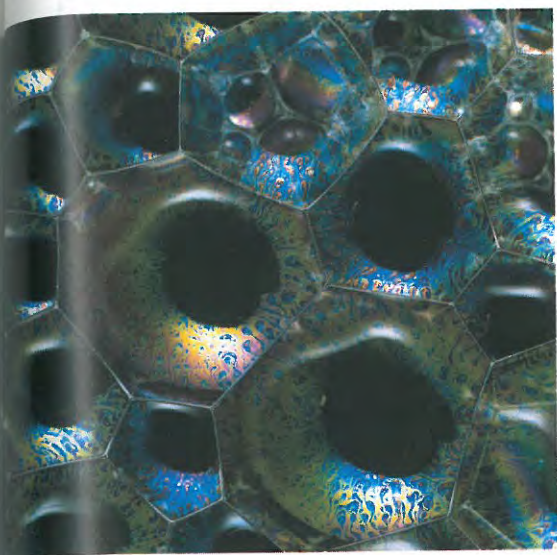


גלי אור



הצבעים נוצרים בהתאבכות
בין קרני אור המוחזרות
מהמשטח הקדמי
ומהמשטח האחורי של
קרום הבועות המימי.

השליכו אבן אל בריכה רוגעת, ועל פני המים יתפשטו גלים. הקישו בקולן מוסיקלי, וגלי קול יתפשטו בכל הכיוונים. בדומה לכך, אם תציתו גפרור, יתפשטו גלי אור בכל הכיוונים במהירות עצומה ממש - 300,000 קילומטרים בשנייה. בפרק זה נלמד על טבעו הגלי של האור. בפרק הבא נראה כי לאור יש גם תכונות של חלקיק, אך לפי שעה נסתפק בחקירת אחדות מן התכונות הגליות של האור: עקיפה, התאבכות וקיטוב.

איור 28.1

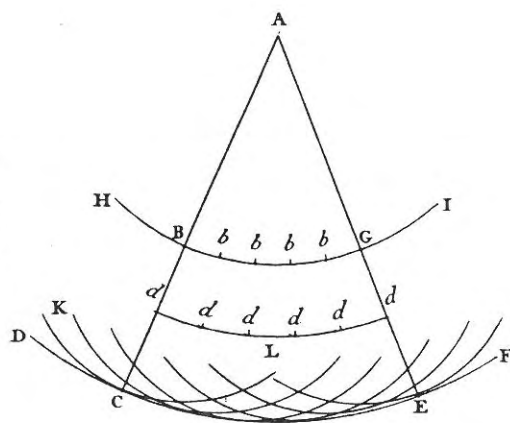
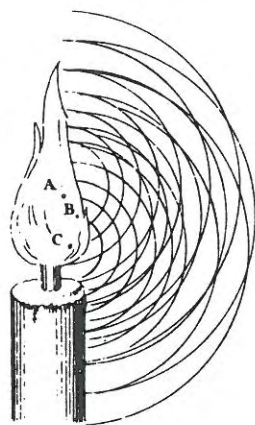
חזיתות הגל של גלי מים.



אמנם לגליליאו מייחסים את בניית המתקן הראשון שבו מטוטלת הפעילה מערכת של גלגלי שיניים, אך כריסטיאן הויגנס ההולנדי הוא שבנה את שעון המטוטלת הראשון. ואולם הויגנס ידוע בעיקר בזכות הרעיון שהגה על אודות הגלים. הוא טען כי ניתן לראות גל המתפשט ממקור נקודתי כאילו הוא מורכב מגלים משניים רבים החופפים זה את זה (איור 28.2). במילים אחרות, חזיתות גל נבנות מחזיתות של גלים זעירים. רעיון זה מכונה **עקרון הויגנס***.

עקרון הויגנס

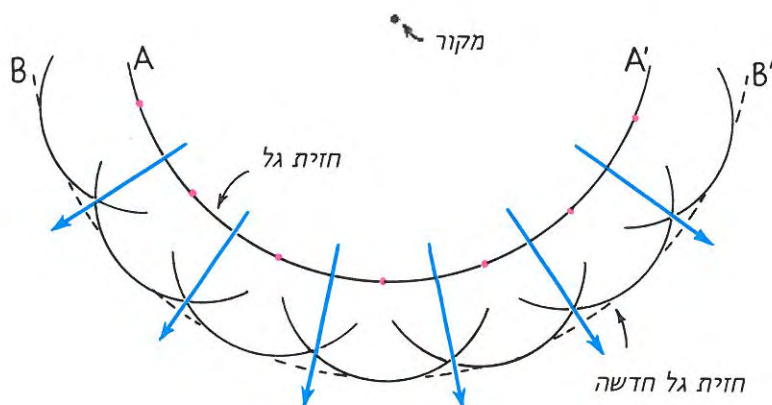
* בשנת 1665, 20 שנה לפני שהציע הויגנס את ההיפותזה שלו בדבר חזיתות הגל, כבר הציע הפיסיקאי האנגלי רוברט הוק תיאוריה שלפיה האור הוא גל.



איור 28.2

שרטוטים מתוך ספרו של הויגנס "חיבור על האור". אור היוצא מנקודה A מתפשט בחזיתות גל שכל נקודה בהן מתפשטת כאילו היתה מקור חדש לגלים. גלים זעירים משניים היוצאים מהנקודות המסומנות b יוצרים חזית גל חדשה (המסומנת בנקודות d); גלים משניים מנקודות אלה יוצרים חזית גל חדשה (DCEF).

