



אילו התמוטט סלע גדול בלב המדבר, מרחק של מאות קילומטרים מיצור חי כלשהו, האם היה משמיע קול בנפילתו? אנשים שונים ישיבו תשובות שונות. "לא," יהיה מי שיאמר, "קול הוא עניין אישי, סובייקטיבי, המחייב את קיומו של מי שמאזין לו. אם אין שומע, אין קול." "הוא היה משמיע קול" יענה חברו, "קול הוא דבר אובייקטיבי, ולא דבר-מה המתקיים רק בראשו של המאזין." תכופות, המשתתפים בוויכוחים מעין אלה אינם מגיעים לידי הסכמה, מפני שאינם מבינים שהוויכוח ביניהם אינו על טבעו של הקול אלא על הגדרת המילה. הצדק יכול להיות עם שני הצדדים, תלוי בהגדרה שנוקטים; אך מחקר אמיתי ייתכן רק אם מגיעים לכלל הגדרה מוסכמת. הפיסיקאי נוקט בהגדרה אובייקטיבית. הוא מגדיר את הקול כצורה של אנרגיה הקיימת אם מאזינים לה ואם לא; זאת נקודת המוצא למחקריו.

רוב הקולות הם גלים הנוצרים מתנודות של גופים שונים. בפסנתר, בכינור או בגיטרה, מיתר מתנודד מחולל את הקול; בסקסופון יוצרת את הקול לשונית רוטטת; בחליל יוצר אותו עמוד אוויר המתנודד בעקבות נשיפה דרך הפייה. ואילו קולכם נוצר מרעידות של מיתרי הקול שבגרונכם.

בכל המקרים הללו, המקור המתנודד יוצר הפרעה המתפשטת בתווך שמסביבו - לרוב באוויר - בדמות גלי אורך. בתנאים רגילים תדירות התנודות של המקור ותדירות גלי הקול הנוצרים שוות זו לזו. אנו מבטאים את

מקור הקול

תחושתנו הנובעת מתדירות הקול במונח גובה הצליל. צליל גבוה, דוגמת זה המופק מחליל פיקולו, הוא בעל תדירות תנודות גבוהה, ואילו צליל נמוך, כמו זה של צופר אונייה, הוא בעל תדירות נמוכה. תחום הצלילים שהאוזן האנושית מסוגלת לשמוע משתרע בין תדירות של כ-20 הרץ לבין 20,000 הרץ בקירוב. עם ההזדקנות מצטמצם תחום התדירויות שאנו מסוגלים לשמוע. גלי קול שתדירותם נמוכה מ-20 הרץ נקראים גלים **תת-שמעיים** וכאלה שתדירותם עולה על 20,000 הרץ נקראים גלים **על-שמעיים**. איננו יכולים לשמוע גלי קול תת-שמעיים או על-שמעיים.

הקול באוויר

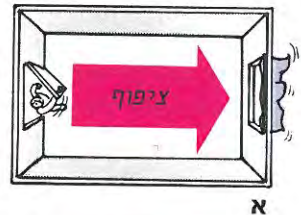
אם נמחא כף אל כף, גל הקול שייווצר לא יהיה מחזורי. יהיה זה דופק (פולס). ההפרעה שיוצר הדופק באוויר דומה לזו שיוצר דופק מתקדם בקפיץ סלילי. כל חלקיק מתנדד הלך ושוב בכיוון התקדמות הגל המתפשט.

כדי להבחיר לעצמנו את המתרחש בתהליך זה, נתבונן בחדר שבאיור 19.1 א. בקצהו האחד של החדר ישנו חלון פתוח ועליו וילון. בקצה האחר של החדר - דלת. נדמה לעצמנו כיצד, עם פתיחת הדלת, היא דוחפת ממקומן את המולקולות הסמוכות אליה לעבר המולקולות שבשכנותן. אלה נדחפות לעבר המולקולות השכנות אליהן, וכך הלאה - בדומה לגל דחיסה (ציפוף) המתקדם בקפיץ סלילי - עד לדחיפת הווילון מבעד לחלון. דופק של אוויר דחוס נע מן הדלת ועד לוילון. דופק זה של אוויר דחוס מכונה גם **ציפוף**.

