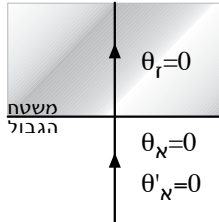
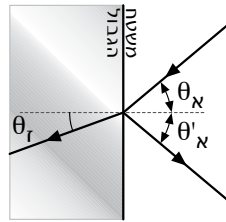


פרק ג: שבירת אור

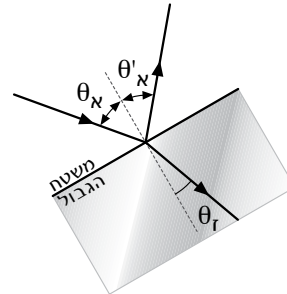
1. א.ב. באיורים א-ד להלן מסורטטים משטחי הגבול, האנכים, האלומות העוברות לזכוכית ואלו המוחזרות ממנה, וכן מסומנות זוויות הפגיעה, θ_{κ} , זוויות השבירה בזכוכית, θ_{τ} , וזוויות ההחזרה θ'_{κ} .



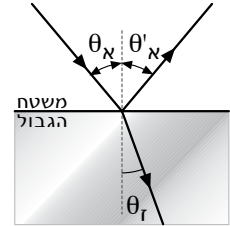
איור ד



איור ג



איור ב



איור א

2. זווית הפגיעה: 60° , זווית ההחזרה: 60° , זווית השבירה: 31° .

3. א. זווית השבירה קטנה מזווית הפגיעה, כי כאשר קרן עוברת מאוויר לזכוכית בזווית פגיעה שונה מאפס הקרן הנשברת "מתקרבת לאנך".

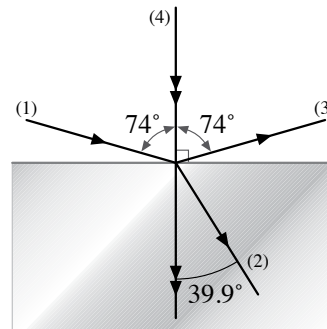
ב. נחשב את זווית השבירה: $\frac{\sin \theta_{\kappa}}{\sin \theta_{\tau}} = 1.5 \Rightarrow \frac{\sin 55^\circ}{\sin \theta_{\tau}} = 1.5 \Rightarrow \theta_{\tau} \approx 33^\circ$

ואכן זווית השבירה קטנה מזווית הפגיעה, כפי שציינו בתשובה לסעיף א.

4. א. חישוב זווית השבירה: $\frac{\sin \theta_{\kappa}}{\sin \theta_{\tau}} = 1.5 \Rightarrow \frac{\sin 74^\circ}{\sin \theta_{\tau}} = 1.5 \Rightarrow \theta_{\tau} \approx 39.9^\circ$

ב. זווית ההחזרה שווה לזווית הפגיעה, כלומר ערכה 74° .

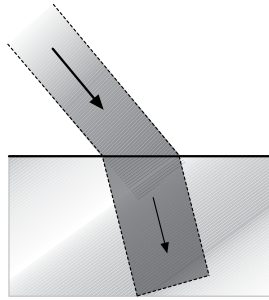
ג. להלן איור שבו מסורטטת האלומה הפוגעת המסומנת ב-(1), האלומה העוברת המסומנת ב-(2) והאלומה המוחזרת המסומנת ב-(3).



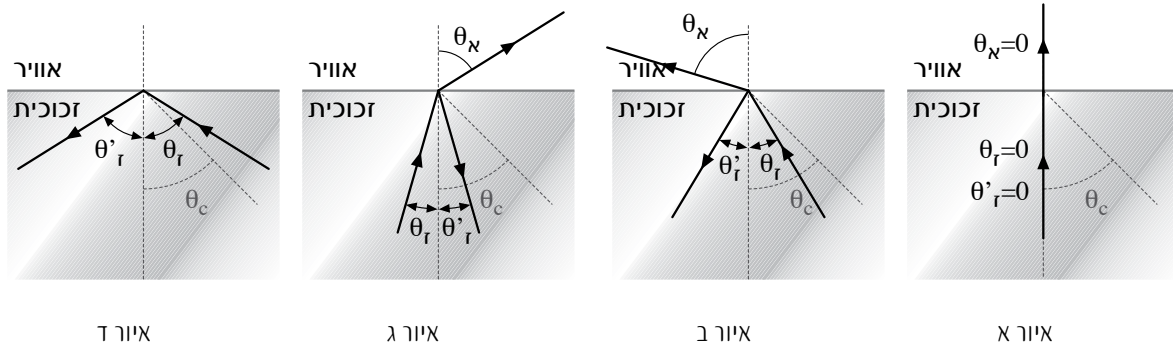
ד. אלומה הפוגעת בזכוכית בנקודת הפגיעה של האלומה הקודמת, ועוברת ללא שבירה, מסומנת באיור לעיל ב-(4).

5. חישוב זווית הפגיעה: $\frac{\sin \theta_{\kappa}}{\sin \theta_{\tau}} = 1.5 \Rightarrow \frac{\sin \theta_{\kappa}}{\sin 35^\circ} = 1.5 \Rightarrow \theta_{\kappa} \approx 59.4^\circ$

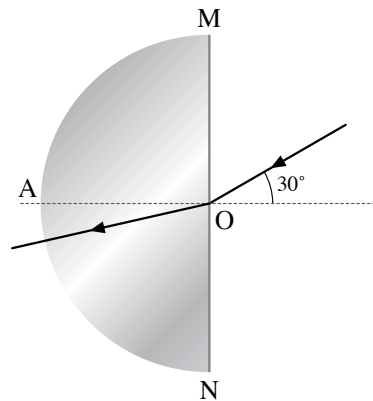
6. באיור שלהלן הוספנו סרטוט מהלכה של אלומת האור בתוך הזכוכית.



7. "זווית הגבול" היא זווית המהווה גבול של זוויות השבירה בזכוכית, כאשר זוויות הפגיעה באוויר שואפות ל- 90° .
8. באיורים א-ד שלהלן מסומנות זוויות הפגיעה ב- θ_i , מסורטטות האלומות העוברות לאוויר (במצב המתואר באיור ד אין אלומה העוברת לאוויר, כי אלומת האור מתפשטת בזכוכית, וזווית הפגיעה גדולה מהזווית הקריטית). כמו כן מסורטטות האלומות המוחזרות, ומסומנות זוויות השבירה באוויר ב- θ_r , וזוויות ההחזרה ב- θ'_r .



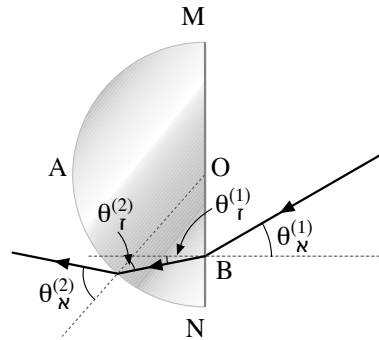
9. א. באיור שלהלן מוצגת הקרן העוברת לזכוכית, ומהלך התפשטותה עד צאתה מהזכוכית.



ב. חישוב זווית השבירה: $\frac{\sin \theta_r}{\sin \theta_i} = 1.5 \Rightarrow \frac{\sin 30^\circ}{\sin \theta_3} = 1.5 \Rightarrow \theta_3 \approx 18.2^\circ$

ג. האור אינו נשבר בעוברו מהזכוכית לאוויר (בקשת NAM).
 הסבר: כאשר האור מתפשט בזכוכית ממרכז הדסקית (מרכז המעגל) ופוגע בקשת - משטח הגבול בין הזכוכית לאוויר הוא קטע של המשיק לזכוכית, והאנך הוא רדיוס המעגל. כיוון שהאור מתפשט לאורך רדיוס המעגל - זווית הפגיעה במשטח הגבול עם האוויר שווה לאפס, לכן האור אינו משנה את כיוון התפשטותו (אינו נשבר).

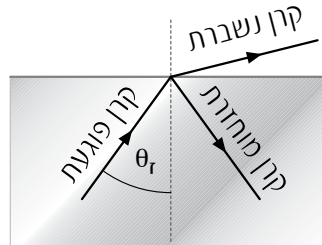
10. א.ב. באיור שלהלן מתוארת באופן מקורב הקרן העוברת לזכוכית, וממנה עוברת לאוויר. זווית הפגיעה מסומנת ב- $\theta_r^{(1)}$ ו- $\theta_n^{(1)}$, וזווית השבירה מסומנת ב- $\theta_r^{(2)}$ ו- $\theta_n^{(2)}$.



11. א. חישוב זווית השבירה באוויר:

$$\frac{\sin \theta_n}{\sin \theta_r} = 1.5 \Rightarrow \frac{\sin \theta_n}{\sin 36^\circ} = 1.5 \Rightarrow \theta_n \approx 61.8^\circ$$

ב. זווית ההחזרה בזכוכית שווה לזווית הפגיעה בזכוכית, דהיינו ל- 36° .
 ג. להלן איור מקורב של הקרן הפוגעת, הקרן הנשברת והקרן המוחזרת.



