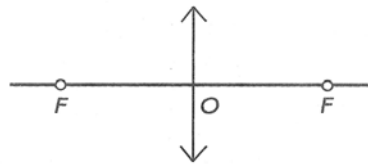
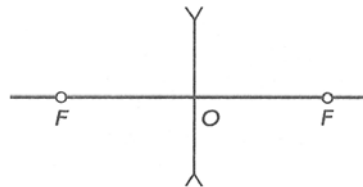


תכונות העדשה הדקה מוגדרות בעיקר על-ידי מקומם של המוקדים. ידיעת המרחק מהמקור לעדשה ומרחק המוקד מהעדשה (מקום המוקדים) מאפשרת למצוא את המרחק לדמות בלא צורך בשרטוט מהלך הקרניים בתוך העדשה. עקב כך אין צורך לשרטט את הצורה המדויקת של המשטחים הכדוריים היוצרים את העדשה. את העדשה המרכזת מתארים בסימן מוסכם כבציור 188, ואת המפזרת – בסימן מוסכם כבציור 189.



ציור 188



ציור 189

אנו יודעים שכל הקרניים, שיצאו מנקודה אחת של העצם ונשברו בעדשה, נפגשות בנקודה אחת. הודות לתכונה זו יוצרת עדשה דקה דמות של כל נקודות הגוף, ולכן של העצם כולו.

כדי לבנות דמות מעצם, המתקבלת על-ידי עדשה מרכזת שמוקדיה ומרכזיה האופטי ידועים, נשתמש בעיקר בשלוש קרניים "נוחות". כפי שלמדנו בסעיף הקודם, הקרניים המקבילות לציר האופטי הראשי מתרכזות לאחר השבירה במוקד העדשה. מאחר שמהלך הקרניים הפיך, תעבורנה קרניים, העוברות דרך מוקד העדשה לאחר השבירה, במקביל לציר האופטי הראשי. לבסוף, קרניים העוברות דרך המרכז האופטי של העדשה אינן משנות את כיוונן; הן עוברות העתקה מקבילה בלבד, ובמקרה של עדשה דקה ההעתקה קטנה מאוד וזניחה.

נבנה את דמות העצם AB (ציור 190). כדי למצוא את דמותה של נקודה A נכוון קרן AC במקביל לציר האופטי הראשי. לאחר השבירה תעבור הקרן דרך מוקד העדשה. את הקרן השנייה AD נכוון דרך המוקד, ולאחר השבירה תעבור במקביל לציר האופטי הראשי. בנקודת המפגש של שתי הקרניים תימצא דמות A₁ של הנקודה A. כך אפשר לבנות את כל יתר נקודות הדמות. הדמות אינה נוצרת רק על-

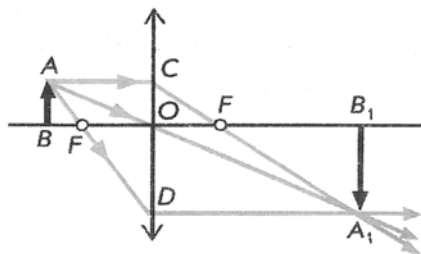


ידי שתיים או שלוש קרניים, אלא על-ידי אינסוף קרניים, היוצאות מנקודה A ומתכנסות בנקודה A_1 . לדוגמה: לנקודה A_1 מגיעה גם הקרן AOA_1 , העוברת דרך המרכז האופטי O של העדשה. ובכן, על מנת לבנות דמות של נקודה אפשר להשתמש בכל שתיים משלוש הקרניים ה"נוחות", שמהלך כל אחת מהן דרך העדשה ידוע:

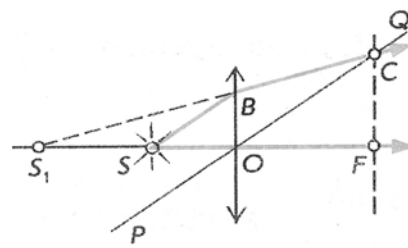
1. הקרן העוברת דרך המרכז האופטי של העדשה;

2. הקרן המקבילה לציר האופטי הראשי;

3. הקרן העוברת דרך מוקד העדשה.



ציור 190



ציור 191

ננתח עוד מקרה: יש לבנות את דמותה של נקודה, הנמצאת על הציר האופטי הראשי. הקושי כאן נעוץ בעובדה, שכל שלוש הקרניים ה"נוחות" מתלכדות לקרן אחת, SF , העוברת לאורך הציר האופטי הראשי. לכן נוצר צורך למצוא את מהלכה של קרן נוספת כלשהי SB (ציור 191), הפוגעת בעדשה בנקודה B. על מנת לבנות את הקרן הנשברת נשרטט ציר אופטי משני PQ , המקביל לקרן SB . נבנה את מישור המוקד, ונמצא נקודה C שבה דוקר הציר המשני את מישור המוקד. דרך נקודה זו תעבור הקרן הנשברת BC . בנינו אפוא מהלך של שתי קרניים היוצאות מהנקודה S. לאחר השבירה בעדשה מתבדרות קרניים אלה, ולכן תהיה הדמות S_1 של הנקודה S מדומה ותימצא במפגש המשכי הקרניים. דמות מדומה מתקבלת כאשר המקור נמצא בין המוקד לבין העדשה.

על מנת לבנות דמות ניתן להשתמש בשתיים מתוך שלוש הקרניים ה"נוחות".



אם העדשה מרכזת, המוקד שלה הוא ממשי, ולפני האיבר $\frac{1}{|F|}$ רושמים סימן "פלוס". אם העדשה מפזרת, $F < 0$, האגף הימני של הנוסחה (8.10) יהיה שלילי¹ ושווה ל- $-\frac{1}{|F|}$. ליד האיבר $\frac{1}{|f|}$ רושמים סימן "פלוס" אם הדמות היא ממשית, וסימן "מינוס" אם הדמות היא מדומה. לבסוף, ליד האיבר $\frac{1}{|d|}$ רושמים סימן "פלוס" אם הנקודה הזוהרת ממשית, ו"מינוס" – אם היא מדומה (כלומר בעדשה פוגעת אלומת קרניים, אשר המשכיהן נפגשים בנקודה אחת).

אם f, F או d אינם ידועים, רושמים ליד האיברים המתאימים $\frac{1}{f}, \frac{1}{F}$ או $\frac{1}{d}$ את הסימן "פלוס"; אולם אם כתוצאה מהחישובים של מרחק המוקד או המרחק מהעדשה לדמות או למקור יתקבל ערך שלילי, סימן הוא שהמוקד, הדמות או המקור מדומים.

הגדלת העדשה

הדמות הנוצרת עשויה להיות שונה בגודלה מגודל העצם. יחסי המידות בין העצם לבין דמותו מאופיינים בערך **הגדלה**.

הגדלה קווית היא היחס בין גודל הדמות לגודל העצם.

כדי למצוא את ההגדלה הקווית נפנה שוב לציור 190. אם גובה העצם AB שווה

ל- h , וגובה הדמות A_1B_1 שווה ל- H , אזי

$$(8.12) \quad \Gamma = \frac{H}{h}$$

היא ההגדלה הקווית.

$$\frac{H}{h} = \frac{|f|}{|d|} \quad \text{נובע ש: } \triangle OAB \text{ ו- } \triangle OA_1B_1 \text{ נובע ש:}$$

לכן הגדלת העדשה שווה ליחס שבין מרחק הדמות מהעדשה לבין מרחק העצם

מהעדשה:

$$(8.13) \quad \Gamma = \frac{|f|}{|d|}$$

¹ ובהתאם תהיה עוצמה אופטית D (ראו סעיף 63) עבור עדשה מרכזת חיובית, ועבור עדשה מפזרת – שלילית.

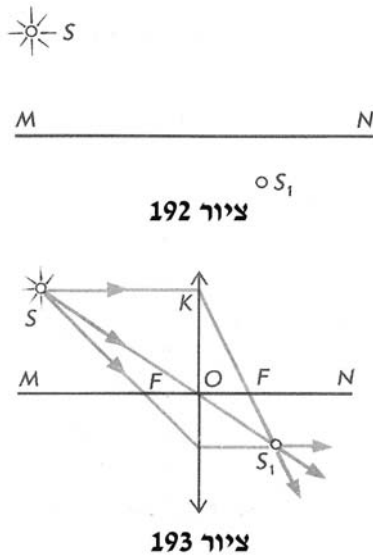
העדשה היא הרכיב העיקרי של המצלמה, המקרן, המיקרוסקופ והטלסקופ. גם בעין נמצאת עדשה, היוצרת את הדמות של כל אשר אנו רואים.

?

1. איזו עדשה מכונה דקה?
2. מהו המוקד הראשי של העדשה?
3. רשמו את נוסחת העדשה.
4. באילו קרניים נוח להשתמש כדי לבנות דמות בעדשה?
5. מהי הגדלת העדשה?

דוגמאות לפתרון תרגילים

1. בציור 192 מתוארים ציר אופטי ראשי MN של עדשה, מקום הנקודה הזוהרת S ודמותה S_1 . מצאו וסמנו את המרכז האופטי של העדשה ואת מוקדיה. מצאו: האם העדשה מרכזת או מפזרת? והאם הדמות היא ממשית או מדומה?



פתרון

הקרן העוברת דרך המרכז האופטי של העדשה אינה סוטה מכיוונה. לכן המרכז האופטי O נמצא בנקודת המפגש של הישרים SS_1 ו-MN (ציור 193). נעביר קרן SK המקבילה לציר האופטי הראשי. הקרן הנשברת KS_1 תעבור דרך המוקד. מכיוון שקרן, העוברת דרך המוקד לאחר השבירה, עוברת במקביל לציר האופטי הראשי, נמצא את המוקד השני. העדשה היא מרכזת, והדמות ממשית.

2. גובה העצם $H = 2 \text{ cm}$. מה צריך להיות מרחק המוקד F של העדשה, הממוקמת במרחק $f = 4 \text{ m}$ מהמסך, על מנת שגובה הדמות על המסך יהיה $h = 1 \text{ m}$?

נוסחת העדשה

פתרון

מנוסחת העדשה:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$$

מחלצים את מרחק מוקד:

$$F = \frac{df}{d+f}$$

את הגדלת העדשה רושמים כך:

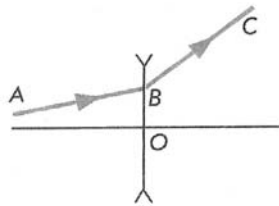
$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}$$

מכאן:

$$d = \frac{hf}{H}$$

לכן:

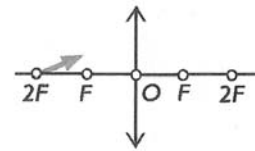
$$F = \frac{hf}{H+h} \approx 8 \text{ cm}$$



ציור 194



ציור 195



ציור 196

מקבץ תרגילים 9

1. סרגל בעל חלוקה מילימטרית נמצא לפני עדשה במרחק $d = 12.5 \text{ cm}$ ממנה; הרוחב של חלוקה מילימטרית אחת על המסך שווה ל- $L = 2.4 \text{ cm}$. מה מרחק המוקד של העדשה?
2. עדשה יוצרת על המסך דמות ממשית של נורת חשמל. כיצד תשתנה הדמות, אם נחסום ביד את החצי הימני של העדשה?
3. מצלמה יוצרת על סרט דמות אדם. מדוע דמויות העצים, הנמצאים רחוק מאחורי האדם, אינן חדות? כיצד יש להזיז את עדשת המצלמה כדי שהעצים

נוסחת העדשה

- ייראו כדמויות חדות? האם במקרה זה תישאר דמות האדם חדה?
4. מדוע אדם, הצולל מתחת לפני המים ללא מסכה, אינו רואה טוב?
5. בנו את דמות העצם הנמצא לפני עדשה מרכזת במקרים הבאים:
 (1) $d > 2F$; (2) $d = 2F$; (3) $F < d < 2F$; (4) $d < F$.
6. ציור 194 מתאר את מהלך הקרן ABC דרך עדשה מפזרת דקה. מצאו את מקום מוקדי העדשה.
7. עצם נמצא במרחק $d = 1.8 \text{ m}$ מעדשה מרכזת. מצאו את מרחק המוקד של העדשה, אם ידוע שהדמות קטנה מהעצם פי 5.
8. בציור 195 מתוארים ציר אופטי ראשי של העדשה, מקור אור ודמותו. מצאו ושרטטו את המרכז האופטי של העדשה ואת מוקדיה. איזו עדשה זאת: מרכזת או מפזרת? מהי הדמות: ממשית או מדומה? בדקו את המקרים הבאים:
 (1) A – מקור, B – דמות; (2) B – מקור, A – דמות.
9. בנו דמות של מקור נקודתי בעדשה מפזרת באמצעות שלוש הקרניים ה"נוחות".
10. מקור אור נקודתי נמצא במוקד עדשה מפזרת. באיזה מרחק מהעדשה נמצאת הדמות? בנו את מהלך הקרניים.
11. בנו דמות של חץ קצר, הנטוי כלפי הציר האופטי הראשי של עדשה מרכזת. הקצה התחתון של החץ נמצא על הציר האופטי הראשי במרחק, השווה לכפליים מרחק המוקד מן העדשה (ציור 196).