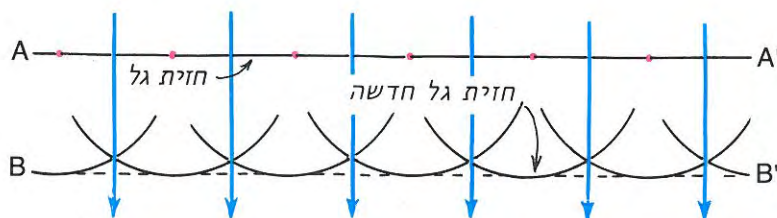
נתבונן בחזית הגל הכדורית שבאיור 28.3. אם כל נקודה לאורך חזית הגל AA' משמשת מקור לגל זעיר חדש, אזי כעבור זמן קצר יבנו גלים זעירים אלה, החופפים חלקית, משטח חדש BB' , שניתן לראותו כמעטפת של מכלול הגלים הזעירים. באיור משורטטים רק אחדים מאין-סוף הגלים הזעירים, שבהתרכבם



איור 28.3

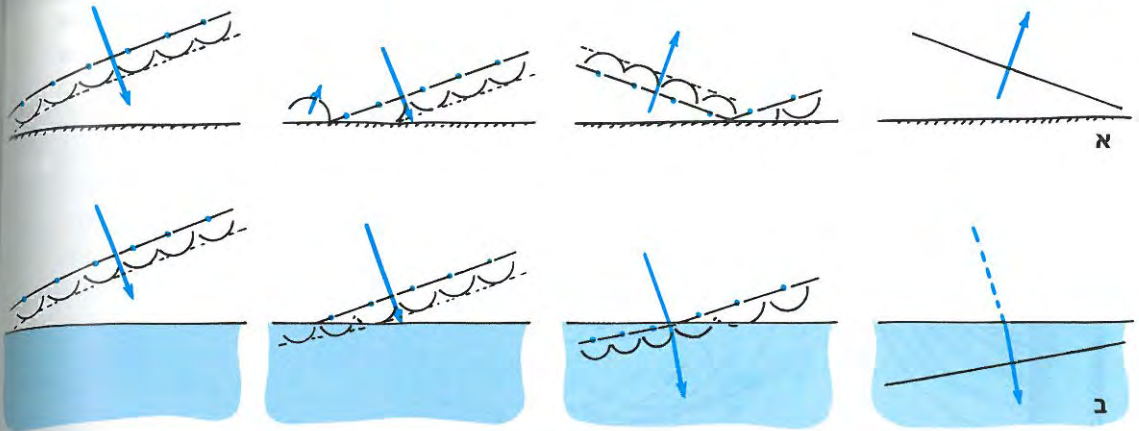
עקרון הויגנס מיושם בחזית גל כדורית.

יוצרים מעטפת חלקה, BB' . עם התפשטות הגל, כל קטע בחזיתו נראה פחות עקום. במרחק גדול מאוד מהמקור הראשוני הגלים מהווים מישור כמעט - כאלה הם, למשל, הגלים המגיעים אלינו מן השמש. בניית חזית גל מישורית בהרכבה של הגלים הזעירים על פי שיטת הויגנס מתוארת באיור 28.4. גם את



איור 28.4

עקרון הויגנס מיושם בחזית גל מישורית.



איור 28.5

עקרון הויגנס מיושם
(משמאל לימין) (א) במקרה
של החזרה, (ב) במקרה של
שבירה.

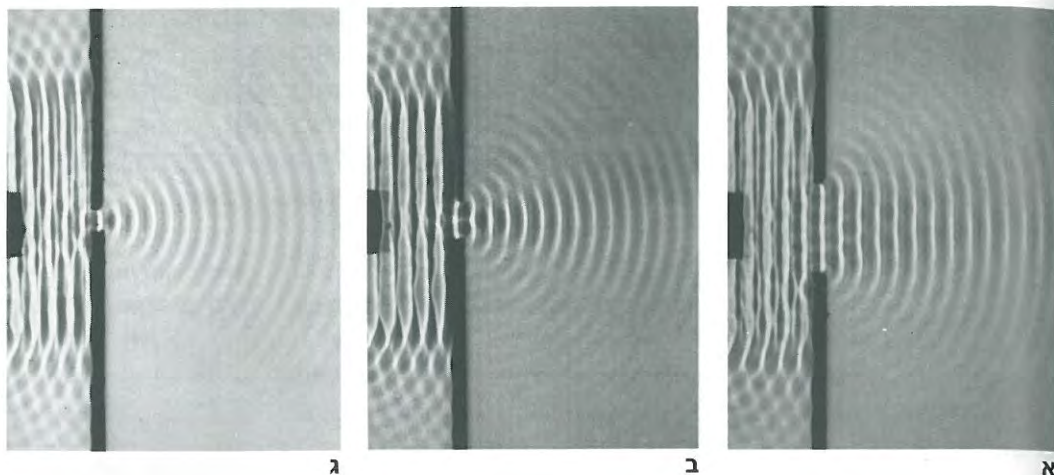
חוקי ההחזרה והשבירה ניתן לתאר בעזרת העיקרון של הויגנס, כמתואר באיור 28.5.

ניתן ליצור גלים מישוריים במים אם חוזרים וטובלים בהם פעמים רבות מוט ישר, למשל סרגל (איור 28.6). התצלומים באיור 28.7 הם מבט מלמעלה על אמבט גלים שגלים מישוריים נוצרים בו בעקבות תנודות של סרגל במים. הסרגל אינו נראה בתמונה, אך הגלים המישוריים הנוצרים נראים כשהם פוגעים בפתחים בעלי גדלים שונים. באיור 28.7א הפתח רחב, ואנו רואים את הגלים המישוריים ממשיכים בדרכם דרך הפתח בלא שיחול בהם שינוי - מלבד בקצוות, שם הם מתכופפים אל תוך תחום ה"צל" של המחסום, כצפוי לפי עקרון הויגנס. אם מצמצמים את רוחב הפתח כבאיור 28.7ב, שיעור הולך וקטן של הגל הפוגע מצליח לעבור דרכו, והתפשטות הגלים אל תוך תחום ה"צל" ניכרת יותר. כאשר הפתח קטן ביחס לאורך הגל של הגלים הפוגעים (איור 28.7ג), ניתן לראות בבירור את העיקרון של הויגנס בפעולה: כל חלק בחזית הגל משמש מקור לסדרה של גלים זעירים חדשים. קל לראות כיצד, עם פגיעת הגלים בפתח הצר, המים המשתכשכים מעלה-מטה בפתח פועלים כ"מקור"

איור 28.6

הסרגל המתנודד יוצר גלים
מישוריים באמבט המים.
המים המתנודדים בפתח
פועלים כמקור של גלים,
המתפשטים כמניפה בצידו
השני של המחסום.





איור 28.7

גלים מישוריים עוברים דרך פתחים בגדלים שונים. ככל שהפתח צר יותר כיפופו של הגל בשוליו גדול יותר.

נקודתי למניפת הגלים החדשים המתפשטים מעבר למחסום. התפשטות זו של הגלים מעבר למחסום אל תוך תחום "הצל" נקראת עקיפה.

