם שהמרחק בין הגוף למראה שווה למרחק בין הדמות למראה.)
- את ההנחה השלישית באשר לשוויון בין זווית הפגיעה ובין זווית ההחזרה בדק תלמי באמצעות ניסוי מורכב (שלא נתאר כאן), אך נפנה את הקורא לניסוי שהוצג בתחילת הפרק.

כאמור, תלמי בדק לא רק את הקשר בין הזוויות, אלא גם את מיקום הדמות המתקבלת במראה מישורית. נזקוף טענה חשובה נוספת לזכותו של תלמי. הוא היה הראשון אשר טען כי הקרן הפוגעת, הקרן המוחזרת והאנך למראה בנקודת הפגיעה – כולם מצויים במישור אחד. מסקנה זו נובעת משתי ההנחות הראשונות (איור 7-8). אכן, מאחר שהישר EKI נחתך עם האנך OTI, מצויים שני ישרים אלו באותו מישור. מישור אחד כולל את קרן הפוגעת במראה, את קרן המוחזרת ממנה ואת האנך למראה בנקודת ההחזרה. מישור זה ניצב למישור המראה (איור 7-9)

תלמי הרחיב את חוק ההחזרה של האור וכלל בו את

הטענה הזאת - הקרן הפוגעת, הקרן המוחזרת

והאנך למישור המראה במקום הפגיעה -

כולם נמצאים במישור אחד.



איור 7-9: מישור אחד P כולל את הקרן הפוגעת, הקרן המוחזרת ואת האנך בנקודת הפגיעה, הניצב למישור המראה M. איור זה מציג את הנראה באיור 8-7 הצגה תלת-מימדית.



חשוב לציין כי בעת העתיקה עסקו המדענים בנושאים אופטיים ופתרו בעיות בתחום בעיקר על בסיס הנחות ונימוקים "הגיוניים", ולא על סמך ניסויים. ייתכן שהסיבה לכך נעוצה בחשדנותם כלפי הניסוי. ניסוי התפרש בזמנו כהתבוננות בתופעות, וזאת (כמו הסתמכות על יתר החושים) יכולה להטעות את החוקר. למשל: תחושות של קור וחום או מראה של "מקל שבור" כאשר חלקו טבול במים. דווקא חשדנות זו כלפי ניסויים מדגישה את החלוציות של תלמי, מכיוון שהוא הסתמך על הניסוי כפוסק באשר לאמיתות טענותיו המדעיות. נטייה להשתמש בניסוי כמקור לנתונים שעליהם מבססים תאוריה אנו מוצאים גם אצל מדענים הלניסטיים אחרים, כמו ארכימדס, הירון, ארטוסטנס, היפרכוס ואחרים. כ-1500 שנים לאחר מכן תוכתר גישה זו על ידי האנגלי פרנסיס ביקון כגולת הכותרת של הפעילות המדעית.

עם זאת חשוב לציין, כי הוכחת חוק ההחזרה בדרך ניסויית אינה מספקת הסבר מדוע נוהג האור בצורה זו ולא אחרת. נזכיר כיצד ענו ארכימדס והירון על השאלה מדוע מתקיים חוק ההחזרה. הם הסתמכו על עקרונות אחרים (המסלול ההפיך והמסלול המינימלי) שסיכמו ניסיון רב: זוהי דרכו של המדע.

חוק ההחזרה של האור:

זווית ההחזרה של האור שווה לזווית פגיעת האור במשטח.



הקרו הפוגעת, הקרו המוחזרת והאנך למשטח בנקודת הפגיעה - כולם מצויים במישור אחד הניצב למשטח הפגיעה.

ניסוח זה של החוק מקובל גם כיום. ושוב - חוק זה מתאר את התנהגות האור אך אינו מסביר אותה.

סוגיות למחשבה ולדין



1. על פי תלמי, מהם מקורות הידע העומדים לרשותנו?
2. האם עולים בדעתכם עוד מקורות ידע? פרטו.
3. שחזרו את הניסויים של תלמי והוכיחו את שתי טענותיו הראשונות.
4. האם בדיקות אלו יכולות לשמש כהוכחה? נמקו.
5. מהו ההבדל בין עדות מאששת ובין הוכחה?
6. האם העובדה כי טענותיו של תלמי התייחסו לקרני הראייה פוגמת בתקפות של הניסויים? נמקו.
7. במה שונה גישתו של תלמי מזו של הירון באשר להוכחת חוק ההחזרה?
8. כיצד אימת תלמי את טענותיו?
9. הציעו ניסוי שיבדוק את הקשר שבין זווית הפגיעה ובין זווית ההחזרה של האור.



