

קול

הציוס הֵכָה כּוֹלֵוּ שְׁקֵדְרוֹיִוֹת - מִלִּיאָרְדֵי שְׁקֵדְרוֹיִוֹת, כּוֹלֵוּ
(מֵרֶטֶוּ בְּסֵדֶר מִוִּפְטִי וְקִרְן אִיִּצֵר סוֹרֶקֶת אֹמֵן בְּקֶצֶב שֶׁל מִלִּיאֹנִי
שְׁקֵדְרוֹיִוֹת בֶּכָל שְׁנִיָּה. סִדְרָה הַשְׁקֵדְרוֹיִוֹת, הַמֵּגֻלָּה בְּצוּרָה
(קוֹדֶשֶׁת שֶׁל אֹרֶז וְאוֹשֶׁק, יוֹצֵרָה קוֹב בִּינְאִי הַמִּחְמֶה לְצוּרָה שֶׁל זֶה
שֶׁמֶד. (מֵאֲמֵד! מִי פִילֵל שְׁנִיָּן יֵהִיֶה אֶפְשֶׁר צִדֵּר כִּה מוֹרֵנֵב כֹּחַ
הַסִּמְפּוֹנִיָּה הַמִּמְשִׁיָּה שֶׁל בְּטֵהוּבֵן אֶסְדִּירָה שֶׁל מִסְפְּרִי אֲמֵד וְאֶפְסִי.



תנודות וגלים

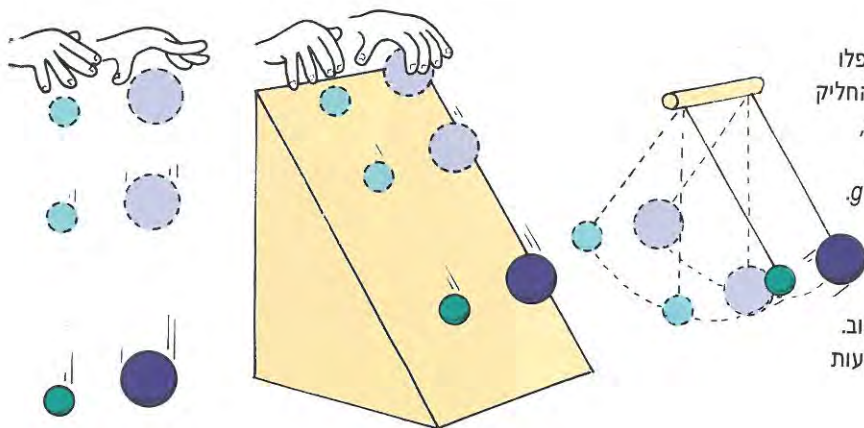


קליע החולף דרך להבת נר יוצר גל
הלם הנראה בבירור.

T ברים רבים בטבע מתנדנדים ומתפתלים ללא הרף. למצב שבו דבר מתנועע הלך ושוב בזמן אנו קוראים תנודה. תנודה אינה יכולה להתקיים ברגע מסוים בלבד; דרוש לה זמן לביצוע התנועה הלך ושוב. אם נכה בפעמון, יימשכו התנודות זמן מה בטרם ידעכו. לדבר המתנדנד הן במקום והן בזמן אנו קוראים גל. גל אינו יכול להתקיים במקום אחד בלבד. הוא חייב להשתרע ממקום אחד למשנהו. הן האור והן הקול הם תנודות המתקדמות במרחב כגלים, אך אלה גלים מסוגים שונים בתכלית. הקול הוא תנודות המתקדמות דרך תווך חומרי - מוצק, נוזל או גז. באין תווך המסוגל להתנדנד, לא ייתכן קיומו של קול. האור, לעומת זאת, הוא תנודות של שדות חשמליים ומגנטיים בלתי חומריים - תנודות של אנרגיה טהורה. האור יכול לעבור דרך חומרים רבים, אך חומר אינו דרוש לקיומו; הוא יכול להתקדם בריק (ואקום), כמו למשל בחלל הריק שבין השמש לכדור הארץ. המקור לכל סוגי הגלים - קול, אור או גל מכל סוג אחר - הוא משהו מתנדנד. מקורם של גלי קול להיות מיתר מתנדנד של כינור, ומקורם של גלי אור - האלקטרונים באטום. גלים עשויים להיות מחזוריים, כבצלילה של מוסיקה נאה, או בלתי מחזוריים, למשל הקול הנוצר בעת ניפוץ של חזיז או כשמכים כף אל כף. נפתח את לימוד נושא התנודות והגלים בהתבוננות במטוטלת פשוטה.

אם נתלה משקולת בקצה חוט, תהיה לנו מטוטלת פשוטה. מטוטלות מתנדנות הלך ושוב בקצב כה קבוע, שזה זמן רב הן משמשות לבקרה על פעולת שעונים. גלילאו הוא שגילה כי הזמן הנדרש למטוטלת להשלמת תנודה שאינה רחבה

תנודות של מטוטלת



איור 18.1

שחררו שתי מסות והן ייפלו בתאוצה g . הניחו להן להחליק במורד מדרון חסר חיכוך, ושתיהן יחליקו בתאוצה השווה לשבר מסוים של g . קישור אותן לחוטים באורך שווה כך שייוצרו מטוטלות, והן יתנודדו יחד הלך ושוב. בשלושת המקרים התנועות אינן תלויות במסה.

מדי תלוי באורך המטוטלת ובתאוצת הכובד בלבד*. משך הזמן של תנודה אחת הלך ושוב, הנקרא משך המחזור (בקיצור: המחזור) או התקופה, אינו תלוי במסת המשקולת, וכאשר קשת התנודה אינה גדולה מדי - גם לא ברוחב התנודה. בנוסף לתלותו באורך המטוטלת, משך המחזור של המטוטלת תלוי גם בתאוצת הכובד. מחפשי נפט ומחצבים שונים משתמשים במטוטלות רגישות ביותר כדי לגלות שינויים זעירים בתאוצת הכובד. אלה נגרמים עקב שינויים בצפיפות תצורות הקרקע.

משך המחזור של מטוטלת ארוכה ארוך יותר מזה של מטוטלת קצרה; פירושו של דבר שהיא מתנודדת הלך ושוב בתדירות נמוכה יותר - בקצב איטי יותר - ממטוטלת קצרה. כאשר אנו הולכים, אנחנו מאפשרים לרגלינו להתנודד בעזרת כוח הכובד, בדומה למטוטלת. וכפי שמטוטלת ארוכה מתנודדת במשך מחזור ארוך יותר, אדם בעל רגליים ארוכות נוטה ללכת בפסיעות איטיות יותר מאלה של בעל רגליים קצרות. עובדה זאת ניכרת במיוחד בבעלי חיים ארוכי רגליים כדוגמת הגיירפה, הסוס והיען, השועטים בפסיעות איטיות בהרבה מאלה של בעלי חיים קצרי רגליים כדוגמת כלב תחש, אוגר או עכבר.

התנועה הלך ושוב של מטוטלת המתנודדת בקשת קטנה נקראת **תנועה הרמונית פשוטה****. גולת המטוטלת הממולאת בחול שבאיור 18.2 מתנודדת בתנועה הרמונית פשוטה מעל לסרט הנע שמתחתיה. בשעה שהסרט נמצא במנוחה (מימין), זרזיק החול מתווה עליו קו ישר. אולם - וזו עובדה מעניינת - כאשר

תיאור הגל

* הנוסחה המדויקת למשך המחזור של מטוטלת פשוטה היא $T = 2\pi\sqrt{l/g}$. כאן T הוא משך המחזור, l - אורך המטוטלת ו- g - תאוצת הכובד.

** תנועה הרמונית פשוטה מתקיימת כאשר הכוח המחזיר הפועל על המסה מתכווץ להעתקה ממצב שיווי המשקל. תנאי זה מתקיים כמעט תמיד, לפחות בקירוב, ברוב התנודות. רכיב המשקל המחזיר מטוטלת שהוסטה למצב שיווי המשקל נמצא ביחס ישר להעתק המטוטלת (בזוויות קטנות) - כך גם לגבי מסה המחוברת לקפיץ. נזכור מפרק 11 את חוק הוק לקפיץ, $F = k\Delta x$, שלפיו הכוח הדרוש למתיחה (או לכיווץ) של קפיץ נמצא ביחס ישר לשיעור המתיחה (או הכיווץ).