בפרק הקודם למדנו כיצד אור יכול לסטות ממסלולו הרגיל לאורך קו ישר בעקבות החזרה או שבירה; כאן לפנינו גורם נוסף שיכול להביא לסטיית האור ממסלולו המקורי. כל סטיית-כיוון של האור שאינה נובעת מהחזרה או משבירה נקראת **עקיפה**. עקיפה דומה לזו של גלי המים המישוריים המתוארת באיור 28.7 מתרחשת בכל סוגי הגלים, ובכללם גלי אור.

כאשר אור עובר דרך פתח שממדי גדולים ביחס לאורך הגל של האור, הוא מטיל צל הדומה לזה המתואר באיור 28.8א. אנו נראה גבול חד למדי בין האזור המואר לאזור האפל, אזור הצל. אך אם ניצור סדק צר - למשל בקרטון אטום, באמצעות סכין גילוח - ונעביר דרכו אור, נראה שמתרחשת עקיפת אור (איור 28.8ב). הגבול החד שבין השטח המואר לשטח האפל נעלם, והאור מתפשט כמניפה ויוצר שטח בהיר ההולך ונמוג בהדרגה אל תוך המשטח האפל ללא גבול ברור. זוהי תופעת העקיפה בגלי אור.

עקיפה

איור 28.8

(א) שוליו של פתח מואר מטילים צל חד כשהפתח גדול ביחס לאורך הגל של האור. (ב) כשהפתח צר, מתרחשת עקיפה ניכרת והצל נראה מטושטש.



באיור 28.9 מוצג גרף של התפלגות עוצמת האור לאור שעבר עקיפה דרך סדק צר יחיד. בשל העקיפה המעבר מחושך לאור אינו חד והשינוי בעוצמת האור הוא הדרגתי. אם נעביר מד-אור לאורך המסך, הוא יחשוף בפנינו שינוי הדרגתי בעוצמת האור - מחושך עד לעוצמה מרבית. (למעשה יש פסי אור חיוורים משני צידי שיא העוצמה המרכזי; בהמשך נראה כי אלה מעידים על קיומה של תופעת ההתאבכות, הבולטת יותר במקרה שהסדק כפול או כשיש סדקים מרובים).



איור 28.9

גרף של עוצמת האור הפועג במסך לאחר שעבר עקיפה דרך סדק צר יחיד.

תופעת העקיפה אינה מוגבלת לסדקים צרים, אף לא לפתחים קטנים כלשהם; ניתן להבחין בה בכל מקום שבו מוטל צל. בחינה מדוקדקת מגלה כי אפילו הצל החד ביותר מטושטש מעט בקצותיו (איור 28.10).

שיעור העקיפה תלוי ביחס בין אורך הגל לגודל המחסום המטיל את הצל. ככל שאורך הגל גדול יותר ביחס למחסום כך תהיה העקיפה ניכרת יותר. גלים ארוכים יעילים יותר במילוי אזורי הצל. זו הסיבה לכך שצופרי אוניות פולטים גלי קול בתדירות נמוכה - כדי שהצלילים יגיעו גם לאזורים המוסתרים במחסומים למיניהם. כך קורה גם בשידורי AM הרגילים של הרדיו, שאורך הגל שלהם גדול מאוד ביחס לממדי רוב העצמים שבדרכם. אורך הגלים של שידורי AM הוא בין 180 ל-6000 מטרים, והם עוקפים בקלות מבנים ועצמים אחרים שעלולים היו לחסום אותם. גלי רדיו ארוכים אינם "מבחינים" כלל במבנים קטנים יחסית הניצבים בדרכם; הם עוקפים מבנים אלה ומגיעים למקומות שגלים קצרים יותר היו מתקשים להגיע אליהם.

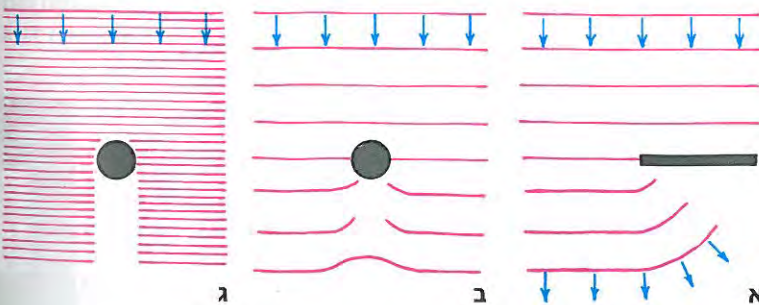
שידורי FM נעשים בגלים קצרים יותר, מ-2.7 עד 3.7 מטרים, ואינם עוקפים בקלות בניינים העומדים בדרכם. זו הסיבה לכך שבמקומות רבים קליטת שידורי FM חלשה בעוד שידורי AM נקלטים בבירור ובקול רם. כשמדובר בשידורי רדיו, איננו מעוניינים שהגלים יושפעו מהמכשולים שבדרכם ולכן העקיפה היא תופעה מועילה.

ואולם, העקיפה אינה מועילה כלל כשמעוניינים להבחין בעצמים זעירים באמצעות מיקרוסקופ-אור רגיל. אם גודל העצם קרוב לאורך הגל של האור, הדמות שתיראה במיקרוסקופ תהיה מטושטשת בשל העקיפה. אם העצם קטן מאורך הגל של האור הוא לא ייראה כלל, ודמותו תיעלם בגלל העקיפה. שום הגדלה או שכלול של מבנה המיקרוסקופ אינם מסוגלים להתגבר על מגבלה בסיסית זו של העקיפה.



איור 28.10

פסי עקיפה ניכרים בצל שמטיל לייזר המקרין אור בתדירות יחידה. אילו הטיל המקור אור לבן היו פסים אלה מתמלאים בשפע של פסים באורכי גל אחרים.



איור 28.11

(א) גלים נעים להתפשט אל תחום הצל. (ב) כשאורך הגל קרוב לגודלו של העצם, הצל מתמלא עד מהרה. (ג) כשאורך הגל קטן ביחס לגודלו של העצם, נוצר צל חד.

כדי לצמצם תופעה זו עד למינימום, משתמשים במיקרוסקופים שבהם "מאירים" את העצמים הזעירים לא בגלי אור כי אם באלומות אלקטרונים; זהו מיקרוסקופ אלקטרוני. אמנם גם לאלקטרונים, כמו לכל חלקיקי החומר, יש תכונות של גלים, אך אורך הגל שלהם קצר בהרבה (נדון בעניין זה ביתר פירוט בפרק 30). לכן, במיקרוסקופ אלקטרוני ניתן להבחין בפרטים זעירים יותר מאשר במיקרוסקופ אופטי, המוגבל לאורכי הגל הגדולים יותר של האור הנראה. במיקרוסקופ האלקטרוני, שדות חשמליים ומגנטיים - ולא עדשות אופטיות - משמשים לצורך מיקוד והגדלה.

