

העולם העתיק והקלאסי

לפה"ס ועד המאה ה-5

אופטיקה

נאסף ונערך בעברית ע"י פרופ' צבי קם

בפגישה האחרונה

עסקנו במכאניקה:

בסטטיקה: חוק המנוף (ארכימדס), מכאניקה של בניה, חוק הציפה של ארכימדס הקובע כי גוף מאבד ממשקלו במים כמשקל המים שהוא דוחה, וגם מגדיר כי כוח הציפה מופעל ממרכז הכובד של המים שנדחו. אם הוא מעל מרכז הכובד של הגוף - הוא ישוט במים ביציבות, אחרת - יתהפך.

ובדינאמיקה: סיפרנו שהנסיון לימד כי גופים נעצרים בלי שמופעל עליהם כוח, לא הבינו את כח החיכוך, שגרם ליוונים לחשוב שתחת כוח גופים נעים במהירות קבועה, ושגופים כבדים נופלים מהר יותר.

וגם טיפלנו בקיצור במוסיקה (פיתגורס)

היום נעסוק באופטיקה.

ראיה

ראיה בעולם הקלאסי

ראיית תמונה בעין לפי הפילוסופים היוונים - קרניים יוצאות מהעין לעצם

אש או אור נחשבו ליסוד כימי

מראות זהב ממורק ליופי היו בשימוש מלכות הפרעונים



אפיקורוס (300 לפה"ס) מתאר עצם ודמות שלו בעין. עדין האור יוצא מהעין וחוזר אליה. למרות שהבינו שאור השמש נחוץ לראיה, וידעו שאור הירח הוא החזרת אור השמש, שילבו את אור השמש עם קרנים היוצאות מהעין, בדומה לחוש המישוש הדורש מגע. עירוב בין אור השמש הלבן והקרנים מהעין יוצר צבע.

אריסטו חשב שהקרנים מהעין לא יוכלו להגיע לכוכבים, אך הסביר את הראיה באמצעות התווך בין העין לגוף הנראה. אור==שקיפות. גם הוא הסביר צבע ע"י התווך (למשל ערפל גורם לשמש להיות אדומה).

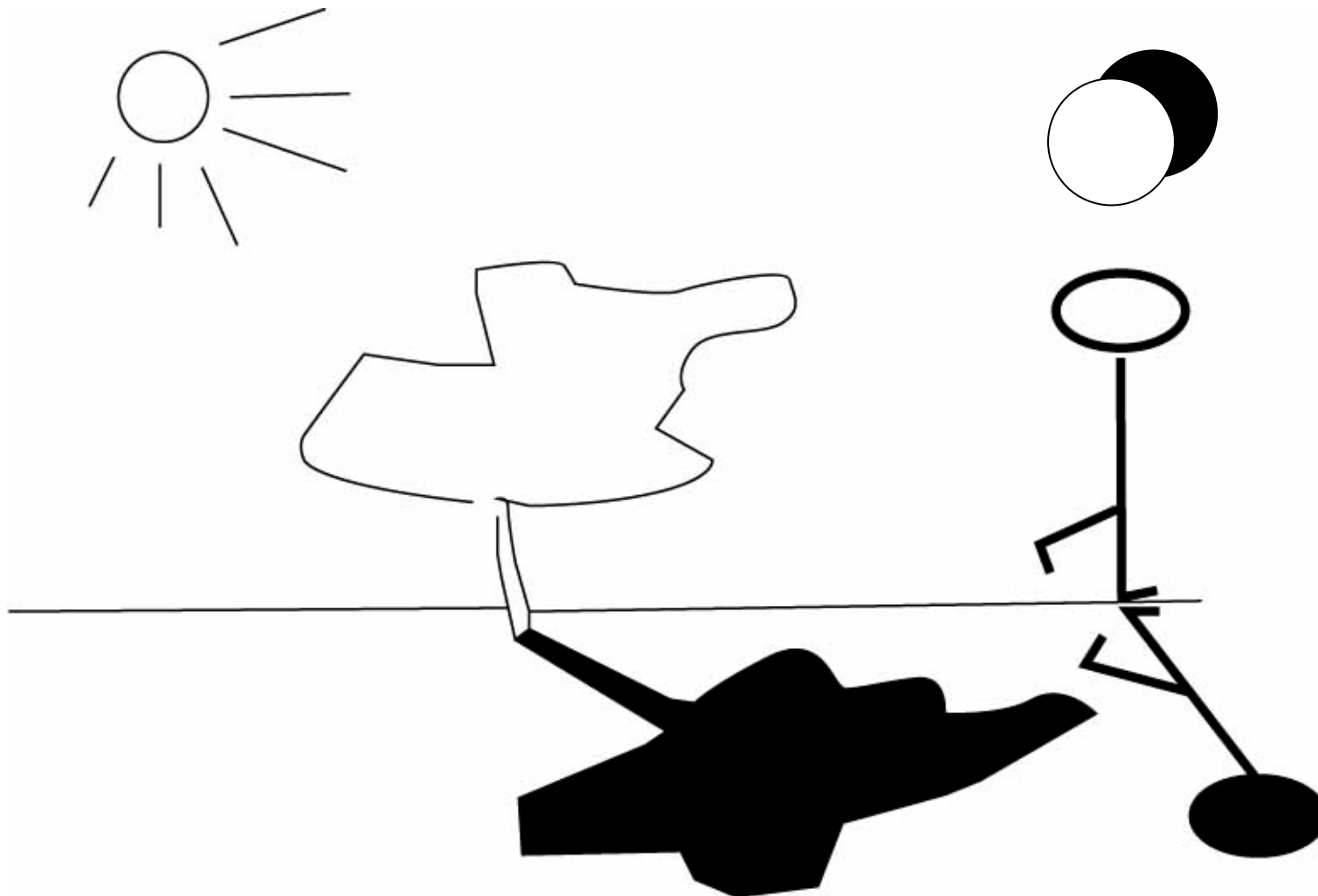
אוקלידס הגיאומטריקן שרטט יצירת דמות מקרנים הנעות בקוים ישרים. הוא תאר ראייה זוויתית וקישר לגודל ומרחק הגוף הנראה. הבין שהראיה ברורה ומפורטת יותר כאשר זווית הראיה גדולה יותר כשהגוף מתקרב. אך אוקלידס השתמש בקרן בודדת מכל נקודה על הגוף ועל העין. לא הבין יצירת דמות ברמה של אופטיקה גיאומטרית.

ארכימדס כנראה תיאר את האופטיקה של מראות.

דיוקלס Diocles (אלכסנדריה) חיבר ספר "מראות"

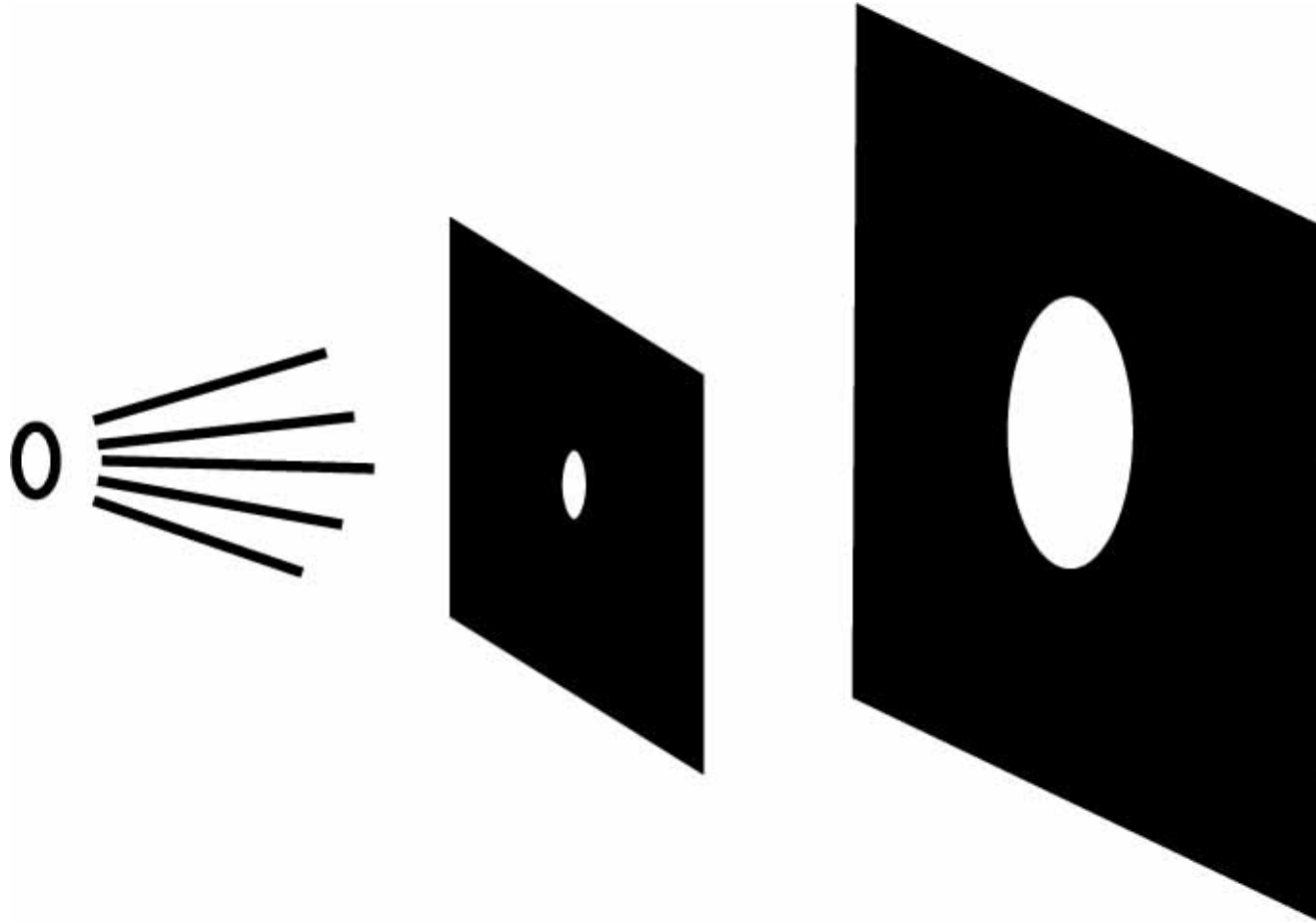
קרנים מתקדמות בקוים ישרים: הוכחות?

אופטיקה גיאומטרית



קרנים מתקדמות בקים ישרים: צל, ליקוי שמש וירח, אי אפשר לראות מעבר לפינה

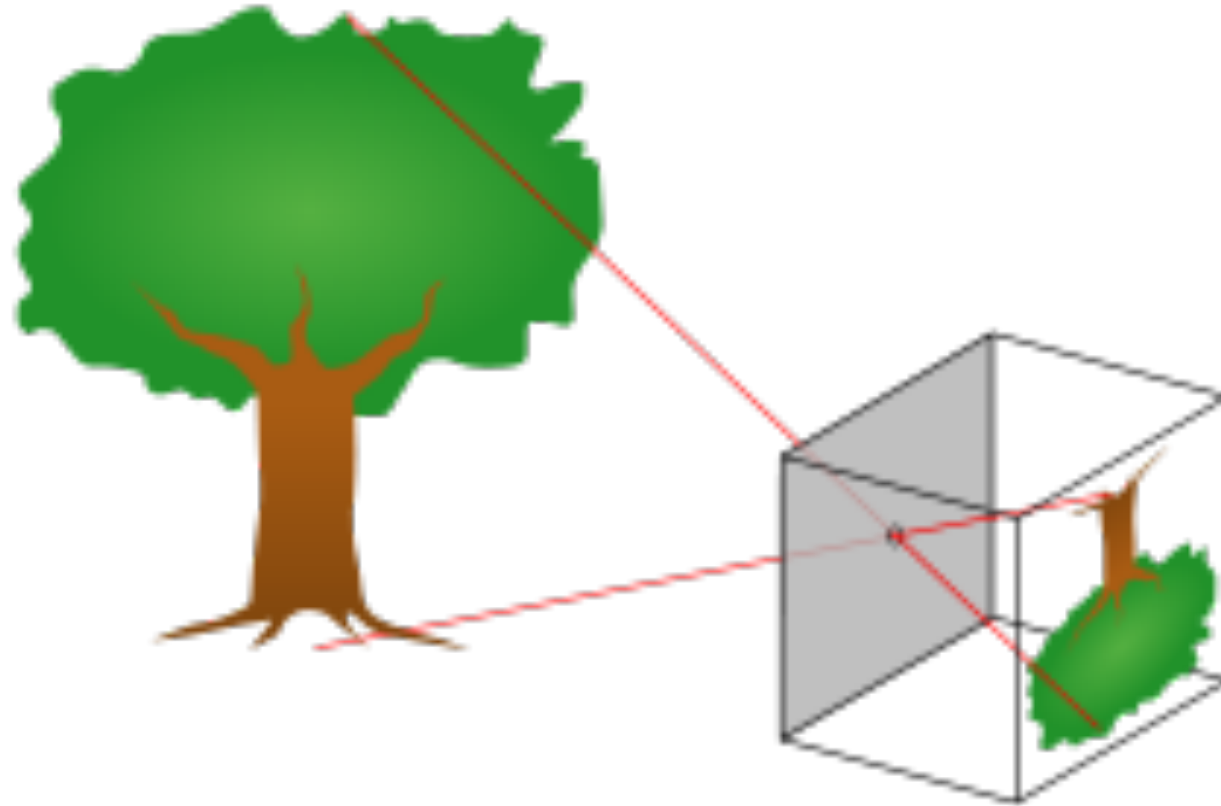
אופטיקה גיאומטרית



הטל האור מחור עגול הוא עגול

(האם העיגול חד ומדוייק? במה תלויה חדות הצל? נסה צל השמש מחור בניר שחור.)

מצלמת חריר



בנית מצלמת חריר מקופסת קרטון וגב ניר דק

מה מרוויחים ומה מפסידים כשמגדילים את החריר?