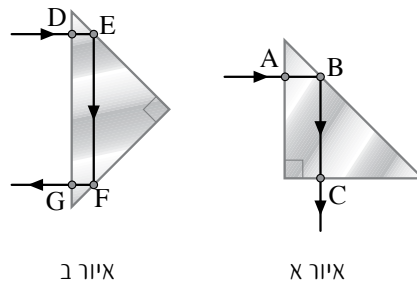
12. א. שני התנאים להחזרה מלאה, כאשר גוף זכוכית נמצא בתוך אוויר:

(1) האור מתפשט בזכוכית לעבר האוויר.

(2) זווית הפגיעה של האור במשטח הגבול עם האוויר גדולה מ- 42° .

ב. "החזרה פנימית מלאה" היא תופעה שבה אור מתפשט בתווך שקוף אחד, פוגע במשטח גבול עם תווך שקוף שני, ולאחר הפגיעה במשטח הגבול האור מוחזר במלואו לתווך הראשון.

13. מהלכי האור בכל אחת משתי המנסרות מסורטטים באיורים א ו-ב שלהלן.

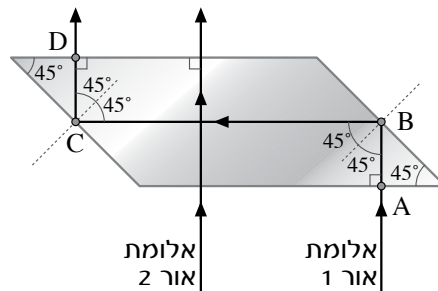


איור ב

איור א

קביעת מהלך האור בשתי מנסרות: בנקודות A, C, D ו-G זוויות הפגיעה שוות לאפס לכן לא מתרחשת בהן שבירה. בנקודות B, E ו-F מתרחשת החזרה פנימית מלאה, כי בנקודות אלה האור מתפשט בזכוכית לעבר האוויר, וכל זווית פגיעה שווה ל- 45° - זווית הגדולה מהזווית הקריטית שערכה 42° .

14. א+ב. המהלכים של שתי אלומות האור מוצגים באיור שלהלן.

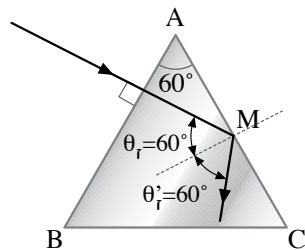


אור 2
אלומת

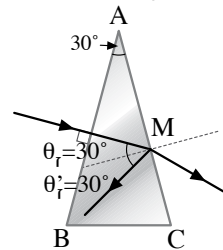
אור 1
אלומת

קביעת מהלך אלומת אור 1: בנקודות A ו-D זווית הפגיעה שווה לאפס לכן לא מתרחשת בהן שבירה. בנקודות B ו-C מתרחשת החזרה פנימית מלאה, כי האור מתפשט בזכוכית לעבר האוויר, וכל זווית פגיעה שווה ל- 45° .

15. א(1). במקרה שבו $\alpha = 30^\circ$ זווית הפגיעה בזכוכית היא $\theta_i = 30^\circ$ (ראה איור א); זווית זו קטנה מהזווית הקריטית (42°), לפיכך לא תתרחש החזרה מלאה, אלא חלק מהאור יעבור לאוויר ו"יתרחק מן האנך" (איור א).
א(2). במקרה שבו $\alpha = 60^\circ$ זווית הפגיעה בזכוכית היא $\theta_i = 60^\circ$ (ראה איור ב); זווית זו גדולה מהזווית הקריטית, לפיכך תתרחש החזרה מלאה (איור ב).



איור ב



איור א

ב. חישוב זווית הסטייה במקרה שבו $\alpha = 30^\circ$:

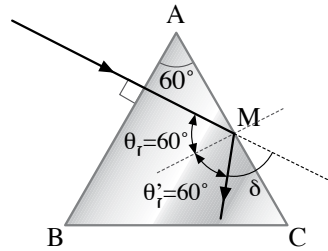
$$\frac{\sin \theta_N}{\sin \theta_i} = 1.5 \Rightarrow \frac{\sin \theta_N}{\sin 30^\circ} = 1.5 \Rightarrow \theta_N \approx 48.6^\circ$$

נחשב תחילה את זווית השבירה באוויר: $\theta_N \approx 48.6^\circ$

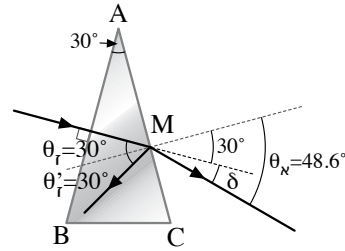
זווית הסטייה היא הזווית בין כיוון ההתפשטות המקורי של האור, לבין כיוון התפשטות האור אחרי הסטייה. נסמן זווית זו באות δ - איור ג.

נחשב את זווית הסטייה:

$$\delta = \theta_{\kappa} - \theta_{\tau} = 48.6^\circ - 30^\circ = 18.6^\circ$$



איור ד



איור ג

חישוב זווית הסטייה במקרה שבו $\alpha = 60^\circ$: במקרה זה סטיית האור אחרי הפגיעה בדופן AC אינה נגרמת כתוצאה משבירה, אלא כתוצאה מהחזרה (מלאה). זווית הסטייה δ היא (איור ד):

$$\delta = 180^\circ - (\theta_{\tau} - \theta_{\tau}') = 180^\circ - (60^\circ + 60^\circ) = 60^\circ$$

16. נחשב את זווית השבירה של הסגול:

$$\frac{\sin \theta_{\kappa}^{\text{סגול}}}{\sin \theta_{\tau}^{\text{סגול}}} = 1.532 \Rightarrow \frac{\sin 45^\circ}{\sin \theta_{\tau}^{\text{סגול}}} = 1.532 \Rightarrow \theta_{\tau}^{\text{סגול}} \approx 27.49^\circ$$

נחשב את זווית השבירה של האדום:

$$\frac{\sin \theta_{\kappa}^{\text{אדום}}}{\sin \theta_{\tau}^{\text{אדום}}} = 1.513 \Rightarrow \frac{\sin 45^\circ}{\sin \theta_{\tau}^{\text{אדום}}} = 1.513 \Rightarrow \theta_{\tau}^{\text{אדום}} \approx 27.86^\circ$$

לכן הזווית בין הגוון הסגול לגוון האדום היא: $27.86^\circ - 27.49^\circ = 0.37^\circ$

17. א. "ספקטרום רציף" הוא ספקטרום של אור המופיע כרצף של צבעים.

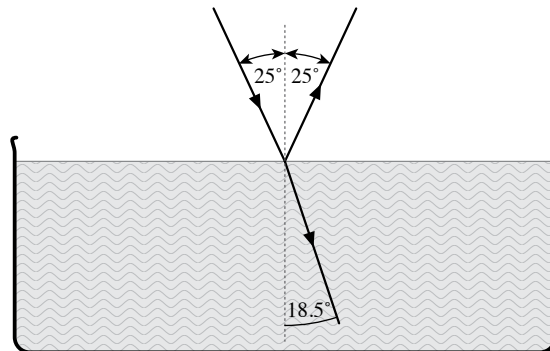
"ספקטרום קווי" הוא ספקטרום של אור המופיע כקווים בעלי גוונים שונים.

ב. מקור אור שהספקטרום שלו רציף הוא לדוגמה נורת להט. מקור אור שהספקטרום שלו קווי הוא למשל נורת נאון.

18. א. חישוב זווית השבירה במים:

$$\frac{\sin \theta_{\kappa}}{\sin \theta_{\tau}} = 1.33 \Rightarrow \frac{\sin 25^\circ}{\sin \theta_{\tau}} = 1.33 \Rightarrow \theta_{\tau} \approx 18.5^\circ$$

ב. באיור שלהלן מופיע סרטוט מקורב של הקרן הפוגעת בפני המים, של הקרן העוברת למים ושל הקרן המוחזרת מפני המים לאוויר.



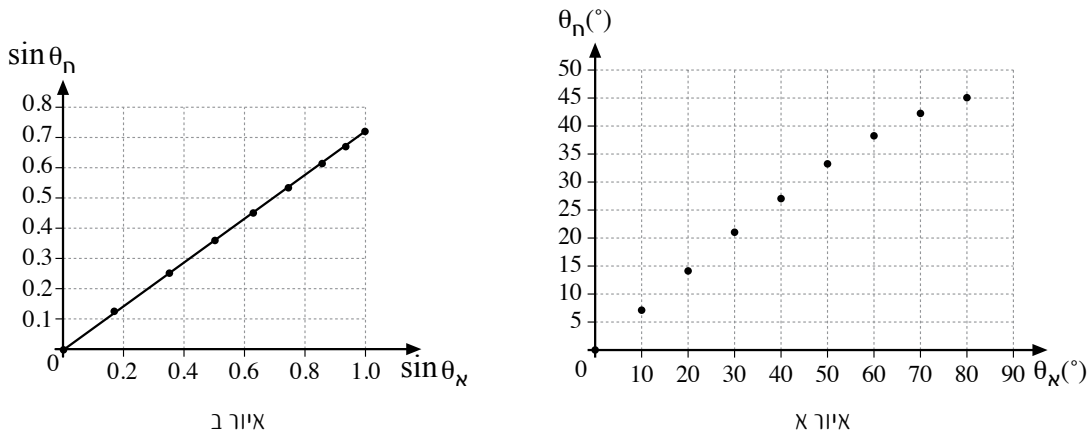
19. התשובה היא (ה), כי במעבר מאוויר למים האלומה "מתקרבת אל האנך".