הדולפינים מנצלים באופן מופלא את העובדה שניתן להבחין בפרטים קטנים יותר בעזרת אורכי גל קצרים יותר. הם סורקים את סביבתם בגלים על-שמעיים (אולטרה-סאונד). ההדים המוחזרים של גלי קול ארוכים מספקים לדולפין בבואה כללית של העצמים שבסביבתו. כדי לבחון פרטים עדינים יותר, רק הדולפין משמיע קולות באורכי גל קצרים יותר, כפי שכבר הזכרנו בפרק 19. רק לאחרונה למדו הרופאים לנצל שיטה זאת - דימות בגלי-קול על-שמעיים.

שאלה

מדוע מעדיפים להשתמש באור כחול להארת העצמים הנחקרים מבעד למיקרוסקופ?

באיור 28.12 מוצגות תמונות התאבכות נאות שהפיק הפיסיקאי צ'אק מֶנְקֶה. הוא הציב פיסות של סרט צילום בצילו של בורג שהוא באור לייזר מסונן. הפסים הנראים בשתי התמונות נוצרו כתוצאה מהתאבכות, שדנו בה לראשונה

התאבכות

איור 28.12

(א) פסי התאבכות כהים שנוצרו כתוצאה מעקיפת האור ניכרים סביב צילו של בורג שהוא באמצעות לייזר. (ב) בעקבות חשיפה ממושכת יותר נראים בתוך תחום הצל גם פסי התאבכות בהירים, שנוצרו בהתאבכות בונה.



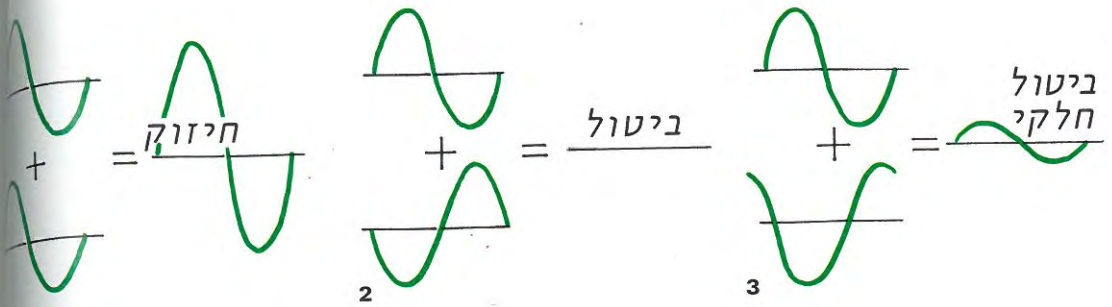
ב



א

תשובה:

באור הכחול, העקיפה מן העצמים הנצפים פחותה מזו המתרחשת באורכי הגל האחרים, הארוכים יותר. לכן ניתן לראות במיקרוסקופ פרטים רבים יותר באור הכחול קצר-הגל, ממש כפי שהדולפין בוחן באופן כה מתוחכם את פרטי סביבתו בעזרת ההדים המוחזרים של גלי הקול האולטרה-קצרים שהוא משגר.



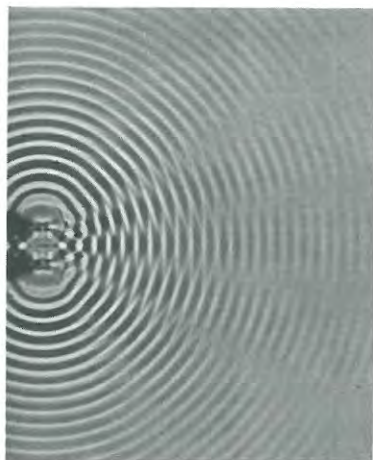
בפרק 18. באיור 28.13 מוצגות, פעם נוספת, תופעת ההתאבכות הבונה ותופעת ההתאבכות ההורסת. ניתן לראות כי בחיבור - או הרכבה (סופרפוזיציה) - של זוג גלים זהים בעלי מופע שווה נוצר גל בעל אותה תדירות אך בעל משרעת כפולה. אם הגלים נמצאים במופע מנוגד בדיוק, כלומר, מוזזים בחצי אורך גל זה ביחס לזה, התוצאה של הרכבתם תהיה ביטול מוחלט של הגלים. אם הם מצויים במופעים שונים זה מזה אך לא מנוגדים, הביטול יהיה חלקי. התאבכות של גלי מים היא מראה שכיח, כמתואר באיור 28.14. במקומות מסוימים יש חפיפה בין שיא-גל לשיא-גל ובמקומות אחרים יש חפיפה בין שיא של גל אחד לשקע של גל אחר.

איור 28.13
התאבכות גלים.

איור 28.14
התאבכות בגלי מים.



אם עורכים את הניסוי בתנאים מבוקרים יותר, נוצרות תבניות מעניינות כששני מקורות-גל מוצבים זה בצד זה (איור 28.15). בתדירות מבוקרת, מטפטפים טיפות מים אל תוך מכל של מים רדודים (אמבט גלים), והתבנית שנוצרת מצולמת מלמעלה. שימו לב לכך שאזורים של התאבכות בונה ושל התאבכות הורסת פוגעים בדופן הימנית של אמבט הגלים, וכי מספר האזורים האלה והמרחקים ביניהם תלויים במרחק שבין מקורות הגלים ובאורך הגל של הגלים (או בתדירותם). תופעת ההתאבכות אינה מוגבלת לגלי מים - אם כי אותם קל לראות; זוהי תכונה כללית של גלים.

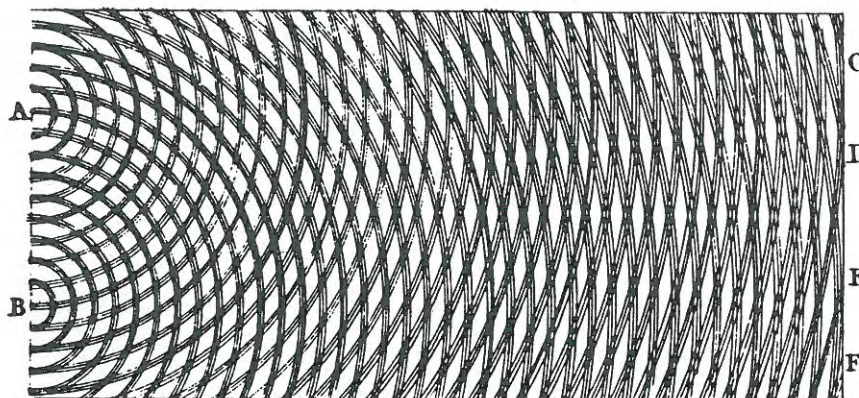
**איור 28.15**

תבניות התאבכות של גלים
חופפים היוצאים משני
מקורות מתנודדים.