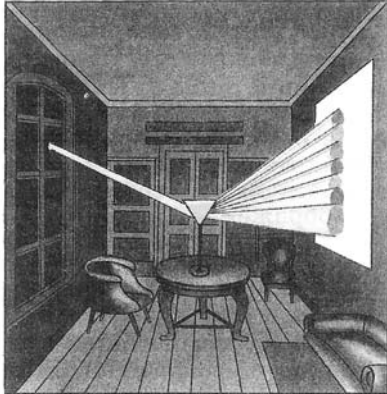
§66 נפיצה

מקדם השבירה אינו תלוי בזווית הפגיעה של אלומת האור, אולם הוא תלוי בצבעו. תופעה זאת התגלתה על-ידי ניוטון.

במהלך עבודתו על שכלול טלסקופים שם ניוטון לב שהדמות, הנוצרת על-ידי האובייקטיב, צבועה בצדיה. הוא התעניין בתופעה זו, והיה הראשון שחקר את הרבגוניות של קרני האור ואת תכונות הצבעים שעליהן איש עדיין לא חשב" (כפי שחרוט על קברו של ניוטון). בצבעי הקשת, המופיעים סביב דמות שיוצרת עדשה, הבחינו גם לפניו, וראו גם את הצבעים סביב גופים שנצפו דרך מנסרה. אלומת קרני

נפיצה

אור שעברה דרך המנסרה, נצבעה גם היא.



ציור 197

הניסוי הבסיסי של **ניוטון** היה פשוט וגאוני. **ניוטון** חש שבבחינת הצבע חשוב ביותר להשתמש באלומת אור בעלת חתך קטן. אלומת אור שמש חדרה לחדר חשוך מבעד לנקב קטן שבתריס, פגעה במנסרה, ולאחר השבירה יצרה דמות מוארכת וצבעונית על הקיר שממול. את התיאור הסכימתי של ניסוי **ניוטון** אפשר לראות בציור 197. הקשת מורכבת משבעה צבעים עיקריים: סגול, כחול, תכלת, ירוק, צהוב, כתום ואדום.

את הפס הצבעוני כינה **ניוטון** בשם **ספקטרום**.

כאשר חסם **ניוטון** את הנקב בזכוכית אדומה, נצפה על הקיר כתם אדום בלבד; וכאשר היתה הזכוכית כחולה, היה הכתם כחול, וכך הלאה. מכאן נבע, שהמנסרה אינה צובעת את האור הלבן, כפי שחשבו קודם; המנסרה אינה משנה את צבע האור, אלא מפרקת אותו למרכיביו (איור I בעמוד הצבעוני). לאור הלבן מבנה מורכב. ניתן לבודד ממנו אלומות בצבע שונה, ורק פעולתן המשותפת גורמת לנו תחושה של צבע לבן.

אם בעזרת מנסרה שנייה, המסובבת יחסית לראשונה ב- 180° , נאסוף את כל קרני הספקטרום, יתקבל שוב האור הלבן (איור II בעמוד הצבעוני); אולם אם נבודד חלק מסוים של הספקטרום – לדוגמה: הצבע הירוק – ונעבירו דרך מנסרה אחרת, לא נקבל שינוי בצבע.

המסקנה השנייה, שאליה הגיע **ניוטון**, מנוסחת על-ידיו בספר "אופטיקה" באופן הבא: "אלומות אור, השונות בצבען, שונות במידת השבירה". במידה חזקה ביותר נשברות קרניים סגולות, ובמידה פחותה ביותר – קרניים אדומות. את התלות של מקדם השבירה של האור בצבע כינה **ניוטון דיספרסיה**¹ (בעברית: **נפיצה**).

¹ מהמילה הלועזית dispersion – פיזור.

מקדם השבירה תלוי במהירות האור v בתווך (ראו סעיף 61). מקדם השבירה המוחלט הוא $n = \frac{c}{v}$. קרן אור אדומה נשברת במידה פחותה, משום שלאור האדום המהירות הגבוהה ביותר בתווך; והאור הסגול נשבר חזק יותר, מכיוון שמהירות האור הסגול היא הנמוכה ביותר בתווך. זו בדיוק הסיבה שמנסרה מפרקת אור. מהירות צבעי האור השונים בריק היא שווה. אילו לא היה כך, אזי הירח של צדק, **איו**, שצפה בו **רומר**, היה נראה אדום ברגע שהיה יוצא מאזור הצל; אולם זה לא נצפה.

בהמשך גילו את תלות הצבע שבאור בתכונות הפיזיקליות של האור: תדירות התנודות או אורך הגל. לכן ניתן להגדיר טוב יותר את מושג הנפיצה מכפי שהגדיר אותה **ניוטון**: דיספרסיה (נפיצה) היא תלותו של מקדם השבירה של האור בתדירות התנודות (או באורך הגל).

היות האור הלבן בעל מבנה מורכב מסביר את הרבגוניות הנפלאה של צבעי הטבע. אם גוף – לדוגמה: דף נייר – מחזיר קרניים מכל הצבעים הפוגעות בו, הוא ייראה לבן. אם נצפה את הדף בשכבת צבע אדום, אנו לא יוצרים אור בעל צבע חדש, אלא חוסמים בשכבת הצבע חלק מהאור הפוגע. כעת יוחזרו קרניים אדומות בלבד, והאחרות ייבלעו בשכבת הצבע. הדשא ועלי העצים נראים לנו ירוקים, מכיוון שמכל קרני אור השמש הפוגעות בהם הם מחזירים את הקרניים הירוקות בלבד ובולעים את הקרניים האחרות. אם נסתכל בדשא מבעד לזכוכית אדומה, המעבירה קרניים אדומות בלבד, ייראה כמעט שחור.

תופעת הנפיצה, שהתגלתה על-ידי **ניוטון**, היא צעד ראשון להבנת מבנה האור. הבנת תופעת הנפיצה בצורה מעמיקה יותר באה לאחר שגילו את תלות הצבע בתדירות (או באורך הגל) של האור.

?

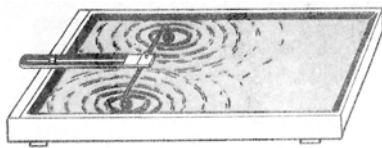
1. במחברת כתוב בעט אדום "מצוין", ובעט ירוק – "טוב". דרך איזו זכוכית, אדומה או ירוקה, צריך להסתכל כדי לראות את המילה "מצוין"?
2. מדוע אלומת אור צרה בלבד גורמת להיווצרות ספקטרום לאחר מעברה דרך מנסרה – ואילו אלומה רחבה רק נצבעת בקצוות?
3. מהי נפיצה של אור?



בפרק הקודם למדנו על שיטות המדידה של מהירות האור, ושמהירות האור בתווך נמוכה יותר מאשר בריק. עובדה זו מאמתת את עקרון הויגנס, המסביר בהצלחה את תופעות ההחזרה והשבירה של האור. אולם נחוצות הוכחות משכנעות יותר, שבהתפשטותו בתווך מתנהג האור כגל. בכל תנועה גלית מתגלות תופעות של התאבכות ועקיפה. על מנת להיות בטוחים בטבעו הגלי של האור, יש למצוא הוכחות ניסוייות של עקיפה והתאבכות של האור. התאבכות היא תופעה מורכבת למדי. כדי להבין את מהותה נלמד תחילה על התאבכות הגלים המכניים.

חפיפת גלים

במקרים רבים מתפשטים בתווך כמה גלים בו-זמנית – למשל, כאשר בחדר משוחחים כמה אנשים, חולפים גלי קול זה בתוך זה. מה מתרחש במפגש זה?



ציור 198

קל מאוד לעקוב אחר חפיפת הגלים המכניים בהסתכלות על גלים, הנוצרים על פני המים. אם נזרוק שתי אבנים לתוך המים, ייווצרו שתי מערכות גלים מעגליים. הן תחלופנה האחת דרך

האחרת, ותמשכנה להתקדם כאילו לא חלפו זה בתוך זה. כך יכולים להתקדם באוויר כמה גלי קול ללא הפרעה הדדית. כלים מוזיקליים רבים בתזמורת או קולות הזמרים במקהלה יוצרים גלי קול, הנקלטים באוזן בו-זמנית, והאוזן מסוגלת להבדיל בין קולות שונים.

נסתכל כעת באזורים שבהם הגלים חופפים. התבוננות במערכת הגלים על פני המים, שנוצרו מזריקת שתי אבנים, מאפשרת להסיק שאזורים מסוימים של פני השטח שקטים לגמרי, ובאזורים אחרים הוגברו וגבהו הגלים; כאשר שני קמרי גלים נפגשים, יוגבר זעזוע המים במקום זה.

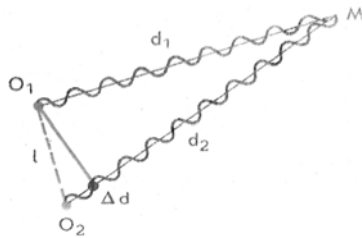
אם קמר של גל אחד פוגש את הקער של הגל האחר, פני המים יהיו שקטים. באופן כללי זעזועי התווך, הנוצרים על-ידי שני הגלים, מסתכמים בכל נקודה:



העתקו של כל חלקיק בתווך ישווה לסכום האלגברי של ההעתקים, שהיו נוצרים בהתפשטות גל אחד בהיעדרו של הגל האחר.

התאבכות

התאבכות היא חפיפת הגלים במרחב, אשר כתוצאה ממנה נוצרת התפלגות של



ציור 199

משרעות הגלים המסתכמים, הקבועה בזמן. נבדוק כעת באילו תנאים יכולה להתרחש ההתאבכות. נסתכל על הגלים שעל פני המים. אפשר לחולל בו-זמנית שתי מערכות של גל מעגלי באמבט מים בעזרת שני כדורים, המחוברים למוט המתנדנד בתנודה הרמונית (ראה ציור 198).

בכל נקודה M על פני המים (ראה ציור 199) יתחברו הזעזועים, שמקורם בשני הגלים (הנוצרים במקורות O_1 ו- O_2). משרעת התנודות, הנוצרת בנקודה M על-ידי שני הגלים, תהיה בדרך כלל שונה, מכיוון ששני הגלים עוברים דרכים אקראיות, d_1 ו- d_2 .