ב



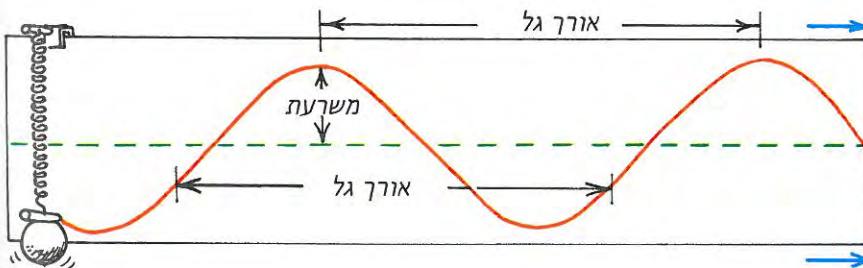
א

הסרט נמצא בתנועה במהירות קבועה (משמאל), החול מתווה עליו צורת עקום מיוחדת במינה המוכרת בשם **עקומת סינוס**. ניתן להתוות עקומת סינוס גם באמצעות מסה התלויה בקפיץ ומתנוודדת בתנועה הרמונית פשוטה (איור 18.3). עט סימון המחובר למסה מתווה עקומת סינוס על גבי רצועת נייר המונעת אופקית במהירות קבועה.

עקומת סינוס משמשת אמצעי גרפי לתיאור של גל. בדומה לגלי מים, כל אחת מן הנקודות הגבוהות ביותר נקראת שיא הגל וכל אחת מן הנקודות הנמוכות ביותר נקראת שקע. הקו הישר המקוטע מייצג את נקודת המוצא - או נקודת האמצע - של התנוודת. המונח **משרעת** (או תנופה, ובלועזית אמפליטודה) נקבע לציון המרחק מנקודת האמצע אל השיא (או השקע) של הגל. במילים אחרות, המשרעת שווה להעתק המרבי ממצב שיווי המשקל.

איור 18.2

פראנק אופנהיימר, מייסדו של מוזיאון המדע בסן פרנציסקו, מדגים (א) קו ישר שמתווה החול הנשפך ממטוטלת מתנוודדת, שנה מעל סרט נע השרוי במנוחה. (ב) כאשר הסרט נע במהירות קבועה, נוצרת עקומת סינוס.



איור 18.3 עקומת סינוס.

אורך הגל הוא המרחק מן הפסגה של שיא אחד לזו של השיא הסמוך אליו, וכללית ניתן לומר כי אורך הגל הוא המרחק בין חלקים זהים סמוכים של הגל.

אורך הגל של גלי הים הסמוכים לחוף נמדד במטרים, זה של האדוות הנוצרות בשלולית נמדד בסנטימטרים, ואורך הגל של האור הנראה קטן ממיליונית המטר (מיקרון).

מספר הפעמים שהגל מתנווד בכל שנייה הוא **התדירות** או התדר. התדירות של מטוטלת מתנוודת או של חפץ התלוי בקפיץ היא מספר התנודות הלך ושוב, או מעלה-מטה, שהם משלימים ביחידת זמן (לרוב שנייה אחת). תנועה שלמה אחת, הלך ושוב, נקראת תנודה. אם התנודה נמשכת שנייה אחת בדיוק, אזי התדירות היא מחזור אחד בשנייה. אם מתרחשות שתי תנודות בשנייה, התדירות היא שני מחזורים בשנייה.

היחידה למדידת התדירות נקראת גם בשם **הֶרץ** (סימונה הלועזי Hz), על שם המדען הגרמני ממוצא יהודי היינריך הרץ, שגילה בניסויים שערך בשנת 1886 את קיומם של גלי הרדיו. מחזור אחד בשנייה הוא הרץ אחד; שני מחזורים בשנייה הם 2 הרץ, וכן הלאה. תדירויות או תדרים גבוהים יותר נמדדים בקילו-הרץ (kHz) - אלפי הרץ, ותדרים גבוהים עוד יותר נמדדים במגה-הרץ (MHz) - מיליוני הרץ. תדר גלי הרדיו של שידורי AM (את"י - אפנון תנופה או משרעת) הוא בתחום הקילו-הרץ, ואילו הגלים של שידורי FM (את"ד - אפנון תדר) נמצאים בתחום המגה-הרץ. תחנת רדיו המשרתת שידורי AM בתדר 675 קילו-הרץ משרתת גלי רדיו המתנוודים בקצב של 675,000 תנודות בשנייה. תחנה המשרתת שידורי FM בתדר 101 מגה-הרץ משרתת גלי רדיו שתדירותם 101,000,000 הרץ. תדרים אלה של גלי הרדיו הם התדרים שבהם האלקטרונים מאולצים להתנווד באנטנה המותקנת על מגדל תחנת השידור. מקורם של כל הגלים הוא במשהו מתנווד. תדירותו של המקור המתנווד ותדירותו של הגל שהוא יוצר שוות תמיד.



איור 18.4

אלקטרונים באנטנת השידור מתנוודים 94,000 פעמים בכל שנייה ויוצרים גלי רדיו בתדר 94 קילו-הרץ.

אם ידועה תדירותו של עצם כלשהו, אפשר לחשב את משך המחזור שלו, ולהיפך. נניח, למשל, כי מטוטלת מסוימת משלימה שתי תנודות בשנייה אחת. תדירות המטוטלת היא 2 הרץ. הזמן שנדרש לה להשלמת תנודה אחת - כלומר, משך המחזור של התנודה - הוא $\frac{1}{2}$ שנייה. אם תדירות התנודות היא 3 הרץ, משך המחזור הוא $\frac{1}{3}$ שנייה. התדירות היא אחד חלקי משך המחזור, ולהיפך:

$$\text{תדירות} = \frac{1}{\text{משך המחזור}}$$

ולהיפך:

$$\text{משך המחזור} = \frac{1}{\text{תדירות}}$$

שאלות

- מהי התדירות, בתנודות לשנייה, של גל בן 60 הרץ? מהו משך המחזור שלו?
- סערה עזה מסוגלת לגרום לבניין רב קומות להתנווד הלך ושוב בתדירות של 0.1 הרץ בקירוב. מהו משך המחזור של תנודות הבניין?

תשובות:

- גל בן 60 הרץ משלים 60 תנודות בכל שנייה ומשך המחזור שלו הוא $\frac{1}{60}$ שנייה.
- משך המחזור הוא 1 חלקי התדירות, ושווה $1/(0.1 \text{ הרץ}) = 10$ (0.1 תנודות/שנייה) = 10 ש'. כל תנודה נמשכת, איפוא, 10 שניות.

תנועת גלים

רוב המידע שאנו מקבלים על סביבתנו מגיע אלינו בצורת גלים. גלים הם המביאים את הקולות לאוזנינו, את האור לעינינו, ואת האותות האלקטרומגנטיים למכשירי הרדיו והטלוויזיה שלנו. במונח תנועת גלים אנו מתכוונים להעברה של אנרגיה ממקור אל קולט המרוחק ממנו בלי שיעבור חומר בין שתי הנקודות.

אולי יקל עלינו להבין את התנועה הגלית אם נתבונן תחילה בדוגמה הפשוטה ביותר - כאשר תנועה כזאת מתרחשת בחוט משיכה אופקי מתוח. אם מנדנדים את קצהו האחד של חוט כזה מעלה-מטה, הפרעה קצובה מתחילה לנוע לאורכו. כל אחד מחלקיקי המיתר נע מעלה-מטה, ותוך כדי כך נעה ההפרעה לאורכו של המיתר. לאחר שחלפה בו ההפרעה, התווך חוזר למצבו ההתחלתי.

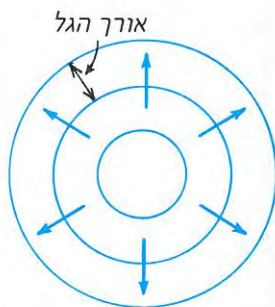
גלי מים הם אולי דוגמה מוכרת יותר של תנועת גלים. אם נשליך אבן אל שלולית מים רוגעת, גלים מעגליים יתפשטו ממקום פגיעת האבן כלפי חוץ. מרכז המעגלים הוא במקור ההפרעה. לכאורה עשויים היינו לחשוב כי עם תנועת הגל מועברים מים מן המרכז כלפי חוץ; הלא הגל מרטיב את שולי השלולית שהיו יבשים. עלינו להבין, עם זאת, כי - להוציא תנודות מקומיות קלות - המים חוזרים בדיוק למקום שממנו יצאו בכל אזור של השלולית. הגל גרם להפרעה בפני השלולית הרוגעים, אך כל מים לא הועברו ממקום אחד למשנהו. נדגיש שוב: לאחר שחולפת ההפרעה, התווך חוזר למצבו ההתחלתי.