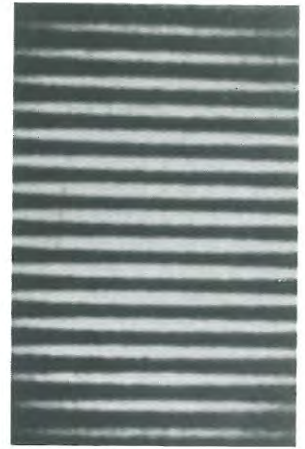
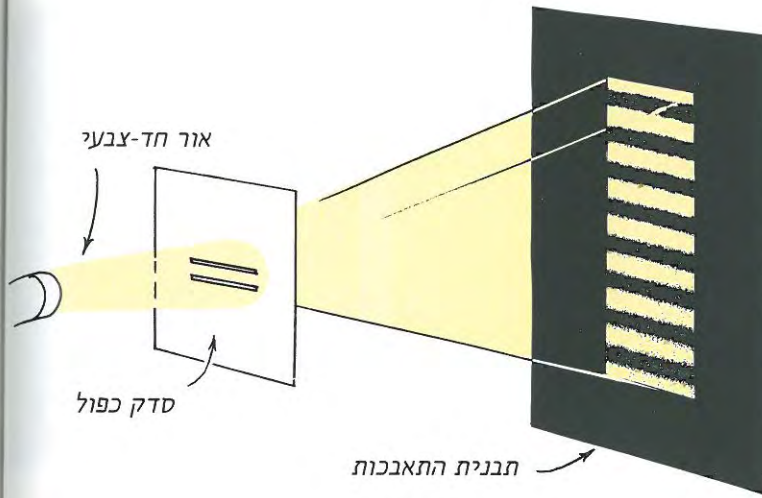
בשנת 1801 הדגים הפיסיקאי והרופא הבריטי תומס יאנג את תכונותיו הגליות של האור באורח משכנע, כשערך את ניסוי ההתאבכות המפורסם שלו*. יאנג גילה כי אור העובר דרך שני חריצים זעירים הקרובים זה לזה יוצר תבנית של פסים בהירים וכהים על מסך הנמצא מעברם השני של החריצים. פסי ההתאבכות הבהירים נוצרים מגלי אור המגיעים משני החריצים באופן ששיא-גל פוגש שיא ואילו האזורים הכהים נוצרים במקום שבו שיא פוגש שקע. איור 28.16 הוא השרטוט של יאנג המתאר את תבניות שני הגלים משני המקורות כשהן מורכבות זו על גבי זו. כיום נהוג לערוך את הניסוי של יאנג כשאת מקום החריצים תופסים שני סדקים צרים וסמוכים, כך שתבנית ההתאבכות מורכבת מפסים ישרים (איור 28.17).

איור 28.16

שרטוטו המקורי
של תומס יאנג
לתבנית התאבכות
משני מקורות.
האותיות C, D, E
ו-F מציינות
אזורים של
התאבכות הורסת.



* תומס יאנג קרא ברהיטות כבר בגיל שנתיים; עד גיל 4 כבר סיים לקרוא את התנ"ך פעמיים; בגיל 14 שלט בשמונה שפות. בבגרותו היה רופא ומדען, שתרם להבנת תכונותיהם של זורמים ולהבנת מושגי העבודה והאנרגיה ואלסטיות החומרים. הוא היה הראשון שקידם את פענוח כתב החרטומים המצרי. אין ספק - בחור מבריק, תומס יאנג זה!



איור 28.17

אור חד-צבעי העובר דרך זוג סדקים צרים סמוכים יוצר תבנית של פסי התאבכות.

באיור 28.19 ניתן לראות כיצד נובעים הקווים הבהירים והכהים מההפרש בין אורכי הדרכים שמן הסדקים למסך. המרחקים משני הסדקים אל פס ההתאבכות המרכזי שווים, לפיכך הגלים מגיעים במופע שווה ומחזקים זה את זה. הפסים האפלים משני צידיו של הפס המרכזי נובעים מהבדל של חצי אורך גל בין המרחקים מהסדקים למסך. הגלים מגיעים לנקודות אלה כשבין מופעיהם שורר הבדל של חצי אורך גל, או 180° , כלומר הם מגיעים במופע מנוגד. הפסים האפלים האחרים נוצרים כשההבדל בין דרכי הגלים הוא כפולה אי-זוגית של מחצית אורך הגל: $\frac{3}{2}$, $\frac{5}{2}$ וכו'.



איור 28.18

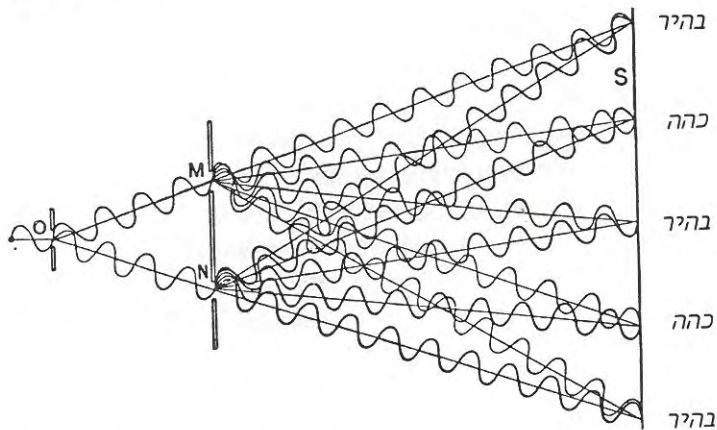
פסים בהירים נוצרים כשגלים משני הסדקים נפגשים במופע שווה; אזורים כהים נוצרים עקב חפיפת גלים במופע מנוגד.