תלמי עם קואדרנט בידו, שהשתמש בו לקביעת מיקום הכוכבים בשמים. לידו אסטרונומיה - סמל המדע המספקת השראה למדען

מבט אל העבר



תלמי, או בשמו הלטיני
קלאודיוס פתולומאוס

[Claudius Ptolemy] (85-165),

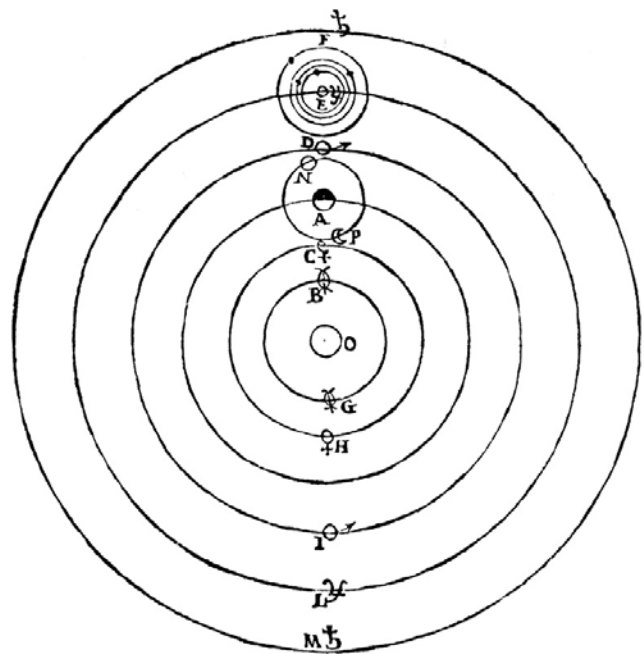
היה אסטרונום ומתמטיקאי
שפעל באלכסנדריה במאה
השנייה לספירה. מרבית הפרטים



על חייו אבדו, אך מתוך עבודותיו שנתרו ידוע על
מחקריו בתחום האופטיקה - החזרה ושבירה של
האור. תלמי עסק גם במתמטיקה ובגאוגרפיה, אך
לפרסומו הגדול זכה בזכות פעילותו בתחום
האסטרונומיה. בספרו המפורסם אלמג'סט
(Almagest) ריכז תלמי את כל הישגיה של
האסטרונומיה ההלניסטית ואף הציג יכולת
מתמטית גבוהה מאוד. תלמי פיתח מודל של היקום
המכונה גאיו-צנטרי (הארץ היא המרכז). על פי מודל
זה הארץ היא נייחת במרחק מה ממרכז היקום,
והשמש וכוכבי הלכת מקיפים אותה במסלולים
מורכבים. המודל של תלמי היה מקובל במשך
מאות שנים, כי הוא אפשר לדייק בחישובים
ובניבויים של אירועים אסטרונומיים. רק כעבור
1400 שנה הציע קופרניקוס, אסטרונום פולני, את
המודל האחר, ההליו-צנטרי (השמש במרכז) - כוכבי
הלכת סובבים את השמש הנייחת. חשוב לדעת
שהמודל ההליו-צנטרי התפתח לא בעקבות גילויים
חדשים או שהיה מדויק יותר מבחינת החישובים,
אלא מטעמים אחרים - הפשטות והיופי של ארגון
היקום. נימוק זה מכנים בשם נימוק פיתגוריאני או
אפלטוני. רק כעבור שנים הצטברו עדויות
המצביעות על כך שהמודל של תלמי אינו תואם
למצויאות למרות היותו שימושי.



המערכת הגיאו-צנטרית, לפי תפיסתו של תלמי.



המערכת ההליו-צנטרית של קופרניקוס
כפי שצוירה ע"י גלילאו במאה ה-17.



פרנסיס ביקון
[Francis Bacon]

(1626-1561).