הרי דוגמה נוספת המבהירה כי בתנועת גלים מה שמועבר ממקום למקום הוא ההפרעה בתווך ולא חומר התווך עצמו. אם תעמדו במקום גבוה ביום סוער ותתבוננו בשדה חיטה, תבחינו בגלים החולפים על פני השיבולים. כל שיבולת אינה זזה ממקומה כי אם מתנדנדת הלוך ושוב. אם תעמדו בשביל צר במרכז השדה, השיבולים הנעות בשולי השביל יתחככו ברגליכם בדומה למים המרטיבים את כפות הרגליים כאשר עומדים על גדות אגם. בזמן תנועת הגל, השיבולים נעות קדימה ואחורה כשהן מתנדדות בין גבולות מוגדרים, אך אינן זזות ממקומן. כאשר תנועת הגל פוסקת, השיבולים שבות למצבן ההתחלתי. תכונה זו מאפיינת את תנועתם של גלים: התווך הנושא את הגל שב למצבו הראשוני לאחר שחולפת בו ההפרעה.

מהירות ההתקדמות של גל מחזורי קשורה בתדר של הגלים ובאורך הגל שלהם. נוכל להבין זאת אם נתבונן במקרה הפשוט של גלי מים (איורים 18.5 ו-18.6). דמו לעצמכם שאתם קובעים את מבטכם בנקודה קבועה על פני המים וצופים בגלים החולפים על פני נקודה זאת. אם נמנה את מספר שיאי-הגל החולפים דרך הנקודה בכל שנייה (התדירות) ונצפה גם במרחק שבין השיאים (אורך הגל), נוכל לחשב את המרחק האופקי שכל שיא עובר בכל שנייה - וזו **מהירות הגל**.

לדוגמה, אם שני שיאים עוברים נקודה נייחת בכל שנייה, ואם אורך הגל הוא 10 מטרים, הרי שגלים באורך כולל של 10×2 מטרים חולפים דרך הנקודה

מהירות הגל



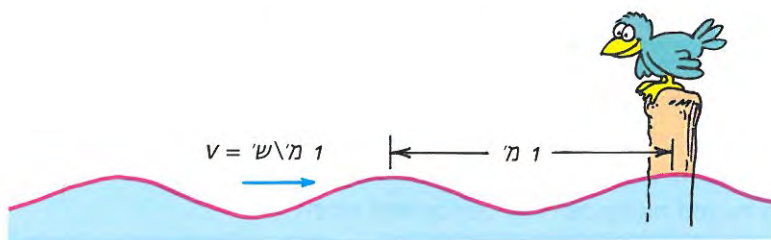
איור 18.5
גלי מים - מבט מלמעלה.

איור 18.6
גלי מים.

בשנייה אחת. מהירות הגל היא לפיכך 20 מטר בשנייה. נוכל לומר:

$$\text{מהירות הגל} = \text{תדירות} \times \text{אורך הגל}$$

קשר זה תקף בכל סוגי הגלים, יהיו אלה גלי מים, גלי קול או גלי אור.



איור 18.7

אם אורך הגל 1 מ' וגל אחד חולף על פני העמוד בכל שנייה, אזי מהירות הגל היא 1 מ'ש'.

1. אם שיירה של משאיות, שאורך כל אחת מהן 10 מטרים, חולפת על פניך בקצב של שלוש משאיות בכל שנייה, מהי מהירותה של שיירת המשאיות?
2. אם גל מים מתנווד מעלה-מטה שלוש פעמים בכל שנייה ואם המרחק בין שיאים סמוכים של הגל הוא 2 מ', מהי תדירות הגל? מהו אורך הגל? מהי מהירות הגל?

שאלות

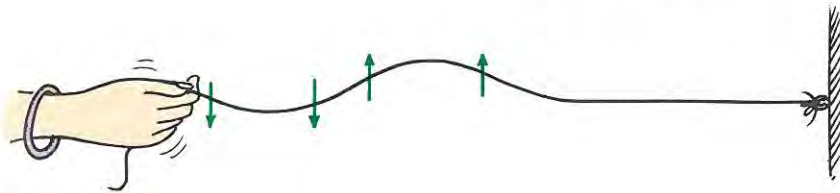
1. 30 מ'ש'. ניתן לראות זאת בשני אופנים, באופן של פרק 2 ובאופן של פרק 18:
לפי הנוסחה $30 \text{ מ'ש'} = 10 \times 3 \text{ מ'ש'} = v = d/t$, שבה d הוא אורך השיירה החולף על פניך ב- t שניות; או אם נשווה את שיירת המשאיות לתנועת גל שבה אורך הגל הוא 10 מטרים והתדירות 3 הרץ, אזי מהירות = תדירות $\times$ אורך גל $= 3 \times 10 \text{ מ'ש'} = 30 \text{ מ'ש'}$.
2. תדירות הגל היא 3 הרץ, אורך הגל הוא 2 מ' ומהירות הגל = תדירות $\times$ אורך גל $= 3 \times 2 = 6 \text{ מ'ש'}$. מקובל לבטא זאת במשוואה $v = f\lambda$, כאשר v היא מהירות הגל, f תדירותו ו- λ (האות היוונית למדה) - אורך הגל.

תשובות:

גלי רוחב

קישרו חבל לקיר והחזיקו בידכם את קצהו האחר. אם לפתע תטלטלו את הקצה החופשי טלטול חד, מעלה-מטה, הפרעה בצורת בליטה (דופק) תנוע לאורך החבל ובחזרה (איור 18.8). במקרה זה תנועת החבל (החיצים המצביעים מעלה-מטה) מתרחשת במאונך לכיוונה של התקדמות ההפרעה. התנועה המאונכת המתרחשת הצידה נקראת תנועה רוחבית. אם עתה נטלטל את החבל מעלה-מטה בתנועה הרמונית פשוטה, סדרת הדפקים תחולל גל מחזורי בחבל. הואיל ותנועת התווך (במקרה זה החבל) מאונכת לכיוון התקדמות הגל (רוחבית), סוג כזה של גל נקרא **גל רוחב**.

גלים הנוצרים במיתרים מתוחים של כלי נגינה ועל שטח הפנים של נוזלים הם גלי רוחב. בהמשך נראה שגלים אלקטרומגנטיים, המהווים את גלי הרדיו ואת האור, גם הם גלי רוחב.

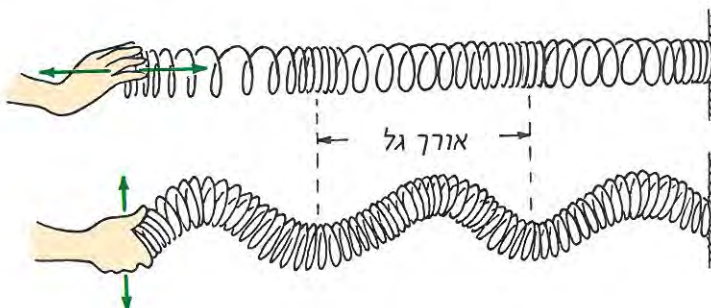


איור 18.8
גל רוחב.

לא כל הגלים הם גלי רוחב. לעיתים חלקיקי התווך נעים הלוך ושוב בכיוון התקדמות הגל. החלקיקים נעים לאורך כיוון ההתקדמות של הגל ולא במאונך. לו. כך נוצרים **גלי אורך**.

הן גלי רוחב והן גלי אורך אפשר להדגים בעזרת קפיץ סלילי, כמתואר באיור 18.9. גל רוחב אפשר להדגים על ידי טלטול קצה הקפיץ מעלה-מטה. גל אורך אפשר להדגים על ידי טלטול קצה הקפיץ קדימה ואחורה. במקרה זה אנו רואים כי התווך מתנוודד בכיוון העברת האנרגיה. חלק של הקפיץ נדחס וכתוצאה מכך מתקדם גל דחיסה, או גל ציפוף, לאורך הקפיץ. בין שני אזורי דחיסה סמוכים ישנו אזור של מתיחה המכונה התקלשות, או קילוש. הן אזורי הדחיסה והן אזורי ההתקלשות מתקדמים באותו כיוון לאורך הקפיץ. גלי קול הם גלי אורך; נדון בהם בפרוטרוט בפרק הבא.