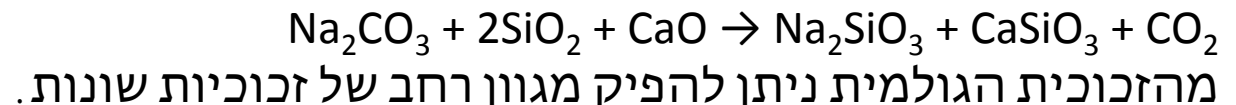
תיאור שבירת קרנים בחמרים שקופים -
פניקים: בקבוקי זכוכית ממקדים קרני שמש

זכוכית

(מהפרק על כימיה)

בשריפה של זרעים האפר שנישאר מהשריפה התחבר עם החול בטמפרטורה גבוהה ונוצרה זכוכית סיליקאטית המכילה 60% של דו תחמוצת הצורן SiO_2 אך "זיהומים" מתחמוצות מתכות גורמים לזכוכית להיות צבועה ובלתי שקופה (כחול-תחמוצת נחושת, חום וירוק-תחמוצות ברזל ניקל-כחול סגול ושחור, כרום-ירוק עמוק). השימוש העיקרי היה לחרוזים בתכשיטים, ולבקבוקונים קטנים שיוצרו ע"י קירור זכוכית סביב גוש חול, והוצאת החול מפנים הבקבוקון (טכניקת הליבה). ניפוח זכוכית התפתח אצל הפיניקים סביב ~1000 לפה"ס. ייצור זכוכית שקופה לא קרה לפני התקופה הרומית: ע"י הוספה של אשלגן חמצני K_2O לתהליך החימום של חול. השימושים של זכוכית לאופטיקה החלו רק בימי הביניים.
הזכוכית מוזכרת בתנ"ך "לא-יערְכָּנָה זָהָב, וְזָכּוּכִית; וְתִמְוָרְתָּהּ כְּלִי-פָז." ([איוב פרק כ"ח, פסוק י"ז](#))
[בתקופת הגמרא כלי זכוכית שקופים \(לבנים\) היו יקרים \(400 זוז\).](#)

זכוכית גולמית מתקבלת כתוצאה מחימום תערובת חול סודה וסיד בטמפרטורה של 1000° מתרחשת הריאקציה הבאה:

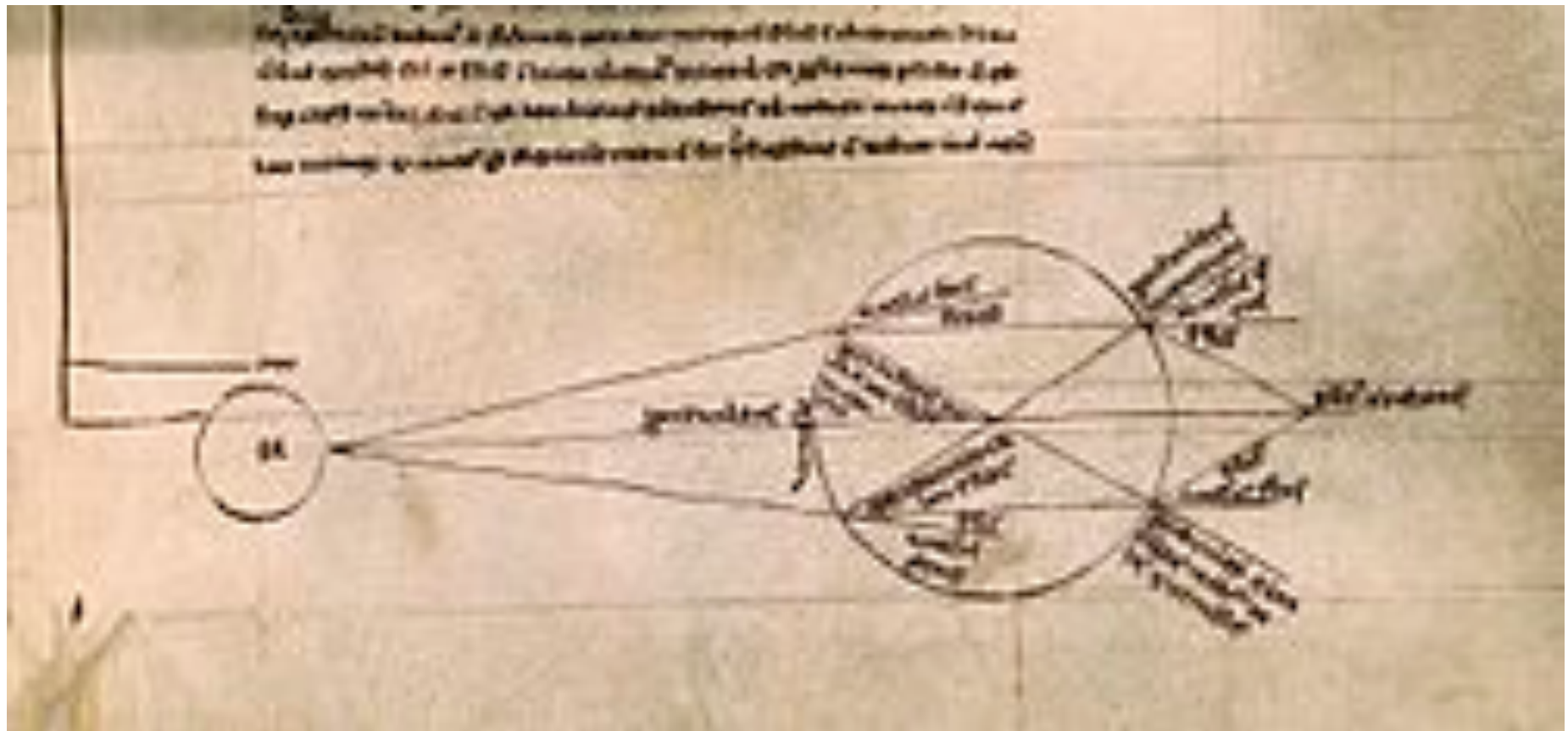


קלאודיוס תלמאי (85 – 165)
Claudius Ptolemy



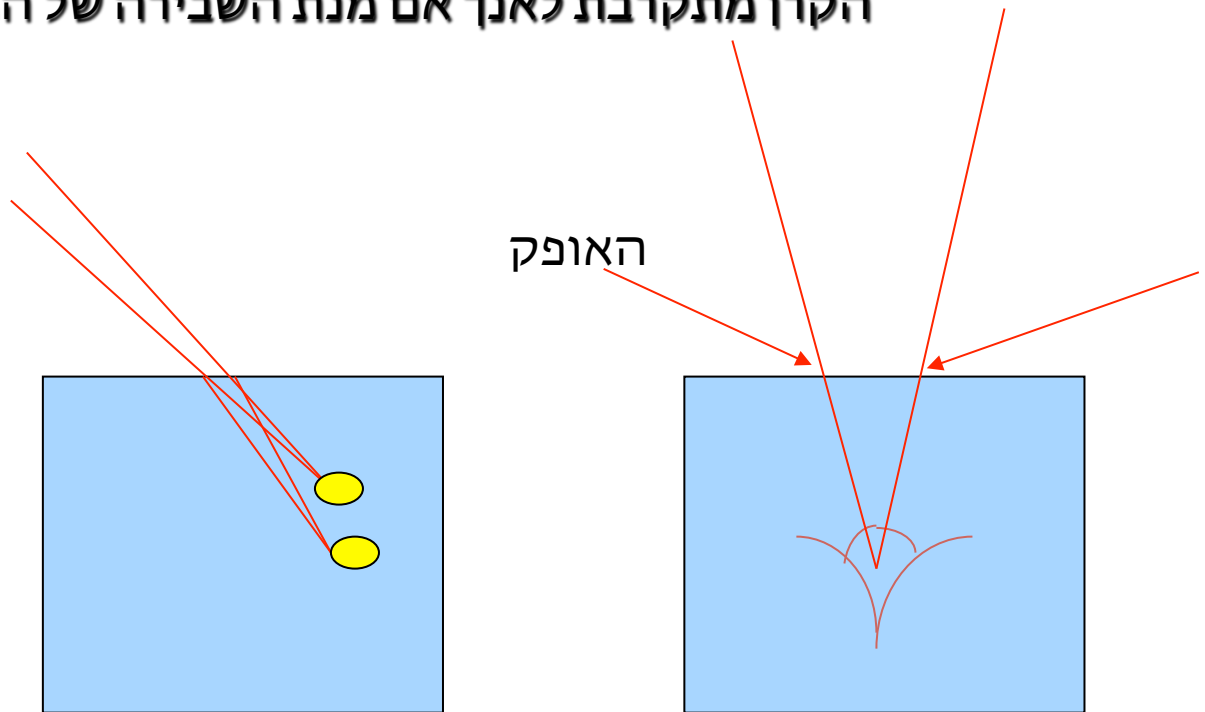
קלאודיוס תלמאי (Claudius Ptolemy) תיעד זויות השבירה (רפרקציה) לחמרים שונים במים ובזכוכית

דיאגרמה אופטית של תלמאי
לא הבין שהתמונה היא נקודת המפגש של הקרניים מהמקור



שבירת קרניים במים

הקרון מתקרבת לאנך אם מנת השבירה של המדיום יותר גבוהה



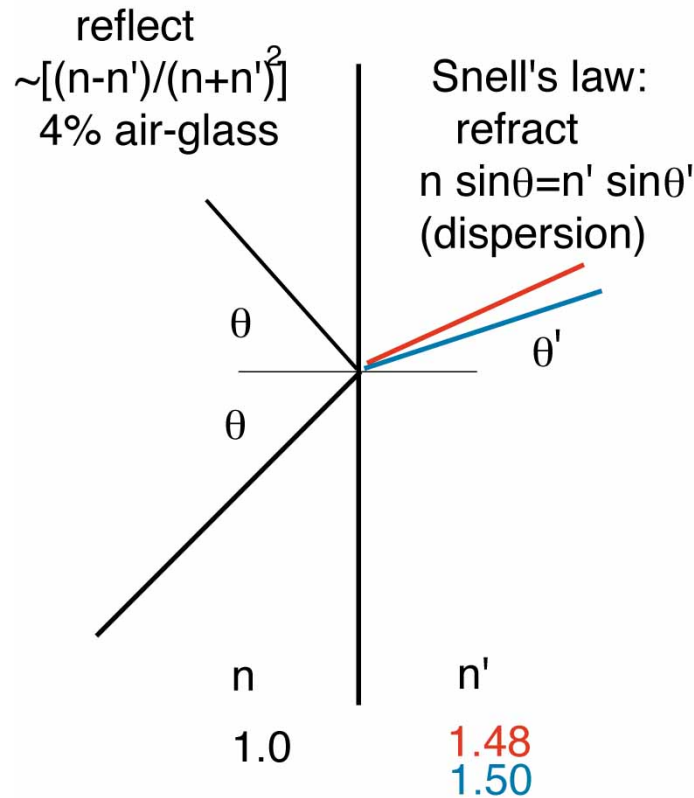
הקש במים נראה שבור

מטבע בבריכה ניראה גבוה יותר ממקומו האמיתי

במבט לשמים מתחת למים נראה האופק כקונוס של כ-50° במקום 90°.

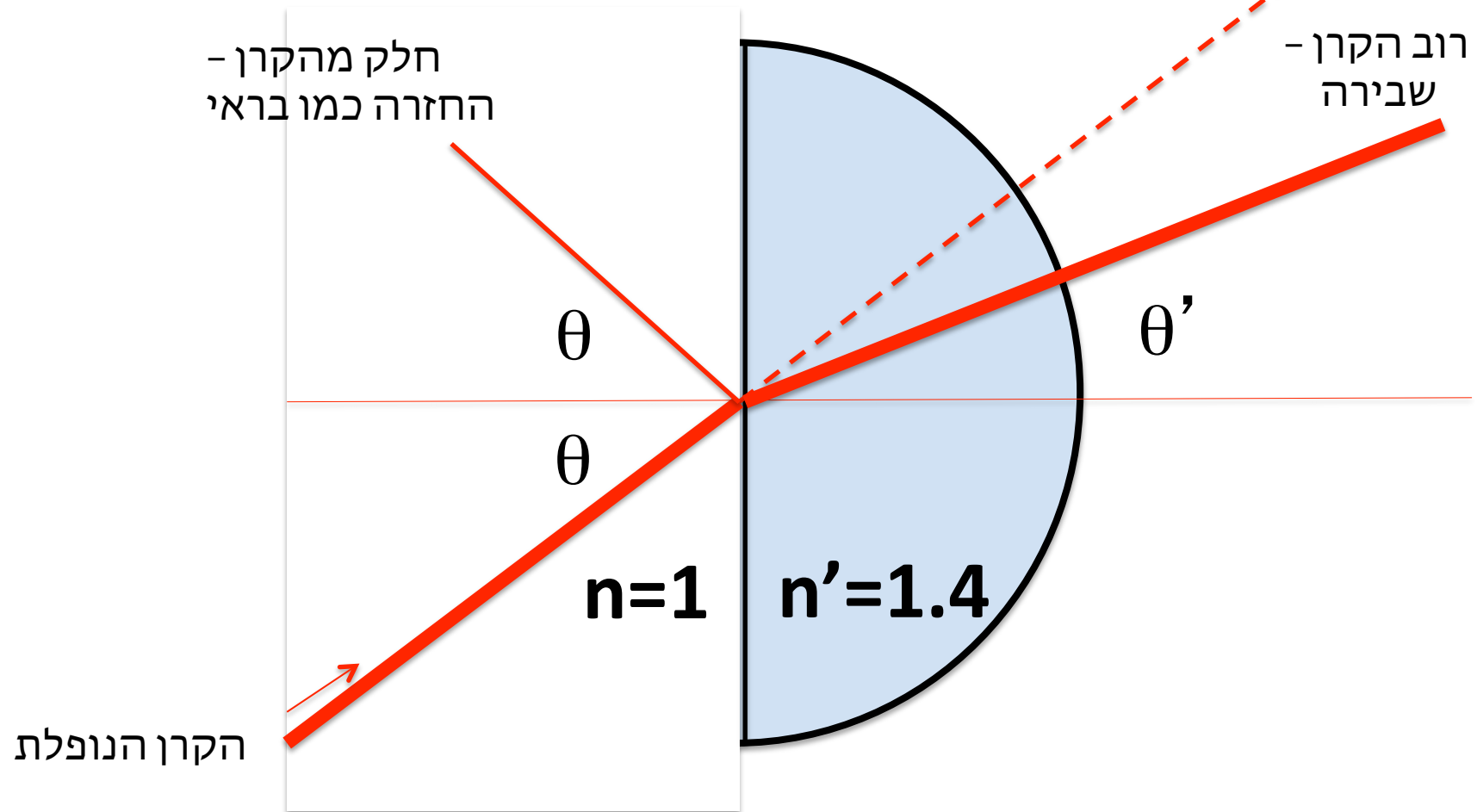
למשל: צילומי National Geographics מתחת למים

שבירת קרניים: חוק סנל



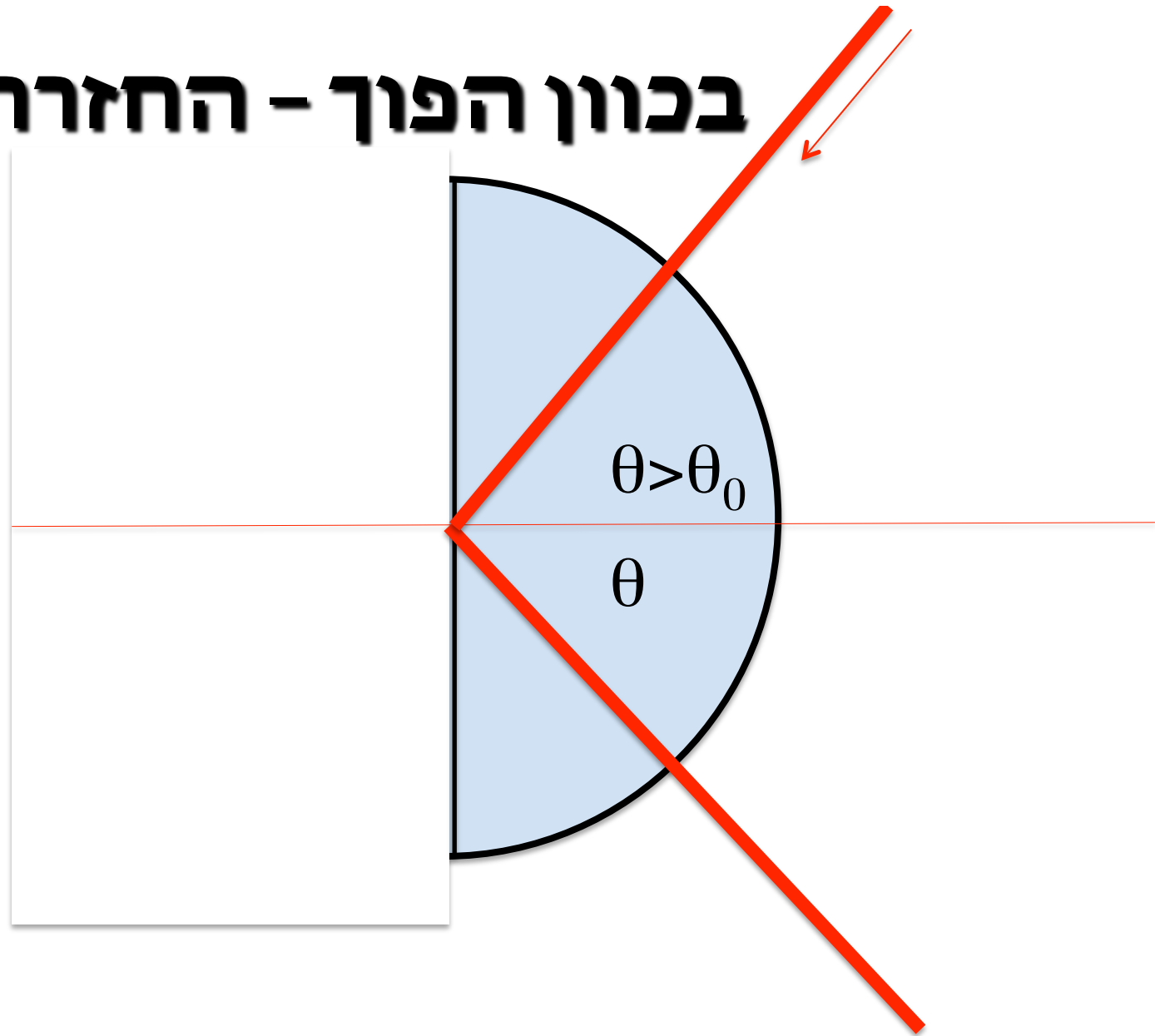
שבירת קרניים במעבר מחומר לחומר נשמע לחוק סנל $n \sin\theta = n' \sin\theta'$
מקדם שבירה: n מוגדר $n=1$ לאויר (למעשה לואקום) $n=1.333$ למים
הקרון הנכנסת למנת שבירה גבוהה מתקרבת לאנך למשטח הגבול
בין שתי מנות שבירה