פילוסוף אנגלי שנחשב לאחד ממייסדי השיטה המדעית המאפיינת את המהפכה המדעית במאה ה-17.



יותר מכל סימל פרנסיס

ביקון את המרד נגד עליונותם הבלתי מעורערת של העקרונות התאורטיים שקבעו גדולי המדע מהעבר הקלסי: אריסטו, אפלטון ואחרים. לטענתו מקור הידע היחיד הוא הניסוי, לכן פעילות המדען היא בעיקר איסוף נתונים ופירושם. על כך כתב ביקון בספרו החשוב "השיטה החדשה" (Novum Organum). בתמימות גדולה הניח פרנסיס ביקון שחוקי הטבע יתבררו מתוך הנתונים עצמם. השיטה של הסקת מסקנות כלליות אך ורק על סמך מקרים פרטיים שנצפו בפעולות קודמות נקראת השיטה האינדוקטיבית. הפילוסופיה שמדגישה את הניסוי ואת הניסיון כמקורות הידע היחידים (ללא תלות בהנחות תאורטיות) נקראת הפילוסופיה האמפיריציסטית.



השנים חולפות והבעיה נשארת בעינה: מה קודם למה? ניסוי לרעיון או רעיון לניסוי?

בכפוף לדיני זכויות יוצרים הוסרה התמונה. להלן פרטיה וכתובת לצפות בה:

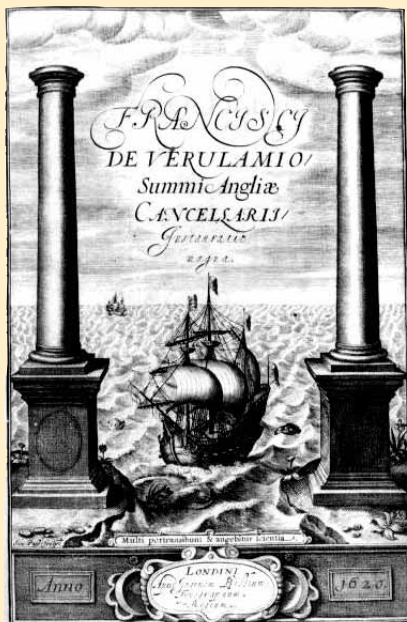
פיטר ברויגל, משל העיוורים, 1568.

Pieter Bruegel the Elder. The Parable of the Blind.

[/http://www.abcgallery.com/B/bruegel/bruegel137.html](http://www.abcgallery.com/B/bruegel/bruegel137.html)

דימוי זה של עיוורים המובילים עיוורים התקשר למדע בימי הביניים. תלות מוחלטת בכתבי אריסטו והמתנה חסרת אונים להתגלות קוממה את אנשי המדע. נגד דימוי זה הם מרדו במהפכה המדעית במאה ה-17.

פרנסיס ביקון ואחרים חיפשו דרך להבטיח את ההצלחה ואת הוודאות של תוצאות המחקר המדעי.



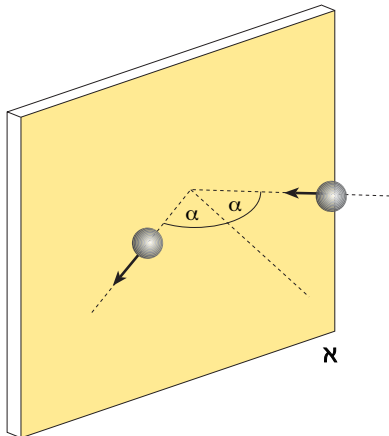
עמוד השער בספרו של ביקון. העמודים מסמלים את הפתח אל "הים", אליו יוצא האדם לחקור את הטבע.



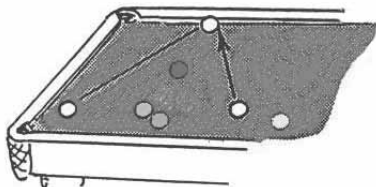
סוגיות למחשבה ולדיון

1. מדוע יש חשיבות רבה להוכחה המסתמכת על ניסוי?
2. אילו בעיות עלולות לנבוע מהסתמכות על ניסוי בלבד?
3. מה ההבדל בין תיאור התופעה, ההסבר לתופעה והוכחת החוקיות שבתופעה?
(בססו את תשובתכם על מה שלמדתם בפרק זה.)
4. הסתמכו על חוק ההחזרה והוכיחו את הטענות הבאות:

- א. מסלולן של קרני האור הוא הפיך.
- ב. מסלולה של אלומת האור המוחזרת הוא "המסלול המינימלי".