אולם אם המרחק l שבין המקורות קטן בהרבה מהדרכים הללו ($l \ll d_1, l \ll d_2$) תהיינה למעשה שתי המשרעות בנקודת המפגש שוות.

תוצאת החפיפה של הגלים, המגיעים לנקודה M, תלויה בהפרש המופעים של שני הגלים. לאחר המעבר של דרכים שונות, d_1 ו- d_2 , נוצר בין הגלים הפרש דרכים $\Delta d = d_2 - d_1$. אם הפרש דרכים זה שווה לאורך הגל λ , נמצא הגל האחר בפיגור של מחזור אחד ביחס לגל הראשון (בפרק זמן זה מתפשט הגל בדרך השווה לאורך הגל). לכן במקרה זה מתלכדות נקודות המקסימום והמינימום של שני הגלים.

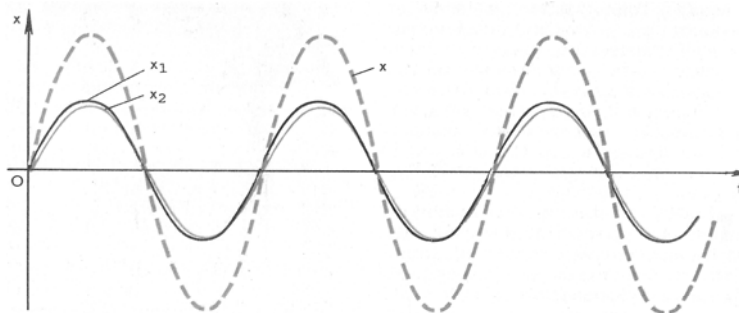
תנאי המקסימום

בציור 200 מתוארת תלות ההעתקים x_1 ו- x_2 , הנוצרים על-ידי שני גלים, בזמן, במקרה של $\Delta d = \lambda$. הפרש המופעים של התנודות שווה לאפס (או ל- 2π , מכיוון שמחזור של פונקציית הסינוס שווה ל- 2π). כתוצאה מחיבור שתי התנודות



נוצרת תנודה בעלת משרעת כפולה. תנודות ההעתק השקול x מתוארות בציור על ידי-קו מקווקו. תוצאה דומה תהיה כאשר בקטע Δd נכנסים לא אחד, אלא מספר שלם כלשהו של אורכי גל. כאשר הפרש הדרכים של שני הגלים, הגורמים לתנודות בנקודה, שווה למספר שלם של אורכי הגל, תהיה משרעת התנודות מרבית בנקודה כלשהי:

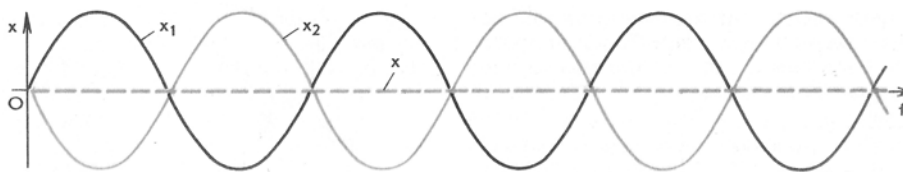
$$\Delta d = k\lambda, k = 0, 1, 2, \dots$$



ציור 200

תנאי המינימום

נניח כעת שבקטע Δd נכנס רק חצי אורך הגל, והגל האחר מפגר אחר האחד בחצי זמן המחזור. הפרש המופעים שווה ל- π , והתנודות יתרחשו במופעים מנוגדים. משרעת הגל שייווצר כתוצאה מחפיפת שני הגלים הללו תהיה שווה לאפס, שפירושו: אין תנודות בנקודה (ראה ציור 201). מצב דומה יקרה כאשר בקטע Δd ייכלל מספר אי-זוגי כלשהו של חצאי אורך הגל.



ציור 201

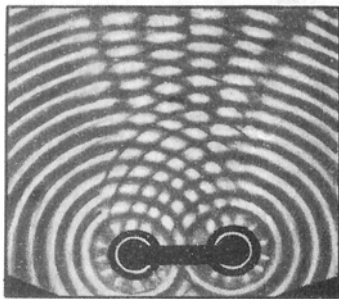
כאשר הפרש הדרכים של שני הגלים, הגורמים לתנודות בנקודה, ישווה למספר אי-זוגי של חצאי אורך הגל, תהיה משרעת התנודות אפסית בנקודה כלשהי:

$$\Delta d = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}, k = 0, 1, 2, \dots,$$

התאבכות גלים מכניים

כאשר ערכו של הפרש הדרכים $\Delta d = d_2 - d_1$ נמצא בתחום שבין λ ל- $\frac{\lambda}{2}$, גם ערכה של המשרעת יהיה בין אפס לבין משרעת כפולה; אולם חשובה ביותר העובדה, שערך המשרעת בכל נקודה במרחב אינו משתנה בזמן. על פני המים נוצרת תבנית ההתאבכות מסוימת שאינה משתנה בזמן. בציור 202 ניתן לראות צילום של תבנית ההתאבכות משני מקורות מעגליים (הנקודות השחורות). האזורים הלבנים באזור המרכז מתאימים לנקודות המקסימום של התנודה, והאזורים הכהים – לנקודות המינימום.

גלים קוהרנטיים



על מנת שתיווצר תבנית התאבכות יציבה נדרש שלמקורות הגלים יהיו תדרים שווים והפרש מופעים קבוע. המקורות, המקיימים תנאים אלה, מכונים **קוהרנטיים**, והגלים, הנוצרים ממקורות אלה, מכונים **גלים קוהרנטיים**. תבנית התאבכות יציבה נוצרת מחפיפת גלים קוהרנטיים בלבד.

ציור 202

אם הפרש המופעים של התנודות אינו נשאר קבוע, ישתנה בזמן גם הפרש המופעים של התנודות בכל נקודה במרחב. כך גם תשתנה משרעת התנודות, וכתוצאה מכך ינועו אזורי מקסימום ומינימום במרחב, ותבנית ההתאבכות תטושטש.

התפלגות האנרגיה

גלים נושאים אנרגיה. היכן אצורה האנרגיה, כאשר הגלים "הורסים" זה את זה בנקודות המינימום? אולי מותמרת היא לצורות אחרות, ובנקודות המינימום נפלט חום, למשל? לא ולא! קיום המינימום בנקודה מסוימת של תבנית ההתאבכות, פירושו: אנרגיה אינה מגיעה כלל לנקודה זו. בעקבות ההתאבכות מתרחשת חלוקה מחדש של האנרגיה במרחב. היא אינה מתחלקת באופן אחיד בין כל חלקיקי התווך, אלא מתרכזת בנקודות המקסימום על חשבון נקודות המינימום, אליהן אינה מגיעה כלל.

היווצרותה של תבנית ההתאבכות מוכיחה את קיום התהליך הגלי. גלים יכולים לבטל או להגביר זה את זה, אולם החלקיקים אינם "מושמדים" או "מתרבים" – הם רק משנים את מצב תנועתם. ההתאבכות אפשרית בין גלים קוהרנטיים (מתואמים) בלבד.

?

1. אילו גלים מכונים קוהרנטיים?
2. מהי התאבכות?
3. מהם תנאי המקסימום והמינימום של תבנית ההתאבכות?

§68 התאבכות האור

אם אור הוא שטף של גלים, חייבת להתגלות בו תופעת ההתאבכות; אולם אי-אפשר ליצור תבנית התאבכות (אזורי מינימום ומקסימום של ההארה) משני מקורות אור שונים כשתי נורות חשמל. הדלקת נורה נוספת מגבירה את הארת השטח, אולם אינה יוצרת רצף של אזורי חושך ואור מתחלפים. נברר את הסיבה לכך ובאילו תנאים ניתן לצפות בהתאבכות האור.

תנאי קוהרנטיות של גלי האור

גלי אור, הנפלטים ממקורות שונים, אינם מתואמים בינם לבין עצמם. כדי ליצור תבנית התאבכות יציבה דרושים גלים מתואמים, כלומר הם חייבים להיות בעלי אורך גל שווה והפרש מופעים קבוע בכל נקודה במרחב, כהגדרתם: גלים קוהרנטיים.

לא קשה להשיג שוויון מקורב של אורכי הגל משני מקורות. לצורך זה מספיק להשתמש במסנני אור טובים, המעבירים אור בתחום אורכי גל צר מאוד; אולם אי-אפשר להשיג קביעות של הפרש המופעים משני מקורות בלתי תלויים. האטומים של כל מקור פולטים אור באופן אקראי ובלתי תלוי בצורה של "חבילות", הבנויות מגלים בעלי צורה של פונקציית סינוס באורך של מטר לערך, שנפלטו משני מקורות חופפים. כתוצאה מכך משתנה משרעת התנודות בכל נקודה במרחב בזמן באופן אקראי בהתאם להפרש המופעים בשתי החבילות ברגע נתון ובנקודה נתונה. גלים

התאבכות האור

ממקורות אור שונים אינם קוהרנטיים, משום שהפרש המופעים ביניהם אינו קבוע,¹ ולכן במקרה זה לא נוצרת תבנית התאבכות יציבה במרחב.

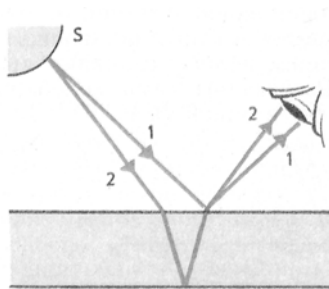
התאבכות בשכבות דקות

ובכל זאת אפשר לצפות בהתאבכות האור. משעשעת העובדה, שצפו בה זה זמן כה רב, אולם לא ידעו זאת.

גם אתם ראייתם את תבנית ההתאבכות פעמים רבות, כאשר שיחקתם בבוטות סבון או התבוננתם בצבעי הקרום הדק של דלק או נפט הפרוס על פני המים. "בועת סבון, במעופה הקסום, נדלקת בכל גוני הצבע שבעולם. בועת הסבון היא הפלא המיוחד שבטבע", כתב **מארק טוויין**. דווקא ההתאבכות – היא שמקנה לבועה את תכונותיה הנפלאות.

המדען האנגלי **תומס יונג** היה הראשון שהגיע למחשבה הגאונית ולהסבר על צבעי השכבות הדקות משום חפיפת הגלים 1 ו- 2 (ראה ציור 203): אחד מהם (1) מוחזר מהמשטח החיצוני של השכבה, והשני (2) – מהמשטח הפנימי.

כתוצאה מכך נוצרת **התאבכות גלי אור** – **חיבור שני הגלים, המתבטא בהיווצרות תבנית יציבה של הגברה או הנחתה של ההארה בנקודות שונות של המרחב.**



ציור 203

תוצאת ההתאבכות (הגברה או הנחתה של ההארה) תלויה בזווית הפגיעה של האור בשכבה, בעובי השכבה ובאורך הגל של האור. הגברת האור תארע כאשר הגל הנשבר 2 מפגר אחרי הגל המוחזר 1 במספר שלם של אורכי גל; ואם הגל השני מפגר בחצי אורך גל או במספר אי-זוגי של חצאי אורך הגל, תתרחש ירידה בעוצמת האור.

¹ יוצא מן הכלל הוא אור הנוצר על-ידי לייזר, שכן האטומים בו פולטים אור לא באקראי, אלא באופן מתואם, על-ידי "פליטה מאולצת".