הדגמה - בחצי כדור יציאת קרן מהמרכז אנכית למשטח ואינה נשברת



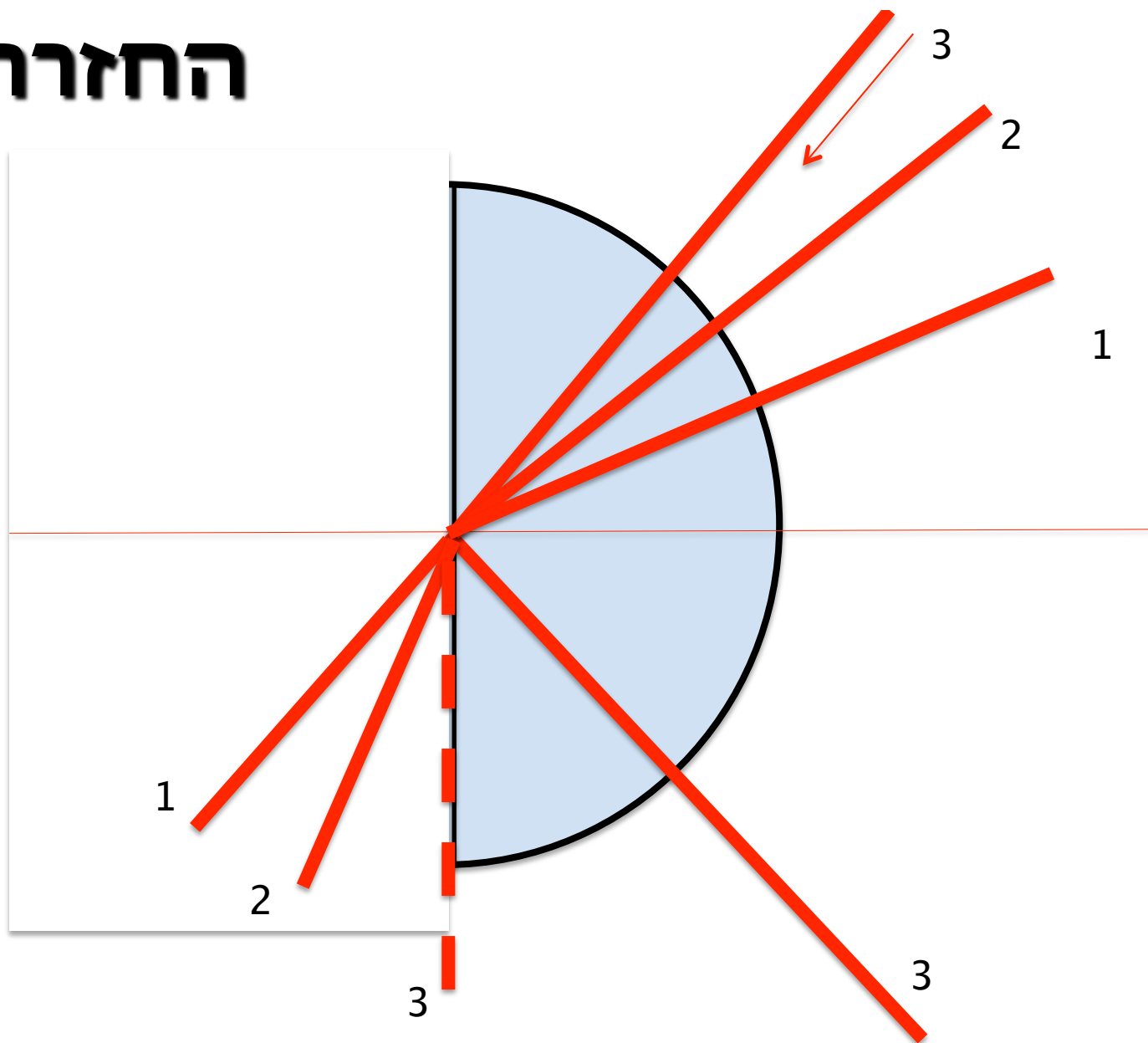
חלק מהקרן מוחזר (לדוגמא כ-4% בין אויר לזכוכית) האחוז תלוי בזווית ציפוי נגד החזרה למשקפים, לעדשות מצלמה וכו' - ברק מתכתי (עקרון הפעולה - נלמד כשנבין אופטיקה פיסיקאלית והתאבכות)

בכוון הפוך - החזרה פנימית



החזרה פנימית ביציאה ממדיום צפוף לאויר: $n > n'$ $\theta_0 = 42^\circ$ $\theta_0' = 90^\circ$ $n \sin \theta_0 = n'$

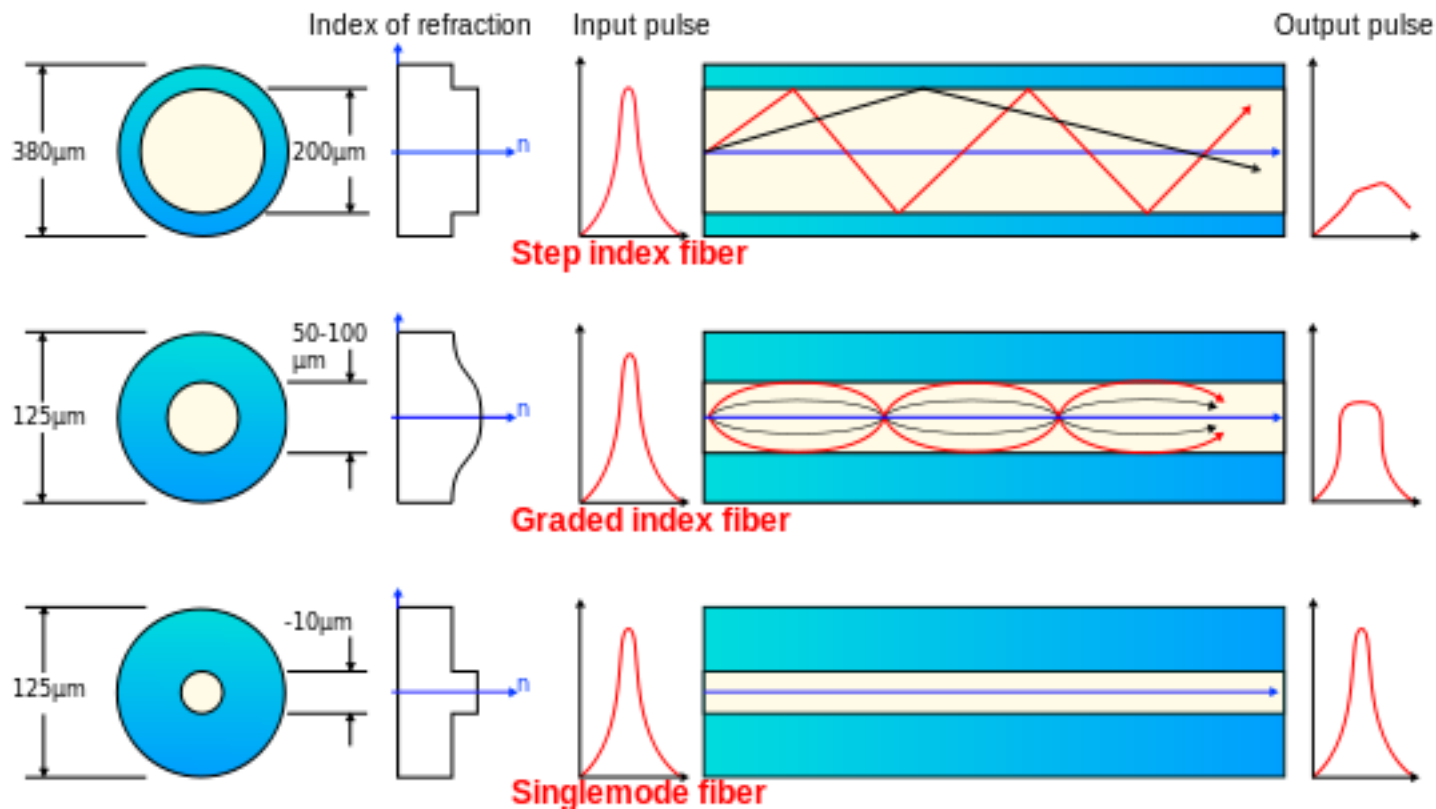
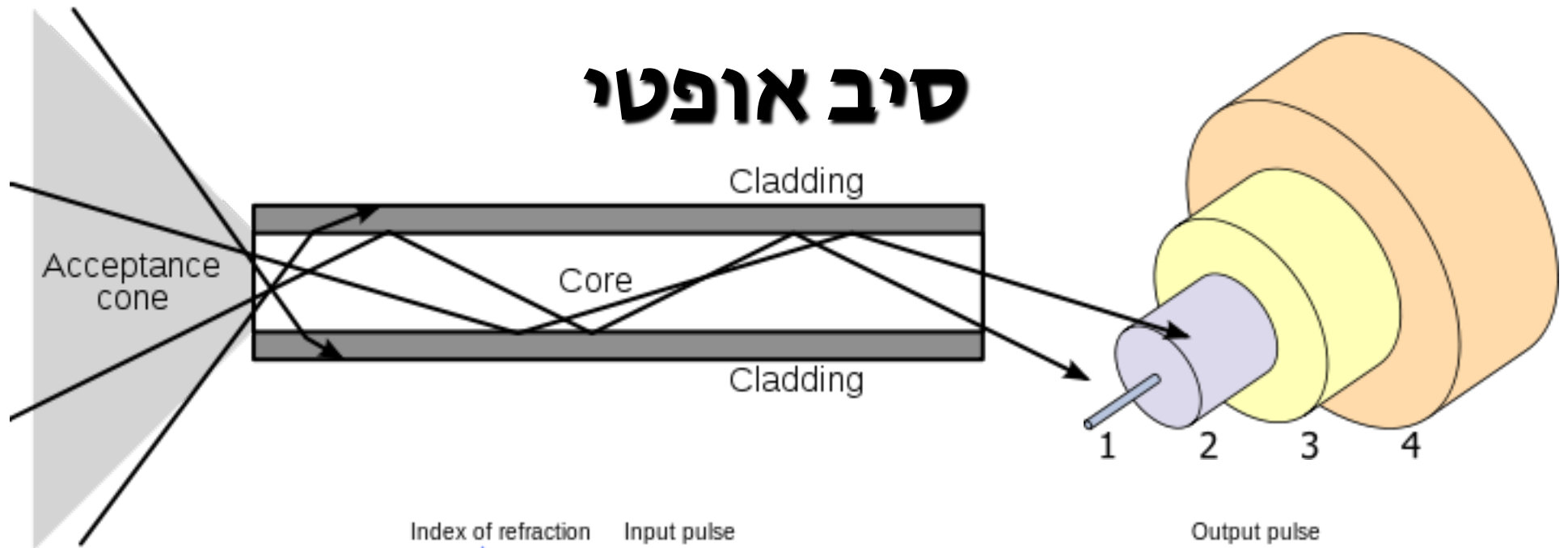
החזרה פנימית



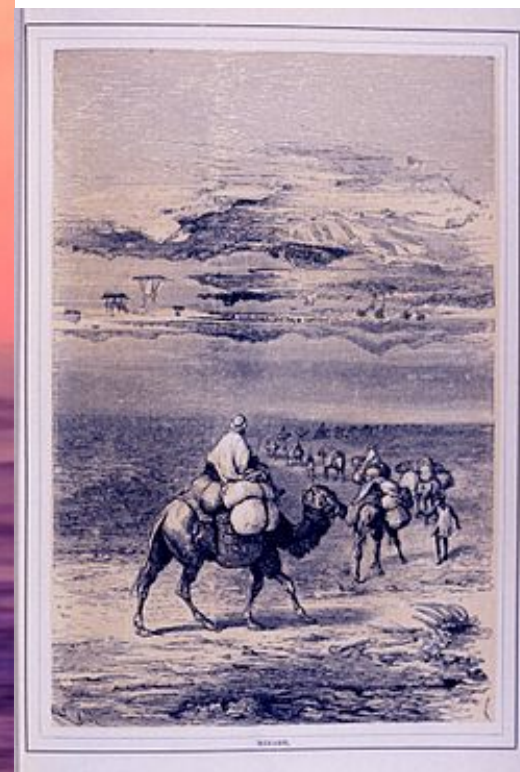
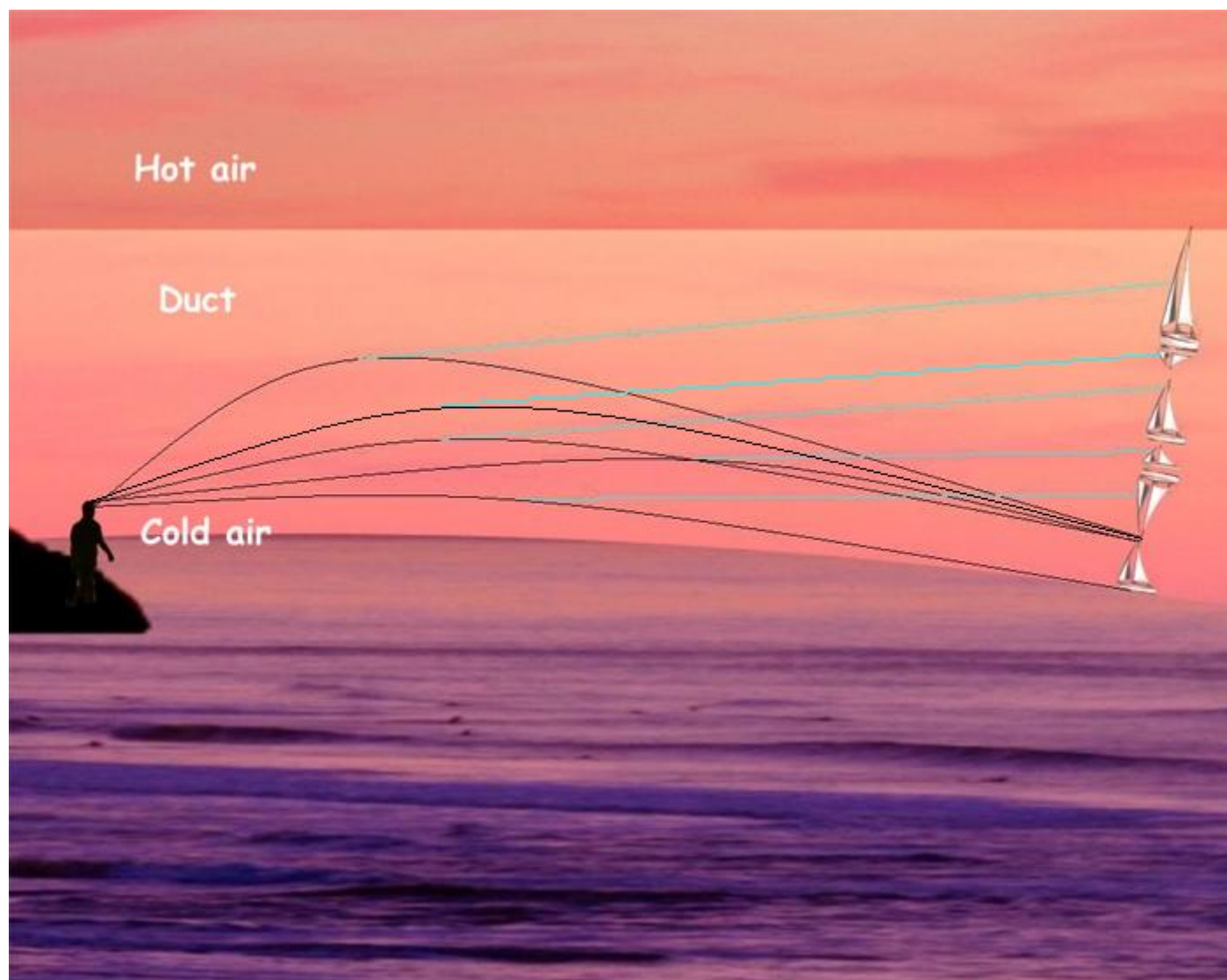
הדגמה - איפה משתמשים היום?