20. חישוב זווית הגבול, θ_c , במעבר אור בין אוויר למים:

זווית הגבול היא הזווית שאליה שואפות זוויות השבירה של האור במים כאשר זוויות הפגיעה של האור באוויר שואפות ל- 90° . מכאן:

$$\frac{\sin \theta_n}{\sin \theta_m} = 1.33 \Rightarrow \frac{\sin 90^\circ}{\sin \theta_c} = 1.33 \Rightarrow \theta_c \approx 48.8^\circ$$

21. א. באיור א מוצג גרף של θ_n כפונקציה של θ_n .



ב. באיור ב מוצג גרף של $\sin \theta_n$ כפונקציה של $\sin \theta_n$.

ג. משוואת הגרף שמתואר באיור ב היא $\sin \theta_n = 0.716 \cdot \sin \theta_n$ (התקבל בגיליון אלקטרוני). מקדם השבירה

של החומר ביחס לאוויר הוא הערך ההופכי של שיפוע הגרף. הערך המתקבל הוא בקירוב 1.4.

ד. חישוב הזווית הקריטית במעבר אור מאוויר לחומר:

$$\frac{\sin \theta_n}{\sin \theta_n} = 1.4 \Rightarrow \frac{\sin 90^\circ}{\sin \theta_c} = 1.4 \Rightarrow \theta_c \approx 45.6^\circ$$

22. כאשר אור מופץ מנקודה מסוימת של קרקעית בריכה הוא מתפשט במים, וכאשר חלק ממנו עובר לאוויר הוא

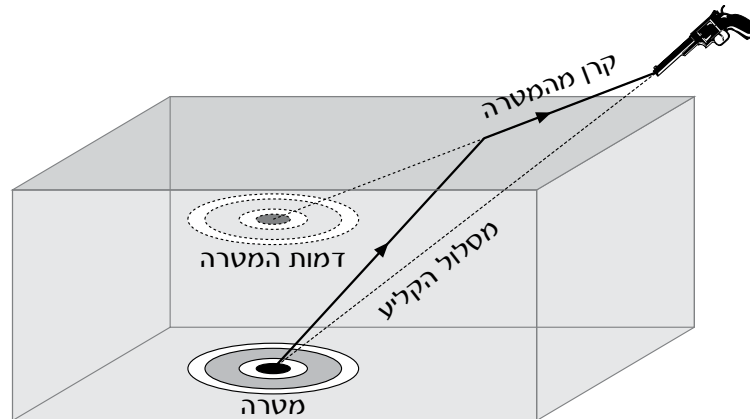
נשבר. כל קרן נשברת כך שהיא "מתרחקת מן האנך". **ההמשכים אחורנית של הקרניים הנשברות נחתכים**

בקירוב בנקודה אחת, הנמצאת מעל קרקעית הבריכה. לכן כאשר הקרניים העוברות לאוויר חודרות לעין -

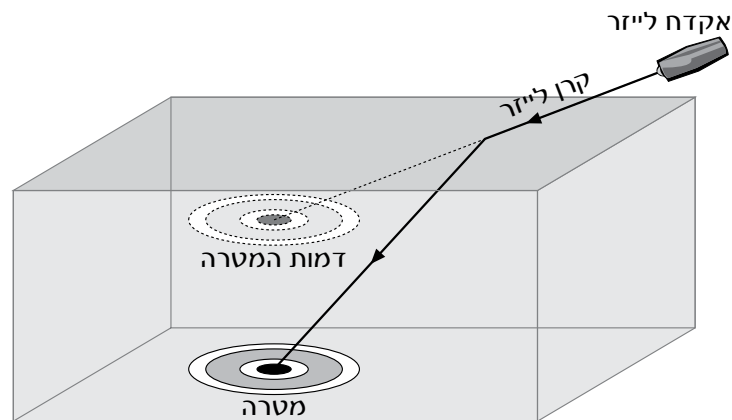
הנקודה שעל קרקעית הבריכה נראית בנקודת החיתוך של ההמשכים אחורנית של הקרניים הנשברות, הנמצאת

כאמור מעל קרקעית הבריכה.

23. א. יש לכוון את האקדח אל מתחת לדמות המטרה הניצפת, כפי שמוצג באיור א שלהלן.



איור א

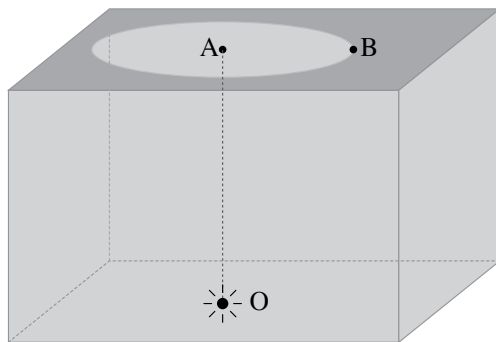


איור ב

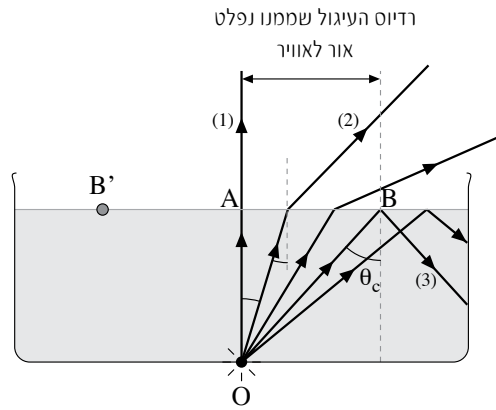
ב. יש לכוון את אקדח הלייזר לעבר דמות המטרה הניצפת, כפי שמתואר באיור ב לעיל.

24. א. נתבונן באיור א שלהלן המתאר חתך אנכי של הבריקה ואת מקור האור. קרן הנפלטת ממקור האור כלפי מעלה (קרן (1) באיור א להלן), ופוגעת בפני המים בזווית פגיעה אפס - עוברת לאוויר ללא שבירה. קרן (2) שיוצרת זווית מסוימת עם קרן (1) - פוגעת בפני המים בזווית פגיעה השווה לזווית שבין קרן (2) לקרן (1), והקרן העוברת לאוויר נשברת ו"מתרחקת מן האנך". קרניים נוספות, שזוויות הפגיעה שלהן בפני המים הולכות וגדלות - זוויות השבירה באוויר גם הן הולכות וגדלות. כאשר זווית הפגיעה בפני המים מגיעה לזווית הקריטית (קרן (3) באיור א) או כאשר היא גדולה מהזווית הקריטית - האור מוחזר במלואו לתוך המים, ואינו עובר לאוויר, כמתואר באיור א להלן. כלומר אור אינו יכול לעבור לאוויר כאשר הוא פוגע בפני המים בזווית פגיעה גדולה מדי.

אור עובר, אם כן, לאוויר בכל הנקודות של הקטע AB. אור עובר לאוויר גם מקטע AB' הנמצא משמאל לנקודה A, אשר שווה באורכו ל-AB. זו התמונה המתקבלת כאשר מתבוננים בחתך אנכי של הבריקה. איור ב מתאר את המצב בשלושה ממדים; אור עובר לאוויר מעיגול שעל פני המים. מרכז העיגול הוא הנקודה A ורדיוסו שווה ל-AB.



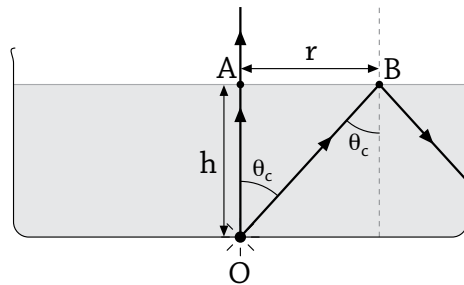
איור ב



איור א

ב. חישוב רדיוס העיגול, בהנחה שהתלמידים אינם מכירים את הפונקציה $\tan x$ אלא רק את הפונקציה $\sin x$:

הזווית הקריטית במעבר אור בין אוויר למים היא בת 48.8° (ראה תשובה לתרגיל 20). באיור ג להלן סרטטנו שתי קרניים הנפלטות ממקור האור O: האחת פוגעת בפני המים בזווית פגיעה 0° , והאחרת פוגעת בפני המים בזווית פגיעה השווה לזווית הקריטית - 48.8° ; קרן זו מוחזרת בהחזרה מלאה למים.



איור ג

נתבונן במשולש OAB באיור ג: את גובה המים סמנו באות h , ואת רדיוס המעגל באות r .