אורך הגל של גל אורך הוא המרחק שבין אזורי דחיסה או בין אזורי התקלשות עוקבים. גלי קול באוויר הם הדוגמה השכיחה ביותר של גלי אורך. כל אחת ממולקולות האוויר מתנוודדת הלוך ושוב מסביב לנקודת שיווי משקל כלשהי תוך כדי התקדמות הגל. כאמור, בפרק הבא נרחיב את הדיון בגלי הקול.



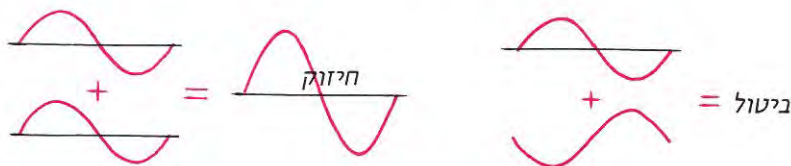
איור 18.9

שני הגלים מעבירים אנרגיה משמאל לימין. כשמנדנדים את קצה הקפיץ הסלילי מעלה-מטה נוצר גל רוחב. כשמנדנדים אותו קדימה-אחורה נוצר גל אורך.

התאבכות

כידוע, גוף חומרי, כדוגמת גוש סלע, אינו יכול לחלוק את המקום שהוא תופס במרחב עם גוש סלע אחר; לעומת זאת, יותר מתנודה אחת או מגל אחד יכולים להתקיים באותו זמן במקום אחד. אם נשליך שני אבנים לשלולית מים, הגלים שתיצור כל אחת מן האבנים עשויים לחפוף חלקית אלו את אלו, כלומר, להימצא בזמן אחד באותו מקום, וליצור **תבנית התאבכות**. בתחום התבנית, תופעות הגל עשויות להתעצם, להיחלש ואף להתבטל כליל.

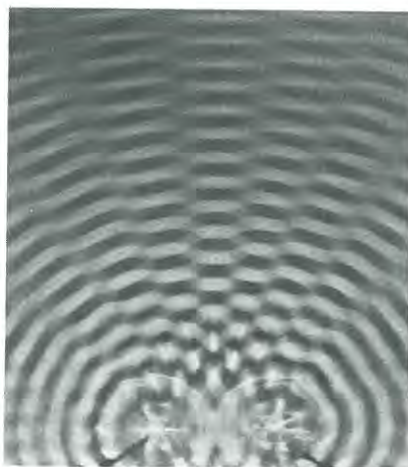
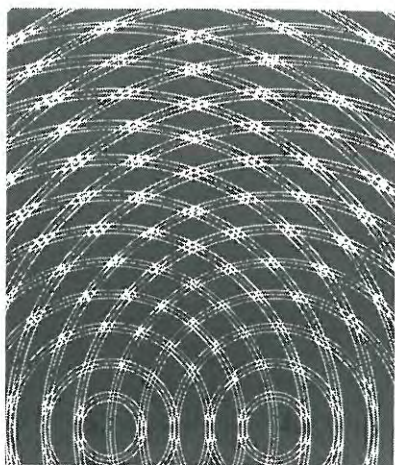
כאשר שיא של גל אחד פוגש שיא של גל אחר, השפעותיהם של שני הגלים מתחברות. כתוצאה מכך נוצר גל בעל משרעת מוגדלת. מצב זה נקרא התאבכות בונה (איור 18.10). אם שיא של גל אחד חופף שקע של גל אחר, השפעתו של כל אחד מהגלים מופחתת. האזור הגבוה של גל אחד פשוט ממלא את האזור השקוע של הגל האחר. מצב זה נקרא התאבכות הורסת.



איור 18.10
התאבכות בונה
והתאבכות הורסת
בגלי רוחב.

הגלים שבהם קל במיוחד להבחין בתופעת ההתאבכות הם גלי מים. באיור 18.11 נוכל להבחין בתבנית ההתאבכות הנוצרת כאשר שני גופים מתנדדים נוגעים בפני המים. ניתן להבחין באזורים שבהם שיא של גל אחד חופף שקע של גל אחר ונוצר אזור של משרעת אפס. לכל נקודה לאורכו של אזור כזה מגיעים הגלים בסטיות מנוגדות ממצב שיווי המשקל. אומרים כי הם מצויים במופע מנוגד זה לזה.

התאבכות היא תופעה אופיינית לכל סוגי הגלים, יהיו אלה גלי מים, גלי קול או גלי אור. אנו נדון בהתאבכות גלי קול בפרק הבא, ובהתאבכות אור נדון בפרק 28.

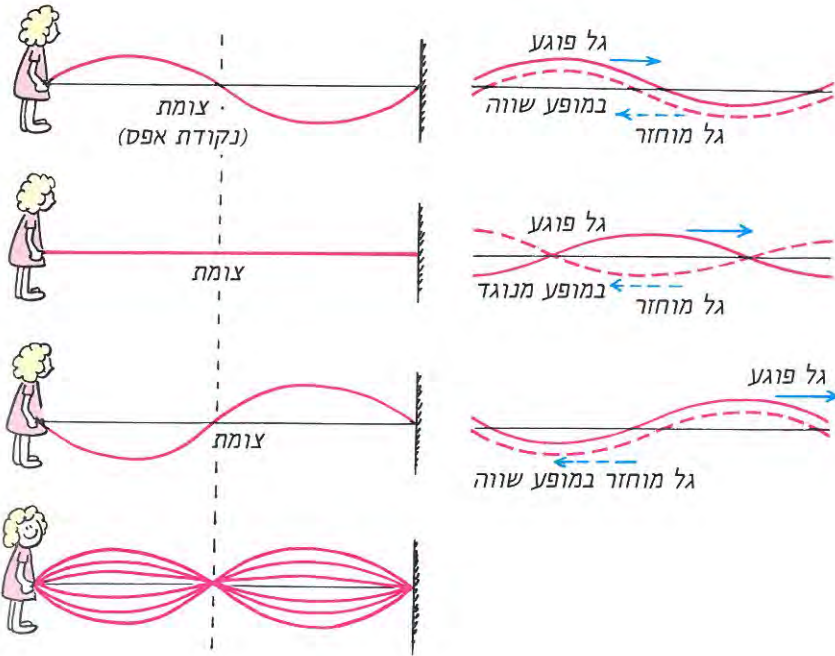


איור 18.11

שתי סדרות של גלי מים חופפים יוצרות תבנית התאבכות.

איור 18.12

בין הגל הפוגע לגל המוחזר חלה התאבכות היוצרת גל עומד.

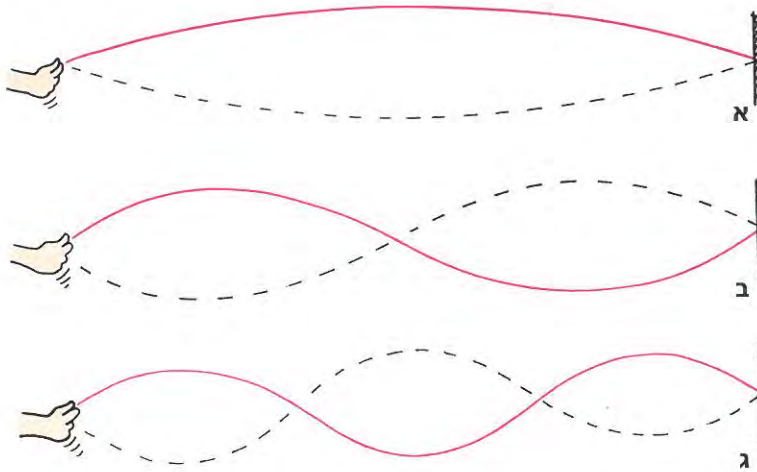


גלים עומדים

אם נקשור חבל לקיר ונטלטל את קצהו החופשי מעלה-מטה, ניצור בחבל סדרת גלים מתקדמת. הקיר קשיח מכדי שיתנוודד, כך שהגלים מוחזרים לאורך החבל. אם נדנדנו את החבל בקצב מתאים, נוכל לגרום לכך שהגל הפוגע והגל המוחזר ייצרו **גל עומד**, שבו קיימות לאורך החבל נקודות מסוימות הנשארות

נייחות ואינן מתנוודדות. נקודות אלה נקראות נקודות צומת. גלים עומדים הם תוצאה של התאבכות. כאשר שתי סדרות של גלים בעלי משרעות שוות ואורכי גל שווים חולפות זו דרך זו בכיוונים מנוגדים, הגלים מצויים ללא הרף במופע שווה או במופע מנוגד זה עם זה. כתוצאה מכך נוצרים אזורים יציבים של התאבכות בונה ושל התאבכות סותרת (איור 18.12).