הקוהרנטיות של הגלים, המוחזרים מהמשטח הפנימי והמשטח החיצוני, מובטחת, שכן שני הגלים הם המרכיבים של אלומת אור אחת. חבילת הגלים, הנפלטת על-ידי כל אטום המשתתף בפליטה, מתפצלת על-ידי השכבה לשתיה חבילות, ובהמשך דרכן הן מתאחדות ויוצרות את תבנית ההתאבכות.

יונג הבין שהבדלי הצבע קשורים בהבדלים באורך הגל (או התדר של הגל האופטי). לגלים בעלי אורך גל שונה מתאימות אלומות אור בעלות צבע שונה. על מנת שתתרחש הגברה הדדית של גלים בעלי אורך גל שונה (וזוויות פגיעה שוות), נדרש עובי שונה של השכבה. לכן אם השכבה הקרומית בעלת עובי משתנה, תפיק הארה באור לבן הופעת צבעים שונים מצבעי הקשת.

תומס יונג (1773 - 1829)



מדען אנגלי בעל כישורים רבים, שעסק בתחומי מדע רבים. **יונג** היה רופא ידוע ופיזיקאי בעל אינטואיציה גאונית. עסק באסטרונומיה, במכניקה, במטאורולוגיה, בהיסטוריה של מצרים העתיקה ובפיזיולוגיה. בקי היה בשפות רבות, היה נגן כשרוני, ואפילו מתעמל טוב. ההישגים העיקריים של **יונג** הם גילוי התאבכות האור (גם שמה של תופעה – interference), הוצע על-ידיו) והסבר תיאורטי של תופעת העקיפה על בסיס תורת הגלים. **יונג** היה הראשון שמדד את אורך הגל של האור.

טבעות ניוטון

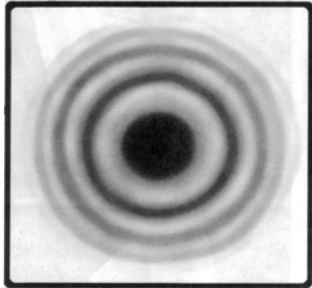
תבנית התאבכות פשוטה מתגלה בשכבת אוויר דקה, הכלואה בין לוחית זכוכית מישורית לבין עדשה ישרה-קמורה בעלת רדיוס עקמומיות של משטח כדורי גדול, המונחת עליה. לתבנית זו צורה של טבעות בעלי מרכז משותף, המכונות **טבעות ניוטון**.

קחו עדשה ישרה-קמורה בעלת עקמומיות קטנה של המשטח הכדורי, והניחו אותה על לוח זכוכית. אם תתבוננו היטב במשטח המישורי של העדשה (עדיף באמצעות זכוכית מגדלת), תגלו כתם כהה במקום המגע שבין העדשה והלוח, וסביבו מערכת טבעות צבעוניות קטנות.

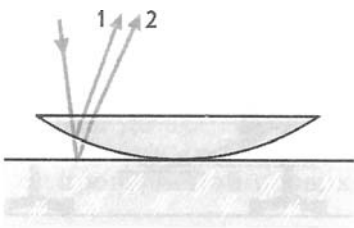
המרחקים בין הטבעות הסמוכות הולכים וקטנים עם הגדלת הרדיוס (ראו איור

התאבכות האור

III-1 בעמוד הצבעוני). מערכת זו מכונה **טבעות ניוטון**. ניוטון צפה וחקר אותה לא רק באור לבן, אלא גם באור חד-צבעי (מונוכרומטי).



התברר שרדיוס הטבעת גדל במעבר מהקצה הסגול של הקשת לקצה האדום; ולטבעות האדומות רדיוס מרבי (ראו איורים III-2 ו-III-3 בעמוד הצבעוני).



ציור 204

ניוטון לא הצליח להסביר מדוע נוצרות הטבעות, ויונג – הוא שהשלים את המלאכה. נעקוב אחר מהלך מחשבתו: ההנחה היא שמהות האור גלית. נחקור את דרכו של גל בעל אורך מסוים, הפוגע בעדשה ישרה-קמורה כמעט אנכית (ציור 204). גל 1 נוצר כתוצאה מהחזרה מהמשטח הקמור של העדשה בגבול שבין זכוכית לאוויר, וגל 2 – כתוצאה מהחזרה מהלוח המישורי, בגבול שבין האוויר לזכוכית.

גלים אלה הם קוהרנטיים: יש להם אורך גל שווה והפרש מופעים קבוע, שכן גל 2 עובר דרך ארוכה יותר מזו של גל 1. אם לגל השני פיגור במספר שלם של אורכי גל, מגבירים הגלים זה את זה, שכן התנודות הנגרמות על-ידיהם מתרחשות באותו מופע.

אם, לעומת זאת, הפיגור של הגל השני יחסית לגל הראשון הוא במספר אי-זוגי של חצאי אורך הגל, תהיינה התנודות הנגרמות על-ידיהם במופע נגדי, והגלים יחרסו זה את זה.

כאשר ידוע רדיוס העקמומיות R של משטח העדשה, אפשר לחשב באילו מרחקים מנקודת המגע של העדשה עם הלוח יהיו הפרשי הדרכים האופטיות כאלה, שהגלים יחרסו זה את זה. המרחקים האלה הם רדיוסי **טבעות ניוטון**, הנוצרות כמעגלים משכבות אוויר שוות-עובי, הכלואות בין המשטח הקמור של העדשה לבין הלוח. באמצעות מדידת הרדיוסים ניתן לחשב את אורך הגל.

אורך הגל של האור

עבור אור אדום תוצאת המדידות היא: $\lambda_r = 8 \cdot 10^{-7} \text{ m}$, ועבור אור סגול:

$$\lambda_v = 4 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

אורכי הגל של צבעי קשת אחרים נמצאים בתחום שבין שני הקצוות האלה. אורך הגל של האור בעל צבע כלשהו קטן מאוד. דמיינו לעצמכם גל ממוצע בים באורך כמה מטרים. נגדילו שימלא את כל האוקיינוס האטלנטי, מחופי אמריקה עד אירופה. אורך הגל של האור באותה הגדלה יהיה אז כרוחב עמוד זה...

תופעת ההתאבכות מוכיחה לא רק את הטבע הגלי של האור, אלא מאפשרת גם למדוד את אורך הגל. כשם שגובה צליל הקול נקבע על-ידי התדר, כך גם הצבע של האור נקבע על-ידי תדר התנודה או אורך הגל.

העין היא מכשיר אופטי מורכב, המאפשר להבדיל בין צבעים, הנבדלים בערך מזערי של אורך הגל (כ- 10^{-6} cm). רוב החיות אינן מסוגלות להבדיל בין צבעים, אלא רואות תמונה בשחור-לבן. חלק קטן מאוכלוסיית האדם לוקה בראיית הצבע בשיעור חלקי או מלא (דלטוניזם).

במעברו של אור מתווך לתווך משתנה אורך הגל, וניתן לגלות זאת כך: נמלא את שכבת האוויר שבין העדשה לבין הלוח המישורי במים או בנוזל שקוף אחר, וניווכח שרדיוסי טבעות ההתאבכות יקטנו בעקבות זאת.

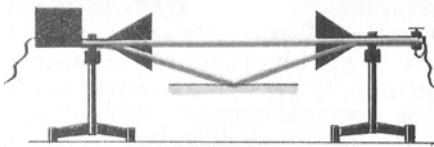
מדוע קורה הדבר? אנו יודעים שבמעבר אור מריק לתווך שקוף משתנה מהירותו: היא תקטן פי n , כאשר n – מקדם השבירה של התווך. מכיוון שאורך הגל והתדר קשורים במשוואה: $v = \lambda \cdot \nu$, אחד מהם – התדר או אורך הגל – חייב להיות קטן פי n גם הוא. אולם רדיוסי הטבעות תלויים באורך הגל, ולכן בכניסתו של האור לתווך משתנה פי n אורך הגל – ולא התדר.

התאבכות גלים אלקטרו-מגנטיים

בעזרת מחולל גלי רדיו בתדרים גבוהים אפשר לצפות בהתאבכות גלי הרדיו. את המחולל והמקלט מציבים זה מול זה (ראו ציור 205), ולאחר מכן מקרבים אליהם לוח מתכת מלמטה בצורה אופקית. מרימים את הלוח אט-אט כלפי הציר

משדר-מקלט, ומגלים הגברה והנחתה של עוצמת הקול.

ניתן להסביר את התופעה כך: חלק מהגלים, הנפלטים מהמשדר, נכנסים ישירות למשפך הקליטה, והחלק האחר מוחזר מהלוח המתכתי. חפיפת שני הגלים – היא שיוצרת את תבנית ההתאבכות. הגלים מגבירים או הורסים זה את זה בהתאם להפרש הדרכים ביניהם: מספר שלם של אורכי גל יגרום להגברה, ומספר אי-זוגי של חצאי אורכי גל יגרום להתאבכות הורסת.



ציור 205

תופעת ההתאבכות של האור מוכיחה שהאור מגלה תכונות של גל. ניסויי ההתאבכות מאפשרים למדוד את אורך הגל של האור. הסתבר שהוא קטן מאוד: מ- $4 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ עד $8 \cdot 10^{-7} \text{ m}$.

1. ? כיצד יוצרים גלי אור קוהרנטיים?
2. מהי התאבכות האור?
3. איזה ערך פיזיקלי מגדיר את הצבע של האור?
4. לאחר ניפוץ הקרח נוצרים בו סדקים, הנוצצים בכל צבעי הקשת. מדוע?
5. אורך הגל של האור בתוך המים קטן פי n יחסית לאוויר (n – מקדם השבירה של מים יחסית לאוויר). האם פירוש הדבר שצוללן לא יוכל לראות את הגופים הסובבים אותו בצבעם הטבעי?

אורך גל של האור

קיימים מכשירים, המכונים "אינטרפרומטרים", הפועלים על עקרון ההתאבכות. ייעודם מגוון: מדידה מדויקת של אורך הגל של האור, מדידת מקדמי השבירה של גזים ושל חומרים אחרים. נלמד על שני יישומים של ההתאבכות.

בדיקת איכות העיבוד של שטח

בעזרת ההתאבכות אפשר לקבוע את איכות עיבוד פני שטח של מוצר בדיוק עד $1/10$ אורך גל, כלומר בדיוק עד 10^{-6} cm. כדי לעשות זאת, יש ליצור מרווח אוויר בצורת טריז בין המשטח הנבדק לבין לוח תקני, שמשטחו חלק מאוד. חספוסי שטח שגודלם עד 10^{-6} cm גורמים לעיוותים משמעותיים של פסי ההתאבכות, הנוצרים במהלך החזרת האור מהמשטח הנבדק ומהלוח התקני.

ציפוי נגד החזרה

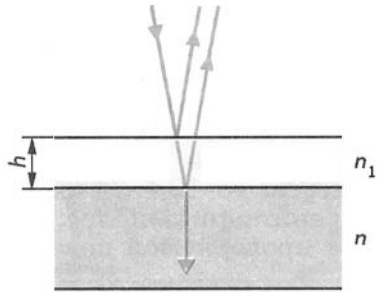
אובייקטיבים של מצלמות ומקרנים, משקפות, טלסקופים ומערכות אופטיות אחרות מכילים מספר רב של רכיבים אופטיים: עדשות, מנסרות וכדומה. במהלך מעבר האור דרך הרכיבים האלה מתרחשת החזרה ממשטחים רבים. מספר המשטחים במצלמות מודרניות מגיע לעשרה, ובמערכות צבאיות, כפריסקופים של צוללות – לארבעים. פגיעת אור בניצב למשטח מתלווה בהחזרה של כ- 5% – 9% מכלל האנרגיה. לכן בסך הכול עוברים דרך המערכת בין 10% ל- 20% מהאור הנכנס. כתוצאה מכך בהירות הדמות נמוכה, ואיכותה ירודה. לאחר החזרות מרובות מהמשטחים הפנימיים עובר חלק מאלומת האור דרך המערכת, אינו משתתף ביצירת הדמות, אלא גורם לטשטושה: על תמונת הדמות מופיעה "הילה". כדי להימנע מתופעות אלה יש להקטין את האור המוחזר מהמשטחים האופטיים, ואז לתקבל דמות חדה וברורה יותר. מכאן השם "הגברה אופטית" הניתן לתהליך זה.