סיב אופטי

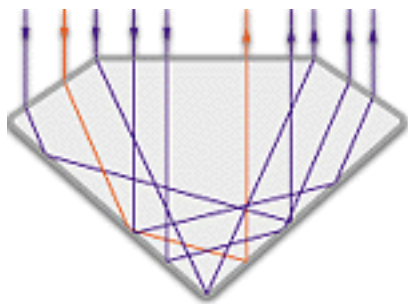
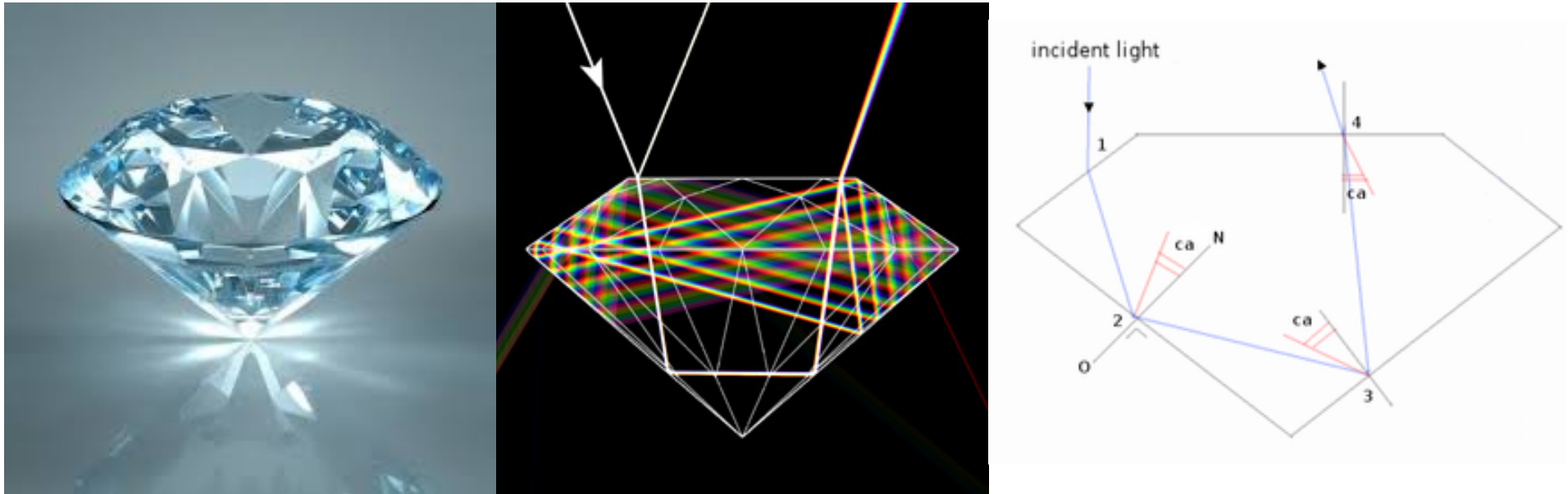


פטה מורגנה



יהלום

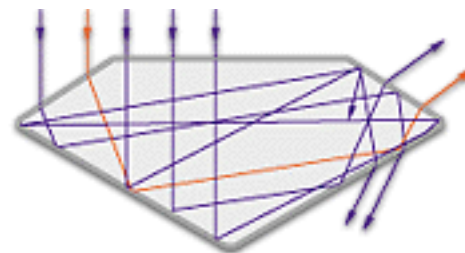
מנת שבירה גבוהה $n=2.4$ ולכן הרבה החזרות פנימיות