תוכלו ליצור בקלות גלים עומדים בעצמכם. קישרו חוט, או עדיף - צינור גומי, בין שתי נקודות עיגון יציבות. נדנדו את הצינור בידכם מצד לצד סמוך לאחת מנקודות העיגון. אם תנדנדו אותו בתדירות מתאימה, ייווצר בצינור גל עומד כמתואר באיור 18.13. הנקודות בגל העומד שהן בעלות המשרעת המרבית נקראות נקודות טבור. כל נקודת טבור נמצאת בדיוק באמצע בין שתי נקודות צומת. הגדילו את תדירות הנדנוד פי שניים ובחבל ייווצר גל עומד שאורך הגל שלו הוא מחצית מזה של הגל הקודם, כלומר שתי לולאות. (המרחק בין שתי נקודות צומת הוא חצי אורך גל; שתי לולאות מהוות אורך גל שלם אחד.) הגדילו את התדירות פי שלושה ותקבלו אורך גל השווה לשליש אורך הגל המקורי, שלוש לולאות, וכך הלאה. מעניין לציין שניתן לקרב את האצבע אל הצינור המתנדנד סמוך לנקודת צומת (מכל צד) והצינור לא ייגע בה. אם תקרבו את האצבע לאזור אחר של הצינור, הוא יפגע בה בכל תנועה.



איור 18.13

(א) נדנדו את החבל עד שתצליחו ליצור גל עומד בעל מקטע אחד ($\frac{1}{2}$ אורך גל). (ב) נדנדו בתדירות כפולה ותקבלו גל בעל שני מקטעים (אורך גל אחד). (ג) טלטלו את החבל בתדירות גדולה פי שלושה כך שיווצרו שלושה מקטעים (1.5 אורכי גל).

גלים עומדים נוצרים במיתרים של כלי נגינה כאשר פורטים עליהם, מנגנים עליהם בקשת או מקישים עליהם. גלים עומדים נוצרים גם בעמוד האוויר שבתוך חליל של עוגב או באוויר שבתוך קנקל כאשר נושפים מעל פתחו. ניתן לחולל גלים עומדים באמבט מים או בספל קפה אם נטלטל אותם הלוך ושוב בקצב המתאים. גלים עומדים ניתן ליצור הן בגלי רוחב והן בגלי אורך.

שאלות

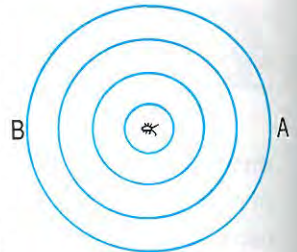
1. הייתכן שגל אחד יבטל גל אחר באופן שהמשרעת תתאפס כליל?
2. נניח שהצלחתם ליצור גל עומד בן שלושה מקטעים כמתואר באיור 18.13. אם עתה תגדילו את קצב הנדנוד פי שניים, כמה מקטעי גל יופיעו בגל העומד החדש? כמה אורכי גל?

באיור 18.14 מתוארת תבנית של גלי מים שיוצרת חיפושית המטלטלת את רגליה תוך שהיא מתנועת מעלה ומטה במרכזה של שלולית מים שקטה. החיפושית אינה מתקדמת לשום מקום אלא מכה במים במקום קבוע אחד. הגלים שהיא יוצרת הם מעגלים משותפי-מרכז, זאת משום שמהירות הגל שווה בכל הכיוונים. אם החיפושית מטלטלת את המים בתדירות קבועה, המרחק שבין שיאי הגל (אורך הגל) יהיה שווה לכל הגלים העוקבים. הגלים יפגעו בנקודה A באותה תדירות שבה הם יפגעו בנקודה B, או בכל נקודה אחרת בקרבת החיפושית. זו אותה תדירות שבה החיפושית מטלטלת את עצמה על פני המים.

איור 18.14

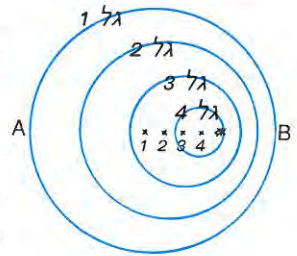
מבט מלמעלה על גלי מים שיוצרת חיפושית ניחת המכה ברגליה במים שקטים.

תוצא דופלר



תשובות:

1. בהחלט. זהו המצב של התאבכות סותרת. לדוגמה, בגל עומד בחבל יש נקודות שהמשרעת שלהן היא אפס - הצמתים.
2. אם תגדילו את התדירות המופעלת על החבל פי שניים, ייווצר גל עומד בעל מספר כפול של מקטעים - שישה מקטעים. מאחר שאורך גל שלם מורכב משני מקטעים, הרי שהגל העומד שיווצר יהיה בן שלושה אורכי גל.



איור 18.15

גלי המים שיוצרת חיפושית המתקדמת במים שקטים.

נניח עתה שהחיפושית המתנדנדת מתקדמת על פני המים במהירות פחותה ממהירות ההתקדמות של הגל. במצב זה החיפושית "רודפת" אחר חלק מן הגלים שהיא עצמה יצרה. תבנית הגלים מתעוותת ואינה עוד בצורת מעגלים משותפי מרכז (איור 18.15). מרכז הגל החיצוני נוצר בזמן שהחיפושית נמצאה במרכזו של מעגל זה. מרכזו של הגל הבא, הקטן יותר, נוצר בזמן שהחיפושית נמצאה במרכזו של מעגל זה, וכך הלאה. מרכזי הגלים המעגליים מתקדמים בכיוון תנועת החיפושית. אף שהחיפושית ממשיכה להתנווד מעלה ומטה באותה תדירות כמקודם, צופה הנמצא בנקודה B יפגוש גלים אלה לעיתים קרובות יותר. הוא יפגוש תדירות גבוהה יותר. הסיבה לכך היא שהמרחק שצריך לעבור כל אחד מהגלים, המתקדמים בזה אחר זה, קצר יותר, ולכן הם מגיעים אל B בתדירות גבוהה יותר מכפי שהיו מגיעים אילו לא התקדמה החיפושית בכיוון B. לעומת זאת, צופה הנמצא בנקודה A יפגוש תדירות נמוכה יותר עקב הזמן הארוך יותר שיחלוף בין הגעת שיא-גל אחד למשנהו. הסיבה לכך היא שכל גל צריך לעבור מרחק ארוך יותר אל A משעבר קודמו, בגלל תנועת החיפושית. שינוי זה בתדירות כתוצאה מתנועת המקור (או הקולט) נקרא **תוצא דופלר** (אפקט דופלר).

גלי מים מתפשטים על פני המים השטוחים. לעומת זאת, גלי קול וגלי אור מתפשטים בכל הכיוונים במרחב התלת-ממדי, בדומה לבלון מתנפח. וכשם שהגלים המעגליים קרובים יותר זה לזה בקדמת החיפושית השוחה, גלי קול או גלי אור כדוריים קרובים יותר זה לזה בקדמת מקור נע ולפיכך פוגעים במקור הקולט אותם בתדירות גבוהה יותר.

קל להבחין בתוצא דופלר כשמאזינים לגובה הצליל המשתנה של צופר מכונית החולפת על פנינו. כאשר המכונית מתקרבת צליל הצופר גבוה מן הרגיל (גבוה יותר בסולם הצלילים, לא חזק יותר). הסיבה לכך היא שגלי הקול פוגעים בנו בתדירות גבוהה יותר. ולאחר שהמכונית חולפת על פנינו ומתחילה להתרחק, אנו שומעים ירידה בגובה הצליל, משום שגלי הקול מגיעים אלינו בתדירות נמוכה יותר (איור 18.16).



איור 18.16

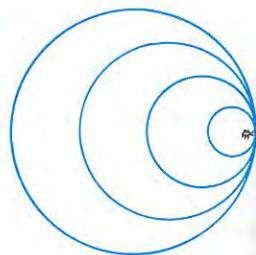
גובה הצליל שמשמיעה מכונית הכיבו נשמע גבוה מן הצליל המקורי כשהיא נעה לקראתך, ונמוך מן הצליל המקורי כשהיא מתרחקת.