הגברה אופטית מבוססת על התאבכות. את פני משטח הזכוכית, שממנה עשויה העדשה, מצפים בשכבה דקה של חומר בעל מקדם שבירה n_1 , הקטן ממקדם השבירה n של הזכוכית.

לצורך פשטות נניח שהפגיעה היא בניצב לפני השטח של השכבה.



הפרש הדרכים האופטיות של הגלים 1 ו- 2 (ציור 206), המוחזרים מהמשטחים העליון והתחתון בהתאמה, שווה לעובי כפול של השכבה $2h$. אורך הגל λ_1 בתוך



ציור 206

השכבה קטן מאורך הגל בריק λ פי n_1 :

$$\lambda_1 = \frac{\lambda}{n_1}$$

על מנת שהגלים 1 ו- 2 יחלישו זה את זה, צריך הפרש הדרכים להיות שווה לחצי אורך הגל של האור בשכבה:

$$(8.16) \quad 2h = \frac{\lambda_1}{2} = \frac{\lambda}{2n_1}$$

אם ערכי המשרעת של שני הגלים שווים או קרובים זה לזה, תהיה הריסת האור מלאה. כדי להשיג זאת בוחרים חומר ציפוי שמקדם השבירה שלו יהיה כזה, שעוצמת האור המוחזר תהיה מזערית.

בתנאים רגילים פוגע בעדשה אור לבן. הביטוי (8.16) מראה, שהעובי הנדרש של השכבה תלוי באורך הגל, ולכן אי-אפשר להגיע להיחלשות שווה של האור המוחזר לכל אורכי הגל. את עובי השכבה בוחרים כך, שהאיפוס המוחלט של האור המוחזר יתקיים עבור אורכי גל שבאמצע הספקטרום (אור ירוק, $\lambda \approx 5.5 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$); העובי צריך להיות שווה לרבע אורך הגל בשכבה:¹

$$h = \frac{\lambda}{4n_1}$$

החזרת אור בקצות הספקטרום – אור אדום ואור סגול – כמעט שאינה מושפעת על-ידי הציפוי. לכן צבעה של עדשה, המצופה בחומר נגד החזרה, סגלגל. כיום מצפים עדשות בחומר כנגד החזרה אפילו במצלמות הזולות ביותר.

תופעת היחלשות האור אינה היפוך אנרגיית האור לצורות אנרגיה אחרות. בדומה להתאבכות גלים מכניים, המשמעות של הריסה הדדית של הגלים באזור מסוים היא שאנרגיית האור אינה מגיעה לאזור זה. היחלשות הגלים המוחזרים מהאובייקטיב, המצופה בחומר נגד החזרה, משמעה שכל האור עובר דרך האובייקטיב.

¹ באופן מעשי מצפים בשכבה בעלת עובי גדול יותר, בכפולה שלמה של אורכי הגל בשכבה.



לעתים קרובות פוגש הגל בדרכו מחסומים קטנים (יחסית לאורך הגל). היחס בין אורך הגל לבין גודל המחסום הוא הגורם העיקרי שקובע את התנהגות הגל.

גלים יכולים לעקוף את קצות המחסומים. כאשר המחסום קטן, עוקף הגל את קצותיו ומתחבר מאחוריו. כך עוקפים גלי ים סלע הבולט מפני המים, אם גודלו קטן בהשוואה לאורך הגל או משתווה לו, ומאחוריו הם מתפשטים כאילו הסלע לא היה קיים כלל (הסלעים הקטנים בציור 207). בדומה לכך גל, הנוצר מאבן שהוטלה לאגם, עוקף ענף הבולט מהמים. רק אחרי מחסום גדול בהשוואה לאורך הגל (הסלע הגדול בציור 207) נוצר "צל": הגלים אינם חודרים לאזור זה.



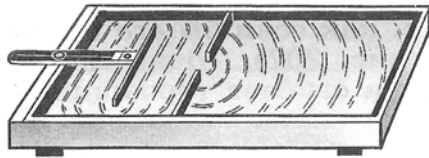
ציור 207

היכולת לעקוף מחסומים קיימת גם בגלי קול: אתם יכולים לשמוע את צופר המכונית כאשר היא נמצאת מאחורי פינת הבית – בעוד היא עצמה אינה נראית. העצים ביער מסתירים את חבריכם, אך כדי לא לאבד אותם אתם קוראים בקול. בשונה מגלי אור, עוקפים גלי קול את גזעי העצים ומביאים את קולכם לחבריכם.

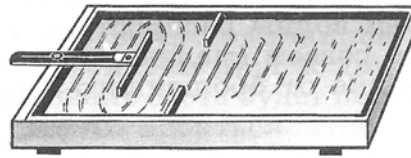
הסטייה מהתפשטות הגלים בקו ישר ועקיפת המחסום על-ידיהם מכונה **עקיפה**.¹ העקיפה אופיינית לכל תהליך גלי. במהלך העקיפה מתעקמים משטחי הגל ליד קצות המחסום. עקיפת הגלים בולטת במיוחד כאשר גודל המחסום קטן מאורך הגל או משתווה לו.

ניתן לצפות בעקיפה על פני המים אם נציב בדרכו של גל מסך ובו חריץ צר, שרוחבו קטן מאורך הגל (ציור 208). אפשר לראות שמאחורי המסך מתפשט גל מעגלי, כאילו במקומו של החריץ היה גוף מתנוודד כמקור הגלים. תופעה זו תואמת לעקרון ה**וויגנס**. מקורות משניים בחריץ צר נמצאים כה קרוב זה לזה, שניתן להחליפם במקור נקודתי אחד.

¹ מהמילה הלועזית diffractus – שבור.



ציור 208



ציור 209

כאשר רוחב החרץ גדול בהשוואה לאורך הגל, תבנית התפשטות הגלים מאחורי המסך אחרת לגמרי (ציור 209): הגל עובר דרך החרץ כמעט ללא שינוי צורה. בקצוות אפשר לראות את עקמומיות משטח הגל, שהודות לה חודר הגל באופן חלקי למרחב שאחרי המסך.

עקרון הוינגס מאפשר להבין מדוע מתרחשת עקיפה: גלים משניים, הנוצרים על-ידי חלקיקי התווך, חודרים מעבר לקצות המחסום הנמצא בדרכו של הגל.

?

1. הביאו דוגמאות נוספות לעקיפת הגלים.
2. באילו תנאים בולטת במיוחד עקיפת הגל?

§71 עקיפת האור

אם אור הוא תהליך גלי, הרי בנוסף לתופעת ההתאבכות צריכה להופיע גם בו גם תופעת העקיפה, שהרי עקיפת קצות המחסומים על-ידי הגלים אופיינית לכל סוג של תנועה גלית. עם זאת קשה לצפות בעקיפת האור, משום שגלי האור סוטים ממסלולם הישר בזווית משמעותית אך ורק בעוברם מחסומים שגודלם כאורך הגל של האור, כלומר קטנים מאוד.

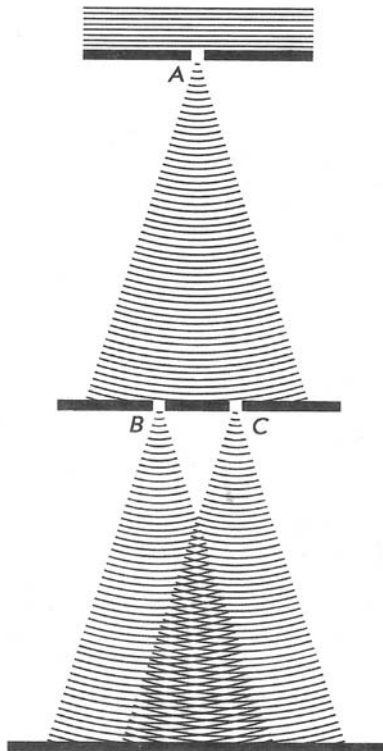
מעבר אלומת אור צרה דרך חריר קטן מאפשר לצפות בסטייה מהתפשטות האור בקו ישר: הכתם הבהיר מול החריר גדול יותר ממה שאפשר היה לצפות, אילו האור היה מתפשט בקו ישר.

ניסוי יונג

בשנת 1802 ביצע תומס יונג, שגילה את ההתאבכות, ניסוי קלאסי בעקיפה (ציור 210). הוא ניקב בסיכה שני נקבים, B ו-C, במסך אטום ובמרחק קטן זה מזה. הנקבים הוארו על-ידי אלומת אור צרה, שעברה לפני-כן דרך נקב קטן A במסך אחר. מכלול ניסויי זה, שבזמנו לא עלה בדעתם של מדעני התקופה, הוא שהכריע



את הצלחת הניסוי: התאבכות תיווצר בגלים קוהרנטיים בלבד.



ציור 210

גל כדורי, שנוצר בהתאם לעקרון הויגנס בחריר A, הוא שגרם להיווצרות גלים קוהרנטיים בנקבים B ו-C. בעקבות העקיפה יצאו מהחרירים B ו-C שני חרוטי אור החופפים חלקית. כתוצאה מהתאבכות גלי האור נוצרה על המסך תבנית של פסים בהירים וכהים. הפסים נעלמו כאשר אטמו את אחד הנקבים. הניסוי הפשוט הזה אפשר ליונג למדוד לראשונה בדיוק רב את אורכי הגל של האור לצבעיו השונים.

תורת פרנל

חקירת העקיפה נמשכה בעבודותיו של פרנל, שחקר מקרים שונים של עקיפה באופן ניסויי. הוא גם פיתח מודל כמותי של עקיפה, המאפשר לחשב את תבנית העקיפה, הנוצרת במעבר האור ליד מחסום כלשהו. פרנל הסביר לראשונה את התפשטות האור בקו ישר על בסיס תורת הגלים.

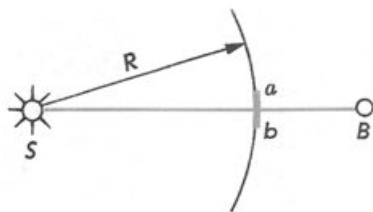
הישגיו של פרנל התאפשרו הודות לשילוב של עקרון הויגנס עם רעיון ההתאבכות של גלים משניים. על-פי פרנל, בכל רגע משטח גלי הוא המשטח, המשיק לגלים משניים כתוצאה מההתאבכות שלהם (עקרון הויגנס-פרנל).

אוגוסטן פרנל (1788 – 1827)



פיזיקאי צרפתי. ביסס את תורת האופטיקה הגלית. פרנל פיתח תיאוריה כמותית של העקיפה על-ידי השלמת עקרון הויגנס בהתאבכות גלים משניים. הסביר את חוקי האופטיקה הגיאומטרית ואת התפשטות האור בקו ישר בתווך אחיד. פרנל פיתח שיטה לחישוב מקורב של תבנית העקיפה, המבוססת על חלוקת משטח הגל לאזורים, והיה הראשון שהוכיח את האופי הרוחבי של גלי האור.

כדי לחשב את המשרעת של גל האור בכל נקודות המרחב, יש להקיף את מקור האור במשטח סגור. התאבכות הגלים המשניים, שמקורותיהם נמצאים על המשטח הזה – היא שקובעת את גודל המשרעת בנקודה הנתונה.