איור 7-10: (א) כדור הנזרק לכיוון הקיר יוחזר במסלול סימטרי ביחס לאנך; (ב) תנועה זו ניתן לראות במשחק הסנוקר; (ג) החזרה אמיתית של האור.



ב

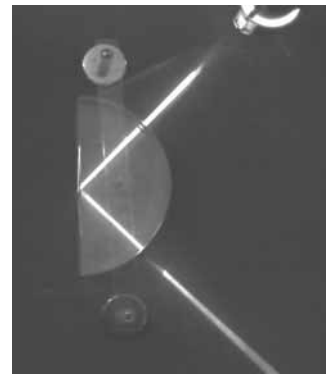
ז. אלחזאן: הסבר חוק ההחזרה

המדענים אינם מסתפקים בתיאור תופעת הטבע, אלא שואפים להסבירה באמצעות תאוריה. התאוריה אמורה לספק תשובה לשאלה **מדוע** מתרחשת התופעה כפי שהיא מתרחשת - תוך הסתמכות על מספר קטן של חוקים או עקרונות שאינם סותרים זה את זה (ידע קוהרנטי). כך גם ניסו ארכימדס והירון להסביר את חוק החזרת האור. כ-1000 שנה מאוחר יותר ניסה אלחזאן להסביר את חוק ההחזרה בדרך אחרת - השוואה לתופעה יום-יומית. וכך כתב אלחזאן בספרו:

"אור נע במהירות גבוהה מאוד, וכאשר הוא מגיע למראה לא מתאפשר לו לעצור. הואיל ועדיין יש לו את התנופה המקורית של תנועתו, הוא מוחזר במסלול בעל אותו השיפוע כמו מסלול תנועתו המקורי. אנו מוצאים עדות לכך הן בתנועה טבעית והן בתנועה מלאכותית..."

היום לא קל להבין את דבריו של אלחזאן, ובכל זאת ננסה לפרשם. בתנועה "הטבעית" התכוונו אלחזאן והמדענים שאחרי אריסטו לנפילה חופשית. אכן גוף הנופל אנכית ומוחזר מהמשטח מקיים שוויון בין זווית הפגיעה ובין זווית ההחזרה (שתיהן ישרות). בתנועה "מלאכותית" מתכוון אלחזאן (שוב, לפי אריסטו) לתנועה "מאולצת", תנועה של גוף בהשפעת גורם חיצוני. כדוגמה לתנועה זו הביא אלחזאן את תנועתו של חץ שלחודו הוצמד כדור: החץ נשלח בזווית אל קיר המהווה משטח חלק. אלחזאן טען, כי כתוצאה מהתנגשות עם הקיר מוחזר הכדור ונשלח במסלול סימטרי לכיוון המקורי, כך שזווית הפגיעה משתווה לזווית ההחזרה (איור 7-10).

נראה כי עובדה זו נבדקה על ידי אלחזאן בניסוי.



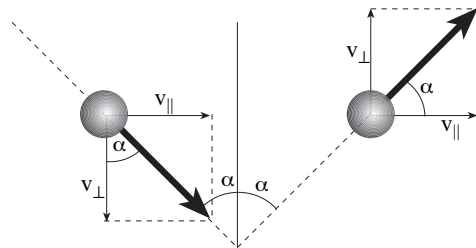
ג

IG

אלחזאן לא הסתפק בבדיקה בדרך הניסוי והוסיף (תוך הסתמכות על רעיונות של אריסטו) הסבר מעניין לתופעה. לדעתו, ניתן לראות את תנועת החץ המגיע לקיר כשילוב של שתי תנועות בו-זמניות: האחת בניצב לקיר, והשנייה במקביל לו. בגלל הפגיעה מתהפך רק רכיב התנועה הניצב, והרכיב המקביל נותר ללא שינוי (איור 7-11). הדבר מחייב שוויון של זוויות הפגיעה וההחזרה בתנועתו של החץ (ניתן לראות זאת בחפיפת המשולשים באיור). על בסיס זה טען אלחזאן לדמיון (אנלוגיה) בין תנועת החץ לתנועתן של קרני האור הפוגעות במראה. וכאן, טען אלחזאן, טמונה הסיבה לחוק ההחזרה.