תוצא דופלר מתרחש גם באור. כאשר מתקרב אלינו מקור אור, תדירותו הנמדדת גדלה, וכאשר הוא מתרחק מאיתנו, תדירותו קטנה. גידול בתדירות האור מכונה בשם היסט לכחול, משום שתדירות גלי האור גבוהה יותר בקצה הכחול של ספקטרום הצבעים. הקטנת התדירות מכונה היסט לאדום שכן הצבע האדום נמצא בקצה בעל התדירויות הנמוכות של ספקטרום הצבעים. תופעת ההיסט לאדום מתגלה, למשל, באור שפולטות הגלקסיות - אותם צבירים עצומים של כוכבים במרחבי היקום. מדידת שיעורי ההיסט מאפשרת לנו לחשב את מהירויות ההתרחקות של הגלקסיות. בכוכב המסתחרר סביב צירו במהירות גדולה נראה היסט לאדום בצד המתרחק מאיתנו תוך כדי סיבובו והיסט לכחול בצידו האחר, המסתובב לעברנו. כך אפשר לחשב את קצב הסחרור של הכוכב.

שאלה

כאשר מקור גלים נע לעברכם, האם תבחינו בגידול במהירות הגל או בהקטנתה?

מחסומי גלים



איור 18.17

תבנית הגלים שיוצרת
חיפושית הנעה במהירות
הגל.

תופעה מעניינת מתרחשת כאשר מהירותו של מקור הגלים משתווה למהירות הגלים שהוא יוצר. נוצר "מחסום גלים". ניזכר בחיפושית יוצרת הגלים שבדוגמה הקודמת ונתאר לעצמנו כי היא שוחה במהירות שבה מתקדמים הגלים. ברור שהחיפושית תישאר תמיד בחזית הגל שהיא מחוללת. לפיכך לא יקדימו עוד הגלים את החיפושית אלא יצטברו, או יתרכבו זה על גבי זה, ממשי לפני החיפושית (איור 18.17). החיפושית תיתקל במחסום גלים. מאמץ רב יידרש ממנה כדי לחלוף דרך המחסום הזה בטרם תוכל לשחות במהירות גבוהה ממהירות ההתקדמות של הגל.

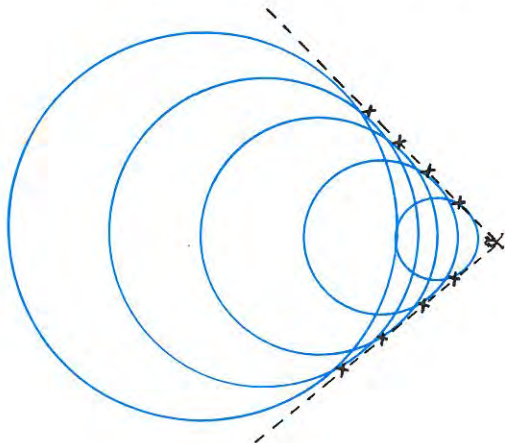
כדבר הזה בדיוק קורה למטוס הטס במהירות הקול. הגלים מצטברים זה על גבי זה ויוצרים מחסום של אוויר דחוס בצידם הקדמי של כנפי המטוס וחלקיו האחרים. על המטוס להפעיל כוח דחף (סחב) ניכר כדי לפלס את דרכו מבעד למחסום הזה. לאחר שהבקיע דרך המחסום, המטוס יכול לנוע במהירות העולה על מהירות הקול מבלי להיתקל בהתנגדות דומה. המטוס הפך להיות על-קולי. הדבר דומה לחיפושית שהצליחה לחלוף את מחסום הגלים ומעתה המים שלפניה חלקים ורוגעים יחסית.

כאשר החיפושית שוחה במהירות העולה על מהירות הגל, היא יוצרת, עקרונית, תבנית גלים כדוגמת זו שבאיור 18.18. היא משיגה את הגלים שהיא מחוללת. גלים אלה, המכונים **גלי חרטום**, חופפים זה את זה בקצותיהם ויוצרים תבנית בצורת ראש חץ הנראית כאילו היא נגררת בעקבות החיפושית. גל החרטום המוכר שיוצרת סירת מרוץ המפלסת את דרכה בים הוא גל לא-מחזורי הנוצר עקב ההצטברות של גלים מחזוריים מעגליים רבים.

גלי חרטום

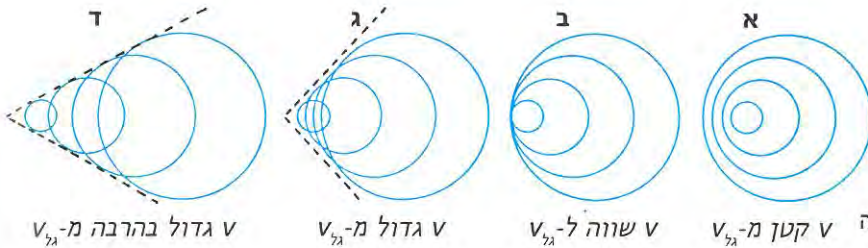
איור 18.18

תבנית הגלים שמחוללת
חיפושית הנעה במהירות
העולה על מהירות הגל.



תשובה:

לא זה ולא זה! התדירות הנצפית היא המשתנה כאשר המקור נע, ולא מהירות הגל. הבהירו לעצמכם את ההבדל בין מהירות הגל לבין תדירותו. קצב התנודות של הגל הוא עניין שונה לחלוטין מן המהירות שבה הוא עובר ממקום למקום.



איור 18.19

תבניות הגלים שיוצרת
חיפושית הנעה
במהירויות גדולות
והולכות. חפיפה
והצטברות גלים בשוליים
מתרחשות רק כשהיא נעה
מהר יותר ממהירות הגל.

תבניות גלים אחדות שיוצרים מקורות בתנועה מתוארות באיור 18.19. שימו לב כי לאחר שמהירות המקור עברה את מהירות הגל, הגדלה נוספת של המהירות מקטינה את זווית ראש החץ של גל החרטום*.

סירת מרוץ המפלסת את דרכה במים יוצרת גל חרטום דו-ממדי. בדומה לכך, מטוס על-קולי יוצר גל הלם תלת-ממדי. כשם שגל החרטום נוצר עקב הצטברות וחפיפה של מעגלים היוצרים צורת ראש חץ, גל ההלם נוצר כתוצאה מחפיפה של כדורים המהווים יחד צורת קונוס (חרוט). וממש כפי שגל החרטום של סירת מרוץ מתפשט והולך עד שהוא מגיע לחוף האגם, השובר הקוני שיוצר המטוס העל-קולי מתפשט עד שהוא מגיע לקרקע. גל החרטום של סירת מרוץ חולפת עלול להתזז ולהרטיב אתכם אם אתם יושבים על שפת המים. במובן מסוים ניתן לומר שפגע בכם "בום על-מימי". בדומה לכך, כשמעטפת האוויר הדחוס הקונית הנסחפת בעקבות המטוס העל-קולי מגיעה אל בני האדם שעל הקרקע, קול הנפץ החזק שהם שומעים הוא התופעה הידועה בשם **בום על-קולי**.

איננו שומעים נפץ דומה כשחולף מטוס תת-קולי, שמהירותו קטנה ממהירות הקול, מכיוון שגלי הקול מגיעים לאוזנינו בזה אחר זה ולכן הם נקלטים אצלנו כצליל רציף אחד. רק כשמהירות המטוס עולה על מהירות הקול, הגלים מצטברים וחופפים זה את זה וכך הם פוגעים במאזין בפרץ אחד. הגידול הפתאומי בלחץ האוויר הוא תופעה הדומה במידה רבה להתפשטות האוויר הפתאומית המתרחשת בעקבות התפוצצות. בשני המקרים מגיע לאוזנו של השומע פרץ של אוויר בלחץ גבוה. האוזן מתקשה להבחין בין הלחץ הגבוה הנוצר בעקבות התפוצצות לבין הלחץ הגבוה של גלים חופפים רבים.