ציור 211

בזכות עבודותיהם של הויגנס ופרנל ניתן להבין כיצד אור ממקור נקודתי S, הפולט גלים כדוריים, מגיע לנקודה כלשהי במרחב B (ציור 211). אם נסתכל במקורות משניים, הנמצאים על משטח הגל הכדורי שרדיוסו R, תהיה תוצאת ההתאבכות בנקודה B של

הגלים המשניים מהמקורות האלה זהה לתבנית, המתקבלת מהמקורות המשניים, הנמצאים על משטח קטן ab בלבד, הפולטים אור אל הנקודה B. הגלים המשניים, הנמצאים באזורים אחרים של המשטח, הורסים זה את זה כתוצאה מההתאבכות, ולכן נראה כאילו מתפשט האור לאורך הישר SB בלבד.

בו-זמנית עסק פרנל בחישוב תבניות העקיפה של מחסומים מסוגים שונים.

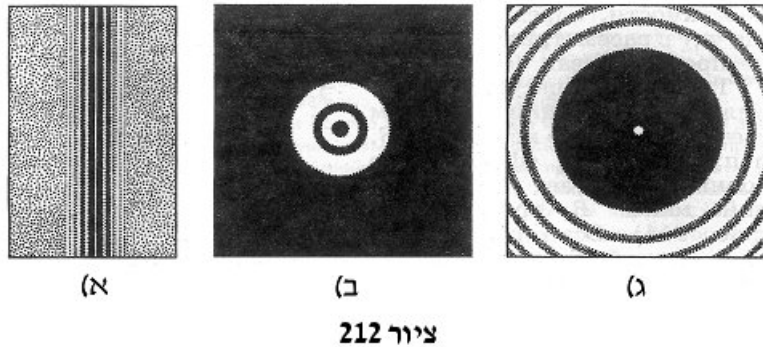
מקרה מעניין אירע בישיבת האקדמיה הצרפתית למדעים בשנת 1818. אחד המדענים שם לב שמתורת פרנל נובעת מסקנה, הסותרת היגיון בריא: האור, העובר דרך נקב הנמצא במרחק מסוים ממקורו, אינו אמור ליצור כתם כהה במרכז הכתם הבהיר. מה רבה היתה פליאתם של המדענים, כאשר בניסוי שערכו אכן נחזתה תופעה בלתי צפויה זו!

תבניות העקיפה של מחסומים שונים

משום שאורך גל האור קטן מאוד, קטנה זווית הסטייה של האור מהקו הישר. כדי לצפות בתופעת העקיפה באופן ברור יש אפוא להשתמש במחסומים קטנים מאוד או למקם מסך רחוק מהמחסום. כאשר המרחק בין המסך למחסום הוא בסדר גודל של מטר, לא צריך גודל המחסום להיות גדול ממאיות המילימטר; ואם המרחק למסך מגיע למאות מטרים או לכמה קילומטרים, אפשר לראות את העקיפה על מחסום, שגודלו כמה סנטימטרים ואפילו כמה מטרים.



בציור 212 א, ב ו-ג נראות תבניות עקיפה ממחסומים שונים: א – תיל דק; ב – פתח עגול; ג – מסך עגול.



במקום צלו הצפוי של התיל נראים פסים בהירים וכהים; במרכז תבנית העקיפה של הפתח העגול מופיע כתם כהה, המוקף בטבעות בהירות וכהות;¹ ובמרכז הצל הנוצר על-ידי המסך העגול נראה כתם בהיר קטן, והצל עצמו מוקף בטבעות כהות.

גבולות השימוש באופטיקה גיאומטרית

כל התיאוריות הפיזיקליות מתארות באופן מקורב את אשר מתרחש בטבע. לכל תיאוריה יש לתחום גבולות, שבתוכם ניתן ליישמה. את גבולות התיאוריה ניתן לתחום רק לאחר שפותחה תיאוריה כללית יותר, העוסקת באותן התופעות.

שיקולים אלה מתייחסים גם לאופטיקה הגיאומטרית. תיאוריה זו מקורבת; היא אינה מסוגלת להסביר את תופעת העקיפה ואת ההתאבכות של האור. התיאוריה הכללית והמדויקת יותר היא האופטיקה הגלית. **חוק התפשטות האור בקו ישר וחוקי האופטיקה הגיאומטרית האחרים מתקיימים די במדויק במקרה אחד בלבד: כאשר גודל המחסום בדרכו של האור גדול בהרבה מאורך הגל האופטי.** במדויק אין הם מתקיימים לעולם.

¹ על-ידי שינוי קוטר הפתח במרכז תבנית העקיפה ניתן לקבל כתם בהיר, המוקף בטבעות כהות ובהירות.



פעולת המכשירים האופטיים מתוארת על-ידי חוקי האופטיקה הגיאומטרית. בהתאם לחוקים אלה יכולים אנו לכאורה להבחין באמצעות המיקרוסקופ בין חלקי הגוף הקטנים ביותר, ובעזרת הטלסקופ ניתן להבחין בשני כוכבים – אף אם המרחק הזוויתי ביניהם מזערי; התורה הגלית של האור מאפשרת להבין ולקבוע את גבולות כושר ההפרדה של מכשירים אופטיים.

כושר ההפרדה של מיקרוסקופ ושל טלסקופ

הטבע הגלי של האור מציב גבול ליכולת הפרדת פרטי גוף או גופים קטנים מאוד בהסתכלות בהם דרך המיקרוסקופ. העקיפה אינה מאפשרת לקבל דמויות חדות של גופים זעירים, מכיוון שהאור אינו מתפשט לאורך קו ישר, אלא עוקף גופים. מסיבה זו מתקבלות דמויות מטושטשות. דבר זה קורה כאשר גודל הגופים קטן יחסית לאורך הגל של האור.

העקיפה מגבילה גם את כושר ההפרדה של הטלסקופ. בגלל העקיפה על גבול היקפה של מסגרת האובייקטיב לא תהיה דמותו של הכוכב בצורת נקודה, אלא כמערכת של טבעות בהירות וכהות. אם שני כוכבים נמצאים במרחק זוויתי קטן זה מזה, חופפות טבעות אלה, והעין אינה מסוגלת להבחין אם קיימות שתי נקודות זוהרות, או אחת. המרחק הזוויתי הגבולי שבין שתי נקודות בהירות, שניתן להבדיל ביניהן, נקבע על-ידי היחס שבין אורך הגל לבין קוטר העדשה.

דוגמה זו ממחישה שעקיפה מתרחשת תמיד בכל סוגי המחסומים. אי-אפשר להתעלם ממנה כאשר מבצעים מדידות מדויקות – אפילו במקרה של מחסום הגדול בהרבה מאורך הגל.

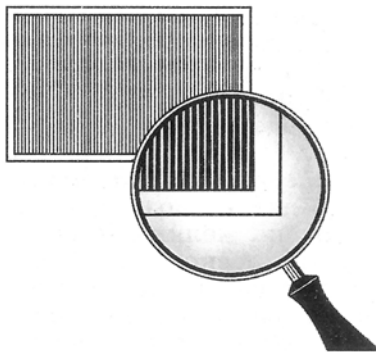
עקיפת אור מציבה גבול לשימוש באופטיקה הגיאומטרית. עקיפת מחסום על-ידי אור גורמת להגבלת כושר ההפרדה של המכשירים האופטיים העיקריים: הטלסקופ והמיקרוסקופ.



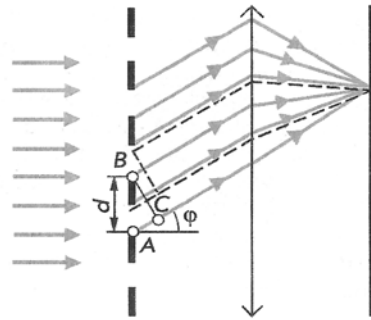
1. מדוע אי-אפשר לראות אטום באמצעות המיקרוסקופ?
2. מהו עקרון הוייגנס-פרנל?
3. נסו לשחזר את ניסוי העקיפה של יונג.
4. באילו מקרים מתקיימים בקירוב חוקי האופטיקה הגיאומטרית?

על תופעת העקיפה מבוססת פעולתו של מכשיר אופטי חשוב: סריג עקיפה.

סריג עקיפה הוא אוסף של מספר רב של חריצים צרים מאוד, המופרדים על-ידי מרווחים בלתי שקופים (ציור 213). סריג טוב מייצרים בעזרת מכונת חריטה מיוחדת, היוצרת קווים מקבילים על לוח זכוכית. מספר הקווים מגיע לכמה אלפים ל-1 מ"מ. בדרך כלל עולה מספרם הכולל של הקווים על 100,000. ניתן לייצר מסריג כזה העתקי ז'לטין, המוכנסים בין שתי לוחיות זכוכית. איכות גבוהה יש לסריגי הַחִזְרָה: הם עשויים מלוח מתכת מלוטש, שחרוטים על פניו קווים המחזירים או המפזרים אור.



ציור 213



ציור 214

אם רוחב הפסים השקופים (או המחזירים) שווה ל- a , ורוחב המרווחים הבלתי שקופים (או הפסים המפזרים אור) הוא b , מכונה הגודל $d = a + b$ **מחזור הסריג**. נראה כיצד פועל סריג. נניח שפוגע בסריג גל מישורי ומונוכרומטי בעל אורך λ (ציור 214). מקורות משניים בחריצים מייצרים גלי אור, המתקדמים בכל הכיוונים. נמצא את התנאי, שגלים אלה יגבירו זה את זה. לשם כך נתבונן בגלים המתקדמים בכיוון המוגדר על-ידי הזווית ϕ . הפרש הדרכים האופטיות בין הגלים, שמקורם בחריצים סמוכים, שווה לאורך הקטע AC . אם בקטע זה נכנס מספר שלם של אורכי גל, יגבירו הגלים מכל החריצים האחד את משנהו בכיוון זה. מהמשולש ABC ניתן למצוא את אורך הניצב AC :

$$AC = AB \sin \phi = d \sin \phi$$



כיווני המקסימום יהיו בזווית φ , המוגדרת על-ידי התנאי:

$$d \sin \varphi = k\lambda \quad (8.17)$$

כאשר: $k = 0, 1, 2, \dots$

יש לזכור: כאשר מתקיים התנאי (8.17), מוגברים הגלים, היוצאים מהקצה התחתון של החריצים (לפי הציור), והגלים היוצאים מכל הנקודות של החריצים האחרים. לכל נקודה בחריץ האחד קיימת נקודה מתאימה בחריץ האחר, הנמצא במרחק d ממנו. לכן הפרש הדרכים בין הגלים המשניים, היוצאים משני החריצים, שווה ל- $k\lambda$, והגלים יגבירו זה את זה.

מאחורי הסריג מציבים עדשה מרכזת ומסך במרחק כמרחקו של מוקד העדשה. העדשה מרכזת קרניים מקבילות בנקודה אחת, ובה מתרחשת התאבכות הגלים. הכיוונים, המוגדרים על-ידי התנאי (8.17), מגדירים את מקומות המקסימום על המסך.

מכיוון שמקום המקסימום (מלבד המקסימום המרכזי, המתאים ל- $k = 0$) תלוי באורך הגל, מפרק הסריג אור לבן לספקטרום (איור IV בעמוד הצבעוני). ככל שגדול אורך הגל λ , כך רחוק יותר מקום המקסימום, המתאים לאורך הגל, מהמקסימום המרכזי. לכל מספר k מתאים ספקטרום שלו.