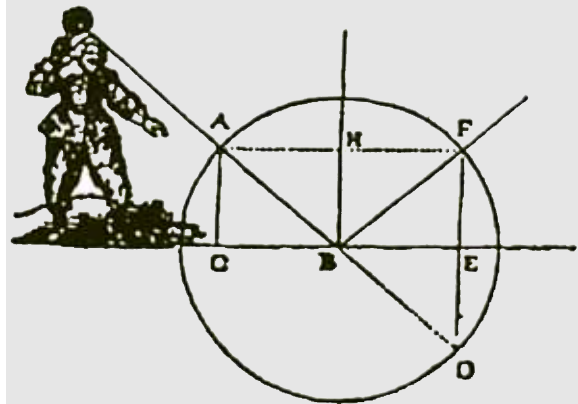
בהוכחת חוק ההחזרה של האור השתמש אלחזאן בשתי שיטות:

- פירוק התנועה למרכיביה
- דמיון (אנלוגיה) בין האור ובין הגוף הנע.



איור 7-11: את תנועת החץ (או כדור) ניתן לראות כשתי תנועות בו-זמניות: במקביל לקיר (במהירות v_{\parallel}) ובניצב לו (במהירות v_{\perp}). ברגע הפגיעה המהירות v_{\perp} מתהפכת, ואילו v_{\parallel} נשמרת, בעקבות זאת מוחזר החץ לפי חוק ההחזרה: זווית הפגיעה שווה לזווית ההחזרה (שימו לב לחפיפת המשולשים, ומכאן - לשוויון הזוויות).

האנלוגיה שיצר אלחזאן בין האור המוחזר ממראה להתנגשות של גוף עם קיר, קידמה את ההבנה של תופעת ההתנגשויות בין גופים. כעבור כ-600 שנים, במאה ה-17, לאחר שהושגה התקדמות בתחום המכניקה, חזרו המדענים לאנלוגיה זאת כדי להבין את התנהגותו של האור בהחזרה ובשבירה. אנו מוצאים כי דקארט וניוטון השתמשו בדיוק באותו רעיון כאשר פירקו את תנועת האור למרכיביה וכך הסבירו את חוק ההחזרה של האור. הרעיון מופיע בספרו של דקארט "אופטיקה" (איור 7-12).



איור 7-12: איור מספרו של דקארט - "אופטיקה".

מושגים פיזיקליים המאופיינים רק על ידי גודלם הכמותי מכונים **סקלרים** (כמו למשל חום, מסה או נפח). מושגים אשר בתיאורם נזקקים גם לציון הכיוון מכונים **וקטורים** (למשל מהירות או כוח). כמו גודל סקלרי, גם גודל וקטורי ניתן להציג כסכום של שני וקטורים (רכיבים) בעלי כיוונים שונים. למשל את תנועתו של מטוס הטס בכיוון צפון-מזרח ניתן להציג כסכום של שתי תנועות המשתלבות יחד: האחת לכיוון צפון והשנייה לכיוון מזרח.



IG

סוגיות למחשבה ולדיון ?

1. כיצד מסביר אלחוזאן את חוק ההחזרה של האור? מהו החידוש בהסבר זה?
2. באיזו אנלוגיה השתמש אלחוזאן?
3. האם הסבר בעזרת אנלוגיה הוא הסבר מספק? מדוע כן ומדוע לא?
4. עמדו על ההבדלים בין תיאור התופעה, החוקיות שלה וההסבר לקיומה.

