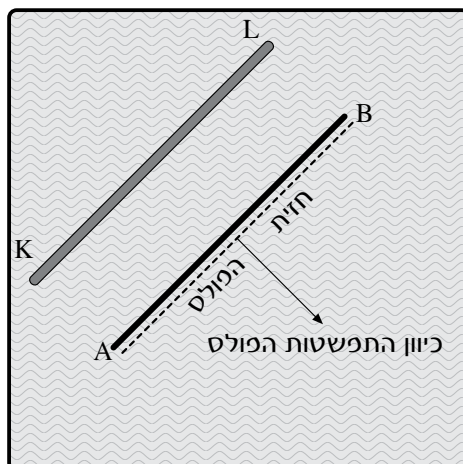
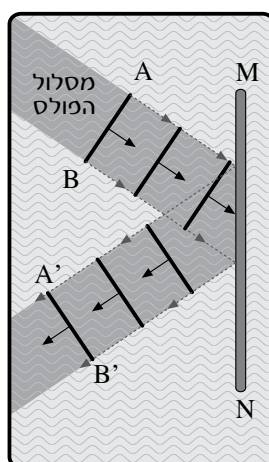


פרק ה: תכונות של גלים דו-ממדיים והשוואתן לתכונות האור

1. באיור שלהלן מוצגת חזית הפולס וכיוון התפשטות הפולס.

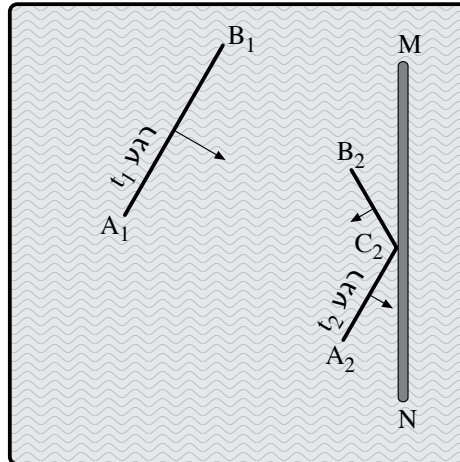


2. התשובות לסעיפים א, ב ו-ג מוצגות באיור שלהלן.

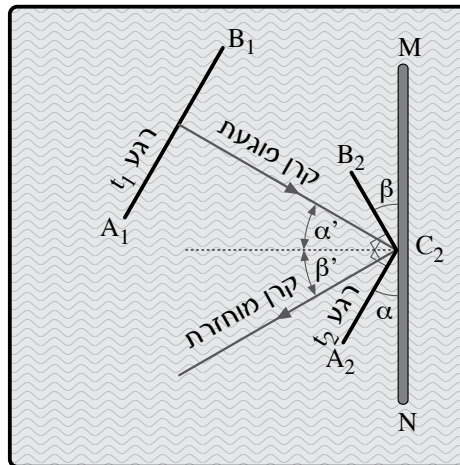


ה"קרניים", שהן כיווני ההתפשטות של הנקודות A ו-B מוחזרות מן המחסום בדומה להחזרת קרני אור ממראה מישורית.

3. א. A_2C_2 מקביל ל- A_1B_1 לכן A_2C_2 הוא חלק הפולס שעדיין לא פגע במחסום. החלק B_2C_2 אינו מקביל ל- A_1B_1 והוא מתאר את חלק הגל שהוחזר.
ב. באיור שלהלן מוצגים כיווני התנועה:

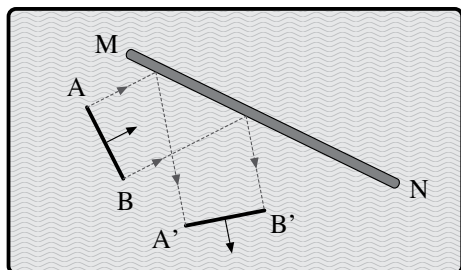


ג. (1) ו-(2): התשובות מוצגות באיור שלהלן.