על-פי משפט פיתגורס: $OB = \sqrt{OA^2 + AB^2} = \sqrt{h^2 + r^2} = \sqrt{1^2 + r^2}$

על-פי הגדרת הפונקציה סינוס במשולש ישר זווית: $\sin \angle AOB = \frac{AB}{OB} = \frac{r}{\sqrt{1+r^2}}$ (1)

אבל: $\angle AOB = 48.8^\circ$

נציב זאת בקשר (1) לעיל: $\sin 48.8^\circ = \frac{r}{\sqrt{1+r^2}} \Rightarrow 0.75 = \frac{r}{\sqrt{1+r^2}}$

פתרון המשוואה האחרונה: $r = 1.14 \text{ m}$

כלומר רדיוס העיגול שממנו עובר אור מהמים לאוויר הוא 1.14 מטר.

חישוב רדיוס העיגול, בהנחה שהתלמידים מכירים את הפונקציה $\tan x$:

נתבונן במשולש OAB באיור ג: $\tan \angle AOB = \frac{AB}{AO} = \frac{r}{h} = \frac{r}{1} = r$

$$\tan 48.8^\circ = r \Rightarrow r = 1.14 \text{ m}$$

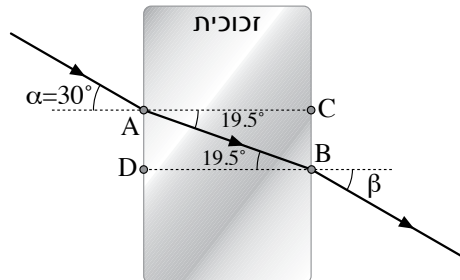
לכן:

$$\frac{\sin \theta_{\alpha}}{\sin \theta_{\gamma}} = 1.5 \Rightarrow \frac{\sin 30^\circ}{\sin \theta_{\gamma}} = 1.5 \Rightarrow \theta_{\gamma} \approx 19.5^\circ \quad \text{א(1). 25. נחשב את זווית השבירה בזכוכית:}$$

כלומר: $\angle CAB = 19.5^\circ$ (ראה איור להלן).

אבל: $\angle CAB = \angle DBA$ (זוויות מתחלפות בין ישרים מקבילים).

לכן האלומה פוגעת בדופן הנגדית של המנסרה בזווית $\angle DBA = 19.5^\circ$.



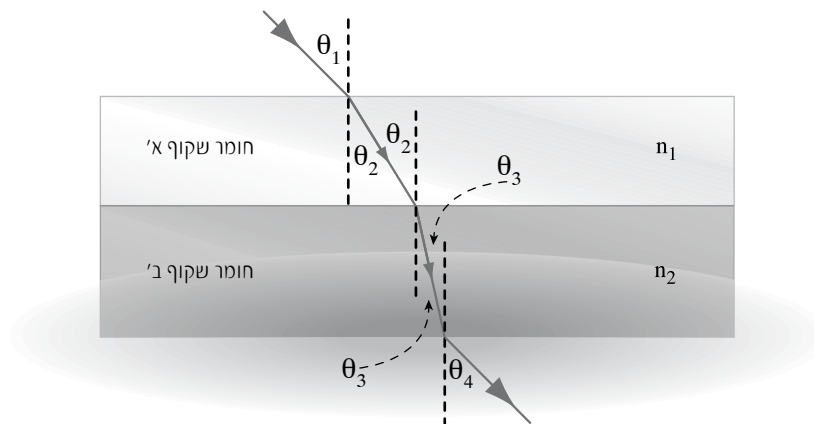
א(2). האלומה עוברת לאוויר מהדופן הנגדית (נקודה B באיור לעיל) בזווית $\beta = 30^\circ$.

הסבר: בנקודה A (איור לעיל) זווית הפגיעה באוויר שווה ל- 30° , וזווית השבירה בזכוכית היא 19.5° . כיוון שמהלך קרן פוגעת וקרן נשברת הוא הפוך - אילו האלומה היתה מתפשטת בזכוכית ופוגעת בנקודה A בזווית פגיעה בת 19.5° - היא היתה עוברת לאוויר בזווית שבירה בת 30° ; אבל זה בדיוק המצב בנקודה B: האלומה המתפשטת בזכוכית פוגעת במשטח גבול עם האוויר (בנקודה B) בזווית פגיעה בת 19.5° , לכן היא תעבור לאוויר בזווית שבירה $\beta = 30^\circ$.

ב. לא יתכן שבדופן הנגדית תתרחש החזרה מלאה.

הסבר (ראה איור לעיל): $90^\circ < \alpha < \theta_c$ לכן $\angle CAB < \theta_c$, אולם $\angle CAB = \angle DBA$ לכן $\angle ABD < \theta_c$, לכן לא תתרחש החזרה מלאה בנקודה B, כי אחד משני התנאים להחזרה מלאה (ראה תשובה לשאלה 12א) אינו מתקיים.

26. באיור שלפניך מסומנות זוויות הפגיעה והשבירה השונות.



חוק סנל לגבי מעבר האור מהאוויר לחומר שקוף א: (א) $\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_1}{1}$

חוק סנל לגבי מעבר האור מחומר שקוף א לחומר שקוף ב: (ב) $\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_3} = \frac{n_2}{n_1}$

חוק סנל לגבי מעבר האור מחומר שקוף ב לאוויר: (ג) $\frac{\sin \theta_3}{\sin \theta_4} = \frac{1}{n_2}$

מהכפלת משוואות (א) ו-(ב) זו בזו נקבל: (ד) $\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_3} = n_2$

מהכפלת משוואות (ג) ו-(ד) זו בזו נקבל: $\sin \theta_1 = \sin \theta_4$

מכאן: $\theta_1 = \theta_4$

משוויון זה ומהעובדה שהפאה העליונה של המנסרה העליונה מקבילה לפאה התחתונה של המנסרה התחתונה נובע שהאלומה היוצאת לאוויר מהמנסרה התחתונה מקבילה לאלומה הפוגעת במנסרה העליונה.

27. אור המתפשט לאורך זרם מים הפורץ מן הבקבוק מתנהג כמו אור המתפשט בסיב זכוכית.

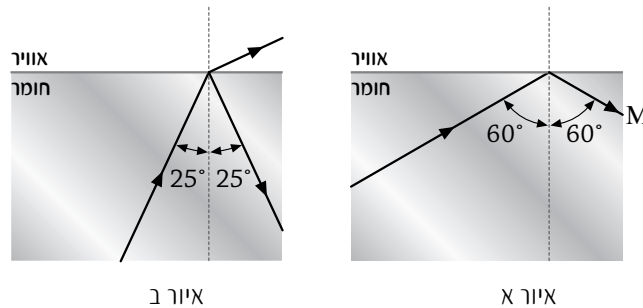
28. התשובה הנכונה - אפשרות (2).

29. א. זווית הגבול של חומר עבור מעבר אור בין אוויר לחומר, היא זווית השבירה בחומר כאשר זווית הפגיעה של האור באוויר שווה ל- 90° (או ליתר דיוק כאשר היא שואפת ל- 90°).

$$\frac{\sin \theta_a}{\sin \theta_n} = 2 \Rightarrow \frac{\sin 90^\circ}{\sin \theta_c} = 2 \Rightarrow \theta_c \approx 30^\circ$$

מכאן:

ב. המשך מהלכה של כל קרן מוצג באיורים א ו-ב להלן.



30. א. "החזרה פנימית מלאה" היא תופעה שבה אור מתפשט בתווך שקוף, פוגע במשטח גבול עם תווך שקוף אחר, ומוחזר במלואו ממשטח הגבול לתווך השקוף הראשון.

ב. שני התנאים הנדרשים להחזרה פנימית מלאה:

(1) האור מתפשט בתווך שמקדם השבירה שלו ביחס לאוויר גדול לעבר תווך שקוף שמקדם השבירה שלו ביחס לאוויר קטן יותר (כלומר מתווך צפוף יותר מבחינה אופטית לעבר תווך דליל יותר מבחינה אופטית).

(2) זווית הפגיעה במשטח הגבול גדולה מהזווית הקריטית במעבר האור בין שני התווכים.

31. מהלך אור שאינו אפשרי מסורטט באיור 3.

32. איור 3 מתאר נכון את מהלך האור; מתקיימים שני התנאים להחזרה מלאה:

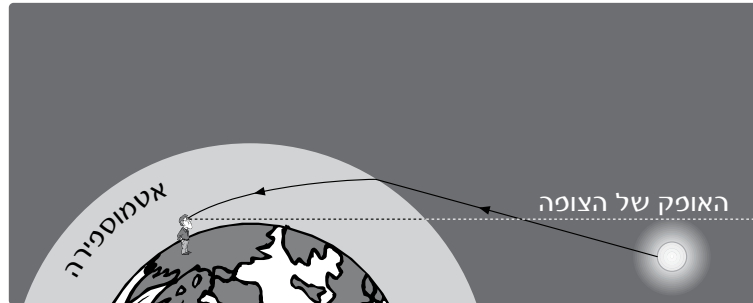
(1) האור נע בתווך צפוף מבחינה אופטית לתווך דליל מבחינה אופטית (ממים לאוויר).