שאלות

1. אילו האירו את זוג הסדקים באור חד-צבעי אדום, האם היו המרחקים בין פסי ההתאבכות גדולים יותר או קטנים יותר מבניסוי שבו האירו אותם באור חד-צבעי כחול?
2. מדוע חשוב להשתמש באור חד-צבעי?

תשובות:

1. המרחקים היו גדולים יותר. התוכלו להבחין באיור 28.19 כי המרחק מסדק הכניסה אל פס ההתאבכות האפל הראשון על המסך יהיה ארוך מעט יותר, ולכן המרווח בין הפסים יגדל עבור אורך הגל הגדול יותר של האדום?
2. אם מתאבך בסדקים אור בעל אורכי גל שונים, הפסים האפלים של אורך גל אחד יוסתרו על ידי פסים בהירים של אורך גל אחר, ותמונת ההתאבכות לא תהיה ברורה. אם לא ראיתם זאת בקשו מהמורה לערוך בפניכם הדגמה.

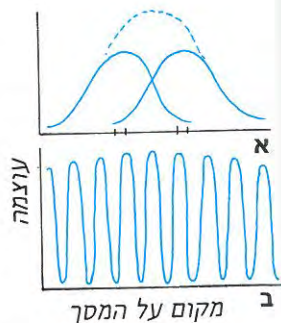


איור 28.19

אור מהמקור O עובר דרך הסדקים M ו-N ויוצר תבנית התאבכות על המסך S.

תארו לעצמכם שבשעה שעורכים את ניסוי שני הסדקים, מכסים את אחד הסדקים ומניחים לאור לעבור דרך סדק אחד בלבד. במצב זה האור יתפשט לאחר המעבר בסדק ויאיר את המסך בתבנית עקיפה פשוטה כפי שתיארנו קודם (איור 28.9). אם כעת נכסה את הסדק האחר ונניח לאור לעבור דרך הסדק שזה עתה היה מכוסה, תתקבל על המסך תבנית הארה דומה, אך מוסטת במקצת בשל מקומו השונה של הסדק. יכולנו לצפות כי במצב שבו שני הסדקים פתוחים, יתקבל חיבור פשוט של שתי תבניות הסדקים הבודדים, כמתואר באיור 28.20. אך לא זה המצב: על המסך מתקבלת תבנית של פסים בהירים וכהים לסירוגין, כמתואר באיור 28.20 - תבנית התאבכות. חשוב לציין כי התאבכות האור אינה יוצרת אנרגיית אור נוספת ואינה ממעיטה מזו הקיימת; היא פשוט משנה את חלוקתה.

תבניות התאבכות אינן מוגבלות לסדק אחד או לשני סדקים. מספר גדול מאוד של סדקים צפופים, זה ליד זה, מהווים סריג עקיפה (איור 28.21). התקנים כאלה, בדומה למנסרות, מפרידים את האור לצבעים שמהם הוא מורכב. אך שלא כמנסרה, המפרידה את האור בתהליך של שבירה, סריג עקיפה גורם להפרדת הצבעים בהתאבכות. סריגים משמשים למטרה זאת במכשיר המכונה ספקטרומטר, שנדון בו בפרק הבא, ובחיי יומיום הם משמשים בתכשיטים שונים. החומר מכוסה בסדרה של סריטות זעירות וקרובות זו לזו הגורמות להתאבכות האור ולהפרדתו לשלל צבעי ספקטרום זוהרים. ניתן לראות זאת גם בצבעים הססגוניים המעטרים את נוצותיהן של ציפורים מסוימות, ובשלל הצבעים המתגלים בהתאבכות מן השקערוריות הזרועות בצפיפות על פני המשטח המחזיר של תקליטורי שמע (קומפקט-דיסקים).

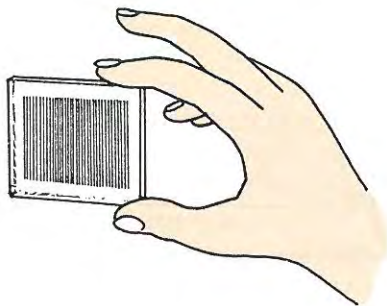


איור 28.20

האור העובר עקיפה בשני הסדקים אינו יוצר חיבור של עוצמות כמתואר ב-(א). תבנית העוצמות נראית כמו (ב) בגלל התאבכות.

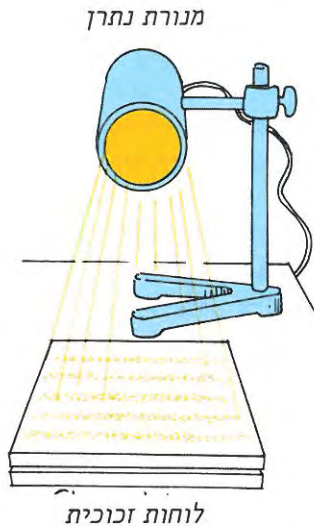
איור 28.21

סריג עקיפה מפצל את האור לצבעיו בתהליך של התאבכות. סריגים משמשים בספקטרומטרים במקום מנסרות.



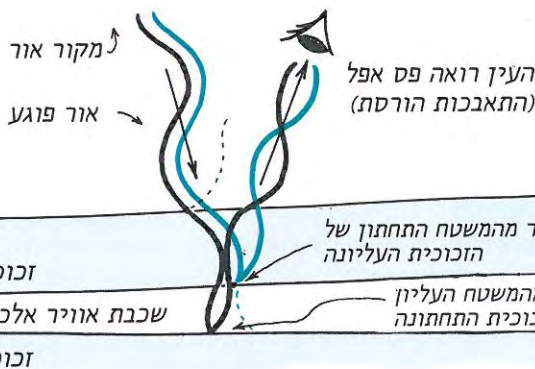
התאבכות אור חד-צבעי בשכבה דקה

דרך אחרת ליצירת פסי התאבכות היא החזרת האור מהמשטח העליון ומהמשטח התחתון של שכבת חומר דקה. קל להדגים זאת בעזרת מקור אור חד-צבעי ושני לוחות זכוכית. מנורת אדי נתן היא מקור טוב לאור חד-צבעי. מניחים את שני לוחות הזכוכית זה על גבי זה, כמתואר באיור 28.22. בקצה אחד של הלוחות מניחים ביניהם פיסת נייר דקיקה. כך נוצרת בין הלוחות שכבת אוויר דקיקה בעלת עובי משתנה. אם צופים בלוחות מזווית המאפשרת לראות את בבואת המנורה המשתקפת בהם, רואים כי הבבואה אינה רציפה אלא מורכבת מפסים בהירים וכהים.