ח. חוק ההחזרה כחוק טבע

למדנו כיצד מדעני העבר הגיעו לחוק ההחזרה וכיצד ניסו להוכיחו. במאמץ משותף ובהדרגה נבנה ידע באשר להתנהגות מסוימת של האור בתהליך ההחזרה. באשר לפירוש הסיבות להתנהגות זו של האור נתקלו המדענים בקשיים רבים שהמשיכו להעסיקם במשך שנים רבות. האם ניתן לקבל את החוק המדעי גם כאשר אין מבינים את הסיבות לו? למדענים של היום אין ספקות: הם מבינים כי ניתן להפיק תועלת מידע, גם אם הם לא יכולים להסבירו. כל שאלות ה"מדוע" האפשריות נשארות למחקר עתידי. בפרק הבא נלמד כיצד ובאילו נסיבות מיושם חוק ההחזרה. ביישומים אלו לא נדרשת הבנת הסיבות לקיומו של החוק.

חוק מדעי הוא כלל הקובע כיצד הטבע מתנהג. אין זה הכרחי שהחוק יסביר גם את הסיבות להתנהגות זו.



חוק טבע המהווה הכללה של ניסויים ותצפיות רבים נקרא חוק אמפירי (ניסויי). זאת בניגוד לחוק הנובע משיקולים תאורטיים. ברור שחוק ההחזרה של האור היה מוכר קודם כל כחוק אמפירי, על סמך תצפיות וניסויים. אין ספק שסיפוק רב מלווה את הידיעה התאורטית באשר לסיבות לקיומו של החוק. השאיפה לידע התאורטי אפיינה את המדע מאז ראשיתו. ההוכחות של ארכימדס, הירון ואלחוזאן הן דוגמאות למאמצים מסוג זה.

הקשר בין תאוריה מדעית לטבע, כלומר לתצפיות ולניסויים, אינו פשוט, וודאי שאין מדובר בהתאמה מושלמת. התאוריות המדעיות הן תוצרים של המחשבה האנושית המנסה להסביר תצפיות ולפרש את החוקיות הקיימת בטבע על סמך מספר קטן ככל האפשר של עקרונות ומושגים בסיסיים. התאוריה משתמשת במודלים, המחקים את תופעות הטבע ומתארים אותן במושגים פשוטים ומעטים ככל שניתן. מסתבר כי זוהי הדרך היוצרת ידע מהימן ובעל עוצמה. במסגרת מאמץ זה צמחו תאוריות הראייה הראשונות, וכך גם צמח המודל של קרני האור.

תאוריה מדעית היא יצירה מחשבתית של האדם המנסה להסביר את תופעות הטבע בעזרת מספר מצומצם של

חוקים ומושגים. תאוריה טובה מסבירה תופעות רבות ומנבאת אירועים שונים.

אדם בונה תאוריות ומגדיר מושגים, ואינו מגלה אותם.



בעזרת מודל הקרניים ניתן בקלות להציג את חוק שוויון הזוויות בהחזרת האור, ואולם מודל זה אינו עוזר להסביר את מהות התופעה ואת הסיבות לקיומה. לשם כך נחוץ מודל אחר, כמו זה המשווה את האור לכדור הפוגע בקיר. האנלוגיה של אלחוזאן הייתה מקורית ופרצה דרך לרעיונות חדשים באשר למהות האור. רעיונות אלו נשאו פרי כעבור כ-600 שנים, לאחר שחלה התקדמות בהבנת חוקי התנועה של הגופים. אז חזרו מדענים אל האנלוגיה של אלחוזאן המפרקת את התנועה לרכיבים כדי להסביר את התנהגותו של האור.



ט. ומה קורה בהחזרת אור ממשטחים שאינם חלקים?

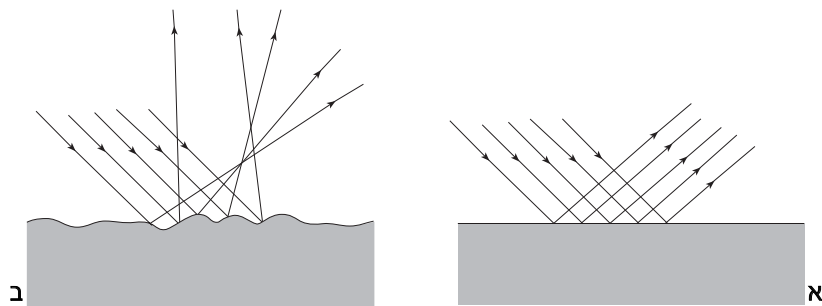
עד כה הכרנו את תכונת ההחזרה של האור, כאשר הוא הוצג על ידי קרן אחת בלבד. כדי להבין את החזרת האור מכל העצמים שסביבנו יש לכלול בדיון את צורת פני השטח שמהם מוחזר האור.