(2) זווית הפגיעה בתווך הצפוף (60°) גדולה מהזווית הקריטית (48.8°).

33. התופעה מוסברת בספר התלמיד בעמוד 133.

34. אור השמש המתפשט באטמוספירה משנה בריצפות את כיוון התפשטותו בגלל שינוי בצפיפות האופטית של השכבות השונות של האטמוספירה. כאשר השמש נמצאת מתחת לאופק שלנו אזי אור השמש הפוגע בחלק האטמוספירה שנמצא מעל האופק משנה כאמור את כיוון התפשטותו, ועשוי להגיע לעיניים שלנו, כמתואר באיור שלהלן.

נוח להסביר זאת אם מחלקים את האטמוספירה לשכבות בעלות צפיפויות אופטיות משתנות, בדומה לאיור 39 בעמוד 134 בספר "קרינה וחומר כרך א".



35. יש לכונן את האלומה ישירות לכיוון שבו החללית נראית.

הסבר: אור שהופץ מן החללית לעברנו שינה אמנם את כיוון התפשטותו בעת מהלכו באטמוספירה, אולם מהלך האור בתופעת השבירה הוא הפיך, לכן אלומת ליזר שתשוגר לכיוון שבו החללית נראית תתפשט לאורך מסלול האור המגיע מן החללית אלינו (רק בכיוון מנוגד), ותפגע בחללית.

36. צורת הקשת היא חתך של מעטפת חרוט שקודקודו בעין של הצופה, וצירו הוא הקו המחבר את השמש (המאירה את גב הצופה) עם העין של הצופה. לכל אורך הקשת צריכות להימצא טיפות מים שמחזירות את אור השמש לעין של הצופה.

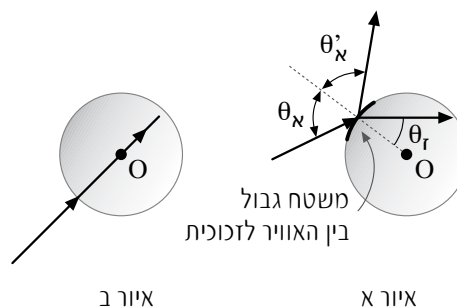
כיוון שבדרך כלל חתך מעטפת החרוט נקטע על ידי הקרקע, ומתחת לפני הקרקע כמובן שלא נמצאות טיפות גשם, רוב הקשתות בענן אינן מהוות מעגל שלם, אלא רק קשתות של מעגל.

37. מטיפת גשם מוחזר ספקטרום הצבעים כולו. (לצופה מסוים מגיע מטיפה מסוימת רק צבע אחד).

38. לצופה המתבונן בקשת, האור המגיע ברגע מסוים מטיפה מסוימת הוא בצבע אחד.

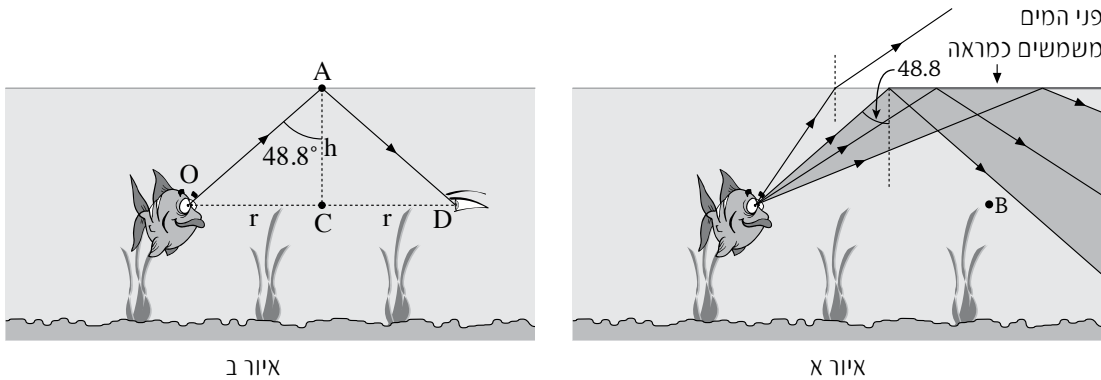
39. הקשת המשנית מתקבלת לאחר שתי החזרות חלקיות בטיפה, ואילו הקשת הראשית מתקבלת לאחר החזרה חלקית אחת בטיפה.

40. א(1)+א(2). באיור א שלהלן מסומן משטח הגבול בין האוויר לבין גוף זכוכית, האנך, ומסומנת זווית הפגיעה θ_A .



ב.ג. אלומת האור נשברת כי זווית הפגיעה שונה מאפס. באיור א לעיל מוצגות הקרן העוברת והקרן המוחזרת, ומסומנות זווית השבירה ב- θ_i , וזווית ההחזרה ב- θ_r .
ד. באיור ב לעיל מוצג מהלך האור: זווית הפגיעה שווה לאפס, לכן לא מתרחשת שבירה.

41. א. הדג משתקף בפני המים כי אור הפוגע בפני המים בזווית גדולה מהזווית הקריטית (במילים אחרות מחוץ לעיגול שרדיוסו חושב בשאלה 24) מוחזר לתוך המים בהחזרה מלאה; במילים אחרות **פני המים שמהם אור מוחזר במלואו למים משמשים כמראה** (שהצד המחזיר שלה הוא פני המים הפונים לתוך המים) - איור א להלן.



ב. כאשר עיני הצוללן קרובות מדי לדג, לדוגמא נמצאות בנקודה B המסומנת באיור א לעיל, האור המוחזר בהחזרה מלאה מפני המים אינו מגיע לעיניו, לכן הצוללן אינו רואה את השתקפות הדג (למרות שהוא יכול לראות את הדג באופן ישיר).
הערה: גם כאשר עיני הצוללן נמצאות ב-B הוא יכול לראות השתקפות חלשה של הדג, באמצעות אור שמוחזר באופן חלקי מפני המים.

ג. המרחק המזערי בין עיני הצוללן לבין הדג מתקבל כאשר קרן המופצת מהדג (שנתייחס אליו כאל גוף נקודתי) ופוגעת בפני המים בזווית הקריטית, מוחזרת מפני המים לעיניו של הצוללן, כמתואר באיור ב. נחשב את המרחק בין עיני הצוללן (נקודה D המסומנת באיור ב לעיל) לדג (נקודה O באיור ב). נשתמש בפתרון תרגיל זה בפונקציה טנגנס. אם התלמידים אינם מכירים פונקציה זו, אפשר לפתור בעזרת הפונקציה סינוס, בדומה לפתרון תרגיל 24.

$$\tan \angle OAC = \frac{OC}{AC} = \frac{r}{h} \Rightarrow \tan 48.8^\circ = \frac{r}{2} \Rightarrow r = 2.28 \text{ m}$$

$$\text{לכן המרחק המזערי בין הדג לבין עיני הצוללן: } OD = 2r = 2 \cdot 2.28 = 4.56 \text{ m}$$

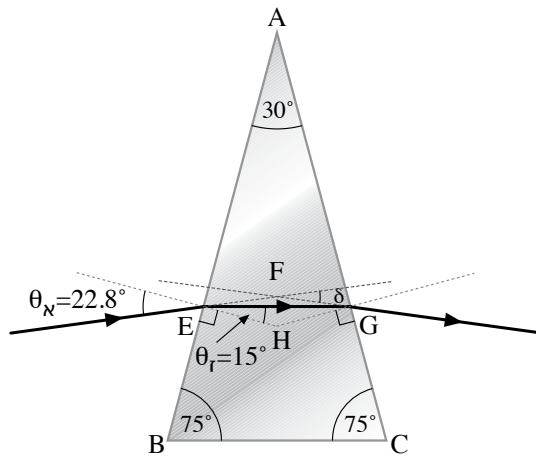
הצוללן יראה את השתקפות הדג אם מרחקו מהדג יהיה גדול מ-4.56 מטרים או שווה למרחק זה.

42. מהלך אור לפני שהגליצרין חדר לצינורית הטפי: אור שהתפשט בגליצרין פגע בצינורית, ופגע במשטח הגבול בין הזכוכית של הצינורית לבין האוויר שבתוך הצינורית - חלקו עבר לאוויר (תוך כדי שבירה) וחלקו הוחזר, הגיע לעין שלנו, וייצר על רשתית העין שלנו דמות של הצינורית.