normal proportions

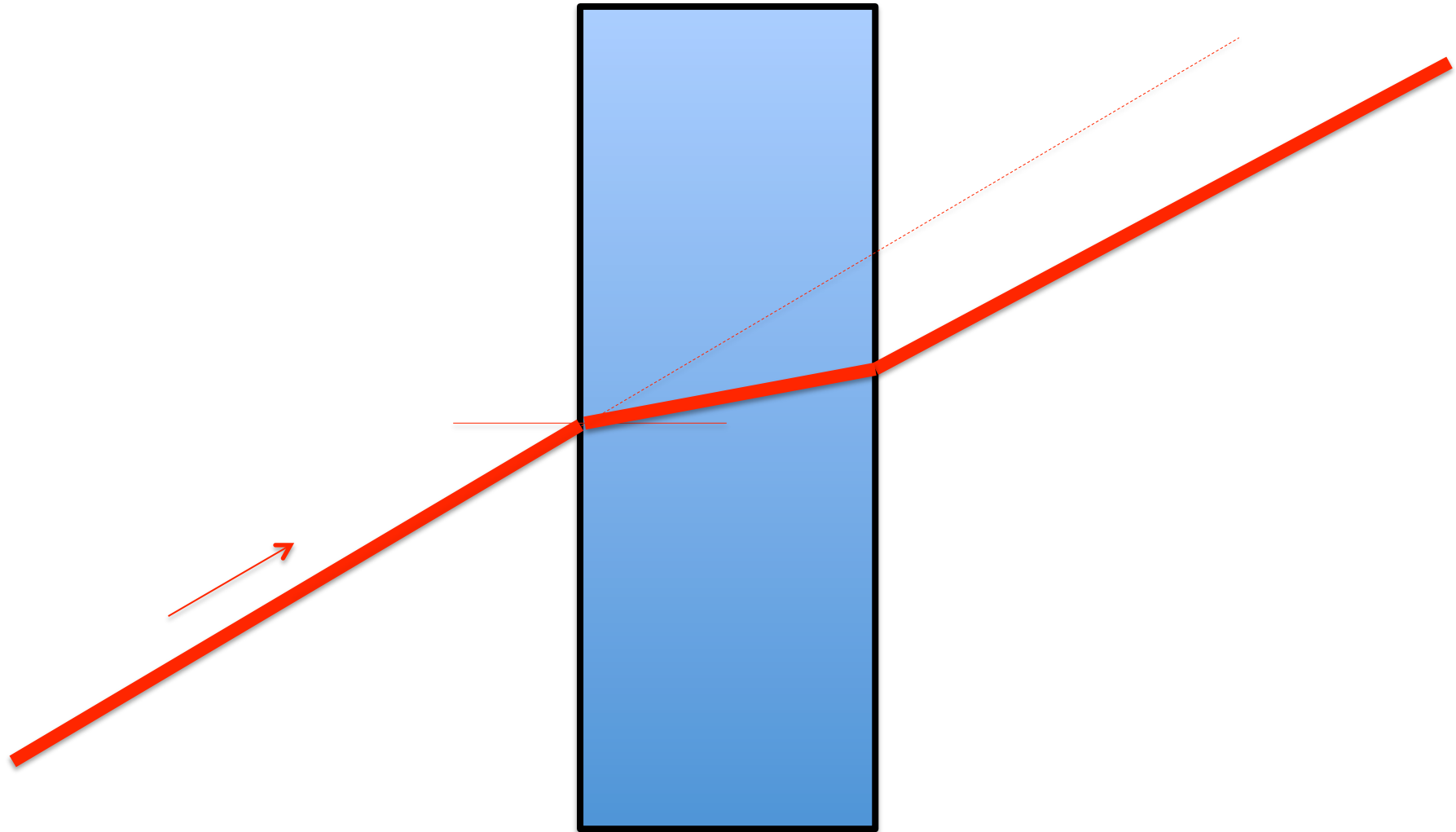


too deep pavilion



too shallow pavilion

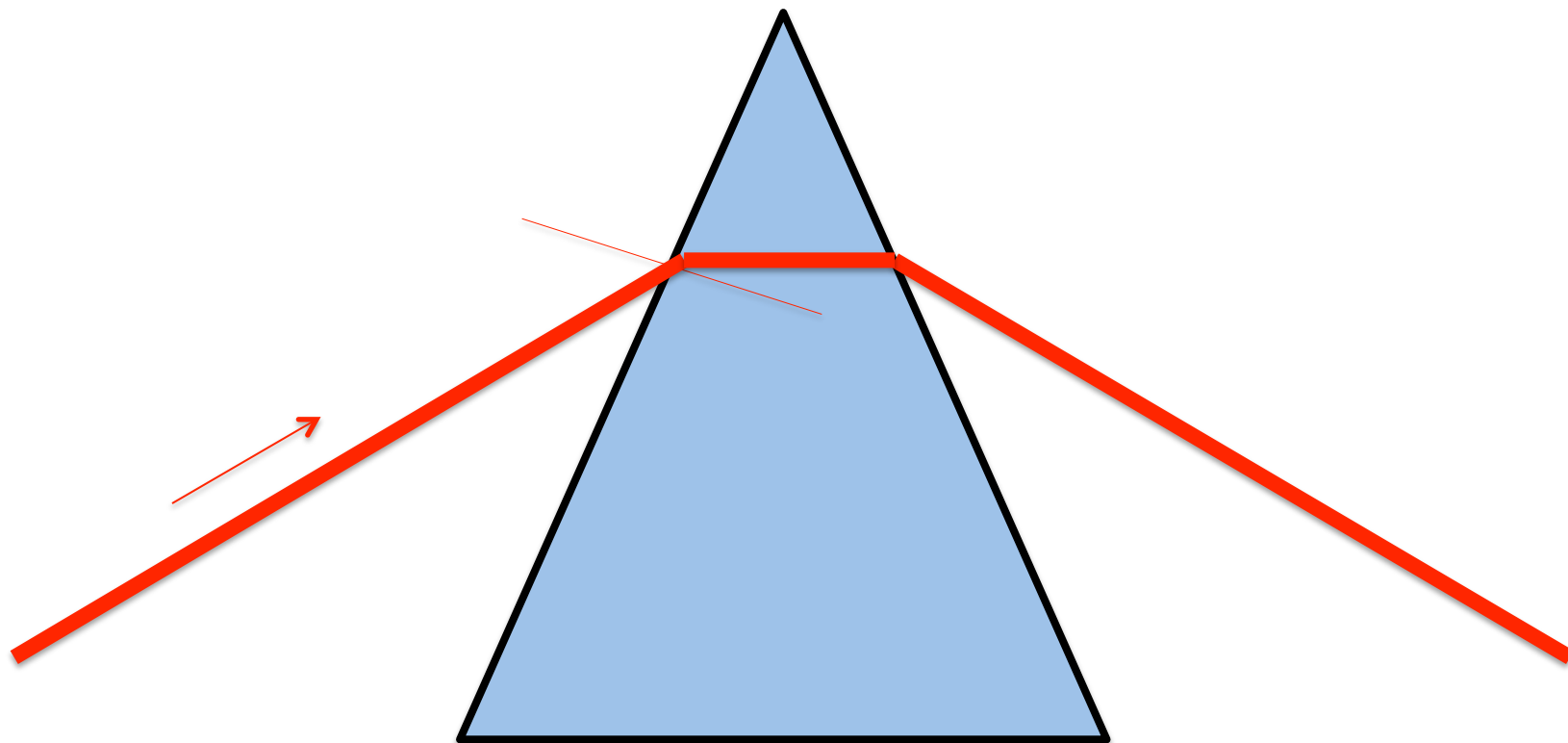
חלון זכוכית



הדגמה

שבירה פעמיים - קרן שומרת על זווית אך מוסטת

מנסרה



הדגמה

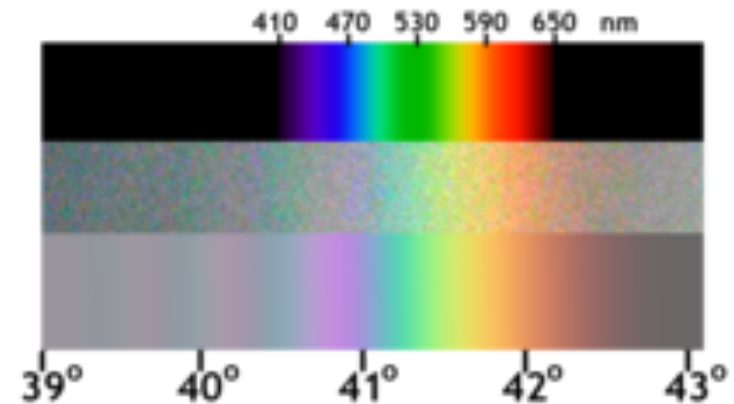
שבירה פעמיים - קרן יוצאת בזווית

נפיצת צבעים

הדגמת נפיצת צבעים

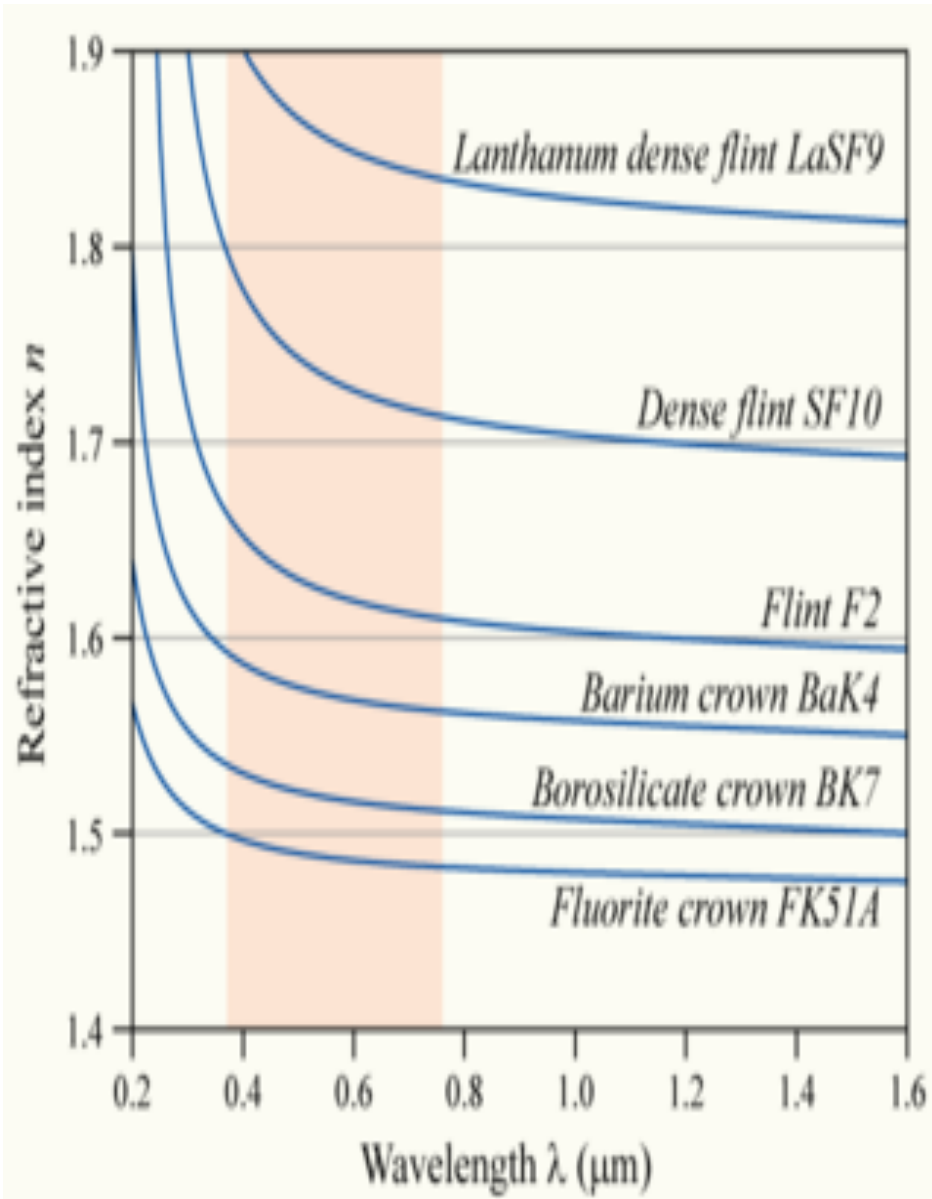
מנת השבירה תלויה בצבע – נפיצה במנסרה (פריזמה) לראשונה באופן מפורט ע"י ניוטון. אך התופעה נראתה ביצירת צבעים מגבישי מלח וקווארץ, ובקשת. עבור מים $n_{0.6\mu\text{m}}=1.332$ $n_{0.4\mu\text{m}}=1.339$ למשל לזווית כניסה $=30^\circ$ זווית יציאה במים תהיה שונה בפחות ממעלה אחת מסגול לאדום

$$\text{Arcsin}(\sin(30)/1.332)=22.05^\circ \quad \text{Arcsin}(\sin(30)/1.339)=22.93^\circ$$

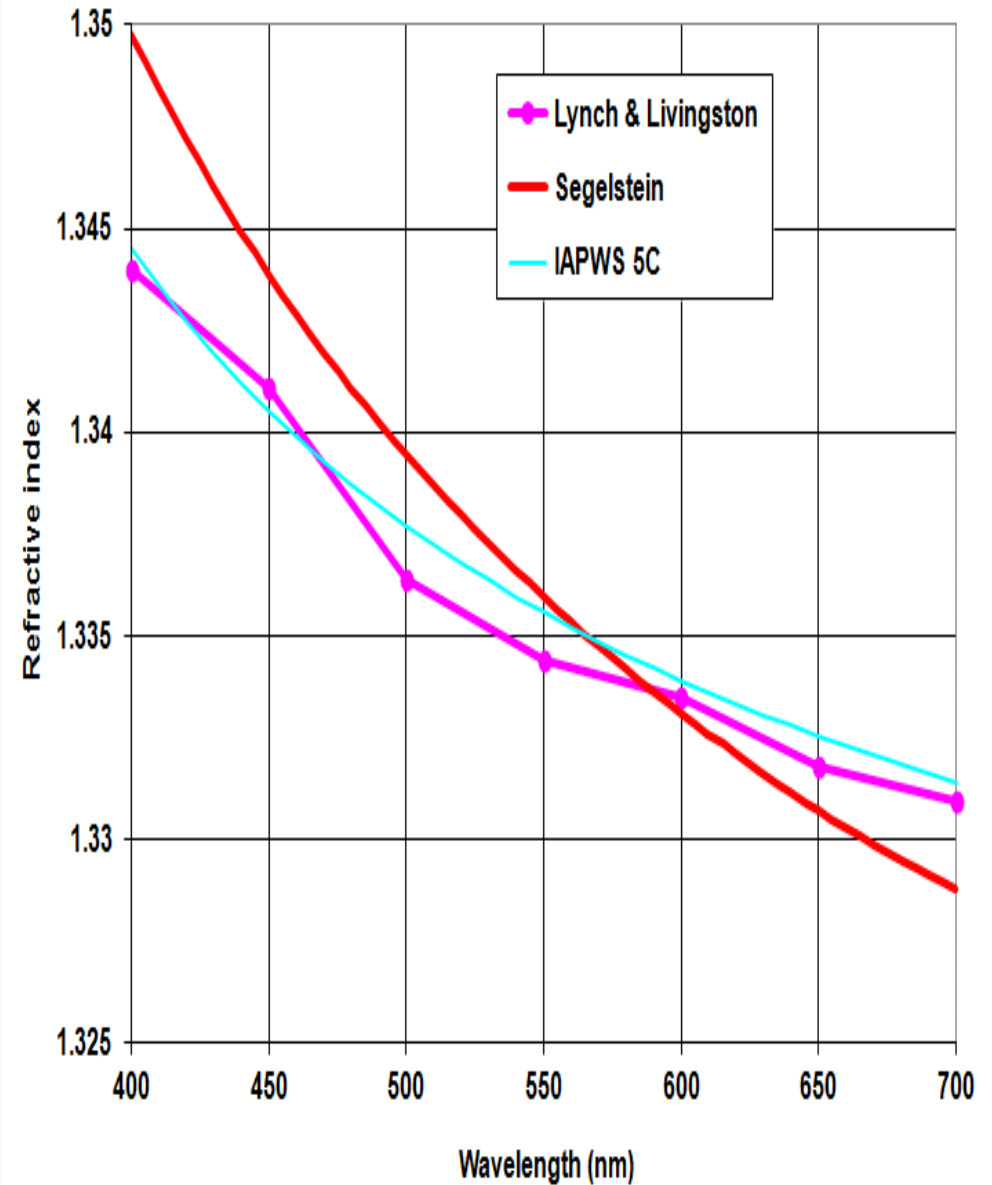


מנת השבירה לרוב עולה לכוון הכחול

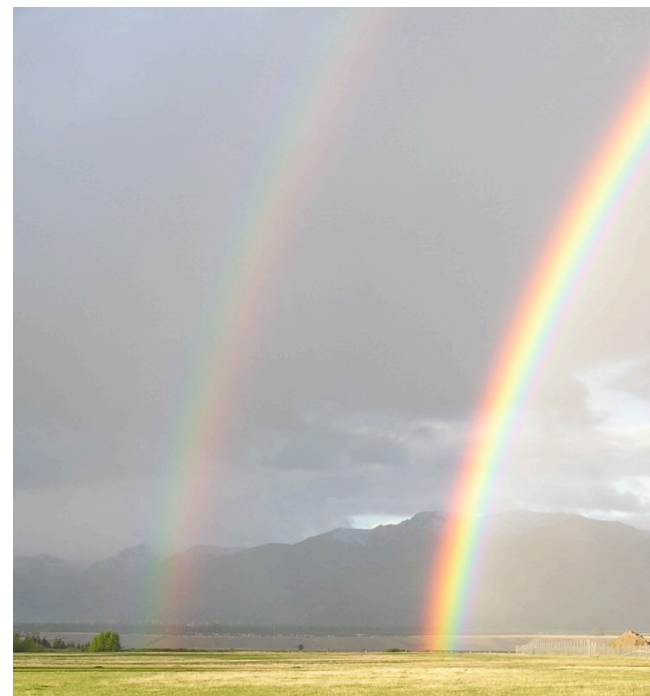
לזכוכיות



למים



הקשת



איך נוצרת הקשת? איך הקשת המישנית?

תוצאה של החזרה פנימית ונפיצה

אם זווית מעגל הקשת 42° מכוון השמש (ראה המשך) רוחב הקשת הוא כ- 2° – פעמיים זווית הנפיצה בין סגול לאדום

אריסטו (322-384 לפה"ס) – הראשון שידוע לנו שהסביר את הווצרות הקשת.
 סנקה הצעיר (65 לספירה Seneca) הקדיש ספר שלם לקשת. אבחנותיו: הקשת מופיעה בכוון
 הפוך לשמש. הציע שני הסברים: נוצרת ע"י טיפות מים (טיבעיות או מלאכותיות) וקשורה
 לנפיצת צבעים ע"י חלקיקי זכוכית. או נוצרת מהחזרה מעננים היוצרים מראה קמורה. הוא
 העדיף את ההסבר השני (הלא נכון).
 גם הסינים (Shen Kuo 1031-1095) עסקו בתופעת הקשת והבינו את הקשר לנפיצת
 הצבעים מאור השמש ע"י טיפות המים.
 הסבר זה התקבל ע"י איבן-אל-היטאם (אל-האזן Alhazen 965-1039 לספירה) ואווירוס

(Averroes 1126-1198).

אבן סינא (Avicenna 980-1037)

היבחין שהקשת נוצרת מערפל דליל,
 ולכן הסבר ההחזרה מעננים אינו סביר,
 והוא סבר שהערפל הוא מעין מסך להצגת
 הקשת.

כותב אל-דין אל-שירזי

(Qutb al Din al Shirazi 1236-1311)

ותלמידו קמאל אל-דין אל-פאריס

(Kamal al-Din al-Faris 1267-1319)

הגיעו להסבר הנכון של החזרה פנימית

בטיפות הגשם ע"י פיתוח מודל מתמטי

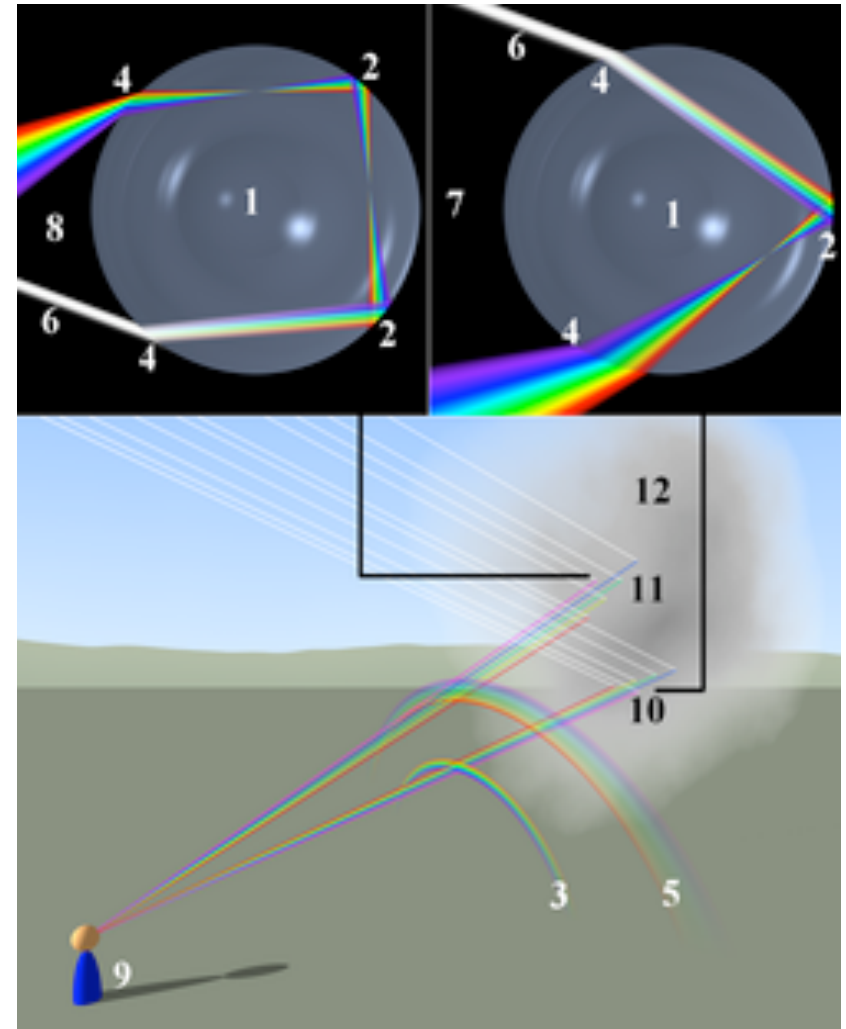
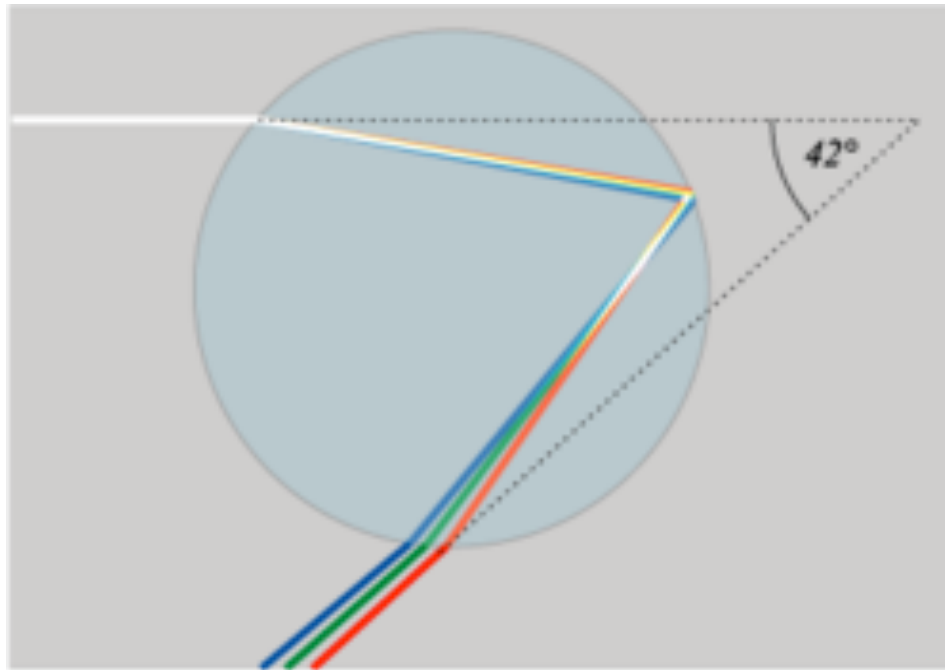
ועריכת נסיונות עם כדורי זכוכית



המודל הזה שימש את רנה דקרט (Rene Descartes 1637) שגם הסביר את זווית הקשת ואת הקשת המישנית. נסיונות הנפיעה במנסרה ע"י ניוטון הישלימו את ההסבר לצבעי הקשת, ארי (Airy 1820) הסביר את תלות עצמת הקשת בגודל טיפות המים, ומי (Mie 1908) השלים את ההסברים המפורטים לפיזור האור בטיפות ערפל.