בהכללה ניתן לחלק את כל העצמים לשתי קבוצות: עצמים **מלוטשים** (בעלי פנים חלקות, למשל מראות) ועצמים **מחוספסים**. בהחזרה ממשטח מישורי מלוטש וחקלק כל קרני האור אשר פגעו במשטח כאלומה של קרניים מקבילות, נשארות מקבילות, כלומר הן "מוחזרות" באותה הזווית (איור 7-13א).

וכיצד מוחזר האור מגופים שאינם חלקים או מלוטשים, כלומר בעלי שטח פנים מחוספס? את התשובה לשאלה ניתן לשער מהעובדה שאנו רואים חפצים מוארים מכל כיוון שבו אנו מתבוננים בהם. דבר זה מעיד על כך שאור מתפזר לכל הכיוונים. במבט ראשון עובדה זו יכולה להיראות כסותרת את חוק ההחזרה: שוויון זוויות ושמירת המישור שבו נמצא האור הפוגע והמוחזר. אולם סתירה זו ניתנת ליישוב.

אפשר לדמיין את השטח המחוספס כאוסף אקראי של שקעים ובליטות זעירות. כשאלומת קרניים מקבילות פוגעת במשטח כזה, כל אחת מהקרניים פוגעת בזווית פגיעה שונה מזו של חברתה. כתוצאה מכך מתפזרות קרני האור לכיוונים שונים, אף שכל קרן "מקיימת" בקפדנות את חוק ההחזרה. כל אזור קטנטן של השטח המחוספס יכול להיחשב כמראה זעירה הממוקמת בזווית שונה, ולכן האלומה המקבילה מתפזרת לכל הכיוונים (איור 7-13ב).

בדיקה מיקרוסקופית יכולה להעיד על נכונות ההשערה לגבי השקעים והבליטות המצויים בשטח המחוספס, גם במקרים שאין זה נראה כך, והמשטח נתפס כביכול כחלק לחלוטין, למשל דף נייר. מובן גם שלא קיים גבול חד בין משטח "מחוספס" (מָט) למשטח "חלק" (מְרָאָה), אך נוח לנו להגדיר את שני המקרים הקיצוניים הללו ולהתייחס למשטח כלשהו כאל מצב ביניים. ליטוש שטח פני הגוף מקרב אותו למְרָאָה.

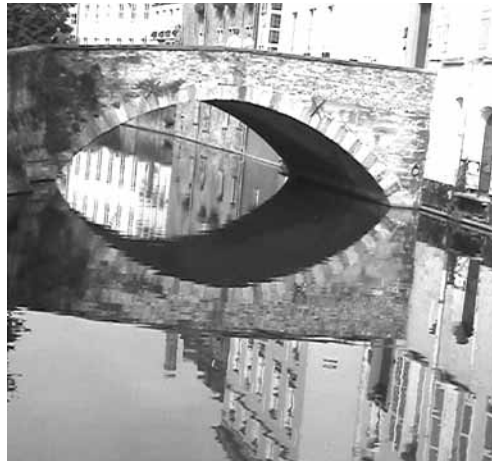


איור 7-13: א: החזרה של אלומת קרניים מקבילות ממשטח חלק - הקרניים נשארות מקבילות.
ב: החזרה של אלומת קרניים מקבילות ממשטח מחוספס - הקרניים מוחזרות לכיוונים שונים.

ניתן להמחיש את שני המקרים של ההחזרה בעזרת מים. שטח הפנים של מים שקטים הוא חלק ושיטוח והם מחזירים אור כמראה (איור 7-14א), אבל כאשר המים אינם שקטים האור מתפזר מהם ללא כיוון מועדף (איור 7-14ג). אם כיוון הפיזור הוא לעבר הצופה, הוא יראה את המקום כמואר, ואם לא - יראה אותו כאפל. במצב ביניים התמונה מעוותת (7-14ב).



IG
IG



IG

איור 7-14: (א) שטח הפנים של מים שקטים הוא חלק ושטוח והם מחזירים אור כמראה; (ב) "מראה מעוותת" מתקבלת כאשר פני המים נעים קלות. (ג) שטח פנים של מים שאינם שקטים אינו חלק, האור מתפזר לכל הכיוונים.