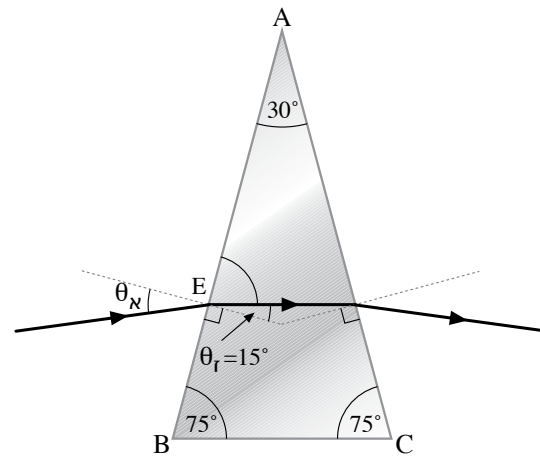
לאחר שחרור גומיית הטפי וחדירת הגליצרין לצינורית, האור שחדר למרחב שבתוך הצינורית (היכן שקודם לכן היה אוויר) בקירוב מצויין אינו נשבר בעוברו מהזכוכית לגליצרין כי **מקדם השבירה של הזכוכית שווה בקירוב מצוין לזה של הגליצרין** - מבחינה אופטית האור מתפשט כאילו באותו תווך. לכן אור גם לא הוחזר ממשטח הגבול. העדר אור מוחזר מונע את היווצרותה של דמות הצינורית על רשתית העין שלנו.

43. א. כל אחת מזוויות הבסיס של המנסרה שווה ל- 75° . בעזרת חישובי זוויות מתקבל כי זווית השבירה בזכוכית, θ_r , שווה ל- 15° (ראה איור א להלן). נחשב את זווית הפגיעה באוויר:

$$\frac{\sin \theta_n}{\sin \theta_r} = 1.5 \Rightarrow \frac{\sin \theta_n}{\sin 15^\circ} = 1.5 \Rightarrow \theta_n \approx 22.8^\circ$$



איור א



איור ב

ב. באיור ב לעיל מסומנת זווית הסטייה δ . על-סמך המשפט שזווית חיצונית במשולש שווה לסכום של שתי

הזוויות הפנימיות במשולש שאינן צמודות לה נובע כי: $\delta = \angle FEG + \angle FGE$ (1)

יתר על כן: $\angle FEG = \angle FEH - \theta_r$ (2)

אבל: $\angle FEH = \theta_n = 22.8^\circ$ (זוויות קודקודיות) ו- $\theta_r = 15^\circ$

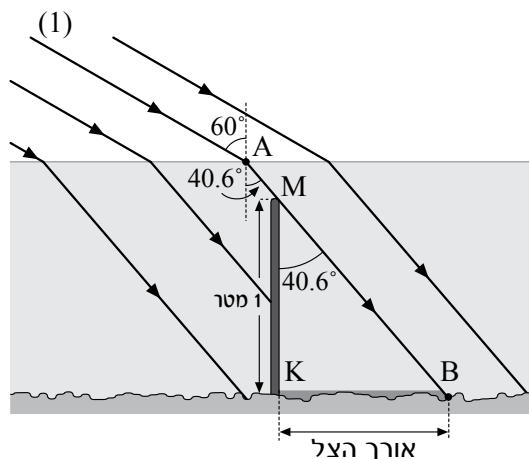
נציב זאת בקשר (2) לעיל ונקבל: $\angle FEG = 22.8^\circ - 15^\circ = 7.8^\circ$

מטעמי סימטריה: $\angle FGE = 7.8^\circ$

נציב זאת בקשר (1) לעיל ונקבל: $\delta = \angle FEG + \angle FGE = 7.8^\circ + 7.8^\circ = 15.6^\circ$

זווית סטיית האור כתוצאה משבירותיו במנסרה שווה ל- 15.6° .

44. באיור שלהלן סרטטנו את המערכת. אחת מקרני השמש, המסומנת באיור כ- (1), פוגעת בפני המים בנקודה המסומנת באות A, נשברת, ועוברת סמוך מאוד לקצה M של המקל. קרן זו פוגעת בקרקעית הים בנקודה המסומנת באות B. אורך הצל של המקל הוא KB.



נסביר זאת: קרני שמש הפוגעות בפני המים משמאל לנקודה A נשברות בפני המים ופוגעות במקל או בקרקעית הים משמאל לנקודה K. קרני שמש הפוגעות מימין לנקודה A - פוגעות בקרקעית הים מימין לנקודה B. אין קרן שמש המגיעה לתחום KB, לכן התחום KB הוא הצל של המקל.

נחשב את אורך הצל KB של המקל: זווית הפגיעה של קרן (1) (ושל כל שאר הקרניים) בפני המים היא 60° . נחשב את זווית השבירה במים:

$$\frac{\sin \theta_{\kappa}}{\sin \theta_{\rho}} = 1.33 \Rightarrow \frac{\sin 60^\circ}{\sin \theta_{\rho}} = 1.33 \Rightarrow \theta_{\rho} \approx 40.6^\circ$$

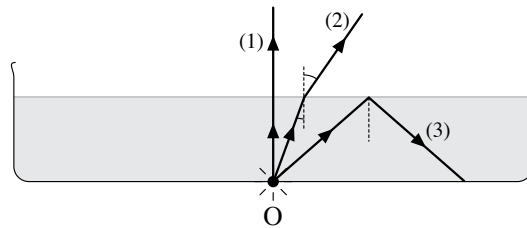
כלומר זווית השבירה במים היא בת 40.6° . לכן $\angle BMK = 40.6^\circ$ (זוויות מתאימות בין ישרים מקבילים).

$$\tan \angle BMK = \frac{KB}{MK} \Rightarrow \tan 40.6^\circ = \frac{KB}{1} \Rightarrow KB = 0.86 \text{ m}$$

כלומר אורך הצל הוא 0.86 מטר או 86 ס"מ.

הערה: אם התלמידים אינם מכירים את הפונקציה $\tan x$ - אפשר לבטא, באמצעות משפט פיתגורס, את אורך הקטע MB, ולאחר מכן לכתוב ביטוי ל- $\sin \angle BMK$.

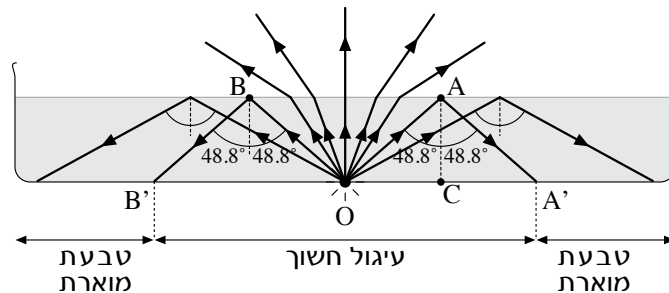
45. א. באיור א שלהן מתוארות שלוש קרניים המקיימות את הדרישות המפורטות בסעיף א של השאלה.



איור א

ב. באיור ב שלהלן מתוארות קרניים הנפלטות ממקור האור, ופוגעות בפני המים. קרניים הפוגעות בפני המים בנקודות A ו-B - פוגעות בזווית הקריטית, מוחזרות בהחזרה מלאה למים, ופוגעות בקרקעית הכוס בנקודות A' ו-B'. קרניים שפוגעות מימין לנקודה A ומשמאל לנקודה B - פוגעות בפני המים בזווית פגיעה גדולה מהזווית הקריטית, לכן גם הן מוחזרות בהחזרה מלאה, ופוגעות בקרקעית הכוס. לכן מימין לנקודה A' ומשמאל לנקודה B' קרקעית הכוס מוארת. לפיכך, מכל האזור A'B' לא מוחזרות קרניים אל עיני הצופה ואזור זה נראה לו חשוך. מהאזור החיצוני - ימינה מ-A' ושמאלה מ-B' יש קרניים שמוחזרות אל עיניו של הצופה, ואזור זה נראה לו מואר.

בתמונה המרחבית מדובר בטבעת מוארת, שרדיוסה הפנימי שווה ל-OA', כמתואר באיור ב שבספר לתלמיד.



איור ב

ג. קוטרו של העיגול הכהה יגדל, כי אז מקום הנקודה A' שבאיור ב יזוז ימינה, ומקום הנקודה B' שבאיור ב יזוז שמאלה, למרות שהקרניים הפוגעות בזווית הקריטית יישארו אותן קרניים.

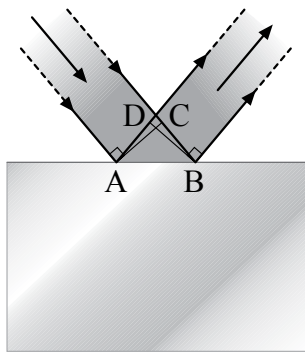
ד. באיור ב לעיל, אורך הקטע OA' שווה לרדיוס העיגול הכהה (1.5 ס"מ). קל לראות כי אורך הקטע OC (ראה איור ב) שווה למחצית הרדיוס, כלומר: $\theta_c = 0.75 \text{ m}$.

$$\tan \angle OAC = \frac{OC}{AC} \Rightarrow \tan \theta_c = \frac{0.75}{1} \Rightarrow \theta_c = 36.9^\circ$$

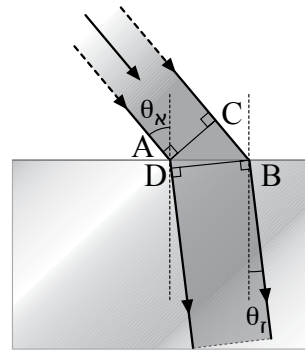
נתבונן במשולש OAC שבאיור ב: עתה נחשב את מקדם השבירה של הנוזל ביחס לאוויר:

$$\sin \theta_c = \frac{1}{n} \Rightarrow \sin 36.9^\circ = \frac{1}{n} \Rightarrow n = 1.67$$

46. א. האלומה העוברת לגוף הזכוכית רחבה מהאלומה הפוגעת בו. כדי לראות זאת נתבונן באיור א שלהלן שבו מסורטטות האלומה הפוגעת בגוף הזכוכית (שרוחבה הוא AC), והאלומה העוברת אליו (שרוחבה הוא BD).