בין מקומות המקסימום ממוקמים מקומות של מינימום. ככל שמספר החריצים גדול יותר, כך חדים יותר פסי המקסימום, ורחבים יותר פסי המינימום ביניהם. אנרגיית האור העוברת דרך הסריג מתפלגת במרחב מחדש, וכך מרוכזת רובה באזורי המקסימום, וחלק קטן – באזורי המינימום.

באמצעות סריג עקיפה ניתן לבצע מדידות מדויקות מאוד של אורך הגל. אם ידוע מחזור הסריג, מצטמצמת מדידת אורך הגל למדידת הזווית φ , המתאימה לכיוון המקסימום.

ריסי העיניים, עם המרווחים שביניהם, מהווים סריג עקיפה גס. לכן אם נסתכל על מקור אור חזק בעפעפיים כמעט עצומים, נוכל לראות את צבעי הקשת: האור הלבן מתפרק לספקטרום בעקבות העקיפה של הריסים. תקליטור, הכולל חריצים



ספירליים העשויים באמצעות לייזר, פועל כמו סריג החזרה. אם נסתכל על האור הלבן המוחזר על-ידי, ניתן לראות את האור המפורק לספקטרום. אפשר לראות כמה סדרי ספקטרום, המתאימים לערכי k שונים. התמונה תהיה חדה במיוחד, אם אור המנורה יפגע בתקליטור בזווית גדולה.

אוסף חריצים צרים, הנמצאים במרחקים קטנים זה מזה, מהווה מכשיר אופטי נפלא: סריג עקיפה. הסריג מפרק אור לספקטרום, וגם מאפשר למדוד אורכי גל של אור בדיוק גבוה מאוד.

?

1. האם תלוי מקום מקסימום ההארה, הנוצר על-ידי סריג, במספר החריצים?
2. במה תבחינו אם תסתכלו על נורת חשמל מבעד לנוצה?
3. במה שונה ספקטרום, הנוצר במנסרה, מספקטרום העקיפה?

§73 רוחביות גלי האור קיטוב האור

תופעות ההתאבכות והעקיפה אינן מותירות ספק שלאור תכונות של גלים. אולם אילו גלים אלה: אורכיים או רוחביים?

משך זמן רב סברו אבות האופטיקה הגלית, **יונג ופרנל**, שגלי האור הם גלי אורך בדומה לגלי הקול. בתקופתם שלטה עדיין "תורת האתר": חומר בלתי נראה ובלתי מוחשי, הממלא את כל המרחב והחודר לתוך כל הגופים, וגלי האור כגלים אלסטיים מתקדמים בו. לא ייתכן, סברו, שגלים כאלה יהיו רוחביים, מכיוון שגלים רוחביים עשויים להתקיים בגוף מוצק בלבד.

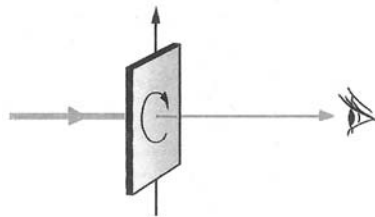
ואכן נאספו יותר ויותר עובדות ניסוייות, שלא היה ניתן היה לפרשן על סמך ההנחה שגלי האור הם גלי אורך.

ניסוי עם גביש נציץ

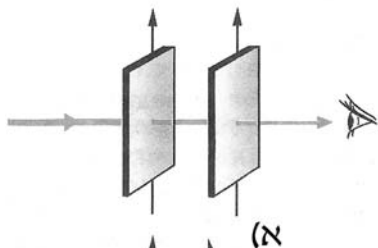
נתאר ניסוי אחד, פשוט מאוד ומרשים, באמצעות גביש נציץ – גבישים שקופים בצבע ירוק, השייכים למשפחת הגבישים בעלי ציר סימטריה אחד. ניקח לוחית



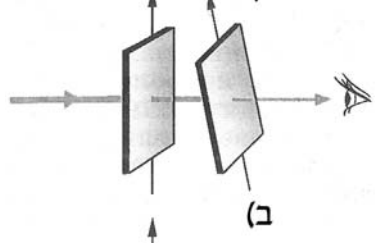
מלבנית של הגביש הגזור כך, שאחת מפאות הלוחית מקבילה לציר הגביש. אם נאיר את הלוחית באלומת אור מנורת חשמל או באלומת אור שמש, הפוגעת בניצב ללוחית, לא יגרום סיבוב הלוחית סביב ציר האלומה לשינוי עוצמת האור (ציור 215). ניתן לשער שהאור נבלע חלקית וקיבל צבע ירוק, ומלבד זאת לא אירע מאום; אולם אין זה כך: האור רכש תכונות חדשות.



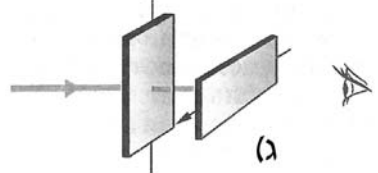
ציור 215



(א)



(ב)



(ג)

ציור 216

התכונות החדשות מתגלות כאשר נעביר את האלומה דרך גביש שני, הוזה לראשון (ציור 216א) ומקביל לו. כאשר מכוונים צירי הגבישים באופן דומה, לא יארע גם הפעם מאום, מלבד בליעה נוספת של אור בגביש השני; אולם אם נסובב את הגביש השני כאשר הראשון נשאר קבוע (ציור 216ב), תתגלה תופעה נפלאה: עוצמת האור העובר נחלשת בהתאם לזווית הסיבוב; וכאשר הצירים מאונכים זה לזה, אין האור עובר כלל (ציור 216ג); הוא נבלע במלואו על-ידי הגביש השני.

כיצד ניתן להסביר זאת?

רוחביות גלי האור

מהניסויים המתוארים נובעות שתי עובדות: האחת – גל אור, המתקדם מהמקור, סימטרי לכיוון התקדמותו, משום שכאשר סובבו את הגביש סביב ציר כיוון האלומה בניסוי הראשון, לא השתנתה עוצמת האור; והשנייה – הגל, היוצא מהגביש הראשון, אינו סימטרי לכיוון התקדמותו, שהרי עוצמת האור היוצאת השתנתה בהתאם לזווית סיבוב הגביש.

גלים אורכיים הם סימטריים לחלוטין לכיוון התקדמותם, שהרי התנודות מתרחשות לאורך ציר כיוון זה, המהווה את ציר הסימטריה של הגל. לכן אי-אפשר להסביר את חלקו השני של הניסוי, בו סובבנו את הגביש השני, אם נניח שגל האור הוא גל אורך.

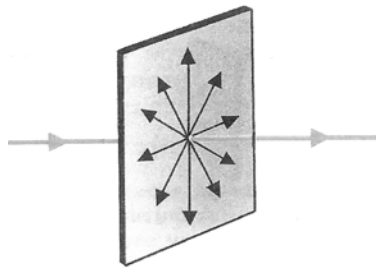


אפשר להסביר את הניסוי באופן מלא אם נניח שתי הנחות:

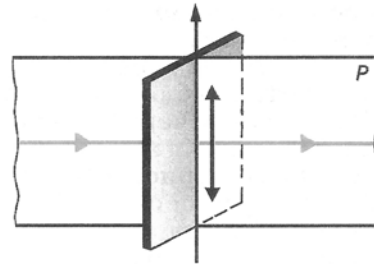
ההנחה האחת מתייחסת לאור עצמו: אור הוא גל רחב, אולם באלומת אור ממקור רגיל קיימות תנודות בכל הכיוונים המאונכים לכיוון התקדמות הגל (ציור 217).

בהתאם להנחה זאת יש לגל אור סימטריה צירית, אולם הוא גל רחב. לגלים על פני המים אין סימטריה מסוג זה, מכיוון שחלקיקי המים מתנודדים במישור האנכי בלבד.

גל אור, המכיל תנודות בכל הכיוונים המאונכים לכיוון ההתקדמות, מכונה **גל טבעי**. כינוי זה הגיוני, מכיוון שבתנאים רגילים יוצרים מקורות אור גל שזכה. הנחה זו מסבירה את התוצאה של הניסוי הראשון: סיבוב הגביש לא השפיע על עוצמת האור העובר, מכיוון שלאור הפוגע סימטריה יחסית לציר ההתקדמות – אף שהגל הוא גל רחב.



ציור 217



ציור 218

ההנחה האחרת מתייחסת לגביש: גביש נציץ מעביר גלי אור, שמתרחשות בהם תנודות במישור אחד מסוים (מישור P בציור 218). אור כזה מכונה **אור מקוטב** או ליתר דיוק: **מקוטב מישורי** – להבדיל מאור טבעי שאינו מקוטב. הנחה זו מסבירה את התוצאות של הניסוי השני: מהגביש הראשון יוצא גל מקוטב מישורי. כאשר הגבישים מצולבים והזווית בין הצירים שווה ל- 90° , הגל אינו עובר דרך הגביש השני; אבל אם הזווית בין צירי הגבישים שונה מ- 90° , עוברות תנודות שמשרעתן שווה להיטל משרעת הגל, שיצא מהגביש הראשון, על כיוון צירו של הגביש השני.

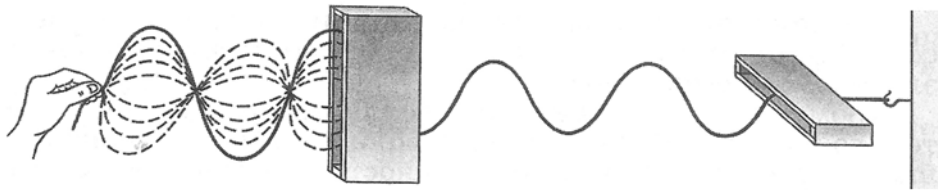
ובכן, גביש נציץ הופך אור טבעי לאור מקוטב מישורי.



מודל מכני של הניסויים עם גביש נציץ

אפשר לבנות מודל מכני פשוט, הממחיש את התופעה. אפשר ליצור גלים רוחביים בחוט גומי, כך שהתנודות ישנו את כיוונן. זוהי הדמיה של גל אור טבעי. נעביר את החוט דרך תיבת עץ צרה (ציור 219). מהתנודות המתרחשות בכל הכיוונים "תבחר" התיבה תנודות במישור מסוים, ולכן יצא מהתיבה גל מקוטב מישורי.

אם בדרכו של הגל המקוטב נמצאת תיבה נוספת זהה, אולם מסובבת ביחס לראשונה ב- 90° , לא תעבורנה התנודות דרכה, והגל ייהרס במלואו.



ציור 219

מקטבים

לא רק גבישי נציץ מסוגלים ליצור אור מקוטב; אותה תכונה קיימת גם בגבישים טבעיים אחרים וגם ברכיבים, המיוצרים באופן מלאכותי והמכונים **מקטבים**. הנפוצים ביותר בין המקטבים הם פולרואידיים. פולרואיד הוא שכבה דקה (כ-0.1 מ"מ) של גבישים שקופים טבעיים, המוצמדת ללוח זכוכית או צלולואיד. יתרונם של הפולרואידיים על-פני גביש הנציץ הוא בשטחם הגדול ובנוחיות עיבודם. חסרונם בגוונים הסגולים שהם מקנים לאור לבן.

בניסויים ישירים הוכח שגל אור הוא גל רוחב. בגל אור מקוטב מתרחשות התנודות בכיוון מוגדר אחד.

?

1. מה המבדיל בין אור טבעי לאור מקוטב?



§74 רוחביות גלי האור התורה האלקטרומגנטית של האור

ראשיתה של התורה האלקטרומגנטית של האור בעבודותיו של **מקסוול**. הוא הוכיח – באופן תיאורטי בלבד – את אפשרות קיומם של גלים אלקטרומגנטיים, וגילה שמהירות התקדמותם בריק שווה למהירות האור, שהיתה ידועה זה מכבר.

בבסיס התורה האלקטרומגנטית של האור נטוע השוויון בין מהירות האור לבין מהירות התקדמות גלים אלקטרומגנטיים.

מתורתו של **מקסוול** נובע, שגלים אלקטרומגנטיים הם רוחביים; בזמנו הוכיחו באופן ניסויי את עובדת הרוחביות של גלי האור, ולכן חשב **מקסוול** שעובדה זו היא הוכחה נוספת לתיאוריה שלו.

הרץ יצר במעבדה את הגלים האלקטרומגנטיים ומדד את מהירותם, וכך קיבלה התורה האלקטרומגנטית של האור הוכחה ניסויית ראשונה. הוכח שבהתקדמותם מגלים גלים אלקטרומגנטיים את אותן התכונות של גלי האור: החזרה, שבירה, התאבכות, קיטוב וכדומה (ראו סעיף 54). בסוף המאה ה-19 הוסכם שגלי אור נוצרים על-ידי חלקיקים טעונים, הנעים באטומים.

קבלת התורה האלקטרומגנטית של האור ביטלה בהדרגה את כל הקשיים, הקשורים בהנחת קיומו של התווך ההיפותטי, האתר, שתכונותיו כתכונותיו של גוף קשיח. גלי אור אינם גלים מכניים, הנעים בתווך מיוחד וחודר כול, אלא גלים אלקטרומגנטיים. מכיוון שתהליכים אלקטרומגנטיים אינם מצייתים לחוקי המכניקה אלא לחוקים משלהם, ניסח אותם **מקסוול** בצורתם התקפה עד היום.

הווקטורים \vec{E} ו- \vec{B} שבגל האלקטרומגנטי מאונכים זה לזה. באור טבעי מתרחשות תנודות השדה החשמלי \vec{E} ועוצמת השדה המגנטי \vec{B} בכל הכיוונים המאונכים לכיוון התקדמות הגל. אם האור מקוטב, מתרחשות תנודות הווקטורים \vec{E} ו- \vec{B} בשני מישורים מוגדרים. הגל האלקטרומגנטי המתואר בציור 120 הוא מקוטב.

נשאלת השאלה: כשדובר על כיוון התנודות בגל האור, לאיזה וקטור, \vec{E} או \vec{B} , התכוונו? ניסויים הוכיחו שעל רשתית העין או על סרט הצילום פועל השדה החשמלי של גל האור.

לכן הוסכם שכיוון התנודות בגל האור יוגדר ככיוון וקטור השדה החשמלי \vec{E} .

גילוי התורה האלקטרומגנטית של האור הוא אחד מגילויים לא רבים, שנעשו "על קצה העט", כלומר באופן תיאורטי; אולם הביטחון בנכונותה התבסס לאחר ההוכחה הניסויית של התיאוריה.

דוגמאות לפתרון תרגילים

1. בניסוי העקיפה של יונג היה המרחק בין החריצים $d = 0.07 \text{ mm}$, והמרחק מהחריץ הכפול למסך $D = 2 \text{ m}$. כאשר האירו את המערכת באור ירוק, היה המרחק בין פסים בהירים סמוכים $\Delta h = 16 \text{ mm}$. מצאו את אורך הגל.

פתרון

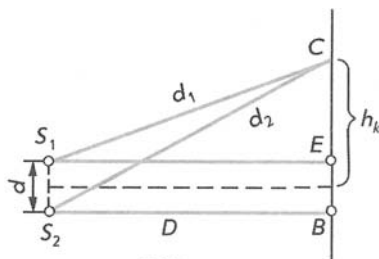
בנקודה כלשהי C על המסך (ציור 220) יופיע מקסימום אור, אם יתקיים התנאי:

$$d_2 - d_1 = k\lambda$$

כאשר: $k = 0, 1, 2, \dots$ מספרים שלמים.

נשתמש במשפט פיתגורס למשולשים S_1CE

ו- S_2CB :



ציור 220

$$d_2^2 = D^2 + \left(h_k + \frac{d}{2}\right)^2,$$

$$d_1^2 = D^2 + \left(h_k - \frac{d}{2}\right)^2$$

נחסיר מהשוויון הראשון את השני, ונקבל:

$$d_2^2 - d_1^2 = 2h_k d$$

או

$$(d_1 + d_2)(d_2 - d_1) = 2h_k d$$

מכיוון ש- $d \ll D$ אזי: $d_1 + d_2 \approx 2D$.

לכן:

$$d_2 - d_1 \approx \frac{h_k d}{D}$$

תורת האור האלקטרומגנטית

בהתחשב בעובדה ש- $d_2 - d_1 = k\lambda$, אפשר לרשום:

$$k\lambda \approx \frac{h_k d}{D}$$

מכאן מוצאים את המרחק ממרכז המסך של פס בהיר שמספרו k :

$$h_k \approx \frac{k\lambda D}{d}$$

המרחק בין פסים סמוכים שווה:

$$\Delta h = h_{k+1} - h_k \approx \frac{\lambda D}{d}$$

מכאן:

$$\lambda \approx \frac{d\Delta h}{D} \approx 5.6 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$$

2. בסריג עקיפה בעל 500 קווים למילימטר פוגע גל מישורי מונוכרומטי ($\lambda = 5 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$). מצאו את סדר הספקטרום k הגדול ביותר שניתן לראותו בפגיעה נורמלית (ניצבת) של הגל.

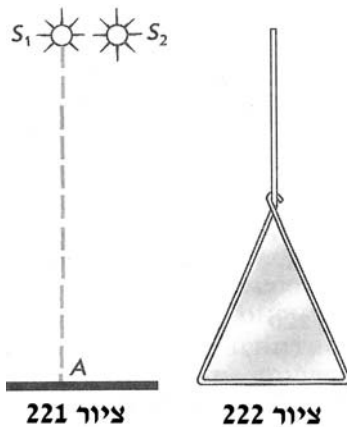
פתרון

לערך המקסימלי של k מתאים $\sin \varphi = 1$ (ראו נוסחה (8.17)). לכן:

$$k = \frac{d}{\lambda} = 4$$

מקבץ תרגילים 10

- שני מקורות קוהרנטיים S_1 ו- S_2 פולטים אור באורך גל $\lambda = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$. המקורות נמצאים במרחק $d = 0.3 \text{ cm}$ זה מזה. המסך נמצא במרחק 9 m מהמקורות. מה יופיע בנקודה A של המסך (ציור 221): כתם בהיר או כתם כהה?
- תארו באופן מקורב תבנית פסי התאבכות, המופיעה בשכבת סבון, שנוצרה במסגרת משולשת התלויה אנכית (ציור 222).



תורת האור האלקטרומגנטית

3. הגדלת קוטר הפתח במסך עשויה לגרום להפחתת ההארה עליו לאורך ציר האלומה. כיצד מתיישב הדבר עם חוק שימור האנרגיה? הרי דרך פתח גדול יותר תעבור אל המסך אנרגיה רבה יותר!
4. גל אור מונוכרומטי פוגע אנכית בסריג עקיפה בעל מחזור $d = 1.2 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$. הזווית בין סדרי הספקטרום 2 ו-3 שווה ל- $2^\circ 30' = \Delta\phi$. מהו אורך הגל של האור?

תקציר פרק 8

1. מהירות האור בריק נמדדה באופן ניסויי, והיא שווה בערך ל- $300,000 \text{ km/sec}$.
בכל סוגי התווך מהירות האור קטנה יותר מאשר בריק.
2. שבירת אור על משטח הגבול בין שני סוגי תווכים נובעת משינוי מהירות האור במעבר האור מתווך אחד לאחר. מקדם השבירה היחסי שבין שני סוגי תווך שווה ליחס מהירויות האור בהם.
3. יישום רב נעשה בעדשה – שהיא גוף שקוף, המוגבל במשטחים כדוריים. יש להבחין בין עדשות מרכזות לבין עדשות מפזרות. אלומת קרניים מקבילות, הפוגעת בעדשה מרכזת, מתכנסת בנקודה אחת במישור מוקד העדשה. אלומת קרניים מקבילות, הפוגעת בעדשה מפזרת, מתבדרת, והמשכי הקרניים מתכנסות במישור המוקד המדומה של העדשה.
נוסחת העדשה קושרת את מרחק המוקד F (המרחק מהעדשה למוקד) למרחק d מהעצם לעדשה ולמרחק f מהעדשה לדמות:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$$

- הערכים F , f ו- d בנוסחה זו עשויים להיות חיוביים או שליליים: ערכים חיוביים מתאימים למוקד, לדמות ולעצם ממשיים; וערכים שליליים – למדומים.
4. כפי שגילה ניוטון לראשונה, תלוי מקדם השבירה של האור בצבעו. צבעו של האור נקבע על-ידי תדירות התנודות (או אורך הגל). תלות מקדם השבירה בתדר התנודות מכונה **נפיצה**. הנפיצה גורמת למנסרה לפרק אור לבן לספקטרום. מהירות האור ואורך הגל קטנים במעבר אור מריק לתווך, אך תדירות התנודות אינה משתנה.

תורת האור האלקטרומגנטית

5. גלי אור בעלי אורך גל שווה והפרש מופעים קבוע נקראים **קוהרנטיים**. כאשר גלים קוהרנטיים חופפים, מתרחשת התאבכות של האור. הגלים מגבירים או מחלישים זה את זה בהתאם להפרש הדרכים האופטיות לאורך קו התקדמותם. גלים קוהרנטיים עשויים להיווצר במהלך החזרה של גלי אור משני משטחים של שכבה דקה. מכיוון שהפרש המופעים של גלים קוהרנטיים תלוי לא רק בעובי השכבה, אלא גם באורך הגל, גורמת הארת השכבה באור לבן להיווצרות של תמונת התאבכות צבעונית.
6. גלי אור עוקפים מחסומים, שגודלם משתווה לאורך הגל. זוהי **עקיפת אור**. מכיוון שאורך הגל של אור הוא קטן מאוד (מסדר גודל של 10^{-5} cm), דורשת צפייה בתופעה אמצעים מיוחדים. עקיפת אור מציבה גבול לכושר ההפרדה של המיקרוסקופ והטלסקופ.
7. חוקי האופטיקה הגיאומטרית מתקיימים באופן מקורב – בתנאי שגודל המחסומים בדרכם של גלי האור גדול בהרבה מאורך הגל.
8. תופעת העקיפה מנוצלת במכשיר המכונה **סריג העקיפה**, המהווה אוסף של מספר רב של חריצים, המופרדים במרווחים צרים. את ערכי הזוויות φ , המגדירות את כיווני המקסימום של תבנית העקיפה, מוצאים מהשוויון:
 $d \sin \varphi = k\lambda$, כאשר: $k = 0, 1, 2, \dots$ – מחזור הסריג.
 הסריג מפרק את האור הלבן לספקטרום; בעזרתו אפשר למדוד את אורך גלי האור.
9. גלי אור הם גלי רוחב. עובדה זו הוכחה באופן ניסויי בהסתכלות על מעבר אור דרך תווך, שתכונותיו תלויות בכיוון הפעולה. דוגמה לתווך כזה הוא הגביש. גל אופטי, שמתרחשות בו תנודות במישור מסוים, מכונה **גל מקוטב**. האור הנוצר על-ידי מקור רגיל (אור טבעי) אינו מקוטב. התנודות בגל האור מתרחשות בכל הכיוונים במישור המאונך לכיוון ההתקדמות.
10. בהתאם לתורה האלקטרומגנטית של האור, האור הוא גל אלקטרומגנטי רוחבי. הוכחת תכונה זו של האור היוותה שלב חשוב בהכרת התורה האלקטרומגנטית של האור.