איור 28.22
פסי התאבכות.

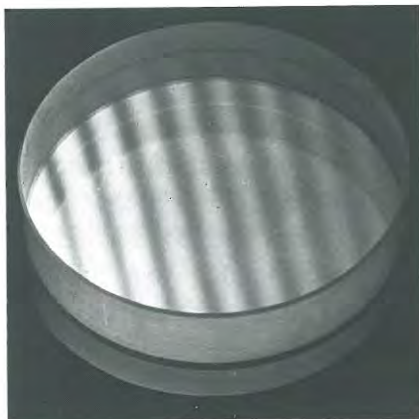
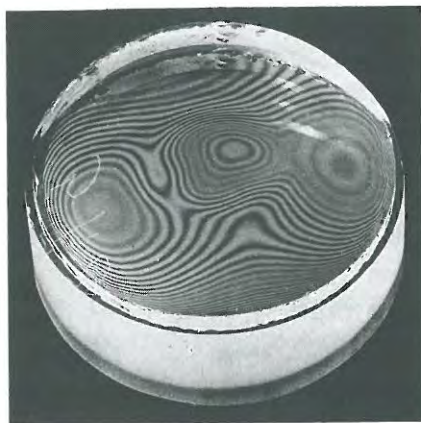
הסיבה להיווצרות הפסים היא התאבכות גלי האור המוחזרים ממשטח הזכוכית שמעל לשכבת האוויר האלכסונית וממשטח הזכוכית שמתחתיה. הדבר מתואר בהגזמה באיור 28.23. האור המוחזר מהאזור P של שכבת האוויר מגיע לעין בשני מסלולים שונים. במסלול האחד האור מוחזר מחלקה העליון של שכבת האוויר; במסלול האחר הוא מוחזר מחלקה התחתון. אם ממקדים את העין ב-P, שתי הקרניים מגיעות לאותה נקודה על רשתית העין. אך



איור 28.23
החזרות מהמשטח העליון ומהמשטח התחתון של שכבת אוויר דקה.

הקרניים עברו דרכים שונות ועשויות להיפגש על הרשתית כשהן במופע שווה או במופע מנוגד, בהתאם לעוביה של שכבת האוויר באותה נקודה - כלומר, בהתאם לדרך הנוספת שעברה הקרן האחת ביחס לאחרת. אם נתבונן במשטח הזכוכית כולו, נבחין באזורים בהירים וכהים לסירוגין. האזורים הכהים נוצרים במקום שבו עובי שכבת האוויר מתאים בדיוק ליצירת התאבכות הורסת, והאזורים הבהירים נוצרים במקום שבו שכבת האוויר עבה יותר או דקה יותר בדיוק בשיעור המתאים ליצירת התאבכות בונה, מצב שבו הקרניים מחזקות זו את זו. הפסים הכהים והפסים הבהירים נוצרים, איפוא, בשל התאבכות גלי אור המוחזרים משני צידיה של השכבה הדקה*.

אם משתמשים בלוחות זכוכית שמשטחי הפנים שלהם שטוחים לחלוטין, מתקבלת תבנית פסים אחידה. אך אם המשטחים אינם שטוחים לגמרי הפסים מתעוותים. התאבכות האור מאפשרת לבחון באופן רגיש ביותר עד כמה משטח נתון הוא מישורי. על משטחים שבהם מתקבלת תבנית אחידה אומרים שהם שטוחים מבחינה אופטית, כלומר - שטוחים ביחס לאורך הגל של האור הנראה (איור 28.24).

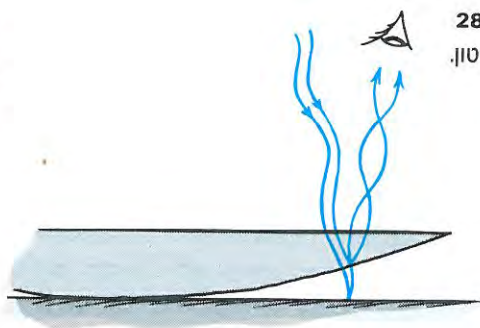
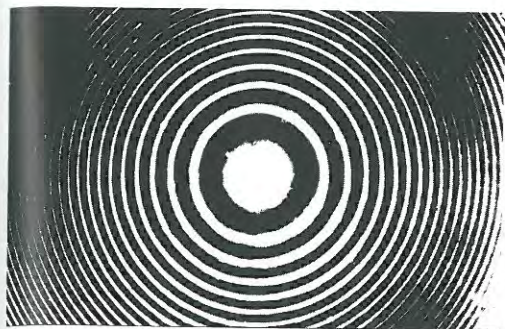


איור 28.24

לוחות אופטיים
משמשים לבדיקת
מידת המישוריות
של משטחים.

אם מניחים עדשה מישורית-קמורה על לוח זכוכית שטוח מבחינה אופטית ומאירים אותה מלמעלה באור חד-צבעי, נוצרת סדרה של טבעות, מוארות ואפלולות חליפות. תבנית זו מכונה טבעות ניוטון (איור 28.25). הטבעות המוארות והאפלולות נוצרות באותו אופן שבו נוצרים פסי ההתאבכות בלוחות המישוריים. על יסוד תופעה זו פותחה שיטת בדיקה המשמשת בתהליך ליטושן של עדשות מדויקות.

* הזווית מופע במשטחים מחזירי אור משפיעות גם הן על ההתאבכות. נזכיר זאת בקיצור בלבד: כשאור הנע בתווך מסוים מוחזר משטח פניו של תווך שני, שבו מהירות האור נמוכה יותר (כלומר, מקדם השבירה בו גדול יותר), חלה הזווית מופע של 180° בגל המוחזר. הזווית הזאת לא מתרחשת אם מהירות האור בתווך השני גדולה יותר (כלומר מקדם השבירה שלו קטן יותר). בדוגמה של שכבת האוויר האלכסונית שתיארנו, לא חלה הזווית מופע במשטח זכוכית-אוויר העליון, אך חלה הזווית של 180° במשטח אוויר-זכוכית התחתון. וכך, בנקודת החוד של האלכסון, שם עובי שכבת האוויר יורד לאפס, הזווית המופע בהחזרה השנייה גורמת להתאבכות הורסת ולפס אפל. כך יקרה גם בטבעות סבון שעוביה קטן במידה ניכרת מאורך הגל של האור.



איור 28.25
טבעות ניוטון.