איור א



איור ב

בנקודות A ו-B העלינו אנכים למשטח הגבול בין האוויר לזכוכית. זווית הפגיעה באוויר סומנה ב- θ_i , וזווית השבירה בזכוכית סומנה ב- θ_r .

נוכל לראות כי:

$$(1) \quad \angle CAB = \theta_r$$

$$(2) \quad \angle ABD = \theta_i$$

וכי:

$$(3) \quad \cos \angle CAB = \frac{AC}{AB}$$

במשולש ישר-הזווית ACB:

$$(4) \quad \cos \angle ABD = \frac{BD}{AB}$$

במשולש ישר-הזווית ABD:

$$(5) \quad \frac{\cos \angle CAB}{\cos \angle ABD} = \frac{AC}{BD}$$

מחילוק משוואות (3) ו-(4) נקבל:

$$(6) \quad \frac{\cos \theta_r}{\cos \theta_i} = \frac{AC}{BD}$$

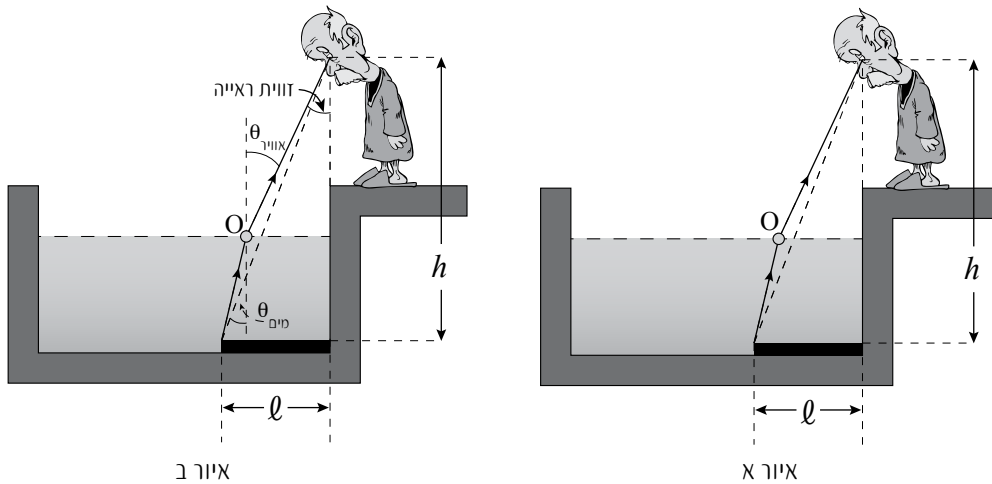
נציב את קשרים (1) ו-(2) בקשר (5) ונקבל:

$$\text{אבל } \theta_r > \theta_i \text{ לכן } \cos \theta_r < \cos \theta_i \text{ ולכן } AC < BD.$$

ב. האלומה המוחזרת מגוף הזכוכית שווה ברוחבה לאלומה הפוגעת בו. כדי לראות זאת נתבונן באיור ב שלעיל שבו מסורטטת האלומה הפוגעת בגוף הזכוכית, והאלומה המוחזרת ממנו. AC הוא רוחב האלומה הפוגעת ו-BD רוחב האלומה המוחזרת.

מחוק ההחזרה נובע כי $\angle CBA = \angle DAB$ (זוויות המשלימות את זוויות הפגיעה ל- 90°) לכן $\triangle ACB \cong \triangle BDA$ (ז.ז.ז.) לכן $AC = BD$.

47. א. (1) איור א הוא האיור המתאים:



איור ב

איור א

(2) הסרגל נראה ארוך יותר, כי זווית הראייה שלו גדולה יותר כשיש מים בבריכה.
 ב. (1) זווית השבירה של הקרן לאחר שהיא יוצאת מהמים לאוויר היא $\theta_{\text{אוויר}} = 9.5^\circ$, כפי שאפשר לראות מאיור ב.

נחשב, על פי חוק סנל, את זווית הפגיעה, $\theta_{\text{מים}}$, של הקרן בפני המים:

$$\frac{\sin \theta_{\text{אוויר}}}{\sin \theta_{\text{חומר}}} = n \Rightarrow \frac{\sin 9.5^\circ}{\sin \theta_{\text{מים}}} = 1.33 \Rightarrow \theta_{\text{מים}} = 7.13^\circ$$

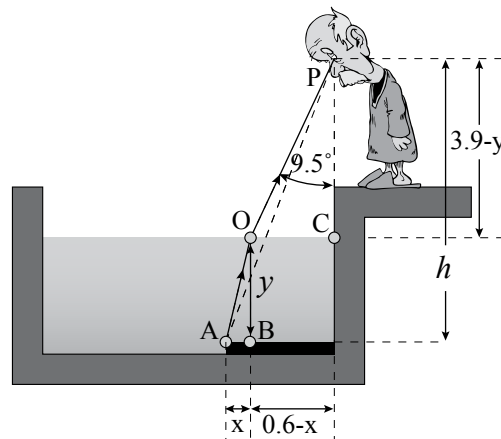
כלומר: זווית הפגיעה במים היא $\theta_{\text{מים}} = 7.13^\circ$, וזווית השבירה באוויר היא $\theta_{\text{אוויר}} = 9.5^\circ$.

(2) על פי משולש OAB (איור ג):

$$(א) \quad \frac{x}{y} = \tan 7.13^\circ$$

$$(ב) \quad \frac{0.6 - x}{3.9 - y} = \tan 9.5^\circ$$

על פי משולש POC:



איור ג

את הביטוי ל- x המתקבל ממשוואה (א) מציבים במשוואה (ב), מתקבלת משוואה בנעלם אחד, y , שפתרונה: $y = 1.22 \text{ m}$.

48. א. במעבר אור בין אוויר וחומר, הזווית הקריטית היא זווית השבירה בחומר כאשר זווית הפגיעה באוויר היא בת 90° . מכאן, על פי חוק סנל:

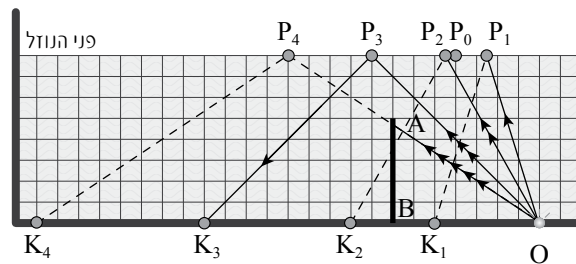
$$\frac{\sin \theta_{\text{אוויר}}}{\sin \theta_{\text{חומר}}} = n \Rightarrow \frac{\sin 90^\circ}{\sin \theta_c} = n \Rightarrow \sin \theta_c = \frac{1}{n}$$

$$\sin \theta_c = \frac{1}{2.236} \Rightarrow \theta_c = 26.5659^\circ$$

$$\tan \theta_c = 0.5^\circ$$

מכאן:

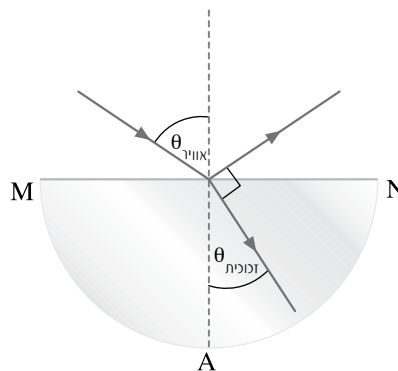
ב. הנקודה P_0 מסומנת באיור שלפניך.



אפשר לראות מהאיור כי טנגנס הזווית הוא 0.5 (הזווית הנדונה היא זווית במשולש שבו אורך אחד הניצבים הוא 8 משבצות, ואורכו של הניצב האחר הוא 4 משבצות).