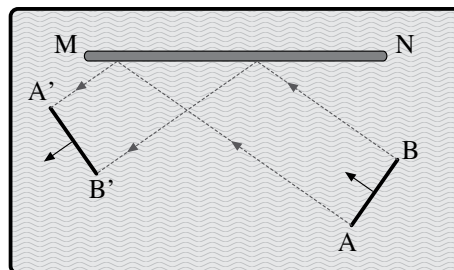


4. א. (1) זווית הפגיעה של אור מוגדרת כזווית שבין הקרן הפוגעת (כיוון ההתפשטות של האור הפוגע) לבין האנך למשטח המחזיר. במצב המוצג באיור שבשאלה זווית הפגיעה שווה ל-0.
(2) זווית הפגיעה של גלי מים מוגדרת כזווית שבין חזית הגל הפוגע לבין המחסום, והיא שווה במצב המוצג באיור שבשאלה ל-0.
ב. בנוסף לפולס המקורי AB הנע לעבר המחסום, באיור שלהלן מוצג הפולס המוחזר $A'B'$, וחץ המתאר את כיוון התפשטותו.
5. זווית הפגיעה מוגדרת כזווית בין חזית הגל הפוגע לבין המחסום. ממדידה עם מד-זווית התקבל כי היא שווה ל- 45° . זווית ההחזרה מוגדרת כזווית בין חזית הגל המוחזר לבין המחסום. ממדידה עם מד-זווית התקבל כי גם היא שווה ל- 45° . מכאן שזווית ההחזרה שווה לזווית הפגיעה, כלומר מתקיים חוק ההחזרה.

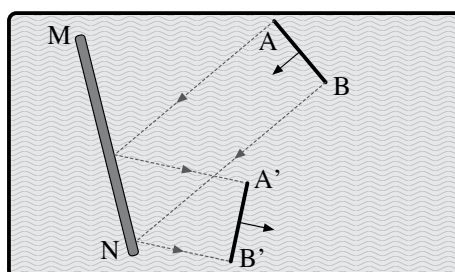
6. באיורים שלהלן מוצגים הפולסים המוחזרים ברגע מסוים.



איור ב

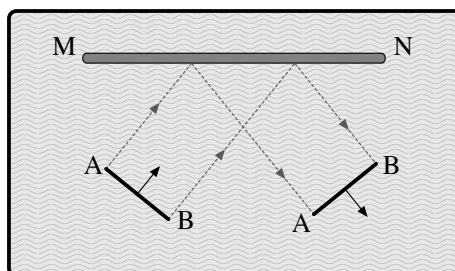


איור א



איור ג

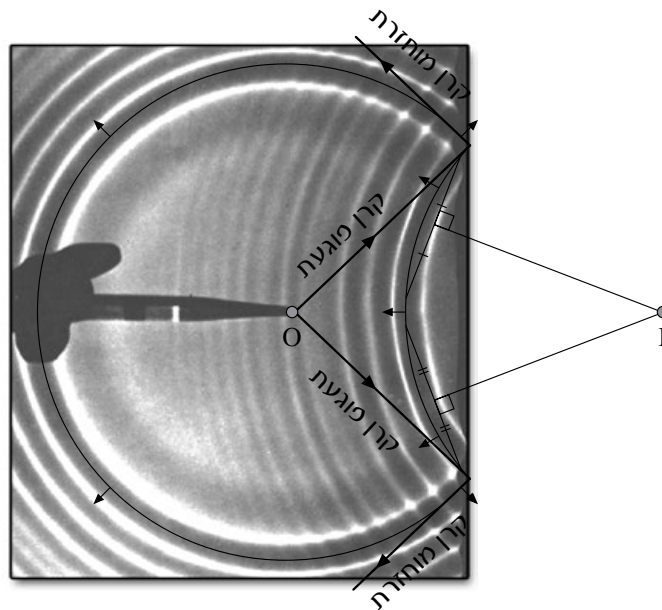
7. קצות הפולס המוחזר מסומנים נכון באיור ג, כמתואר באיור שלהלן.



8. במרכז פני המים נוצר פולס מעגלי ממקור נקודתי (פגיעת הטיפה בפני המים) שהולך ומתפשט כך שרדיוסו הולך וגדל, עד שברגע מסוים הפולס מגיע לשפת המים המהווה קצה חופשי של המים. הפולס מוחזר מקצה המים, והוא מתפשט כך שרדיוס הפולס הולך וקטן, עד שהוא מתכנס כולו לנקודת מרכז הצלחת. ממצב זה הוא שוב הולך ומתפשט, כך שרדיוסו הולך וגדל, וחוזר חלילה, בתנאי שאין ריסון.

9. זווית הפגיעה היא הזווית שבין חזית הגל הפוגע לבין המחסום, והיא בת 30° .

10. א. (1) האיור שלהלן הוא העתק של איור 9 שבספר. לחלק המוחזר של הגל הוספנו שני מיתרים, ולכל אחד מן המיתרים הוספנו אנך אמצעי. נקודת החיתוך של שני האנכים האמצעיים היא מרכז הגלים המעגליים המוחזרים מהמחסום.



- (2) המרכז I שמצאנו סימטרי למרכז O של הגלים הנוצרים בפני המים ביחס למחסום.
 (3) המונח הקשור לאור, המקביל למרכז הגלים המעגליים המוחזרים, הוא "דמות מדומה של מקור אור נקודתי, הנוצרת על-ידי מראה מישורית".
 ב. באיור דלעיל מסורטטות שתי קרניים הפוגעות ושתי קרניים המוחזרות.

11. א. מהירות הגל גדולה יותר בתווך המופיע בחלק התחתון של התצלום.
 הסבר: תדירויות הגל בשני התווכים שוות זלזו, אורך הגל בתווך התחתון גדול יותר. משתי עובדות אלו מהנוסחה $v = \lambda f$ נובע כי מהירות הגל גדולה יותר בתווך המופיע בחלק התחתון.
 ב. (1) מצאנו על ידי מדידה כי בחלק התחתון של התצלום אורך הגל הוא $\lambda_1 = 0.5 \text{ cm}$. כמו כן מצאנו כי האורך של שישה אורכי גל בחלק העליון של התצלום הוא 1.95 ס"מ. מכאן שאורך הגל בחלק העליון של התצלום הוא $\lambda_2 = \frac{1.95}{6} = 0.325 \text{ cm}$.
 (2) מתשובה (1) לעיל נובע כי:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{0.5}{0.325} = 1.5$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 1.5$$

ג. יחס המהירויות:

12. א. מהירות הגל גדולה יותר בתווך המופיע בחלק הימני של התצלום.
 הסבר: תדירויות הגל בשני התווכים שוות זלזו, אורך הגל בתווך הימני גדול יותר. משתי עובדות אלו מהנוסחה $v = \lambda f$ נובע כי מהירות הגל גדולה יותר בתווך הימני.
 ב. (1) מצאנו על ידי מדידה כי האורך של תשעה אורכי גל בחלק הימני של האזור הוא 4.1 ס"מ. מכאן שאורך גל בחלק הימני הוא $\lambda_1 = \frac{4.1}{9} \text{ cm}$. כמו כן מצאנו כי האורך של ארבעה אורכי גל בפינה השמאלית העליונה של התצלום הוא 1.25 ס"מ. מכאן שאורך הגל בפינה השמאלית העליונה הוא $\lambda_2 = \frac{1.25}{4} \text{ cm}$.

הגלים שבחלק הימני של האזור מקיימים: (1) $v_1 = \lambda_1 f$

הגלים שבחלק הסמוך לפינה השמאלית העליונה של האזור מקיימים: (2) $v_2 = \lambda_2 f$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad \text{מחילוק קשר (1) בקשר (2) נקבל:}$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{4.1/9}{1.25/4} \approx 1.46 \approx 1.5 \quad \text{לכן:}$$

כלומר בעזרת מדידת אורכי גל מצאנו כי מהירותם של הגלים בחלק הימני של האיור גדולה בערך פי 1.5 ממהירות הגלים בחלק האיור הסמוך לפינה השמאלית העליונה של האיור.

(2) על-פי מדידה באמצעות מד-זווית מצאנו כי זווית הפגיעה של הגלים היא $\theta_1 = 53^\circ$, וזווית השבירה היא $\theta_2 = 33^\circ$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \Rightarrow \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin 53^\circ}{\sin 33^\circ} \Rightarrow \frac{v_1}{v_2} \approx 1.47 \approx 1.5 \quad \text{על-פי חוק סנל:}$$

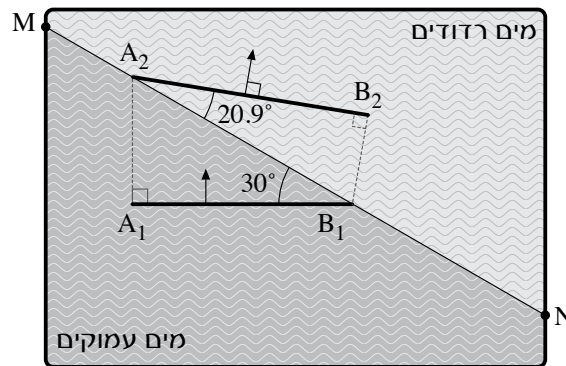
כלומר בעזרת מדידות של זווית פגיעה ושל זווית שבירה מצאנו כי מהירותם של הגלים בחלק הימני של האיור גדולה בערך פי 1.5 ממהירות הגלים בפינה השמאלית העליונה של האיור. תוצאה זו תואמת לתוצאה שהתקבלה ממדידת אורכי הגל.

13. האפשרות הנכונה היא (3).

הסבר: במעבר אור מתווך אחד למשנהו התדירות אינה משתנה. מתוצאות אמפיריות, וגם מחוק סנל נובע כי מהירות האור בזכוכית קטנה מזו שבאוויר. נתבונן בנוסחה $v = \lambda f$: f אינו משתנה, v קטן לכן λ קטן.

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \Rightarrow \frac{14}{10} = \frac{\sin 30^\circ}{\sin \theta_2} \Rightarrow \theta_2 = 20.9^\circ \quad \text{א. נחשב את זווית השבירה בעזרת חוק סנל:}$$

ב. תחילה העלנו אנך לחזית הגל A_1B_1 בנקודה A_1 . נקודת החיתוך של אנך זה עם MN היא A_2 . מהנקודה A_2 סרטטנו את חזית הגל במים הרדודים, כך שהזווית בין חזית הגל לבין MN היא 20.9° . לבסוף הורדנו אנך מהנקודה B_1 לחזית הגל שסרטטנו במים הרדודים. נקודת חיתוך של אנך זה עם חזית הגל היא B_2 , כמתואר באיור שלהלן.



ג. חישוב אורך חזית הגל ברגע t_2 :

$$\cos \theta_1 = \frac{A_1B_1}{A_2B_1} \Rightarrow \cos 30^\circ = \frac{20}{A_2B_1} \quad \text{במשולש } A_1A_2B_1:$$

$$\cos \theta_2 = \frac{A_2B_2}{A_2B_1} \Rightarrow \cos 20.9^\circ = \frac{A_2B_2}{A_2B_1} \quad \text{במשולש } A_2B_2B_1:$$

מפתרון מערכת שתי המשוואות מקבלים כי $A_2B_2 = 21.57 \text{ cm}$. כלומר אורך חזית הגל ברגע t_2 הוא 21.57 ס"מ.

15. א. על-פי חוק סנל: $n = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \Rightarrow n = \frac{\sin 40^\circ}{\sin 26^\circ} \Rightarrow n \approx 1.47$

ב. על-פי חוק סנל: $n = \frac{c}{v} \Rightarrow v = \frac{3 \cdot 10^8}{1.47} \Rightarrow v \approx 2.05 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

(v מסמל את גודל מהירות האור בזכוכית).

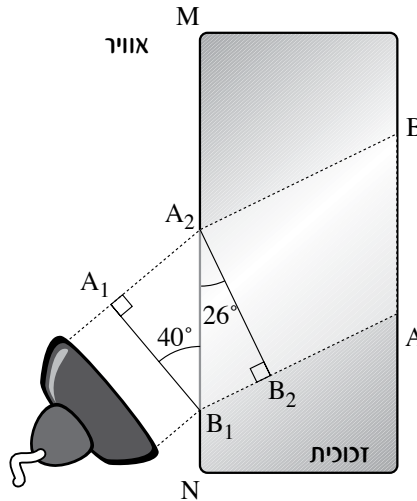
ג. תדירות האור בזכוכית שווה לתדירות האור באוויר.

ד. אורך הגל של האור בזכוכית קטן מזה שבאוויר.

הסבר: נתבונן בנוסחה $v = \lambda f$: התדירויות f באוויר ובזכוכית שוות, המהירות v בזכוכית קטנה מזו שבאוויר,

לפיכך אורך הגל λ בזכוכית קטן מזה שבאוויר.

ה. חישוב רוחב האלומה בזכוכית. נתבונן באיור:



במשולש $A_1A_2B_1$: $\cos \theta_1 = \frac{A_1B_1}{A_2B_1} \Rightarrow \cos 40^\circ = \frac{2}{A_2B_1}$

במשולש $A_2B_2B_1$: $\cos \theta_2 = \frac{A_2B_2}{A_2B_1} \Rightarrow \cos 26^\circ = \frac{A_2B_2}{A_2B_1}$

מפתרון שתי המשוואות מקבלים ש- $A_2B_2 = 2.35 \text{ cm}$

כלומר אורך חזית הגל ברגע t_2 שווה ל-2.35 ס"מ.

16. על פי נוסחה (9) בספר לתלמיד: $(1) A \propto \frac{1}{\sqrt{r}}$

פתרון בדרך א':

המשרעת נמצאת ביחס הפוך לשורש הרדיוס. הרדיוס גדל מ-20 ס"מ ל-200 ס"מ, כלומר פי 10. $\sqrt{10} \approx 3.16$

לכן המשרעת קטנה פי 3.16, כלומר גודלה: $A_2 = \frac{A_1}{3.16} = \frac{5}{3.16} = 1.58 \text{ cm}$

פתרון בדרך ב':

מנוסחה (1) לעיל אפשר להסיק

$$\frac{A_2}{A_1} = \sqrt{\frac{r_1}{r_2}}$$

ומכאן: $A_2 = A_1 \sqrt{\frac{r_1}{r_2}} = 5 \sqrt{\frac{20}{200}} \Rightarrow A_2 = 1.58 \text{ cm}$

17. על פי נוסחה (10) בספר לתלמיד:

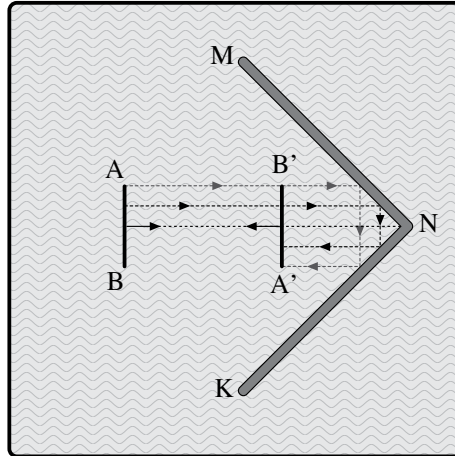
$$(1) \quad e \propto \frac{1}{r^2}$$

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} = \frac{12^2}{2^2} = 36$$

מכאן נובע ש-:

כלומר אנרגיית הקול שחודרת לאוזנו של אדם ב' קטנה פי 36 מזו שחודרת לאוזנו של אדם א'.

18. מסלולי התנועה של שלוש נקודות, והפולס לאחר ההחזרה, מוצגים באיור שלהלן.



19. נחשב, בעזרת חוק סנל, את זווית הגבול במעבר פולס מהמים הרדודים למים העמוקים. זווית הגבול היא זווית השבירה במים שבהם המהירות היא נמוכה יותר, כלומר במים הרדודים, כאשר זווית הפגיעה במים העמוקים היא 90° (או ליתר דיוק שואפת ל- 90°).

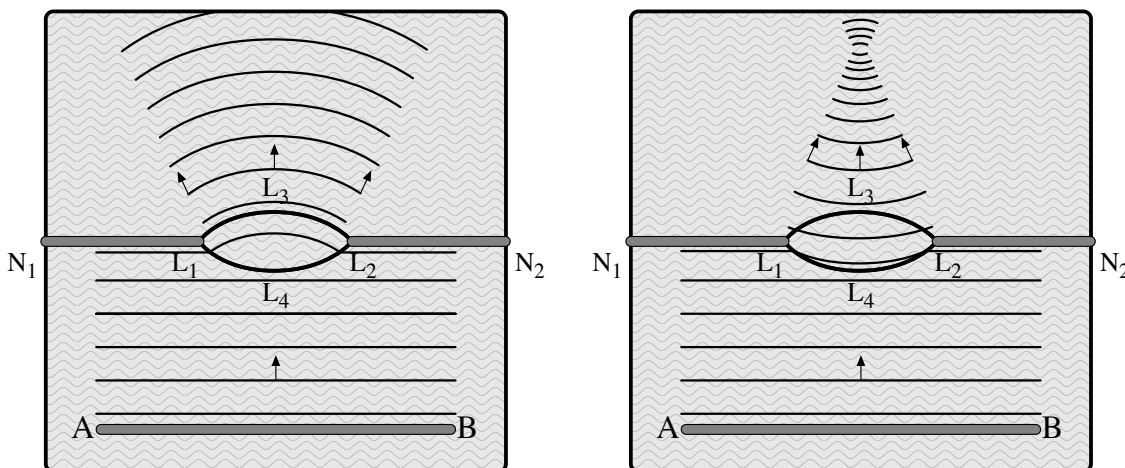
$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \Rightarrow \frac{14}{10} = \frac{\sin 90^\circ}{\sin \theta_2} \Rightarrow \theta_2 = 45.6^\circ$$

כלומר אם פולס מתפשט במים העמוקים, ופוגע במשטח הגבול עם המים הרדודים בזווית הקרובה ל- 90° - הוא ישבר במים הרדודים וזווית השבירה תהיה בת 45.6° .

תכנון ניסוי להחזרה מלאה: משגרים פולס **במים הרדודים לעבר המים העמוקים** כך שזווית הפגיעה במשטח הגבול עם המים העמוקים גדולה מ- 45.6° . הפולס יוחזר למים הרדודים בהחזרה מלאה.

20. א. גל המים שינוע באמבט יגיע לאזור המים הרדודים ושם הוא ינוע לאט יותר. תחילה מרכז הפולס יחדור לאזור האיטי, לאחר מכן אזורים של הפולס הקרובים למרכז הפולס וכך הלאה. כמובן שחלקי הפולס הנמצאים מול המחסומים לא יעברו. מרכז הפולס יתחיל לנוע ראשון לאט יותר מהנקודות שבצדדיו, לכן חזית הפולס במים הרדודים תפגר אחרי הנקודות שבצדדים. לכן הפולס ינוע באופן המוצג באיור א. **הפולס הישר משתנה, אם כן, לפולס מתכנס.**

ב. המערך המתואר דומה **לעדשה מרכזת.**



איור ב

איור א

ג. הפולס הישר משתנה לפולס מתבדר כפי שמוצג באיור ב, כי מרכז הפולס מתחיל להתקדם ראשון במהירות רבה יותר מאשר הנקודות שסמוכות לו, לכן נוצרת צורה קשתית כך שמרכז הפולס מקדים את הנקודות שבצדדים.

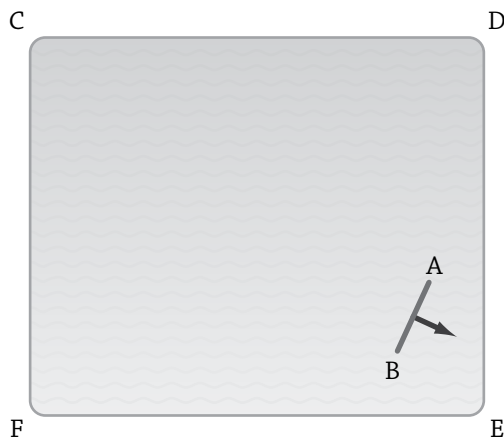
ד. מערכת זו דומה לעדשה מפזרת.

21. תופעה זו מעידה על כך שכל צבעי האור הלבן מתפשטים בריק באותה מהירות.

22. נשתמש בקשר: $v = \frac{c}{n}$

מהירות האור בזכוכית (m/s)	מקדם שבירה	גוון האור
$v = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8}{1.513} = 1.983 \cdot 10^8$	1.513	גוון מסוים של אדום
$v = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8}{1.514} = 1.982 \cdot 10^8$	1.514	גוון מסוים של כתום
$v = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8}{1.517} = 1.978 \cdot 10^8$	1.517	גוון מסוים של צהוב
$v = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8}{1.519} = 1.975 \cdot 10^8$	1.519	גוון מסוים של ירוק
$v = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8}{1.528} = 1.963 \cdot 10^8$	1.528	גוון מסוים של כחול
$v = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8}{1.532} = 1.958 \cdot 10^8$	1.532	גוון מסוים של סגול

23. לפניך איור מקורב של חזית הפולס בהגיעו לקרבת דופן האמבט DE:



חזית הגל נקבעה על סמך הנתון שכל שנקודות הפולס קרובות יותר לדופן EF הן נמצאות במים רדודים יותר, לכן הן נעות לאט יותר.

24. ככל שקרובים יותר לחוף, המים יותר רדודים. מהירות גל במים רדודים יותר נמוכה. כאשר גל מתקרב לחוף, החזית הקדמית שלו נעה במים רדודים, לכן החלק הקדמי של הגל נע לאט. החזית האחורית של הגל נמצאת במים עמוקים יותר, לכן החלק האחורי של הגל נע יותר מהר מהחלק הקדמי של הגל והוא "מטפס" על החלק הקדמי של הגל.

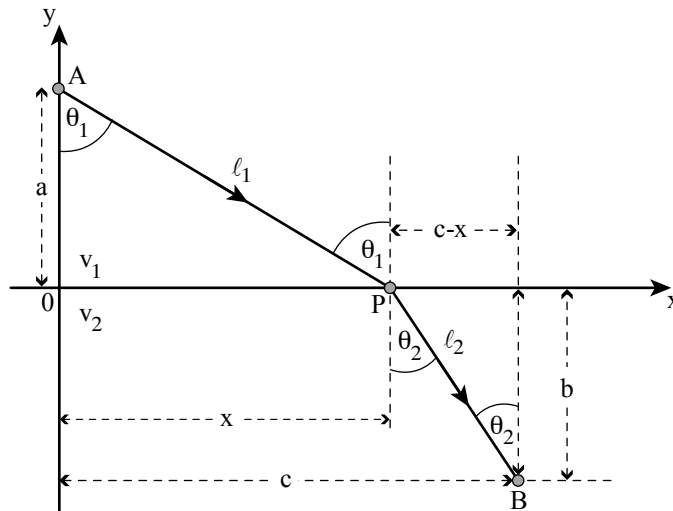
25. נניח שגל מתקרב לחוף כאשר הוא אינו מקביל לחוף. קצה חזית הגל הקרוב יותר לחוף נמצא במים רדודים יותר, לכן הוא נע לאט יותר מהקצה הרחוק יותר מהחוף, וכך הגל מסתובב תוך כדי התקדמותו, עד למצב שבו הוא מקביל לחוף. ממצב זה הגל מתקרב לחוף כשהוא מקביל אליו.