שאלה

מה יהיה ההבדל בין טבעות ניוטון שיווצרו אם נאיר את העדשה באור אדום לבין אלה שיווצרו באור כחול?

צבעי התאבכות בהחזרה משכבות דקות

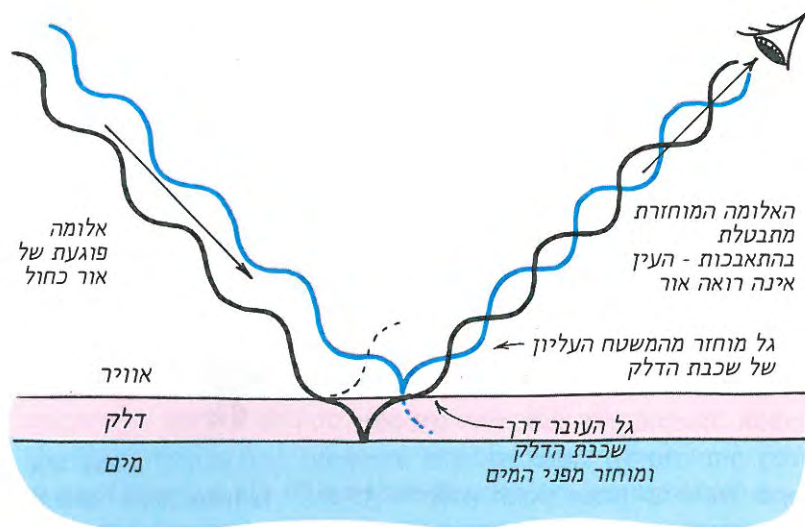
כולנו מכירים את שלל הצבעים הנפלאים המוחזרים מבוטות סבון או משכבת דלק על כביש רטוב. אנו מכירים גם את הצבעים הנאים המוחזרים מכנפיהן של ציפורים מסוימות, אשר נראים משנים את גוניהם עם תנועת הציפור. בשני המקרים הצבעים מופיעים עקב התאבכות של גלי אור. תופעה זו מתרחשת לעיתים קרובות בשכבות דקות.

בוטות סבון נראית בוהקת בשלל צבעים אם עובי שכבת הסבון שווה בקירוב לאורך הגל של האור. גלי האור המוחזרים מהמשטח החיצוני ומהמשטח הפנימי של שכבת הסבון עוברים דרכים שונות. כשמאירים את השכבה באור לבן, עוביה עשוי להתאים בדיוק ליצירת התאבכות הורסת של האור הצהוב, למשל. כשמפחיתים את האור הצהוב מאור לבן, התערובת הנותנת נראית בצבע המשלים לצהוב - בכחול. במקום אחר, שבו השכבה דקה יותר, עשוי להתבטל צבע אחר והאור שייראה יהיה בצבע המשלים לצבע זה. כך קורה גם בשכבה הדקיקה של דלק או שמן על כביש רטוב (איור 28.26). האור מוחזר הן ממשטח הדלק העליון והן מהמשטח דלק-מים התחתון. אם עובי הדלק מתאים בדיוק לביטולו של הכחול, כמתואר באיור, המשטח ייראה צהוב בעיני המתבונן. זאת משום שהפחתת הכחול מהאור הלבן מותירה את הצבע המשלים - הצהוב. הצבעים השונים נובעים איפוא מהשינויים בעובי השכבה הדקה, ונוצרת "מפת קווי גובה" ססגונית.

במבט מן הצד ניתן להבחין בצבעים גם אם עוביה של שכבת הדלק אחיד. במצב זה, האור המגיע לעין מחלקים שונים של המשטח הוא אור שהוחזר בזוויות שונות ועבר מרחקים שונים בתוך השכבה. ככל שזווית הפגיעה של האור שטוחה יותר, הקרן החודרת לתוך שכבת הדלק תעבור בה דרך ארוכה

תשובה:

באור האדום, בעל הגלים הארוכים יותר, המרווחים בין הטבעות יהיו גדולים יותר מאשר באור הכחול קצר-הגל. האם אתם מבינים את הסיבה הגיאומטרית לכך?



איור 28.26

שכבת הדלק הדקה הינה בדיוק בעובי המתאים לכך שאור כחול המוחזר ממשטחה העליון יתבטל על ידי אור בעל אותו אורך גל המוחזר מהמים.

יותר. לכן, בזווית פגיעה שטוחה יתבטלו, עקב ההתאבכות, הגלים הארוכים יותר. כך, בכל זווית של צפייה יתגלו צבעים שונים.

כאשר רוחצים כלים בסבון ולא שוטפים אותם כראוי, נשארת עליהם שכבה דקה של מי-סבון. החזיקו כלי כזה מול מקור אור באופן שיתגלו צבעי ההתאבכות. אחר כך הטו אותו למצב חדש בלא להסיר את העיניים מאותו חלק של הכלי, ותראו כיצד הצבעים משתנים. אור המוחזר מהמשטח התחתון של שכבת הסבון מבטל בהתאבכות הורסת אור המוחזר מהמשטח העליון של השכבה. אור באורכי גל שונים מתבטל בזוויות שונות.

ניתן למדוד את אורך הגל של האור הנראה ושל תחומים אחרים בספקטרום האלקטרומגנטי בשיטות המבוססות על תופעת ההתאבכות. עקרון ההתאבכות מאפשר גם מדידת מרחקים זעירים ביותר בדיוק רב. מכשירים הקרויים אינטרפרומטרים, המבוססים על עקרון ההתאבכות, הם המכשירים המדויקים ביותר למדידת מרחקים קטנים.

שאלות

- איזה צבע יראה מוחזר מבועת סבון באור השמש אם עוביה הוא כזה שהאור הירוק מתבטל?
- בטור הימני מובאת רשימה של דברים צבעוניים. הטור השמאלי הוא רשימה של סיבות להופעת צבעים. התאימו את הפריטים שבעמודה השמאלית לאלה שבימנית.

(א) נרקים צהוב	(1) התאבכות בשכבה דקה
(ב) שמים כחולים	(2) עקיפה והתאבכות מסריג
(ג) קשת בענן	(3) החזרה ברינית
(ד) נוצות תוכי חסרות צבענים	(4) שבירה
(ה) בועת סבון	(5) פיזור

תשובות:

- צירוף כל אורכי הגל מלבד הירוק נותן את הצבע המשלים, מגנטה (ורוד-סגול). ראו איור 26.9.
- א-3; ב-5; ג-4; ד-2; ה-1.