ג. (1) לא קיימת קרן כזו, כי קרן שהיתה פוגעת בפני המים ומוחזרת לנקודה K_1 היתה צריכה לפגוע בפני המים בנקודה P_1 (ראה איור לעיל), אך P_1 נמצאת מימין ל- P_0 , לכן זווית הפגיעה היתה קטנה מהזווית הקריטית, לכן קרן שתוחזר ל- K_1 תהיה קרן שהוחזרה חלקית מפני המים, ולא קרן שהוחזרה בהחזרה מלאה.
(2) לגבי K_2 : קרן שיוצאת מ- O ומוחזרת למים לפי חוקי ההחזרה צריכה לפגוע במים בנקודה P_2 (ראה איור לעיל) כדי להגיע ל- K_2 , אולם הקרן המוחזרת תפגע במחיצה AB האטומה לאור, לכן היא לא תגיע ל- K_2 .
לגבי K_3 : קרן שיוצאת מ- O ומוחזרת למים לפי חוקי ההחזרה צריכה לפגוע במים בנקודה P_3 (ראה איור לעיל) כדי להגיע ל- K_3 . מסלול כזה אכן אפשרי.
לגבי K_4 : קרן שיוצאת מ- O ומוחזרת למים לפי חוקי ההחזרה צריכה לפגוע במים בנקודה P_4 (ראה איור לעיל) כדי להגיע ל- K_4 , אולם קרן הנעה לעבר הנקודה P_4 תפגע במחיצה AB האטומה לאור.

49. נסרטט את תרשים הבעיה:



על פי חוק סנל: (א) $\frac{\sin \theta_{\text{אוויר}}}{\sin \theta_{\text{זכוכית}}} = 1.5$

על פי התרשים, הסכום של זוויות ההחזרה והשבירה שווה ל- 90° . זווית ההחזרה שווה לזווית הפגיעה באוויר.

מכאן: (ב) $\theta_{\text{אוויר}} + \theta_{\text{זכוכית}} = 90^\circ$

נציב את הביטוי המתקבל עבור $\theta_{\text{זכוכית}}$ מקשר (ב) לעיל בקשר (א) לעיל ונקבל:

(ג) $\frac{\sin \theta_{\text{אוויר}}}{\sin (90^\circ - \theta_{\text{אוויר}})} = 1.5$

אבל $\sin (90^\circ - \theta_{\text{אוויר}}) = \cos \theta_{\text{אוויר}}$. נציב זאת בקשר (ג) לעיל:

$$\frac{\sin \theta_{\text{אוויר}}}{\cos \theta_{\text{אוויר}}} = 1.5$$

לכן: $\tan \theta_{\text{אוויר}} = 1.5$

ומכאן: $\theta_{\text{אוויר}} = 56.31^\circ$

50. א. כדי לקבוע מאיזה חלק של פני המים חודר אור לעין של הדג, אפשר להסתמך על כך שבתופעת השבירה

מהלך האור הוא הפיך, לכן יש לברר מאיזה חלק של פני המים עובר לאוויר אור שהופץ מעינו של הדג. שאלה

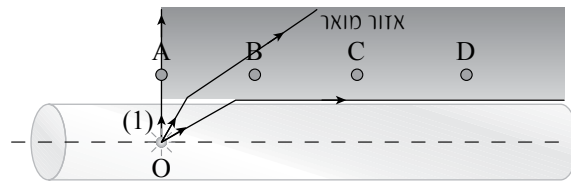
זו נדונה כבר בתרגילים 24, 41 ו-45.

ב. זווית הראש של החרוט שווה לכפליים הזווית הקריטית במעבר אור בין אוויר למים, שהיא שווה ל- 48.8° . לכן

$$\text{זווית הראש: } 2 \cdot 48.8^\circ = 96.7^\circ$$

51. מהמקור O נפלט אור לכל הכיוונים. קרן שמתפשטת כלפי מעלה, פוגעת בשפת החומר השקוף בזווית פגיעה 0,

ועוברת לאוויר ללא שבירה - קרן (1) באיור.

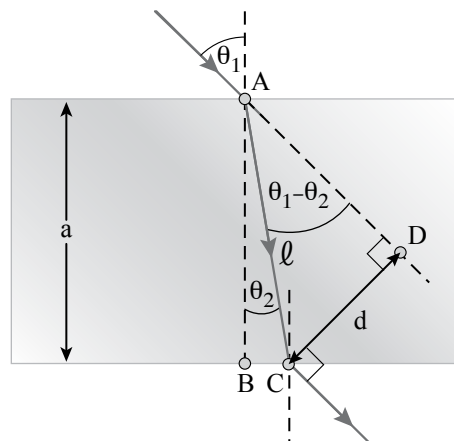


ככל שקרן פוגעת בשפת החומר השקוף יותר ויותר ימינה, זווית הפגיעה הולכת וגדלה ברציפות, וכאשר היא

גדלה עד הזווית הקריטית - זוויות השבירה באוויר הולכות וגדלות ברציפות מאפס עד 90° , לכן הן מאירות את כל

המרחב שמעל המוט הגלילי, כמתואר באיור.

52. לפניך תרשים הבעיה:



(א) $\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = n$ חוק סנל עבור מעבר האור למנסרה:

(ב) $\frac{a}{\ell} = \cos \theta_2$ נסמן: $AC = \ell$. על פי משולש ABC:

(ג) $\frac{d}{\ell} = \sin (\theta_1 - \theta_2)$ על פי משולש ACD:

נפתור את מערכת משוואות (א), (ב) ו-(ג). מחילוק משוואה (ג) במשוואה (ב):

(ד) $\frac{d \cos \theta_2}{a} = \sin (\theta_1 - \theta_2)$

אחרי ביצוע פעולות אלגבריות פשוטות עם משוואה (ד), ושימוש בזהות הטריגונומטרית המופיעה בגוף השאלה נקבל:

$$d = a \frac{\sin \theta_1 \cos \theta_2 - \cos \theta_1 \sin \theta_2}{\cos \theta_2}$$

$$d = a \left[\sin \theta_1 - \cos \theta_1 \frac{\sin \theta_2}{\cos \theta_2} \right]$$

$$d = a \left[\sin \theta_1 - \cos \theta_1 \frac{\sin \theta_1 / n}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_2}} \right]$$

$$d = a \left[\sin \theta_1 - \cos \theta_1 \frac{\sin \theta_1}{n \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_1}{n^2}}} \right] \quad \text{בעזרת חוק סנל:}$$

$$d = a \left[\sin \theta_1 - \sqrt{1 - \sin^2 \theta_1} \frac{\sin \theta_1}{n \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_1}} \right]$$

$$d = a \sin \theta_1 \left[1 - \frac{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_1}}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_1}} \right]$$

(א) $\frac{\sin \theta_{\text{אוויר}}}{\sin \theta_{\text{זכוכית}}} = 1.5$ 53. על פי חוק סנל:

כאשר זווית x קטנה ומבוטאת ברדיאנים, הסינוס שלה שווה בקירוב לזווית (הקירוב טוב יותר ככל שהזווית קטנה):

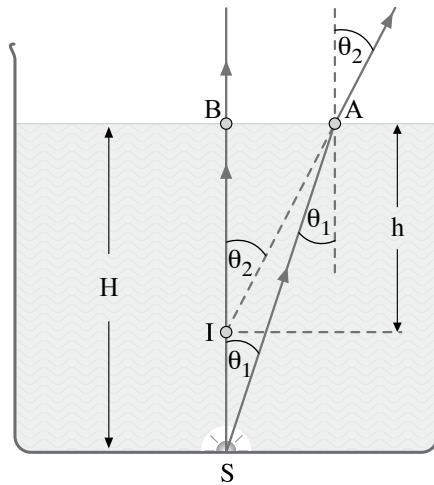
$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = 1$$

(ב) $\sin x \approx x$ נוכל לרשום שעבור זוויות קטנות מתקיים: לכן, כאשר הזווית באוויר קטנה ומבוטאת ברדיאנים, נוכל להמיר את קשר (א) לעיל בקשר:

(ג) $\frac{\sin \theta_{\text{אוויר}}}{\sin \theta_{\text{זכוכית}}} = 1.5$

כדי להמיר את הזוויות למעלות, יש לכפול את המונה ואת המכנה ב- $180/\pi$. גורם זה מצטמצם, וקשר (ג) נשאר תקף גם עבור זוויות הנמדדות במעלות.

54. א. נסמן את זווית הפגיעה במים ב- θ_1 . זו הזווית בין SA לבין האנך לפני המים כמתואר באיור שלפניך. היא שווה גם לזווית BSA (זוויות מתחלפות בין ישרים מקבילים).



זווית השבירה באוויר, θ_2 , שווה לזווית BIA (זוויות מתחלפות בין ישרים מקבילים).

(א) $\tan \theta_1 = \frac{AB}{H}$ במשולש BSA:

(ב) $\tan \theta_2 = \frac{AB}{h}$ במשולש BIA:

$\frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = \frac{h}{H}$ מחילוק משוואה (א) במשוואה (ב) נקבל:

כיוון שהזוויות θ_1 ו- θ_2 קטנות, ערכי הטנגנס שווים בקירוב לערכי הסינוס, לכן:

(ג) $\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \approx \frac{h}{H}$

(ד) $\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = n$ על פי חוק סנל:

(ה) $\frac{H}{h} \approx n$ מקשרים (ג) ו- (ד) נובע כי:

$\frac{H}{h} \approx n \Rightarrow \frac{1}{h} \approx 1.33 \Rightarrow h \approx 0.75 \text{ m}$ ב. על פי קשר (ה) לעיל: