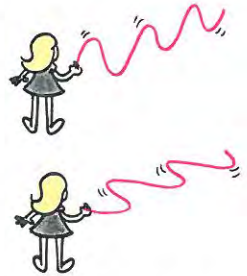


קִיטוּב

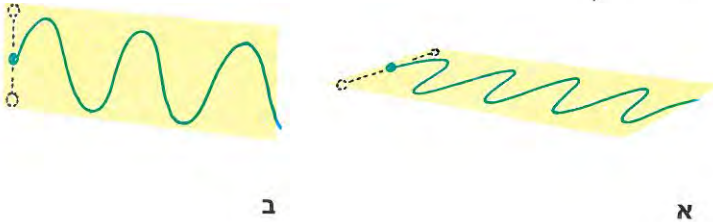


איור 28.27

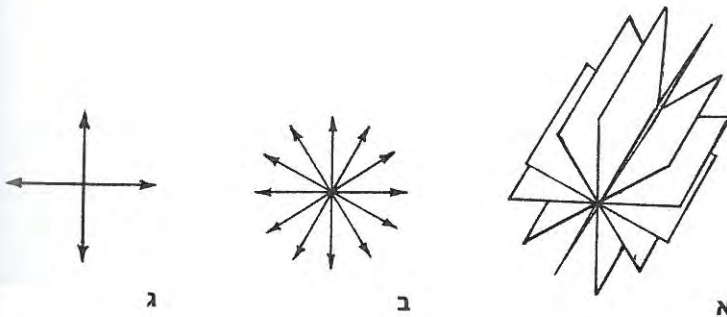
גל מישורי מקוטב אנכית וגל מישורי מקוטב אופקית.

איור 28.28

(א) גל מישורי מקוטב אופקית יוצא ממסען המתנווד אופקית. (ב) גל מישורי מקוטב אנכית יוצא ממסען המתנווד אנכית.



מקורות האור הרגילים כמו נורות להט, נורות פלואורסנטיות, להבת נר או מנורות קשת פולטים אור שאינו מקוטב. זאת משום שבמקורות אלו אין כיוון מועדף שבו מואצים המטענים המתנוודים היוצרים את האור. מספרם של מישורי התנודה עשוי להיות גדול כמספרם של המטענים המואצים. אחדים ממישורים אלה מוצגים באיור 28.29. את כל מישורי הקיטוב הללו ניתן לייצג באמצעות קווים רדיאליים (איור 28.29 ב), או באמצעות וקטורים בשני

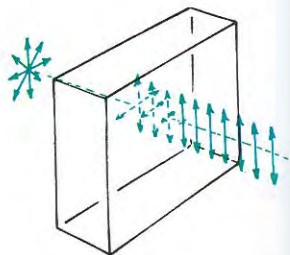


איור 28.29

הצגת מישורי הקיטוב של גלים מקוטבים מישורית.

* האור עשוי להיות גם מקוטב מעגלית או מקוטב אליפטית - גם אלה צורות קיטוב ניצבות. אך אנו לא נדון בכך כאן.

כיוונים מאונכים זה לזה (איור 28.29) - סכימה שבה נראים כל הווקטורים מאיור 28.29 לאחר שהופרדו לרכיביהם בשני הכיוונים המתוארים, האופקי והאנכי. סכימה זו היא פשוטה ונוחה לשימוש. במקרה שלנו התרשים מייצג אור בלתי מקוטב. אור מקוטב ייוצג באמצעות וקטור יחיד.



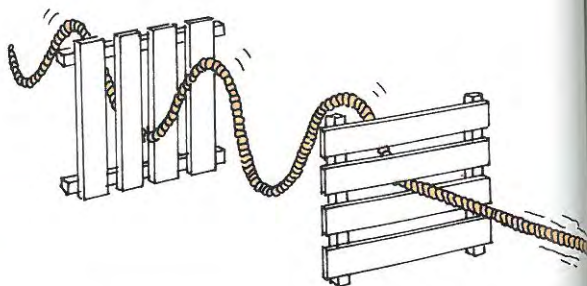
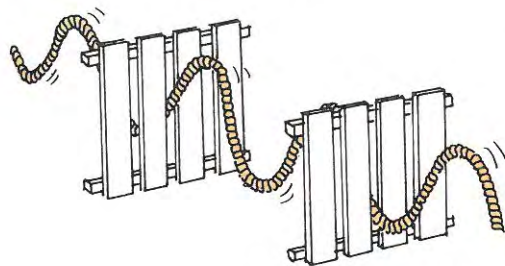
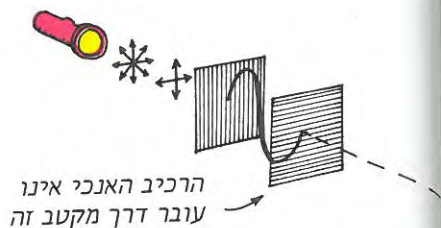
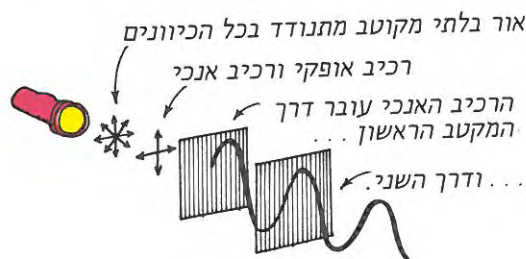
איור 28.30

רכיב אחד של האור הפוגע הבלתי מקוטב נבלע, ובשל כך האור היוצא מקוטב.

כל הגבישים השקופים שמבנם הטבעי אינו קובייתי ניחנו בתכונה מיוחדת: הם מעבירים את האור כך שתנודותיו מתקיימות בשני מישורים המאונכים זה לזה. גבישים מסוימים* לא זו בלבד שיוצרים שתי אלומות פנימיות מקוטבות המאונכות זו לזו, אלא גם בולעים במידה רבה אחת משתי האלומות ומעבירים את האחרת (איור 28.30). גביש מוכר מסוג זה, הגורם לקיטוב האור, הוא אבן החן טורמלין, אך כאן גם משתנה צבע האור המועבר. לעומת זאת, גבישי כינן יודי-גפרתי, המשמשים להכנת מסנני פולרואיד (מְקַטְבִּים), גורמים לקיטוב האור בלא לשנות את צבעו. גבישונים מיקרוסקופיים של חומר זה משובצים בין יריעות תאית שקופות כשהם מקבילים זה לזה. ישנם גם מקטבים העשויים ממולקולות מסוימות, המכוונות כולן במקביל זו לזו, ולא מגבישונים ועירים**. אם מתבוננים באור לא מקוטב דרך מקטב, ניתן לסובב את המקטב בכל כיוון בלי לראות שינויים באור. אך אם האור שצופים בו מקוטב, ניתן, תוך כדי סיבוב המקטב, להפחית עוד ועוד את כמות האור העוברת עד לחסימתו המוחלטת. מקטב אידיאלי מעביר 50 אחוזים של האור הבלתי מקוטב הפוגע בו. 50 אחוזים אלה הם, כמובן, מקוטבים. אם מציבים שני מקטבים כאלה באופן שצירי הקיטוב שלהם שווים כיוון, האור יעבור דרך שניהם (איור 28.31 משמאל). אך אם צירי הקיטוב שלהם מאונכים זה לזה האור לא יעבור כלל. (למעשה,

איור 28.31

חבל מתנודד (החבל הימני) מדגים את פעולתם של זוג מקטבים מאונכים זה לזה.



* הם נקראים גבישים דיכרואיים.

** מדובר במולקולות של יוד פולימרי הנתונות בין יריעות של פוליוויניל אלכוהול או פוליווינילן.



1



2



3

איור 28.32

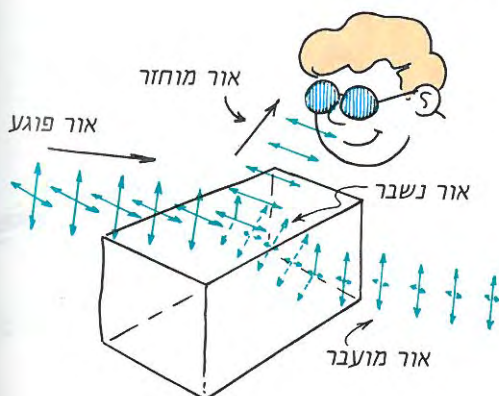
האור עובר כשצירי המקטבים מקבילים (1), אך נבלע כשמסובבים אחד מהם באופן שציריהם מאונכים זה לזה (2). אם מוסיפים מקטב שלישי, בזווית, בין המקטבים המוצלבים, שוב עובר אור (3). מדוע? (לאחר שתחשבו על התשובה תוכלו להסתייע בנספח ג, "עוד על וקטורים").

מעט מאורכי הגל הקצרים יותר יצליחו לעבור, אך לא במידה משמעותית). כשמשמשים בזוגות מקטבים באופן הזה, הראשון נקרא קָטב והשני - נָתַח. גם אור המוחזר ממשטחים לא-מתכתיים הוא לרוב מקוטב. בוהק האור המוחזר מזכוכית או ממים הוא דוגמה טובה לכך. אם האור אינו פוגע במשטח במאונך, הקרן המוחזרת כוללת תנודות חזקות יותר במקביל למשטח המוחזר ואילו הקרן המועברת כוללת תנודות חזקות יותר בניצב למשטח זה (איור 28.34). הקפצת אבנים שטוחות על גבי בריכה או אגם מדגימה תופעה דומה. כשמשטח האבן פוגע במים במקביל לפנייהם, האבן מוחזרת בקלות, אך אם משטח האבן פוגע במים בניצב לפנייהם, האבן חודרת בקלות אל תוך המים בשנותה את כיוונה ("ישבירה"). ניתן להפחית במידה ניכרת סינוור הנובע מן הבוהק של משטחים מחזירים אם משתמשים במשקפי פולרואיד. צירי הקיטוב של העדשות במשקפיים כאלה הם מאונכים, מפני שרוב הבוהק מוחזר ממשטחים אופקיים. בעזרת משקפי פולרואיד בעלי צירי קיטוב מתאימים ניתן גם ליצור אשליה של תלת-ממדיות כאשר צופים דרכם בשקופיות או בסרטים "תלת-ממדיים" המוקרנים על מסך שטוח.



איור 28.33

משקפי שמש מסוג פולרואיד חוסמים את האור המתנודד אופקית. כששתי עדשות מאונכות מונחות זו על גבי זו, כל אור אינו עובר.



איור 28.34

האור הבוהק ממשטחים לא-מתכתיים מקוטב ברובו. בתמונה נראים רכיבי האור הפוגע המקבילים למשטח כשהם מוחזרים, בעוד רכיבי האור הניצבים למשטח נשברים אל תוכו. מכיוון שרוב האור הבוהק מגיע אלינו ממשטחים אופקיים, צירי הקיטוב של משקפי פולרואיד הם אנכיים.

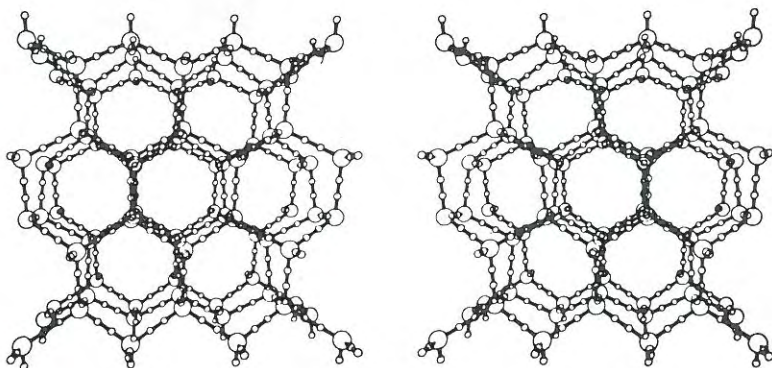
שאלה

איזה מזוגות המשקפיים הוא המתאים ביותר לשימושם של נהגים? (צירי הקיטוב מתוארים בקווים הישרים).



ראייה תלת-ממדית מתבססת במידה רבה על התמונות המתקבלות בו-זמנית (או כמעט כך) בשתי העיניים, כשכל עין צופה במראָה מזווית שונה במקצת. כדי להשתכנע שכל עין רואה מראה שונה, החזיקו אצבע זקופה בקצה זרועכם כשזו מתוחה קדימה, ושימו לב כיצד האצבע משנה כביכול את מקומה - זוהי שמאלה וימינה ביחס לרקע - בשעה שאתם סוגרים חליפות פעם את עינכם הימנית ופעם את השמאלית. התרשימים שבאיור 28.35 מהווים תמונה סטריאוסקופית ("תלת-ממדית") של המבנה הגבישי של קרח.

צפייה תלת-ממדית



איור 28.35

המבנה הגבישי של קרח בסטריאו. תבחינו בעומק אם מוחכם יצרף את המראה שתראה העין השמאלית כשתביטו בתמונה השמאלית עם המראה שתראה העין הימנית כשתביטו בתמונה הימנית. כדי להצליח בכך, מקדו את ראייתכם למרחק לפני שתתבוננו בדף. בלא לשנות את המיקוד, הביטו בדף, וכל תמונה תיראה כפולה. אחר כך שנו את המיקוד באופן שתיווצר חפיפה בין שתי הדמויות האמצעיות ותיראה דמות מרכזית אחת. אם תתאמנו תשיגו תוצאות מושלמות. (אם במקום זאת תצליבו את מבטכם ליצירת החפיפה, הקרוב והרחוק יתחלפו בתפקידים!)

איור 28.36

בעיניים ממוקדות למרחק, השורה השנייה והרביעית נראות רחוקות יותר; במבט מוצלב, השורה השנייה והרביעית נראות קרובות יותר.

מבחנו של כל ידע

הוא הניסוי.

הניסוי הוא השופט היחיד

של "אמת" מדעית.

ריצ'רד פ' פיינמן

מבחנו של כל ידע

הוא הניסוי.

הניסוי הוא השופט היחיד

של "אמת" מדעית.

ריצ'רד פ' פיינמן

זוג המשקפיים ג הוא המתאים, מפני שהציר המאונך חוסם את האור המקוטב אופקית, שרוב הבוהק המוחזר ממשטחים אופקיים מורכב ממנו. הזוג א מתאים לצפייה בסרטים "תלת-ממדיים".

תשובה:

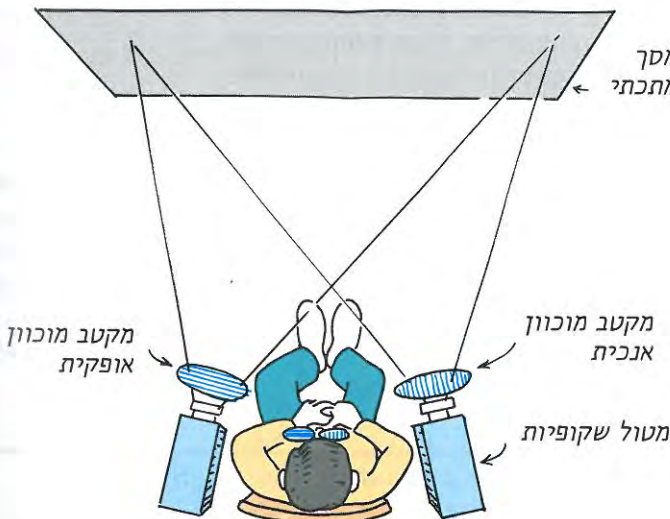
איור 28.37

תמונת סטריאו של פתיתי שלג.
צפו בה כמו באיור 28.35.



איור 28.38
סטריאוסקופ.

הסטריאוסקופ (איור 28.38) הוא מכשיר המדמה את השפעת העומק. מוצגות בו שתי שקופיות של אותו מראה אשר צולמו משתי נקודות שונות במקצת, שהמרחק ביניהן הוא כמרחק שבין שתי העיניים. כשצופים בשתי השקופיות יחד בשתי העיניים, העין הימנית רואה את התמונה שצולמה מימין והעין השמאלית רואה את התמונה שצולמה משמאל. במצב זה העצמים שבתמונה נראים תלת-ממדיים, בעלי עומק. המכשיר בנוי כך שכל עין רואה רק את התמונה המתאימה לה ואינה יכולה לראות את שתיהן. אם תוציאו את השקופיות מהמכשיר ותקרין אותן על מסך, זו על גבי זו, בעזרת שני מטולי שקופיות, תתקבל תמונה מטושטשת. זאת משום שבאופן כזה כל עין רואה את שתי התמונות. כאן "נכנסים לתמונה" מקטבי הפולרואיד. אם תציבו מקטבים לפני המטולים באופן שצירו של מקטב אחד מוכוון אנכית והאחר מוכוון אופקית, ותצפו בתמונה המקוטבת באמצעות משקפי פולרואיד שבהן צירי העדשות המקטבות מוכוונים באותם כיוונים, כל עין תראה רק את התמונה המתאימה לה, כמו במכשיר הסטריאוסקופ (איור 28.39). אם ראייתכם בשתי העיניים תקינה ומתואמת, התמונה שתצפו בה כך תיראה תלת-ממדית.



איור 28.39

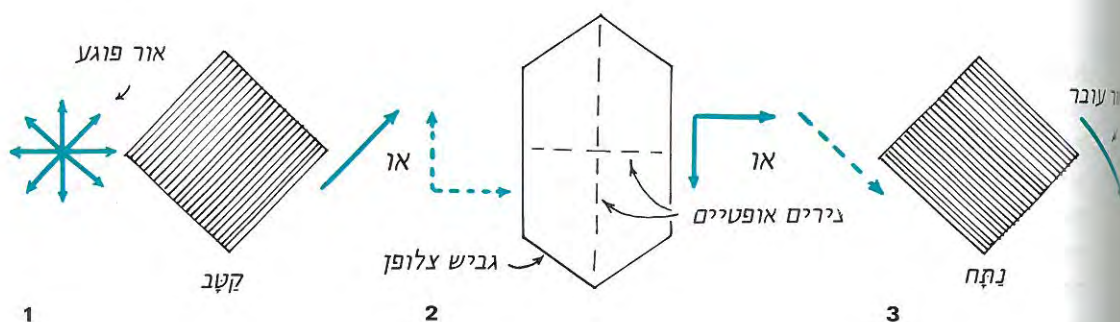
תצוגת שקופיות תלת-ממדית בעזרת מקטבים. עין ימין רואה רק אור מקוטב מהמטול הימני, עין שמאל רואה רק אור מקוטב מהמטול השמאלי, ושתי התמונות מתלכדות במוח באופן שנוצרת תחושת עומק.

צבעים וחומרים
מקטבים

שלל צבעים ניתן לקבל לא רק בהתאבכות בעקבות החזרה משכבות דקות, אלא גם על ידי ניצול תכונות קיטוב האור של גבישים שקופים מסוימים. למעשה, בכל הגבישים השקופים שמבנם הטבעי אינו קובייתי קיימים שני מישורים המאונכים זה לזה, ורכיבי התנודות של האור המקבילים למישורים אלה מתקדמים בגביש במהירויות השונות במקצת זו מזו. כשאור בעל תכונות קיטוב מסוימות עובר דרך גביש כזה, תכונות הקיטוב שלו משתנות, כפי שנראה בהמשך.

אם חומרים שבעצמם מורכבים מגבישים לא קובייתיים שקופים, לדוגמה סוכר, מושמים בין מקטבים מאונכים זה לזה ומוארים באור לבן, יופיע מן הצד האחר אור צבעוני. דפי מיקה (מין של סיליקאט) בעוביים שונים המושמים בין מקטבים מאונכים יוצרים מגוון של צבעים. המראה מרהיב עוד יותר אם משתמשים בנייר צלופן, המורכב ממולקולות שרשרת ארוכות אשר מתנהגות, מבחינה אופטית, כגבישונים מיקרוסקופיים לא קובייתיים. אם מקמטים פיסת נייר צלופן ומניחים אותה בין מקטבים מתקבל שלל צבעים מרהיב.

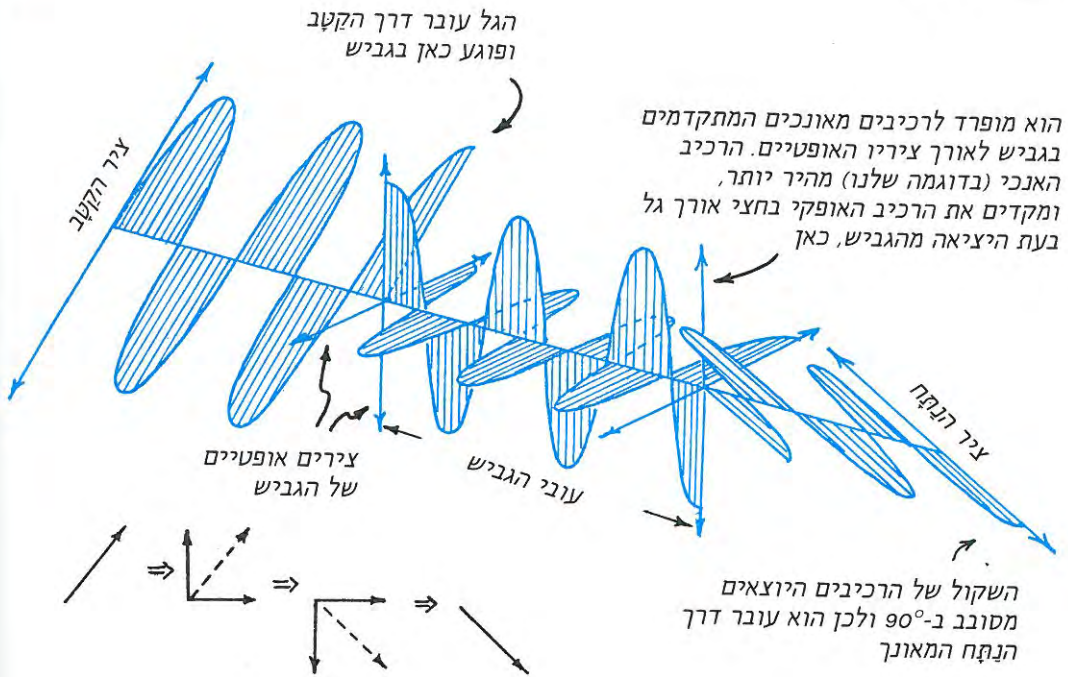
ההסבר לכך אינו פשוט ודורש ידע לא מבוטל בווקטורים. אם אינכם מתמצאים בווקטורים אולי תעדיפו לדלג על הפסקה הבאה ועל איורים 28.40 ו-28.41 או לעבור עליהם ברפרוף.



נתבונן באור בעל אורך גל יחיד העובר דרך "כריך" של צלופן בין שני מקטבים מאונכים. באיור 28.40 תיאורנו זאת, לשם נוחיות, כאילו שכבות הכריך מופרדות זו מזו. האור המגיע פוגע במקטב הראשון, הקטב, שמעביר אור מקוטב אל תוך נייר הצלופן, וממנו הוא יוצא דרך המקטב השני, הנתח. נניח כי הצירים האופטיים של הצלופן מסובבים בזווית של 45° ביחס לכל אחד מצירי המקטבים. האור הנכנס עובר דרך הקטב ומגיע לשכבת הביניים כשהוא מקוטב ב- 45° הן ביחס לציר האנכי והן ביחס לציר האופקי של הצלופן. לווקטור המוטה ב- 45° יש רכיב אנכי ורכיב אופקי, המתוארים באיור באמצעות הווקטורים המקוטעים, והם מועברים לאורך הציר האנכי והציר האופקי של הצלופן. רכיבים אלה עוברים דרך הצלופן במהירויות שונות, ולפיכך רכיב אחד מקדים את האחר. באיור מניחים כי עובי הצלופן הוא כזה שהרכיב האנכי מקדים את הרכיב האופקי בחצי אורך גל, ולפיכך

איור 28.40

גל אור עובר דרך נייר צלופן בין מקטבים מאונכים זה לזה. הנייר צריך להיות לחוץ בין המקטבים, אך לצורך בהירות השרטוט הם הופרדו. עיקבו אחר האור מפגיעתו במקטב הראשון (1) עד ליציאתו מהמקטב השני (3). באיור 28.41 מתואר האופן שבו הרכיב האנכי משנה כיוון בצלופן.



הרכיב האנכי היוצא מן הצלופן מצביע למטה ולא למעלה. הווקטור היוצא הסתובב, איפוא, ב- 90° ביחס לווקטור שעבר דרך הקטב. במצב זה כיוונו מקביל לציר הנתח והוא עובר דרכו במידה מרבית. סיבוב זה ב- 90° של הווקטור הפוגע יתרחש רק לגבי אורך גל מוגדר זה ועובי מיוחד זה של נייר הצלופן. דיאגרמת גלים המתארת מקרה זה מוצגת באיור 28.41. אם מסובבים את הנתח במקצת, אורך גל מסובב אחר יגיע אליו כשהוא מכוון בדיוק במקביל לציר הנתח, והוא שייטיב לעבור דרכו. עם סיבוב הנתח יעברו, איפוא, צבעים שונים דרך המערכת.

מגוון הצבעים הבוקעים מנייר הצלופן המקומט, המוחזק בין זוג המקטבים המאונכים, הוא מרהיב עין, בפרט אם מקרינים אותו על מסך גדול ומסובבים את אחד המקטבים לקצב המוסיקה החביבה עליכם!

איור 28.41

תרשים גלים של אור מקוטב המסתובב בתוך גביש.

אילו היו כל הגבישים בדוגמה מסודרים במקביל ומישור הקיטוב של האור הפוגע היה מקביל לאחד מצירי ההעברה של הגבישים, האם היה אור צבעוני בוקע מהמקטב השני?

שאלה

תשובה:

לא, מכיוון שהאלומה הפוגעת לא היתה מתפצלת לשני רכיבים הנעים במהירויות שונות לאורך שני צירי הגביש ויוצאים במופעים מוסטים זה ביחס לזה באופן שתיווצר הפרדת צבע.

אולי הדוגמה המלהיבה ביותר של תופעת ההתאבכות היא ההולוגרמה - סרט צילום דו-ממדי שנוצר באור לייזר ומאפשר לנו לראות שחזור מהימן של מראה תלת-ממדי. את ההולוגרמה המציא דניס גאבור בשנת 1947, עשר שנים לפני המצאת הלייזר, והוא גם העניק לה את שמה. הולו ביוונית פירושו "שלם", וגרם ביוונית פירושו "מִסָּר" או "מידע". ההולוגרמה מכילה מסר מלא או תמונה מושלמת. כשמתבוננים בהולוגרמה, הדמות כה מציאותית שניתן להציץ מעבר לפינות שלה ולראות את צדדיה "המוסתרים".

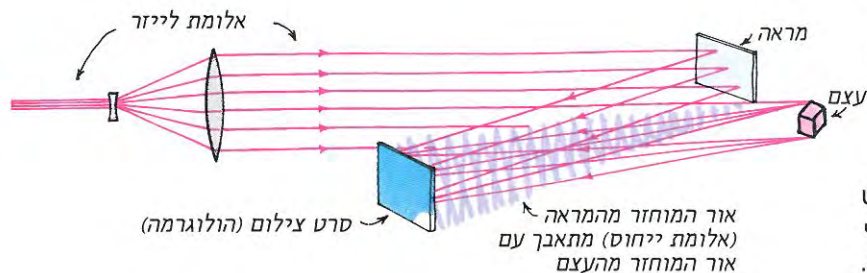
בשיטת הצילום הרגילה, עדשה משמשת ליצירת דמות על סרט צילום. העדשה מכוונת את כל האור המגיע מנקודה אחת של העצם לנקודה אחת על סרט הצילום. כל האור המגיע לסרט מקורו בעצם המצולם. לעומת זאת, כאשר יוצרים הולוגרמה לא משתמשים בעדשה ליצירת דמות. מכל נקודה בעצם "המצולם" מגיע אור לסרט הצילום כולו, כך שכל חלק של הסרט נחשף לאור המגיע מכל חלקי העצם. וחשוב מכל - האור המשמש ליצירת ההולוגרמה חייב להיות בעל תדירות אחת וכל חלקיו חייבים להיות בעלי מופע שווה בדיוק. אור כזה נקרא מתואם (ובלועזית: קוהרנטי). אילו השתמשו באור לבן, למשל, פסי העקיפה בתדירות אחת היו נמחים על ידי התדירויות האחרות. רק לייזר יכול ליצור אור כזה (בלייזרים נדון בפירוט בפרק הבא). הולוגרמות מייצרים באמצעות אור לייזר.

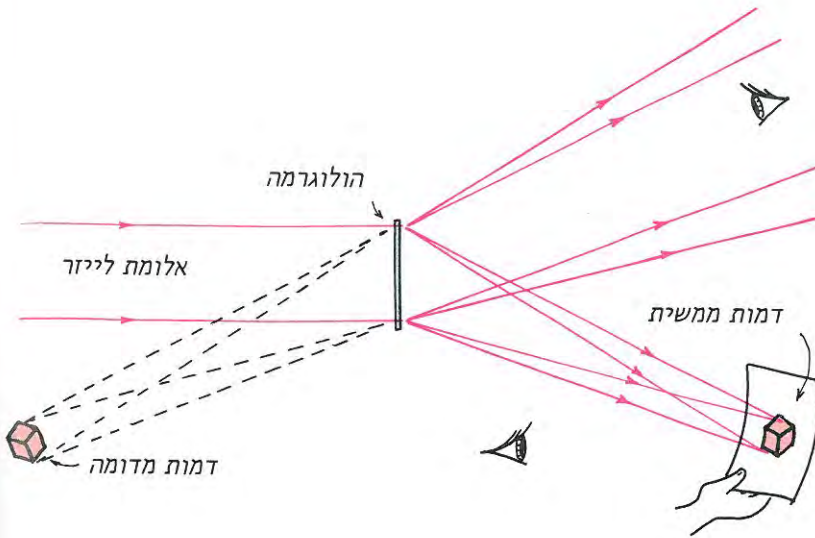
תצלום רגיל הוא רישום של דמות, אך ההולוגרמה היא רישום של תבנית ההתאבכות הנוצרת מהרכבה של שתי חזיתות גלים. סדרה אחת של חזיתות גל מקורה באור המוחזר מן העצם, והסדרה האחרת מקורה באלומת "יחוס", המוסטת מן האלומה המאירה ונשלחת הישר אל סרט הצילום (איור 28.42). כשמפתחים את התצלום אי אפשר לזהות בו כל דמות. כל שניתן לראות הוא "סלט" של קווים מסתלסלים, שאינם אלא אזורים זעירים שתבניות התאבכות נוצרו עליהם. תבניות אלו מורכבות מנקודות כהות במקומות שחזית הגל מהעצם וזו של אלומת הייחוס הגיעו אליהם במופע שווה, ומנקודות בהירות במקומות שאליהם הן הגיעו במופע מנוגד (מדובר בנגטיב). ההולוגרמה היא תצלום של תבניות התאבכות מיקרוסקופיות.

אם מציבים הולוגרמה באור מתאים, האור עובר עקיפה דרך התבניות המיקרוסקופיות ויוצר חזיתות גלים הזהות בצורתן לחזיתות הגלים המקוריות שהוחזרו מן העצם. כשצופים בחזיתות אלה בעין או בכל מכשיר אופטי אחר, הן מתנהגות בדיוק כחזיתות הגל המקוריות שהוחזרו מהעצם. כאשר אתם

איור 28.42

מעריך פשוט ליצירת הולוגרמה. אור הלייזר הפוגע בסרט הצילום מורכב משני חלקים: אלומת "יחוס" המוחזרת מהמראה ואור המוחזר מהעצם. שני גלים אלו מתאבכים ויוצרים תבניות התאבכות מיקרוסקופיות על סרט הצילום. הסרט שנחשף ופותח הוא ההולוגרמה.





איור 28.43

כשאור לייזר עובר דרך הולוגרמה מתרחשת עקיפה ונוצרת דמות תלת-ממדית שניתן לראותה אם צופים דרך ההולוגרמה כמו דרך חלון. זו דמות מדומה, הנראית ממוקמת מאחורי ההולוגרמה, כפי שנראית לכם דמותכם המשתקפת במראה. אם תשנו את מיקוד העיניים תוכלו לראות בחדות את כל חלקי הדמות המדומה, קרובים ורחוקים כאחד. האור העובר עקיפה ומתכנס לפני ההולוגרמה יוצר שם דמות ממשית שניתן להקרין על מסך. כיוון שהבואה היא תלת-ממדית, לא ניתן לראות את כולה חדה במיקום אחד על מסך שטוח.

מתבוננים בהולוגרמה, אתם רואים דמות תלת-ממדית מלאה, מציאותית ממש כאילו הייתם מתבוננים בעצם המקורי מבעד לחלון. אפילו תופעת הפְּרִלֶקְסָה (תנועתם המדומה של עצמים קרובים ביחס לרחוקים הנראית כשמשנים את נקודת התצפית) ניכרת בבירור אם מטים את הראש ומתבוננים לאורך צידו של העצם או אם מנמיכים את הראש ומתבוננים מתחתיו (איור 28.43). הולוגרמות הן תמונות הדומות ביותר למציאות.

מעניין לציין כי אם ההולוגרמה עשויה על סרט צילום, ניתן לחתוך את הסרט לשני חצאים ועדיין ייראה העצם בשלמותו בכל אחד מהחצאים. כל חצי כזה ניתן לשוב ולחצות לשניים, והתופעה תישנה. הסיבה לכך היא שכל חלק של ההולוגרמה קלט אור מן העצם כולו. באופן דומה, אור שמגיע מחוץ לחלון אל החדר ממלא את שטח החלון כולו, וניתן לצפות החוצה דרך כל חלק של החלון הפתוח. רק בהירות התמונה תפחת ככל שנקטין את ההולוגרמה.

מעניינת עוד יותר היא הגדלה באמצעות הולוגרמות. אם מכינים הולוגרמה באמצעות אור קצר-גל וצופים בה באור בעל גלים ארוכים יותר, הדמות המתקבלת מוגדלת בשיעור היחס שבין אורכי הגלים. עקרונית, אילו הכינו הולוגרמות בקרני X ולו ניתן היה לצפות בהן באור נראה באמצעות מתקן מתאים, הדמות היתה מוגדלת אלפי פעמים. מכיוון שהולוגרמות אינן נזקקות לעדשות, אפשרות פיתוחן של מיקרוסקופ בקרני X נראית מעניינת ביותר.

ובאשר לטלוויזיה, אם תפותח טלוויזיה הולוגרפית, אזי מסכי הטלוויזיה שלנו, המציגים תמונות דו-ממדיות, עשויים להיראות לילדינו מוזרים ממש כפי שנראים לנו מקלטי הרדיו העתיקים של סבא וסבתא.

האור הוא תופעה מרתקת, במיוחד כשהוא עובר עקיפה בתבניות ההתאבכות של הולוגרמה.

5. אילו שידורי רדיו עוקפים מבנים הנקרים בדרכם ביתר קלות, שידורי AM או שידורי FM? מדוע?

6. מנו מספר יתרונות ומספר חסרונות של תופעת העקיפה.

התאבכות

7. האם מוגבלת תופעת ההתאבכות לסוגי גלים מסוימים, או שמא היא קיימת בכל סוגי הגלים?

8. מה בדיוק הוכיח תומס יאנג בניסוי המפורסם באור?

9. כשמתרחשת התאבכות הורסת, האם נעלמת אנרגיית אור?

התאבכות אור חד-צבעי בשכבה דקה

10. מהו אור חד-צבעי?

11. ממה נובעים הפסים הבהירים והכהים כשאור חד-צבעי מוחזר מלוח זכוכית המונח על לוח זכוכית אחר?

12. מהי הסיבה להיווצרות טבעות ניוטון?

13. טבעות ניוטון נראות היטב כשצופים בהן באור חד-צבעי - בגלים ארוכים נראות טבעות מרווחות ובגלים קצרים נראות טבעות צפופות. מדוע אין רואים טבעות אלו כשמשתמשים באור לבן?

צבעי התאבכות בהחזרה משכבות דקות

14. איזו תופעה פיסיקלית גורמת לבוהק הססגוני בבוטות סבון ועל נוצות של ציפורים מסוימות?

15. כיצד נוצר מגוון הצבעים הנראה בכתם דלק על כביש רטוב? מדוע אין הוא נראה על כביש יבש?

16. מה קובע היכן ייראו הצבעים השונים בבוטות סבון או בשכבת שמן על מים?

17. כשמתבוננים בבוטות סבון מוויזות שונות רואים, לכאורה, שכבות סבון בעוביים שונים. האם כתוצאה מכך רואים צבעים שונים?

קיטוב

18. איזו תופעה מבדילה בין גלי אורך לגלי רוחב?

19. האם תופעת הקיטוב מאפיינת את האור בלבד או את סוגי הגלים כולם?

תקציר מונחים

עקרון הויגנס התיאוריה שלפיה ניתן לתאר את חזית גלי האור המתפשטים ממקור נקודתי כמורכבת מגלים משניים זעירים, חופפים חלקית, הנוצרים בחזית הגל הקודמת.

עקיפה התכופות האור מסביב למכשול או בעת מעבר דרך חריץ צר באופן שנוצרת תבנית של פסים בהירים וכהים או צבעוניים.

התאבכות הרכבה של גלים היוצרת אזורים שבהם הגל מתחזק ואזורים שבהם הוא מתבטל. התאבכות בונה יוצרת את אזורי הגל המחוזק והתאבכות הורסת מתרחשת באזורי הביטול. אם מתרחשת התאבכות של אורכי גל מסוימים באור לבן, נוצרים צבעים המכונים צבעי התאבכות.

קיטוב הכוונה הווקטורים של השדה החשמלי (או המגנטי), המהווים את הקרינה האלקטרומגנטית, בכיוון מסוים. גל בעל תנודות מכוונות כאלה נקרא גל מקוטב.

הולוגרמה תבנית התאבכות מיקרוסקופית דו-ממדית המאפשרת לשחזר דמויות תלת-ממדיות ולצפות בהן כאילו היו ממשיות.

שאלות חזרה

עקרון הויגנס

1. כיצד מתנהגת כל נקודה של הגל לפי הויגנס?

2. כשגלים מישוריים פוגעים במחסום ובו פתח צר, האם יתפשטו מצידו השני של הפתח כמניפה או ימשיכו כגל מישורי?

עקיפה

3. היכן בולטת יותר תופעת העקיפה, בפתח צר או בפתח רחב?

4. מהו היחס בין אורך הגל לבין גודל הפתח שבעת מעבר הגל דרכו מתרחשת עקיפה ניכרת?

מטלות בית

1. בעזרת סכין גילוח חיתכו סדק צר בפיסת קרטון והתבוננו דרכו במקור אור. תוכלו לשנות את רוחב הפתח באמצעות כיפוף הקרטון. נסו לראות פסי התאבכות. נסו זאת גם כשאתם מתבוננים דרך שני סדקים סמוכים.
2. בפעם הבאה שתרחצו באמבטיה להנאתכם, דאגו שיהיה מעט קצף על המים והתבוננו בצבעים הנוצצים בכל בועה זעירה. שימו לב לכך שבועות שונות מחזירות צבעים שונים בשל העוביים השונים של דפנותיהן. אם אתם רוחצים בשניים, בידקו אילו צבעים רואה כל אחד מכם באותה בועה. תגלו שאתם רואים צבעים שונים - מפני שמה שרואים תלוי בנקודת הראות!
3. עירו ניסוי זה בכיור המטבח. טיבלו ספל כהה (רקע כהה הוא הרקע הטוב ביותר לצפייה בצבעי התאבכות) בתמיסת סבון לשטיפת כלים, אחר כך התבוננו מהצד באור המוחזר משכבת הסבון המכסה את פתח הספל. צבעים מסתלסלים יופיעו עם שקיעת הסבון אל התחתית ביוצרו צורת חרוט. חלקה העליון של השכבה הולך ונעשה דק במידה כזאת שהוא נראה שחור - עובדה המלמדת שעוביה קטן מרוב אורך גל של הגלים הקצרים ביותר של האור הנראה. האור, באורך גל כלשהו, המוחזר מהמשטח הפנימי עובר היפוך מופע, מתחבר עם האור המוחזר מהמשטח החיצוני ומתבטל. בתוך זמן קצר תהיה השכבה כה דקה עד שתקרה.
4. בזמן שאתם מרכיבים משקפי שמש מסוג פולרואיד, התבוננו במשטח לא-מתכתי בזהק כמו כביש או מאגר מים. הטו את ראשכם מצד לצד ושימו לב כיצד משתנה עוצמת הבהוק עם השינוי בזווית שבין כיוון הקיטוב של האור לבין ציר הקיטוב של המשקפיים. שימו לב גם לקיטוב של חלקים שונים בשמים בשעה שאתם מחזיקים את המשקפיים ביד ומסובבים אותם.
5. הציבו בקבוק של תרכיז מתוק בין שתי יריעות מקטב העמידו מקור אור לבן מאחורי התרכיז וצפו באור דרך התרכיז והמקטבים, כשאתם מסובבים אחד מהם. תראו צבעים מרהיבים.
6. מיקרוסקופ של אור מקוטב מאפשר צפייה בצבעי התאבכות מרהיבים. ניתן להפוך כל מיקרוסקופ, ובכלל זה מיקרוסקופ עצצוע פשוט, למיקרוסקופ של אור מקוטב בהכנסת פיסת מקטב לעינית ובהדבקת מקטב שני לכן הדגימות. ערבבו מעט נפתלן בטיפות של בנן על זכוכית נושא וצפו בגדילת הגבישים. סובבו את העינית וראו כיצד

20. מה הקשר בין מישור הקיטוב של האור למישור התנודות של האלקטרון שיצר אותו?

21. מדוע יעבור האור דרך זוג מקטבים שציריהם מקבילים אך לא כאשר הצירים מאונכים זה לזה?

22. איזה חלק של אור רגיל יעבור דרך מקטב אידיאלי?

23. כאשר אור רגיל פוגע בזווית שטוחה במשטח של מים, מה ניתן לומר על האור המוחזר?

24. במה שונים משקפי שמש מסוג פולרואיד ממשקפי שמש רגילים?

צפייה תלת-ממדית

25. מדוע לא תבחינו בעומק אם תצפו באמצעות מכשיר סטריאוסקופ (איור 28.38) בשני עותקים של שקופית רגילה, ולא בזוג שקופיות שצולם במצלמת סטריאו?

26. איזה תפקיד ממלאים המקטבים בתצוגה של שקופיות "תלת-ממדיות"?

צבעים וחומרים מקטבים

27. מהי תכונתם האופטית הייחודית של גבישים שקופים לא-קובייתיים?

28. רכיביו של גל אור הנכנסים אל גביש לא-קובייתי במופע שווה עשויים לצאת ממנו במופע שונה. מה הסיבה לכך?

29. כאשר רכיבי הגל יוצאים מגביש כזה במופע מנוגד, מה קורה לכיוונו של וקטור האור השקולי?

30. אם כיוונו של הווקטור היוצא מתלכד עם ציר הקיטוב של הנתח, האם יעבור הגל דרכו? מה קורה אם כיוון הווקטור ניצב לציר הקיטוב?

הולוגרמות

31. במה שונה הולוגרמה מתצלום רגיל?

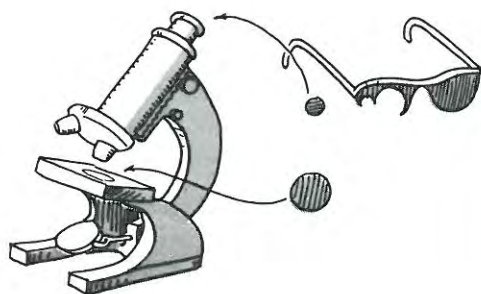
32. במה שונה אור מתואם (קוהרנטי) מאור רגיל?