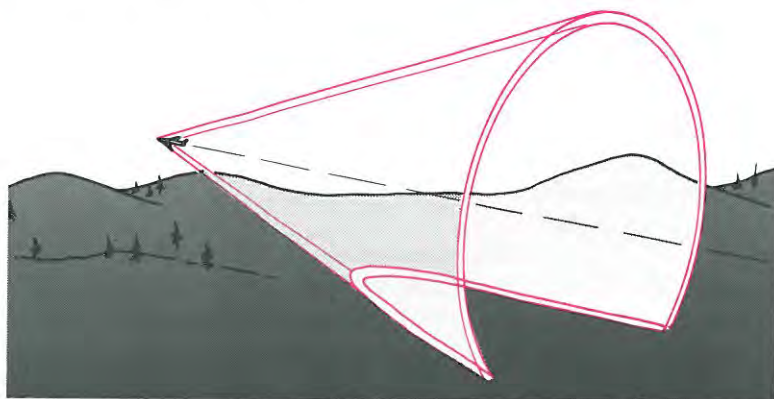
ספורטאי המתמחה בסקי מים יודע שסמוך לגבנון המים הגבוה של גל החרטום, שצורתו ראש חץ, ישנו שקע שגם צורתו ראש חץ. כאלה הם פני הדברים גם בגל הלם, המורכב, למעשה, משני חרוטים: חרוט של לחץ גבוה הנוצר בחרטום המטוס וחרוט של לחץ נמוך הנמשך אחריו בזנב המטוס. קצותיהם של שני חרוטים אלה נראים בתצלום של הקליע העל-קולי שבאיור 18.20. בין שני חרוטים אלה לחץ האוויר עולה באופן חד אל מעל ללחץ האטמוספירי הרגיל, אחר כך הוא יורד אל מתחת ללחץ האטמוספירי, ולבסוף הוא חוזר במהירות ללחץ הרגיל מעבר לחרוט הזנב הפנימי (איור 18.22). השינוי הפתאומי ממצב של לחץ-יתר למצב של תת-לחץ מחזק את עוצמת הבום העל-קולי.

איור 18.20

גל הלם שיוצר קליע החודר
דרך לוח פלסטיק. קרני האור
נשברות כשהן עוברות דרך
האוויר הדחוס המהווה את גל
ההלם, וכך ניתן לראותו.

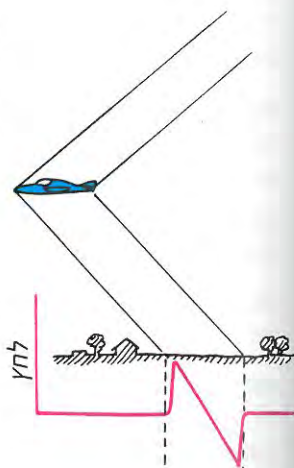
* למעשה, גלי חרטום שיוצרות סירות וספינות במים הם תופעה מורכבת יותר מכפי שתיארנו כאן. הדיון המפושט בתופעה זו נועד להבהיר את האופן שבו נוצרת התופעה המורכבת פחות של גלי הלם באוויר.

איור 18.21 גל הלם.



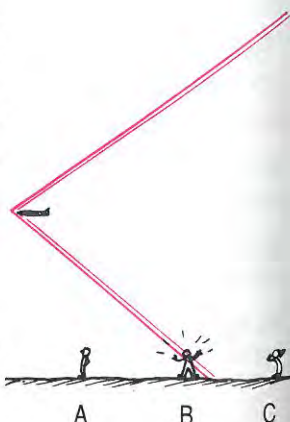
איור 18.22

למעשה, גל ההלם מורכב משני קונוסים (חרוטים) - קונוס של לחץ גבוה שקודקודו בחרטום המטוס, וקונוס של לחץ נמוך שקודקודו בזנבו. לגרף של לחץ האוויר על פני הקרקע בין הקונוסים צורה של האות הלטינית N.



רבים סבורים בטעות שגפצי בום על-קולי נוצרים ברגע שמטוס מבקיע את מחסום הקול, כלומר, ברגע שבו הוא עובר את מהירות הקול. לטעון כך הרי זה כמו לומר שסירת מרוץ יוצרת גל חרטום רק ברגע שבו היא משיגה את הגלים שהיא עצמה יוצרת, ואין זה כך. למעשה, גל הלם והבום העל-קולי הנלווה לו נסחפים ברציפות בעקבות מטוס הטס במהירות הגדולה ממהירות הקול, ממש כפי שגל החרטום נסחף ברציפות כשובל של סירת מרוץ. באיור 18.23, מאזין B שומע כרגע את הבום העל-קולי. מאזין C כבר שמע אותו ומאזין A ישמע אותו בקרוב. אך המטוס שיצר את גל ההלם הזה אולי עבר את מחסום הקול כבר לפני זמן רב!

המקור הנע אינו צריך לפלוט גלי קול כדי שייוצר גל הלם. מרגע שבו גוף כלשהו נע במהירות על-קולית הוא יוצר קול. קליע רובה על-קולי החולף מעל לראש יוצר קול נפץ קל שאינו אלא בום על-קולי קטן. אילו היה הקליע גדול יותר וגורם להסטת אוויר רב יותר, קול הנפץ היה גם הוא חזק יותר. מאלף האריות בקרקס משמיע קול נפץ בנפנוף שוט; אין זה אלא בום על-קולי הנוצר בקצה השוט, הנע מהר יותר ממהירות הקול. לא הקליע ולא השוט בקרקס הם מקורות קול כשלעצמם, אך בעת שהם נעים במהירות העולה על מהירות הקול הם יוצרים קול, כאשר גלי אוויר נוצרים בצידי הגוף הנע.



איור 18.23

גל ההלם טרם הגיע למאזין A, אך הוא מגיע כרגע למאזין B וכבר הגיע למאזין C.

גל הלם גל בצורת קונוס (חרוט) הנוצר כאשר עצם נע במהירות על-קולית דרך זורם (נוזל או גז).

בום על-קולי קול הנפץ הרם הנשמע כאשר מגיע גל הלם אלינו.

שאלות חזרה

1. כיצד נקראת תנועה הלוך ושוב? כיצד נקרא דבר המתנדנד הן במקום והן בזמן?
2. מהו מקורם של כל הגלים?
3. במה נבדלים גלי אור מגלי קול?

תנודות של מטוטלת

4. מהי התכונה של מטוטלות שבזכותה הן כה שימושיות בשעונים?
5. מהו משך המחזור של מטוטלת?
6. אם נדרשת למטוטלת שנייה אחת להשלמת תנודה אחת, הלוך ושוב, מהו משך המחזור שלה?
7. משך המחזור של מטוטלת מסוימת הוא 2 ש', וזה של מטוטלת אחרת הוא 1 ש'. איזו מטוטלת ארוכה יותר?

תיאור הגל

8. כיצד קשורה עקומת הסינוס לתנועת גלים?
9. הבחינו בין המונחים הבאים הקשורים בתנועת גל: משרעת, אורך גל, תדירות ומשך המחזור.
10. כמה תנודות בשנייה מתרחשות בגל רדיו של 101 מגה-הרץ?
11. מה הקשר בין תדירות לבין משך המחזור?

תנועת גלים

12. מה בדיוק נע מן המקור לקולט בתנועה גלית?
13. האם התווך שבו נע גל מתקדם עם הגל עצמו? התוכלו לבסס את תשובתכם בעזרת דוגמאות?

מהירות הגל

14. מה הקשר בין התדירות, אורך הגל ומהירות הגל?
15. אם מגדילים את תדירותו של גל שמהירותו קבועה, האם יגדל אורך הגל או יקטן?

גלי רוחב

16. מהו כיוון התנודות ביחס לכיוון התקדמות הגל בגל רוחב?

תקציר מונחים

עקומת סינוס קו עקום בצורת גל, המותווה על ידי גוף הנע בתנועה הרמונית פשוטה ובתוך כך נע גם במהירות קבועה בניצב לכיוון התנודה ההרמונית. לדוגמה: המסלול דמוי הגל המצטייר על סרט נע כאשר מטוטלת מתנדדת מעליו במאונך לכיוון תנועת הסרט.

משרעת (תנופה, אמפליטודה) בגל או בתנודה, ההעתק המרבי ממצב שיווי המשקל (האמצע) לכל צד.

אורך גל המרחק בין שיאים או שקעים עוקבים בגל, או בין חלקים עוקבים זהים אחרים שלו.

תדירות מספר התנודות ליחידת זמן של גוף הנע בתנועה הרמונית פשוטה או, בגל מחזורי, מספר הגלים החולפים דרך נקודה ביחידת זמן.

הרץ יחידת התדירות במערכת היחידות המטרית הבינלאומית (SI). הרץ אחד (סימון לועזי: Hz) פירושו תנודה אחת בשנייה.

משך מחזור (זמן מחזור, תקופה) משך הזמן שבו גוף מתנדנד, או גל, משלים תנודה שלמה אחת; שווה ל-1/התדירות.

מהירות הגל המהירות שבה הגלים חולפים דרך נקודה מסוימת:

מהירות הגל = תדירות $\times$ אורך הגל.

גל רוחב גל שבו התנודות מתרחשות בכיוון מאונך לכיוון התקדמות הגל. אור וגלי רדיו הם גלי רוחב.

גל אורך גל שבו חלקיקי התווך (החומר) שבו הוא נע מתנדדים הלוך ושוב באותו כיוון שבו מתקדם הגל. גלי קול הם גלי אורך.