26. א. נסמן:

a - מרחק הנקודה A ממשטח הגבול בין שני התווכים.

b - מרחק הנקודה B ממשטח הגבול בין שני התווכים,

נבחר מערכת צירים (x, y) , כאשר ציר x מתלכד עם משטח הגבול שבין שני התווכים וציר y הוא האנך למשטח הגבול העובר בנקודה A (ראה איור שלהלן). לנקודות הקבועות A ו-B שיעורים קבועים; על פי הרשום באיור: $A(0, a)$ ו- $B(c, b)$.



נסמן נקודה $P(x, 0)$ על ציר ה- x ונחבר אותה עם A ועם B . המסלול $A \leftarrow P \leftarrow B$ אינו בהכרח מסלול של קרן אור. נראה כי המסלול $A \leftarrow P \leftarrow B$ המקיים שהזמן לאורכו הוא מינימלי, הוא המסלול שאותו "בוחרת" קרן אור המתפשטת מ- A למשטח הגבול וממנו ל- B .

אורך המסלול ℓ_1 מ- A ל- P :

$$\ell_1 = \sqrt{a^2 + x^2}$$

אורך המסלול ℓ_2 מ- P ל- B :

$$\ell_2 = \sqrt{(c-x)^2 + b^2}$$

משך התנועה מ- A ל- P ול- B :

$$(1) \quad t(x) = \frac{\ell_1}{v_1} + \frac{\ell_2}{v_2} = \frac{\sqrt{x^2 + a^2}}{v_1} + \frac{\sqrt{(c-x)^2 + b^2}}{v_2}$$

משך התנועה t תלוי ב- x . נרשום את התנאי שנקודת הקיצון של הפונקציה $t(x)$ מקיימת:

$$\frac{dt(x)}{dx} = \frac{1}{2v_1} \cdot \frac{2x}{\sqrt{x^2 + a^2}} + \frac{1}{2v_2} \cdot \frac{2(c-x) \cdot (-1)}{\sqrt{(c-x)^2 + b^2}} = 0 \quad \text{לשם כך נגזור תחילה את הפונקציה (1):}$$

$$\frac{1}{2v_1} \cdot \frac{2x}{\sqrt{x^2 + a^2}} - \frac{1}{2v_2} \cdot \frac{2(c-x)}{\sqrt{(c-x)^2 + b^2}} = 0 \quad \text{התנאי לקיצון הוא שהביטוי האחרון יתאפס:}$$

$$\frac{\frac{x}{\sqrt{x^2 + a^2}}}{\frac{c-x}{\sqrt{(c-x)^2 + b^2}}} = \frac{v_1}{v_2}$$

מכאן:

$$\frac{\frac{x}{\ell_1}}{\frac{c-x}{\ell_2}} = \frac{v_1}{v_2}$$

$$(2) \quad \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

הקשר האחרון המבטיח זמן מינימלי לאורך המסלול $A \leftarrow P \leftarrow B$ מתקיים גם עבור מסלול של קרן אור. כלומר מצאנו שמבין אינסוף המסלולים האפשריים כדי להגיע מ- A ל- B , המסלול שבו משך הזמן הוא הקצר ביותר זהו המסלול שאותו "בוחרת" קרן האור.

ב. לא. לפי האמור בסעיף א עליו לבחור במסלול המקיים את קשר (2) לעיל.