א

ב

ג



כדאי לתת את הדעת!



■ האור מוחזר מדף נייר לבן כמעט באותה מידה כמו ממראה, אף על פי שאין זה נראה כך. באותה **מידה**, אך לא באותו **אופן**. דף נייר לבן מחזיר כמעט אותה כמות אור כמו מראה, אבל החזרת האור היא מפוזרת, כלומר לכיוונים שונים. אפקט ההחזרה ממראה מוחשי יותר, רק מפני שהמראה מחזירה את האור לכיוון מסוים.

■ עצמים שקופים מאפשרים מעבר אור דרכם, אך גם הם מחזירים אור במידה מסוימת, גם אם היא מועטה. נוכל לוודא זאת כאשר נתבונן בחלונות הזכוכית של חדרנו בשעות החשכה. חלונות הזכוכית השקופה "הפכו" למראות.

סוגיות למחשבה ולדיון ?

1. על סמך מה שלמדנו לגבי חוק החזרה, הסבירו כיצד נוצר "שביל האור" על פני המים בים או באגם, כפי שנראה באיור האחד, וכיצד הוא נעלם באיור השני? (תופעה דומה היא, כמובן, שביל האור שיוצר אור הירח על פני המים).
2. האם תופעה זו סותרת את חוק החזרה של האור? נמקו.
3. מדוע ניתן לראות את הסביבה מבעד לזכוכית החלון בשעות האור, אך לא בלילה?
4. מדוע הופכת זכוכית החלון השקופה באור יום למראה בשעות החשכה?



עיקרי הדברים שנלמדו בפרק זה



- בפרק זה למדנו כי אור הפוגע בגוף חומרי מוחזר ממנו בצורה ייחודית: הזווית שבה מוחזר האור שווה בדיוק לזווית שבה הוא פוגע בגוף.
- אלומת אור ישרה תחזור מהמראה כך שהאלומה הפוגעת, האלומה המוחזרת והאנך למראה במקום הפגיעה – כולם ימצאו במישור אחד הניצב למישור המראה.
- מדענים בעת העתיקה ניסו להסביר את חוק ההחזרה ולהוכיח אותו על סמך שיקולים הגיוניים או על סמך ניסויים.
- הודות למאמצים אלו התברר כי חוק ההחזרה קשור לכמה תכונות חשובות ביותר של האור:
 1. מהלכו של האור הוא הפיך, כלומר אם קרן אור היוצאת מנקודה A מוחזרת לנקודה B, הרי שקרן היוצאת מ-B תוחזר ל-A באותו המסלול בדיוק (ארכימדס).
 2. מסלולו של האור היוצא מנקודה מסוימת ומגיע לנקודה אחרת הוא המסלול המינימלי האפשרי בין שתי נקודות אלו, בין שיש החזרה בדרך ובין שאין החזרה (הירון).
 3. את השוויון בין זוויות הפגיעה וההחזרה ניתן לפרש בעזרת אנלוגיה לכדור המתנגש בקיר ומוחזר ממנו. פירוש זה כולל הבנה של תנועת האור כמורכבת משתי תנועות: תנועה המקבילה לשטח המראה (התנועה הנשמרת בהתנגשות) ותנועה הניצבת לשטח המראה (התנועה המתהפכת בהתנגשות).



- גופים שונים מחזירים אור באופן שונה: גופים בעלי שטח פנים חלק (מראות) מחזירים את האור באופן שונה מאשר גופים בעלי שטח פנים מחוספס:
 1. מראה מחזירה קרני אור מקבילות בכיוון שנקבע על פי חוק ההחזרה.
 2. משטח מחוספס מפזר את האור הפוגע בו לכל הכיוונים (פיזור "דיפוזיבי").

תופעת החזרת האור מן המראה הייתה נושא שהוצג בספרי מדע רבים. כאן מוצגת תמונה מספר "האמנות הגדולה של האור והצללים" שכתב אנסטסיוס קירשר, מדען גרמני ידוע במאה ה-17. האישה משמאל מסמלת את היום. אור היום מוחזר מהמגן שבידיה של האישה המסמלת את הלילה (האישה מימין).