מה כוון השמש יחסית לקשת?

איך נוצרת קשת כפולה? מה הזווית שלה? מה סדר הצבעים בה?



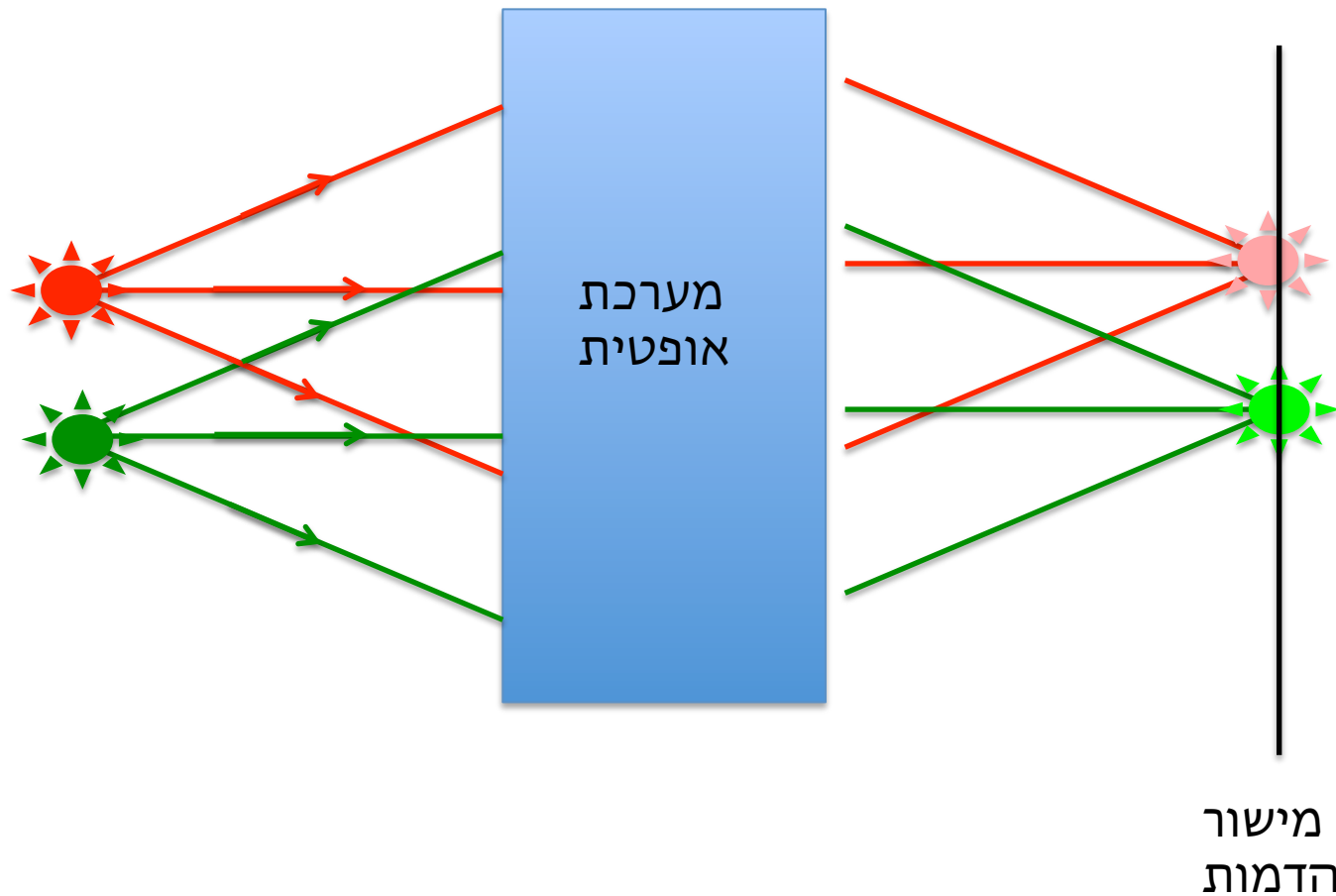
קשת נוצרת מנפיעה והחזרה פנימית בטיפות המים קשת עיקרית – מהחזרה אחת. הזווית בין כוון קרני השמש והקשת 42° קשת משנית – מהחזרה כפולה. תכונותיה: חיצונית לעיקרית, חלשה יותר (מדוע?) וסדר צבעיה הפוכים.

יצירת תמונה אופטית

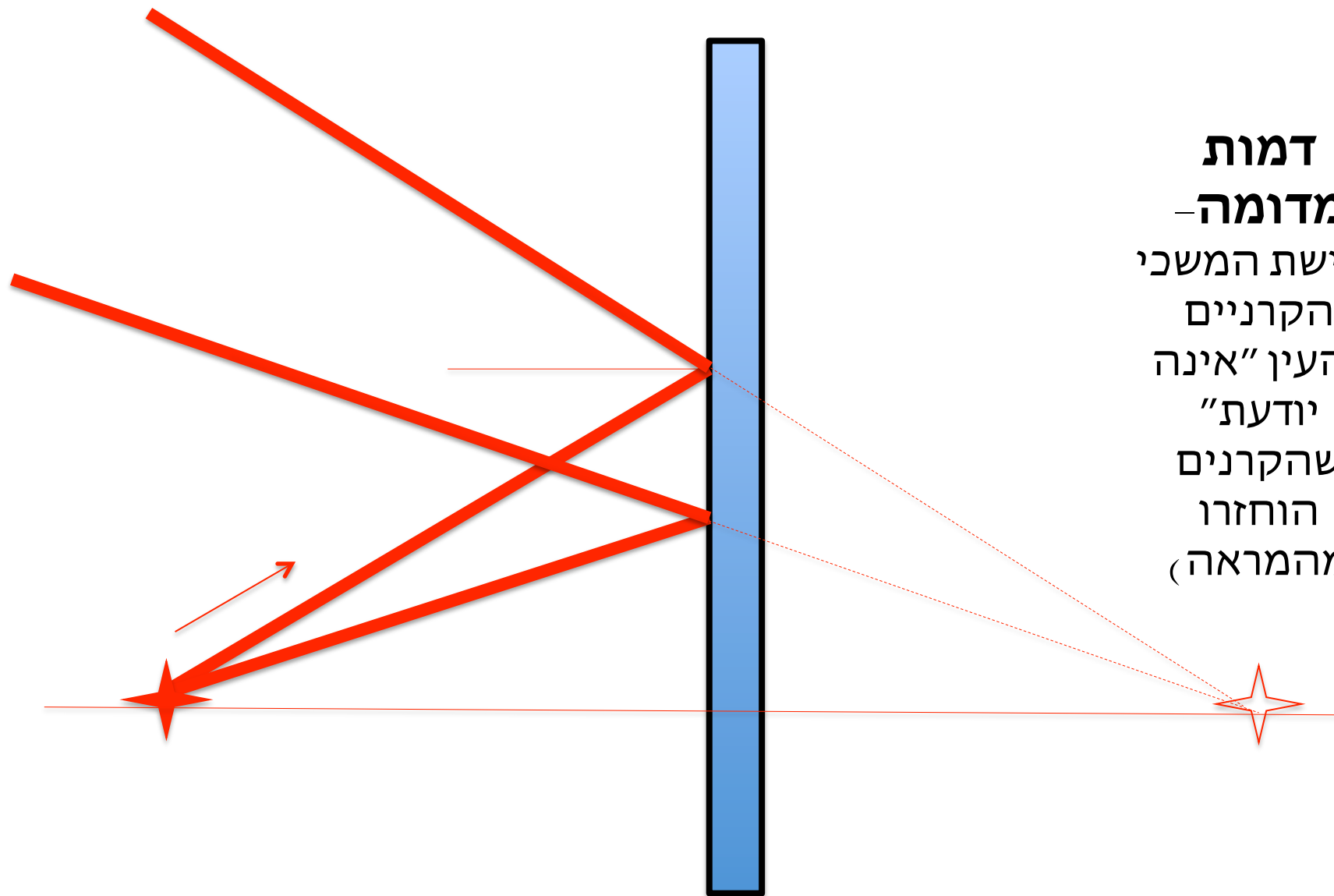
במראות ובעדשות

יצירת דמות במערכת אופטית

הדמות היא מקום מפגש הקרניים היוצאות מנקודה אחת על העצם.
במקומות אחרים הקרניים מכל נקודות העצם "מתערבות"



מראה מישורית



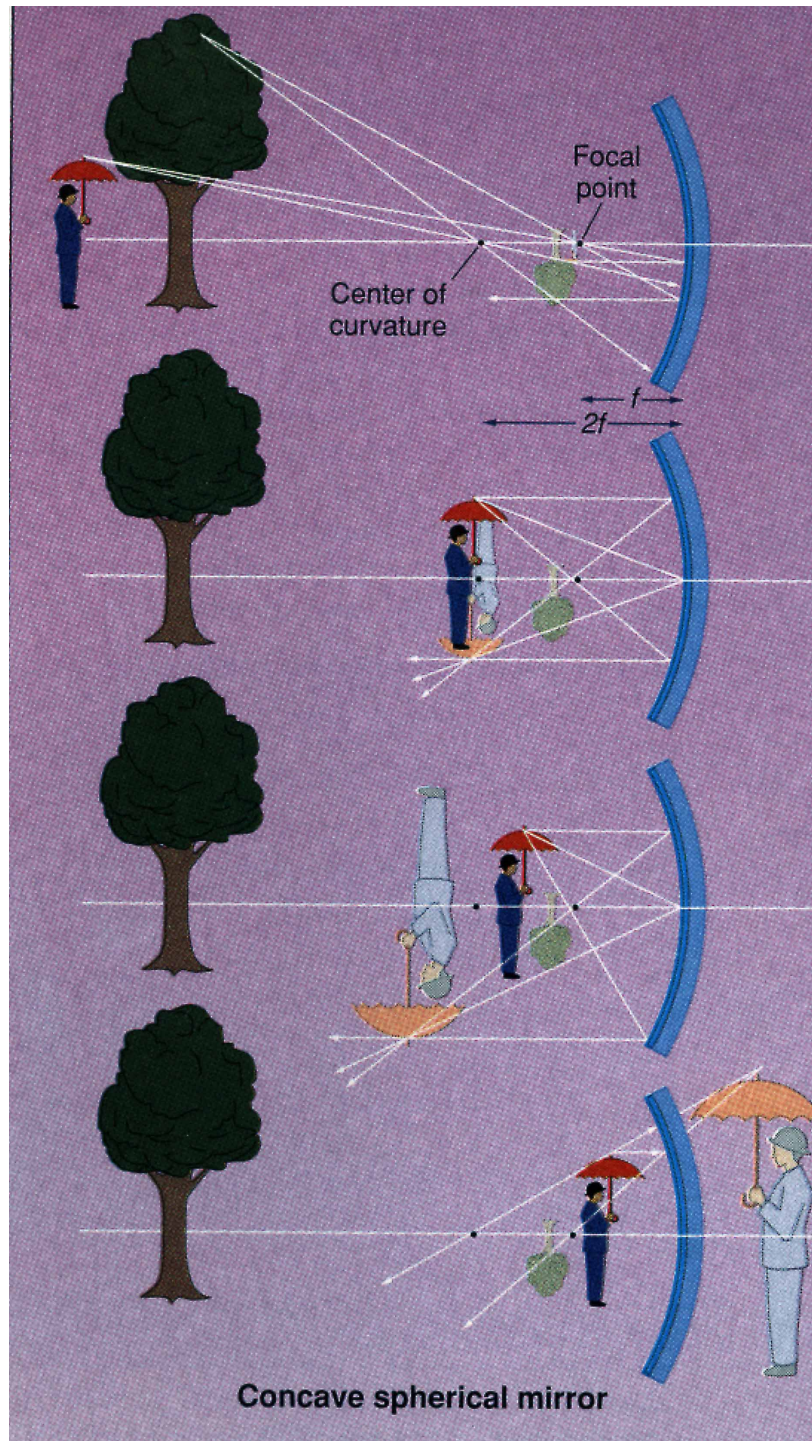
**דמות
-מדומה**
פגישת המשכי
הקרניים
(העין "אינה
יודעת"
שהקרניים
הוחזרו
(מהמראה)