33. כאשר אור מתואם שעבר עקיפה פוגע בסרט צילום, נוצרות עליו תבניות התאבכות. מה היה קורה לתבניות אלה אילו אור בתדירויות אחרות היה מעורב באור המתואם?

34. מה היה קורה לתבנית העקיפה של אור מתואם אילו אור בעל אותה תדירות, אך במופעים שונים, היה מעורב בו?

35. מדוע הכרחי להשתמש באור מתואם ליצירת הולוגרמות?

הצבעים משתנים. תוכלו גם לצפות פשוט בצבעי ההתאבכות של פיסות צלופן.



7. הכינו שקופיות למטול שקופיות בהדבקת פיסת צלופן מקומטת על פיסת מקטב בגודל שקופית. (נסו גם סרטים של צלופן דביק - "סלופטייפ" - מסוגים שונים והדביקו אותם כשהם חופפים זה את זה בזוויות שונות). הקרינו אותם על מסך גדול או על קיר לבן וסובבו מקטב שני, גדול מעט יותר, לפני עדשת המטול בקצב המתאים לצילוי מוסיקה חביבה עליכם. כך תפיקו מופע אורות וצלילים פרטי שלכם.

תרגילים

1. עקיפה של גלי קול מורגשת בסביבתנו היומיומית הרבה יותר מעקיפה של גלי אור. מדוע?
2. במה דומים פסי ההתאבכות של האור לפעילות בגלי קול?
3. מדוע מתרחשת מסביב לבניינים עקיפה של גלי רדיו אך לא של גלי אור?
4. באזורים של קליטה גרועה, ערוצי טלוויזיה המשדרים בתדירות נמוכה יחסית נקלטים טוב יותר מערוצי תדירויות גבוהות. התוכלו להציע סיבה לכך?
5. שני רמקולים שמרחקם זה מזה כמטר אחד פולטים צלילים טהורים בתדירות וברום קול שווים. כשמאזין עובר לפני הרמקולים במקביל לקו המחבר ביניהם, הקול נשמע לו חזק וחלש חליפות. מה קורה כאן?
6. בתרגיל הקודם, הציעו מסלול שלאורכו יוכל המאזין

ללכת מבלי לשמוע קולות חזקים וחלשים חליפות.

7. אור מאיר שני סדקים צרים וסמוכים זה לזה ויוצר תבנית התאבכות על מסך מאחוריהם. במה יהיה שונה המרחק בין פסי ההתאבכות באור אדום ממרחקם זה מזה באור כחול?

8. מה יקרה למרחק בין פסי ההתאבכות אם ירחיקו את שני הסדקים זה מזה?

9. מדוע עדיף לערוך את הניסוי של יאנג בשני סדקים ולא בשני חורים זעירים כפי שעשה יאנג עצמו בתחילה?

10. לקבלת ביטול מושלם של אור המוחזר במופע מנוגד משני המשטחים של שכבה דקה, מה צריך להיות שווה בשני חלקי הגל השבים ומתחברים מלבד התדירות ואורך הגל?

11. כשאור חד-צבעי עובר דרך זוג סדקים צרים, נוצרת תבנית של פסי התאבכות. האם תיווצר תבנית התאבכות כזאת משלושה סדקים צרים מקבילים? מאלפי סדקים מקבילים? התוכלו להביא דוגמה שתוכיח את תשובתכם?

12. צבעי נוצותיהם של תוכים מסוימים ושל זכר הצופית אינם נובעים מצבענים אלא משקעים צרים במשטח החיצון של נוצותיהם. מהו העיקרון הפיסיקלי המסביר את היווצרותם של צבעים אלו?

13. הצבעים המרהיבים בכנפי פרפרים רבים מקורם בצבענים (פיגמנטים) שונים. אך יש פרפרים שמקור צבעיהם אינו צבענים. כשמתבוננים בכנפיים כאלה מזוויות שונות, צבעיהן משתנים. כיצד נוצרים הצבעים הללו?

14. מדוע משתנים צבעיהן הססגוניים הבהקים של קונכיות ים מסוימות כשמתבוננים בהן מזוויות שונות?

15. לעיתים, כשאין שוטפים את הכלים היטב לאחר רחיצתם בסבון, מוחזרים מפניהם צבעים שונים. הסבירו.

16. מדוע צבעי ההתאבכות בשכבות דקות בולטים יותר מאשר בשכבות עבות?

17. האם ייצור האור המגיע משני כוכבים קרובים מאוד תבנית התאבכות? הסבירו.

18. את שלל הצבעים הנראים בשעה שמתרחשת החזרה כפולה אנו מסבירים בתופעת ההתאבכות. האם מסבירה ההתאבכות גם את הצבעים הנוצרים בהעברה דרך חומרים מסוימים בסיוע מקטבים? הסבירו.

19. מדוע מפחיתים משקפי שמש מסוג פולרואיד את הבהוק, ולעומתם משקפי שמש רגילים, לא מקטבים, פשוט מפחיתים את כמות האור שמגיע לעיניים?

20. כיצד תוכלו לקבוע מהו ציר הקיטוב של מקטב יחיד הנמצא בידכם?

21. רוב האור הבוהק המוחזר ממשטח לא-מתכתי הוא מקוטב, וציר הקיטוב מקביל למשטח המחזיר. האם תצפו שציר הקיטוב של משקפי פולרואיד יהיה מאוזן או מאונך? מדוע?

22. כיצד ניתן להראות באמצעות מקטב יחיד כי השמים מקוטבים חלקית? (מעניין לציין שבניגוד לבני אדם, דבורים וחרקים רבים מסוגלים להבחין באור מקוטב ולנצל תכונה זאת לצורך ניווט.)

23. מדוע יעביר מקטב אידיאלי 50 אחוזים של אור לא-מקוטב הפוגע בו?

24. איזה אחוז של האור יעבור דרך שני מקטבים אידיאליים הצמודים זה לזה כשצירי הקיטוב שלהם מקבילים? כשצירי הקיטוב שלהם מאונכים זה לזה?

25. מדוע ציור נראה שטוח פחות כשצופים בו בעין אחת? (אם טרם הבחנתם בכך, נסו ותיווכחו בהבדל.)

26. מדוע לא היה אפשר ליישם את רעיון ההולוגרמה הלכה למעשה לפני שהומצא הלייזר?

27. כיצד ניתן להגדיל תמונה באמצעות הולוגרמה?

28. אם בעת צפייה בהולוגרמה תעצמו עין אחת, האם עדיין תבחינו בעומק בתמונה? הסבירו.