תבנית התאבכות התבנית הנוצרת כתוצאה מהרכבה (סופרפוזיציה) של גלים שונים המחזקים אלו את אלו במקומות מסוימים וגורמים לביטול הדדי חלקי, או מלא, במקומות אחרים.

גל עומד תבנית גל שאינה מתקדמת, הנוצרת בתווך כאשר שתי סדרות של גלים זהים חולפים דרכו בכיוונים מנוגדים.

תוצא דופלר השינוי בתדירות של גל הנובע מתנועת מקור הגל או מתנועתו של הקולט.

גל חרטום הגל דמוי ראש חץ הנוצר כאשר גוף נע על פני נוזל במהירות העולה על מהירות הגלים.

מטלות בית

קישרו צינור גומי, קפיץ או חבל לנקודת עיגון קבועה וחוללו בו גלים עומדים. בידקו כמה נקודות צומת אתם מסוגלים ליצור.

תרגילים

1. אם נעביר שעון מטוטלת, שהיה מדויק בגובה פני הים, למקום גבוה בהרים, האם הוא ימהר או יפגר?
2. אם מקצרים מטוטלת, האם תקטן תדירותה או תגדל? מה יקרה למשך המחזור שלה?
3. מנדנדים תיק ריק הלוח ושוב בתדירותו הטבעית. אם ממלאים את התיק בספרים, האם תדירותו הטבעית תקטן, תגדל, או תישאר ללא שינוי?
4. האם משך הזמן הנדרש כדי להתנדנד הלוח ושוב (משך המחזור) בנדנדת מטוטלת של מגרש משחקים ארוך יותר או קצר יותר כאשר עומדים על הנדנדה במקום לשבת עליה?
5. מדוע פוסעים אנשים נמוכים בצעדים מהירים יותר מאנשים גבוהים?
6. מדוע אנו נוטים לכופף את זרועותינו כאשר אנחנו רצים?
7. כיצד יש להניע את קצהו של צינור השקיה כדי שהמים הזורמים יתוו צורה הדומה לעקומת סינוס?
8. כיצד יש להניע קפיץ סלילי מתוח כדי ליצור בו גלי רוחב? גלי אורך?
9. אם משיהו המרוחק מאיתנו 5-6 מטרים יתיז מעט תרסיס ממכל של מטהר אוויר או של קוטל חרקים, נשמע את רחש התרסיס המשתחרר בטרם נחוש בריחו. מה ניתן ללמוד מכך על התקדמות גלי הקול?
10. אם נכפיל את תדירותו של עצם מתנדנד פי שניים, מה יקרה למשך המחזור שלו?
11. מהי תדירותו של מחוג השניות בשעון? של מחוג הדקות? של מחוג השעות?
12. אם אתם טובלים את האצבע בשלולית מים שוב ושוב ליצירת גלים, מה יקרה לאורך הגל אם תגדילו את קצב הטבילה?
13. מה הקשר בין תדירות התנודות של עצם קטן הצף על המים לבין מספר הגלים החולפים תחתיו בכל שנייה?

גלי אורך

17. מהו כיוון התנודות ביחס לכיוון התקדמות הגל בגל אורך?
18. מה הקשר בין אזורי דחיסה ואזורי התקלשות בגל אורך לבין שיאים ושקעים בגל רוחב?

התאבכות

19. הסבירו את ההבדל בין התאבכות בונה להתאבכות הורסת.
20. מה משמעות הדבר ששני גלים נמצאים ב"מופע מנוגד"?
21. אילו סוגי גלים מתאפיינים בתופעת ההתאבכות?

גלים עומדים

22. כיצד נוצר גל עומד?
23. מהו צומת?

תוצא דופלר

24. מה משתנה בתוצא דופלר - תדירות הגל, מהירות הגל או שתיהן?
25. האם תוצא דופלר אופייני לגלי אורך, לגלי רוחב או לשני סוגי הגלים?
26. למה הכוונה במונחים "היסט לכחול" ו"היסט לאדום" של אור?

מחסומי גלים

27. מה צריך להיות היחס בין מהירותו של מקור גלים לבין מהירות הגלים עצמם כדי שיווצר מחסום גלים?

גלי חרטום

28. מה צריך להיות היחס בין מהירותו של מקור גלים לבין מהירות הגלים עצמם כדי שיווצרו גלי חרטום?
29. באיזה אופן תלויה צורת ראש החץ של גל חרטום במהירותו של המקור?

גלי הלם

30. במה דומה גל חרטום לגל הלם?
31. באיזה אופן תלויה צורת הקונוס (החרוט) של גל חרטום במהירותו של המקור?
32. האם נכונה הטענה הבאה: בום-על-קולי מתרחש רק בעת שמטוס שובר את מחסום הקול?
33. האם נכונה הטענה הבאה: גוף מחולל בום-על-קולי רק אם הוא פולט גלי קול?

14. לאיזה מרחק מתקדם גל במשך מחזור אחד?

15. משליכים אבן לשלולית ועקב כך מתפשטים גלים מעגליים על פני המים. מה קורה לאנרגיית הגלים לאחר שהם שוככים?

16. תבניות הגלים שבאיור 18.5 מורכבות ממעגלים. מה ניתן ללמוד מכך על מהירות הגלים בכיוונים השונים?

17. מדוע רואים את הברק לפני ששומעים את הרעם?

18. האם נבחין בתוצא דופלר במקרה שבו מקור הקול נייח והמאזין נע? נמקו את תשובתכם. באיזה כיוון צריך המאזין להתקדם כדי לשמוע תדירות גבוהה יותר? נמוכה יותר?

19. האם נבחין בתוצא דופלר במקרה שבו המקור נע בניצב לקו המחבר אותו אל המאזין, כלומר, במצב שבו למעשה אין שינוי במרחק שבין המקור לקולט? הסבירו!

20. כיצד מסייע תוצא דופלר למשטרה ללכוד נהגים הנוסעים במהירות מופרזת?

21. איזה תפקיד ממלאת תופעת ההתאבכות ביצירתם של גלי חרטום או גלי הלם?

22. כיצד משתנה זווית המפתח של חרט גל-ההלם כאשר המטוס העל-קולי מגביר את מהירותו: האם היא גדלה, קטנה או נותרת ללא שינוי?

23. אם הרעש שמשמיע מטוס אינו מגיע אלינו מן המקום שבו המטוס נראה בשמים, האם ניתן ללמוד מכך שהמטוס טס במהירות העולה על מהירות הקול? הסבירו.

24. האם מתרחש בום על-קולי ברגע שמטוס עובר את מהירות הקול?

25. מדוע מטוס תת-קולי (שמהירותו אינה מגיעה למהירות הקול) אינו יכול ליצור בום על-קולי, ואין זה משנה עד כמה חזק הרעש שהוא משמיע?

26. תארו לעצמכם דג מהיר ביותר המסוגל לשחות במהירות העולה על מהירות הקול במים. האם ייצור דג כזה "בום על-קולי"?

בעיות

1. שייט בספינה מבחין בכך שגלים חולפים את שרשרת העוגן בקצב של גל אחד בכל 5 ש'. להערכתו המרחק בין שיאי הגלים הוא 15 מ'. הוא גם העריך נכונה את מהירות הגלים. התוכלו לחשב מהירות זו?

2. משקולת התלויה בקפיץ מתנוודת מעלה-מטה מרחק כולל של 20 סנטימטרים בקצב של שתי תנוודות בכל שנייה. מהם (א) התדירות, (ב) זמן המחזור, (ג) המשרעת?

3. גלי רדיו מתקדמים במהירות האור, 300,000 ק"מ/ש". חשבו את אורך הגל של גלי הרדיו הנקלטים במקלט הרדיו בתדר 100 מגה-הרץ.

4. יתוש מנפנף בכנפיו הלוך ושוב בקצב של 600 תנוודות בשנייה. כך נוצר הזמזום המעצבן בתדר 600 הרץ המגיע לאוזניים במהירות הקול (340 מ/ש"). מיצאו לאיזה מרחק מתקדם הקול בין שתי מכות כנף. במילים אחרות, חשבו את אורך הגל של זמזום היתוש.

5. בזמן קונצרט נושבת רוח הישר מן התזמורת אליכם במהירות 34 מ/ש". כנר המכוון את כינורו משמיע את הצליל לה (שתדירותו 440 הרץ). מהם התדירות, המהירות ואורך הגל של הקול שאתם שומעים?