מראה קעורה

הדמות:
מקום פגישת
הקרניים היוצאות
מנקודה על העצם

דמות ממשית - לעצם רחוק
דמות מדומה - לעצם קרוב

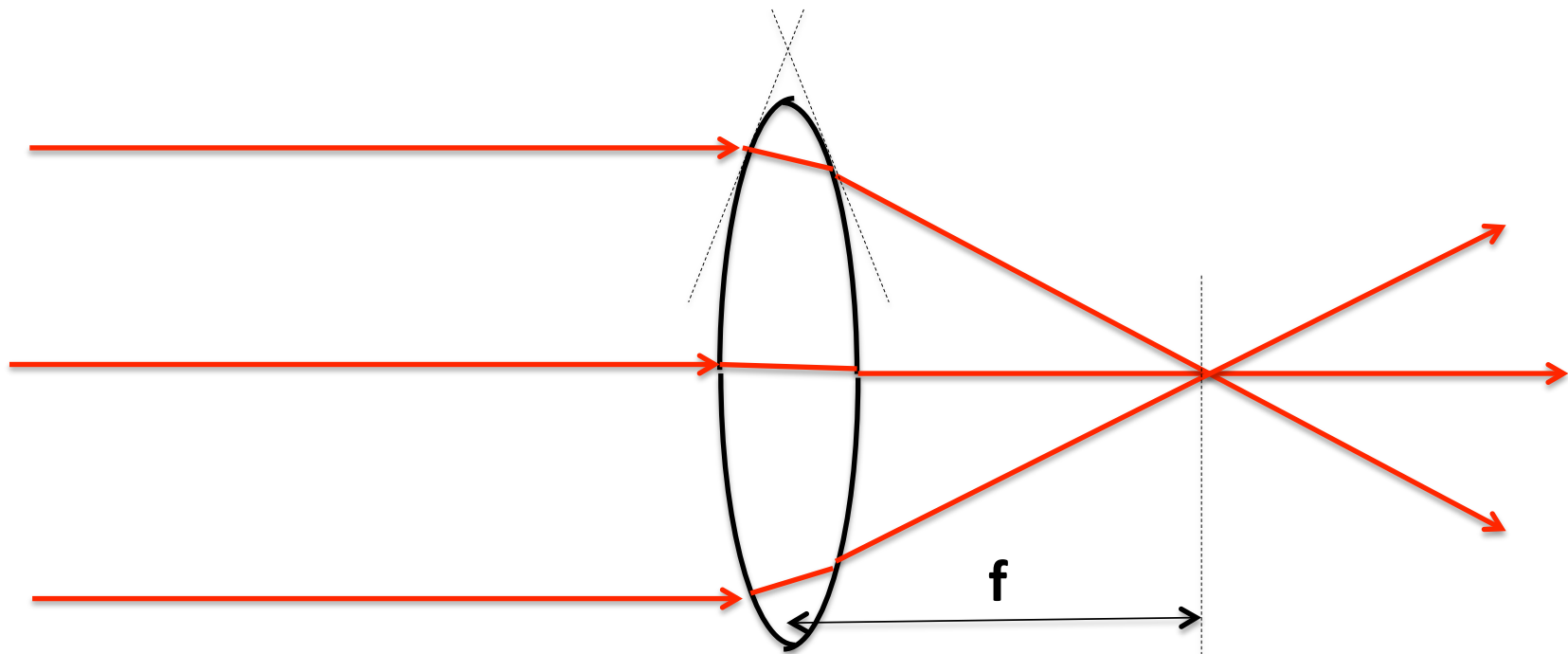
הדגמה: מראת גילוח



משהו קורה
בדרך לפוקוס:
התמונה
מתרחקת
לאינסוף
וחוזרת
ממינוס-אינסוף
כתמונה
מדומה

שבירת אור בעדשה

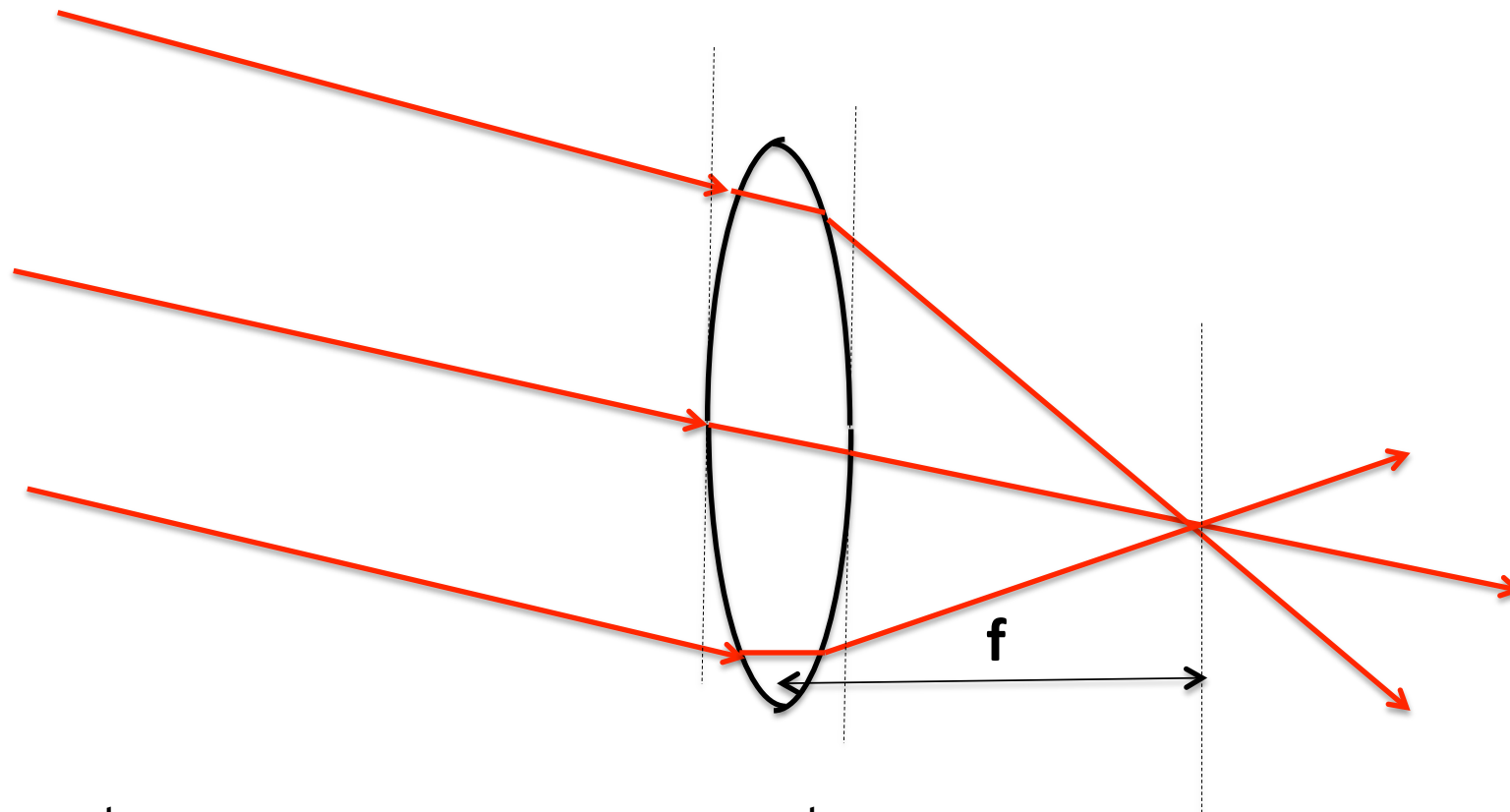
המוקד



מוקד - פגישת הקרניים הנופלות במקביל זו לזו
ככל שהקרן רחוקה ממרכז העדשה - זווית "המנסרה" גדולה יותר והקרן נשברת יותר
לעדשות כדוריות פגישת כל הקרניים בדיוק די טוב בנקודה

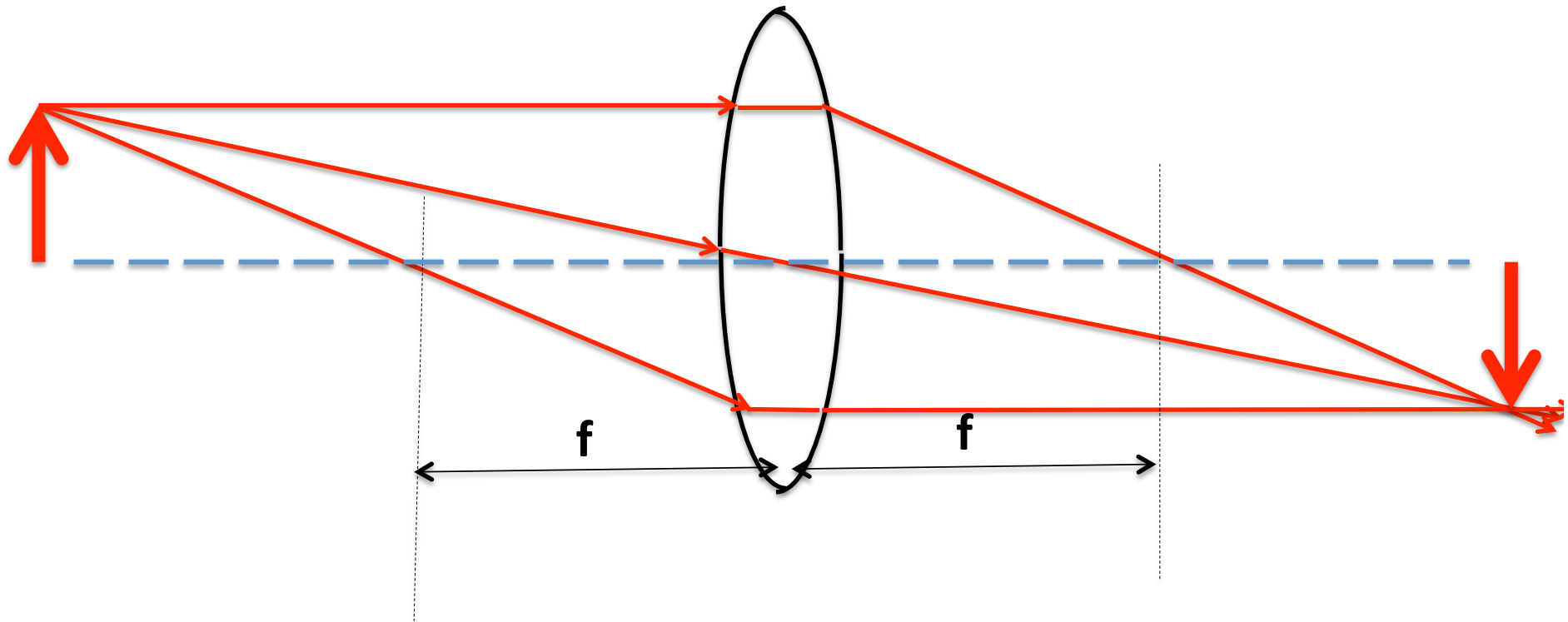
שבירת אור בעדשה

המוקד בזווית לציר האופטי



קרן העוברת במרכז עדשה אינה נשברת - אלא עוברת ישר (עד כדי הסטה קטנה לעדשה דקה)

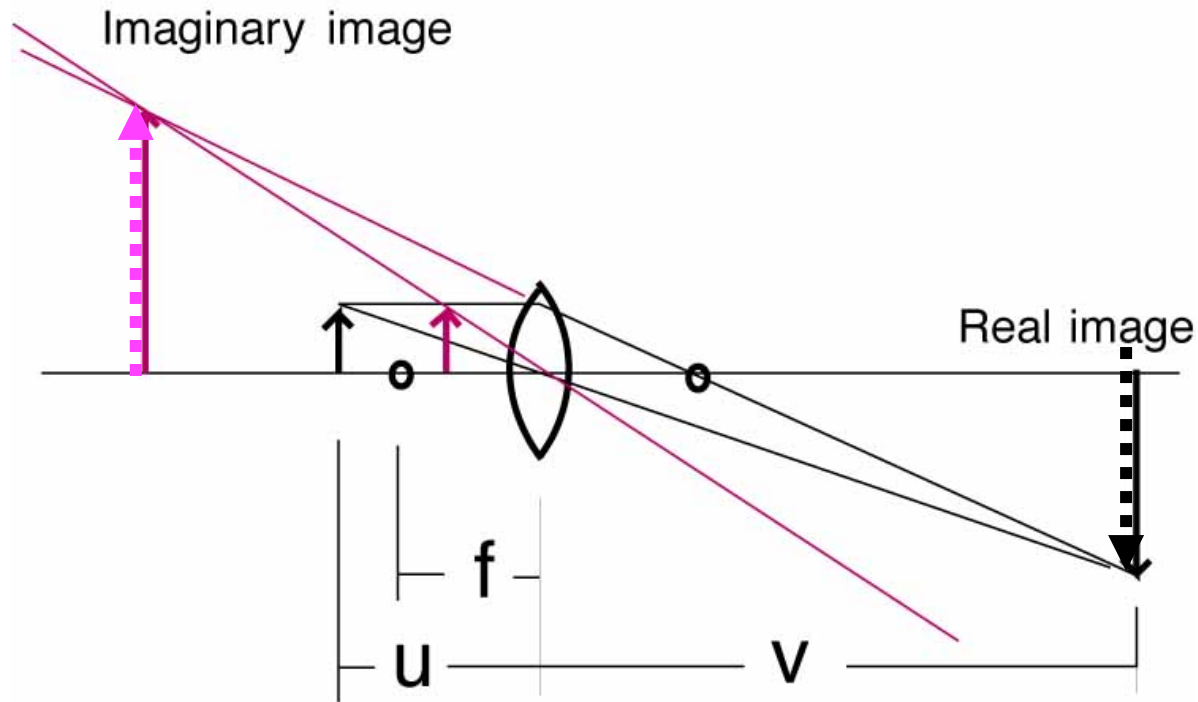
איך משרטטים יצירת דמות



קל לבנות דמות באמצעות שלש קרניים:
קרן העוברת במרכז עדשה אינה נשברת - עוברת ישר (עד כדי הסטה קטנה לעדשה דקה)
קרן העוברת בפוקוס יוצאת מקבילה
קרן מקבילה יוצאת דרך הפוקוס

יצירת תמונה בעדשות

לעצמים לפני ואחרי המוקד



הוכיח שהנוסחאות זהות

$$1/u + 1/v = 1/f$$

$$\text{or: } (u-f) \cdot (v-f) = f^2$$

נוסחת מלטשי העדשות

נוסחת ניוטון

בנית הקרניים: קרן מרכזית, קרן היוצאת מהמוקד, וקרן הנכנסת למוקד
דמות ממשית (על מסך) דמות מדומה (כמו מהמשכי הקרניים במראה)

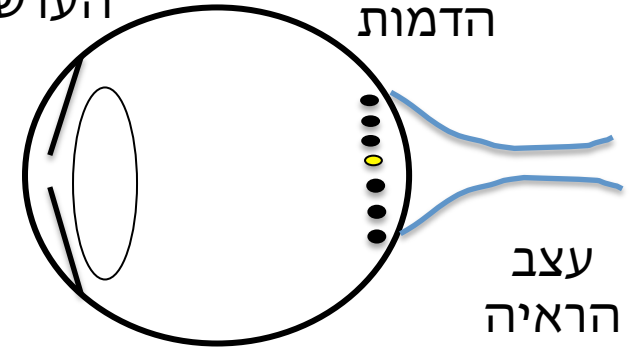
ספסלון אופטי דיודה ועדשה - להדגמה

העין



עדשת העין
(מיקוד ע"י כוּוץ
העדשה)

הרשתית
(רטינה)
"CCD"
מקום
הדמות

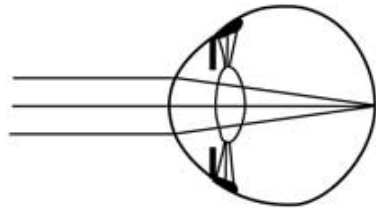


אישון-כמות האור



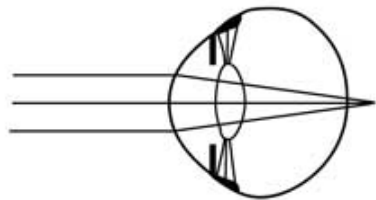
עדשת עין נורמאלית – ללא מאמץ: מיקוד למרחק (אינסוף)
מאמץ מירבי: מיקוד ל-250 מ"מ

משקפיים

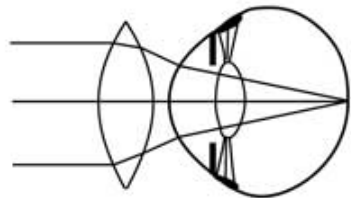


Normal eye

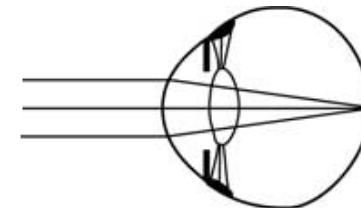
Hypermetropia



Light focused behind the retina

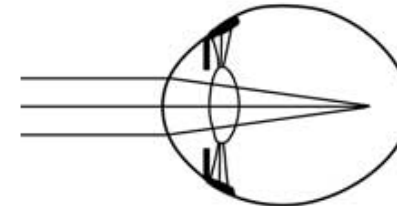


Corrected with convex lens

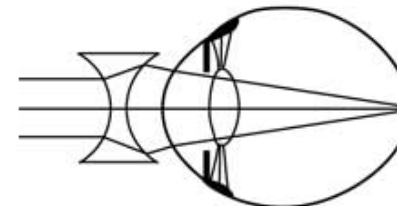


Normal eye

Myopia



Light focused in front of retina



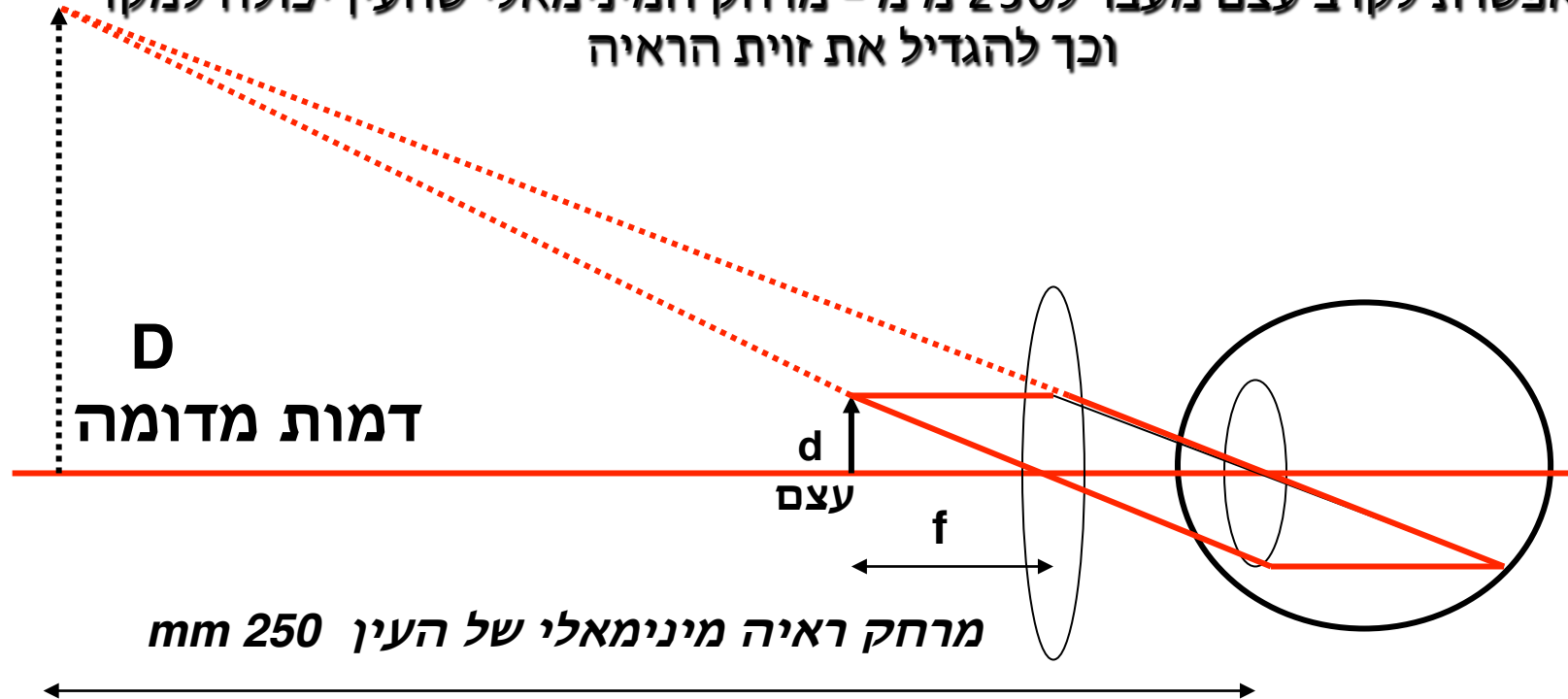
Corrected with concave lens

רחק ראייה – מיקום הרטינה קרוב מידי כלפי מוקד עדשת העין, עדשה "חלשה" מידי כשהיא רפויה תיקון בעדשה חיובית (קעורה)

קרב ראייה – מיקום הרטינה רחוק מידי כלפי מוקד עדשת העין, עדשה "חזקה" מידי כשהיא רפויה תיקון בעדשה שלילית (קמורה)

זכוכית מגדלת

מאפשרת לקרוב עצם מעבר ל-250 מ"מ - מרחק המינימאלי שהעין יכולה למקד
וכך להגדיל את זווית הראיה

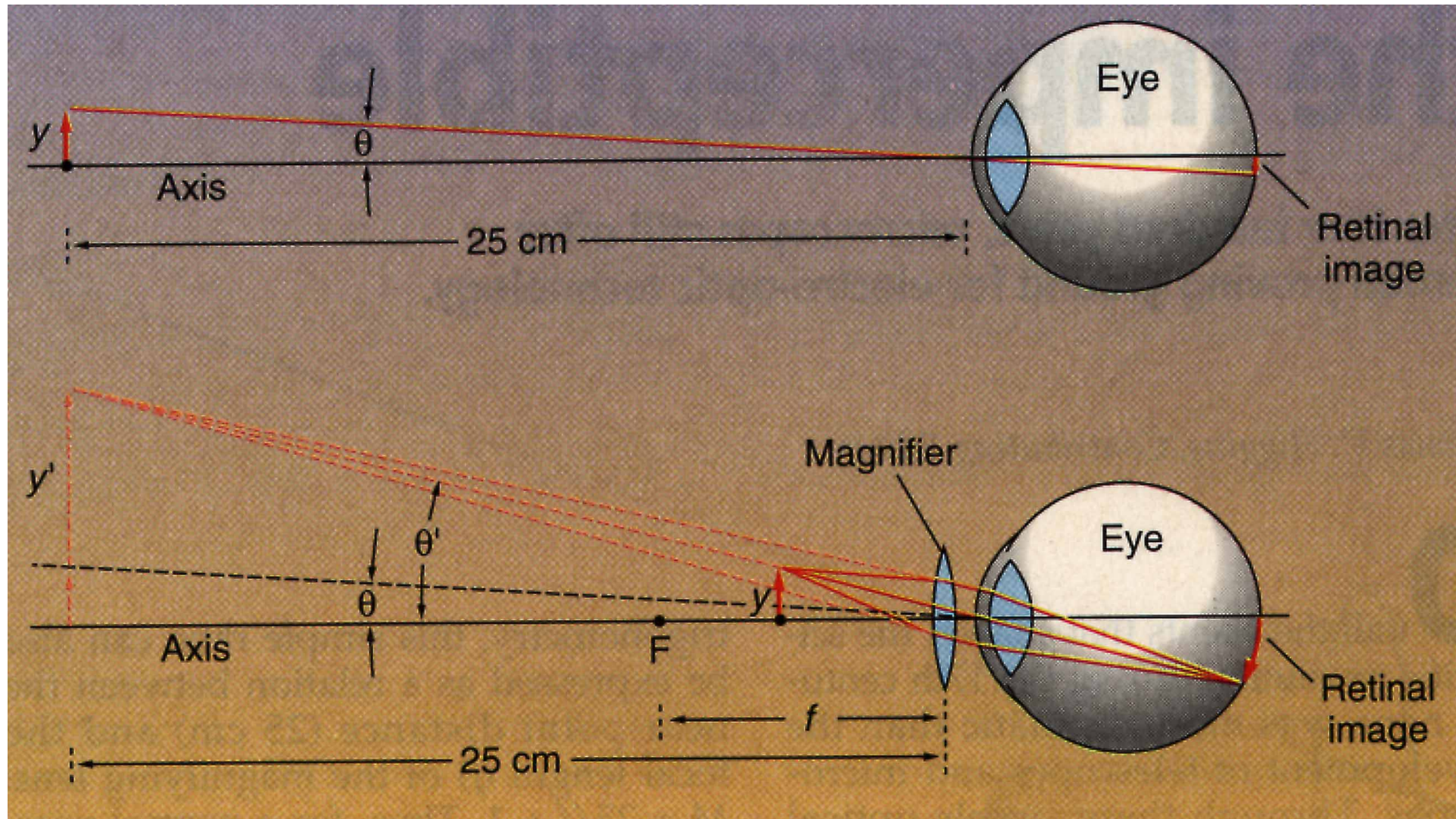


הגדלה למרחקים סופיים $M = D/d$
למרחק אינסופי הגדלה = יחס זווית הראיה
הגדלה $M = 250/f$

מדוע?

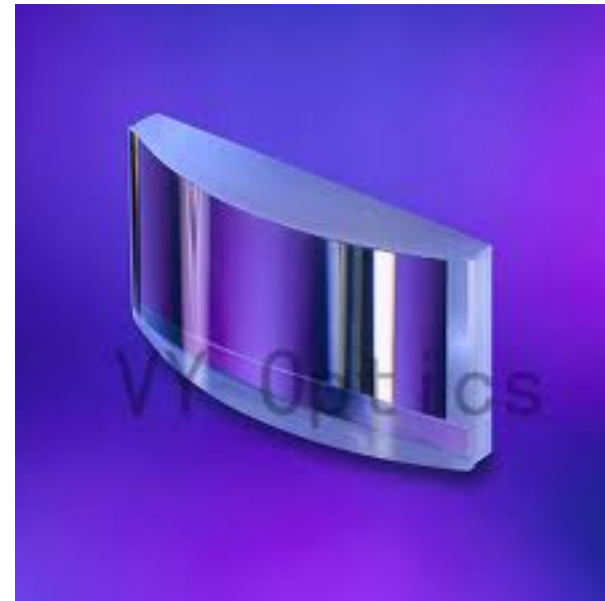
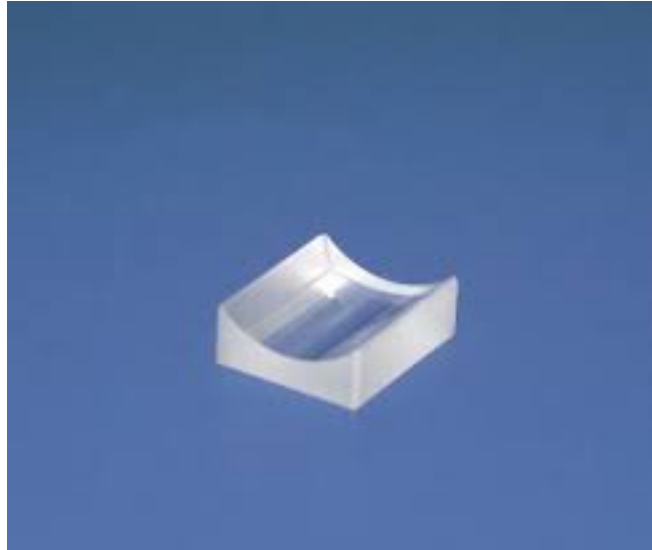
לעין לא מסתגלת (רואה לאינסוף) $M = 250/f + 1$

זכוכית מגדלת

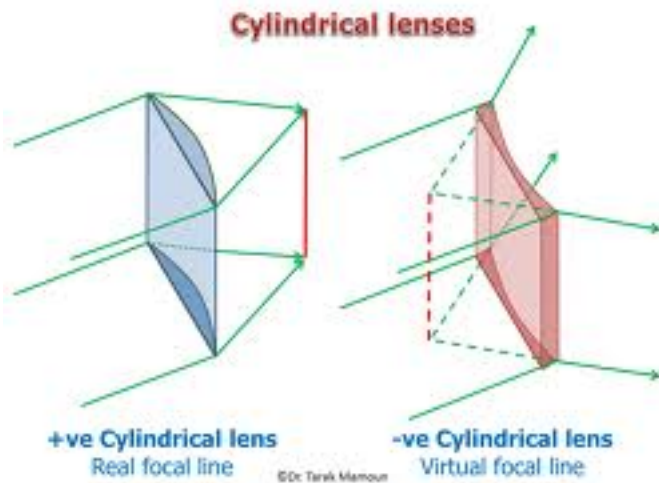
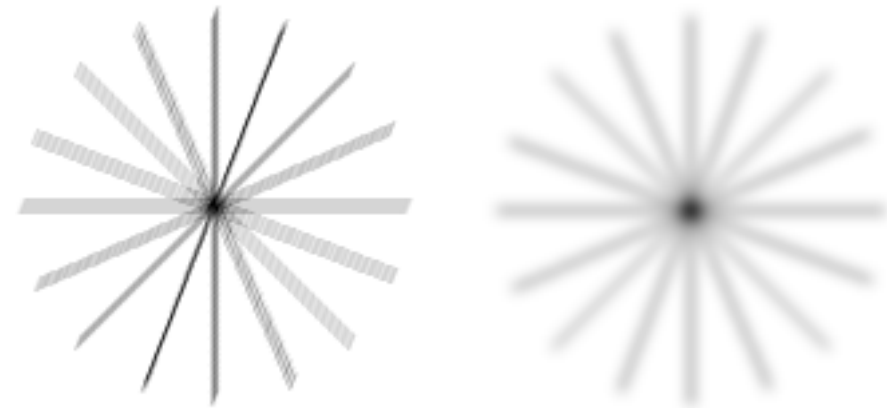
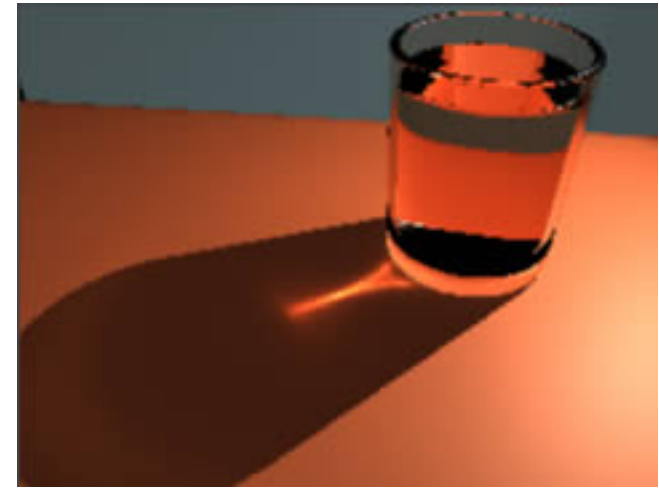
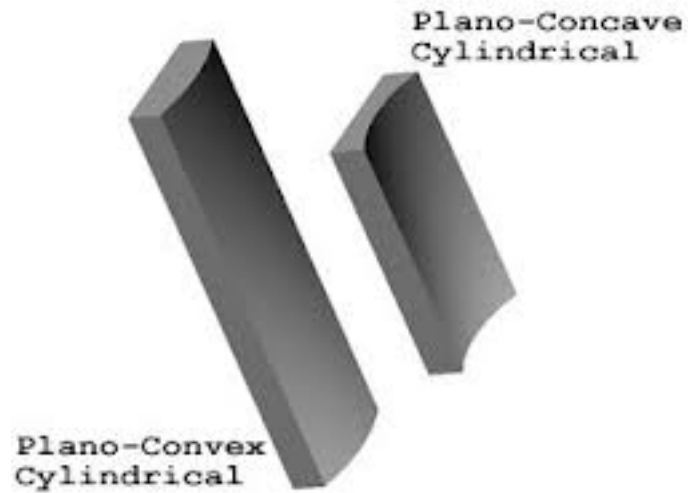


יוצרת מעצם קרוב דמות מדומה ומורחקת מעבר ל-25 ס"מ : מרחק הראיה המינימאלי של העין, עם זווית ראיה הגדולה מזו שנוכל לקבל בלי העדשה

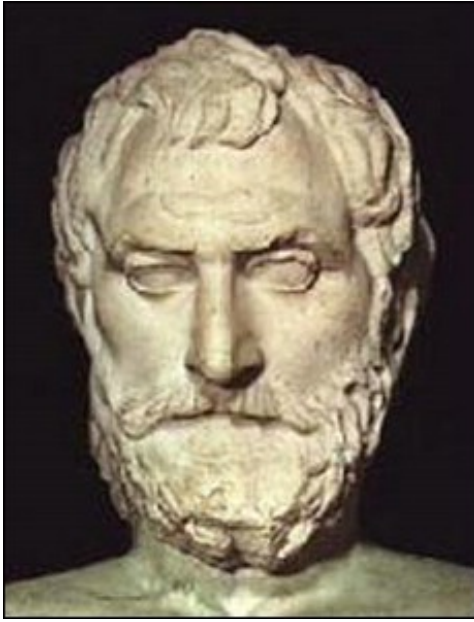
עדשות גליליות (צילינדריות) תן דוגמא לשימוש?



מדוע יש עיניים הדורשות עדשות צילינדריות לתיקון הראיה?



תמונה לבדיקת עוות צילינדר בראיה.
 מימין: טישטוש של קצר רואי
 משמאל: טישטוש הדורש משקפיים צילינדריות



מיקרוסקופ טיפת המים של תלס

Thales of Miletus 620—546 BC

כנראה ראה תאים בעלים, או בקליפת בצל (שקופה)