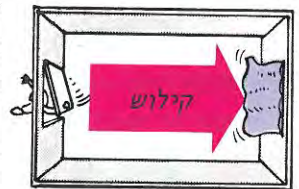
אם עתה סוגרים את הדלת (איור 19.1 ב), היא דוחפת את מולקולות האוויר הסמוכות לה אל מחוץ לחדר, וכך נוצר אזור של לחץ נמוך מאחוריה. אל האזור הזה ינועו מולקולות האוויר מהסביבה, תוך כדי יצירת אזור של לחץ נמוך במקום שממנו באו. האוויר באזור זה התקלש. מולקולות אחרות, רחוקות עוד יותר מהדלת, ינועו בתורן אל אזורי ההתקלשות, וכך תתקדם ההפרעה מצידו האחד של החדר אל צידו האחר. ההוכחה לכך, גם הפעם, היא תנועתו של הווילון, שכעת מתנופף אל תוך החדר. במקרה זה, ההפרעה היא מסוג **קילוש**.

כבכל המקרים של תנועה גלית, לא התווך עצמו הוא הנע לאורך החדר, אלא האנרגיה שהדופק נושא. בשני המקרים הדופק נע מן הדלת לעבר הווילון. אנו יודעים זאת מכיוון שבשני המקרים הווילון מתנפנף זמן מה לאחר פתיחת הדלת או סגירתה. אם תנדנדו את הדלת ברציפות הלך ושוב, פתוח וסגור, באופן מחזורי, תוכלו ליצור גל מחזורי של ציפופים (דחיסות) וקילושים שיגרורם לנפנוף הווילון פנימה והחוצה מבעד לחלון. דבר דומה, בקנה מידה קטן בהרבה אך במהירות גדולה פי כמה וכמה, קורה כאשר מכים בקולן מוסיקלי. לתנודותיו המחזוריות של הקולן ולגלים שהוא מחולל תדירות גבוהה בהרבה ומשרעת קטנה במידה ניכרת מאלה שגורמת להן הדלת המתנדנדת. לא תבחינו בהשפעת גלי הקול על הווילון, אך תגלו אותם על נקלה כאשר הם יפעילו את תאי החוש לקול שבאוזן הפנימית שלכם.

שימו לב לגלי הקול בשפופרת המתוארת באיור 19.2. לשם פשטות צוירו רק הגלים הנעים בתוך השפופרת. כשזרוע הקולן הסמוכה לשפופרת נעה לעבר השפופרת, ייכנס לתוכה אזור של ציפוף; ואילו בעקבות הציפוף, עם התרחקות הזרוע מן השפופרת בכיוון ההפוך, ייווצר קילוש. הדבר דומה לתנועה הלך



א



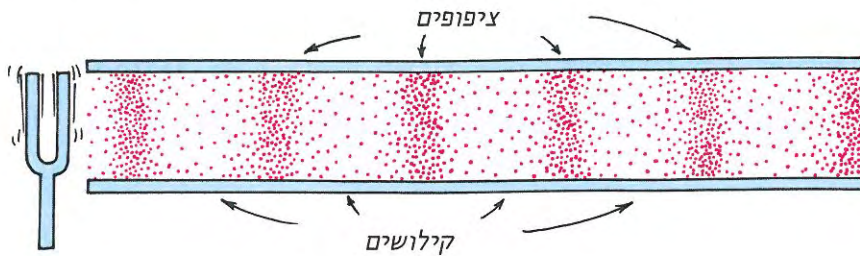
ב

איור 19.1

(א) כשהדלת נפתחת, ציפוף (אזור דחיסה) עובר דרך החדר.

(ב) כשהדלת נסגרת, קילוש (אזור צפיפות נמוכה) עובר דרך החדר.

(ע"פ הספר: *The New College Physics: A Spiral Approach* מאת A. V. Baez בהוצאת W.H. Freeman and Co. באישור המו"ל).



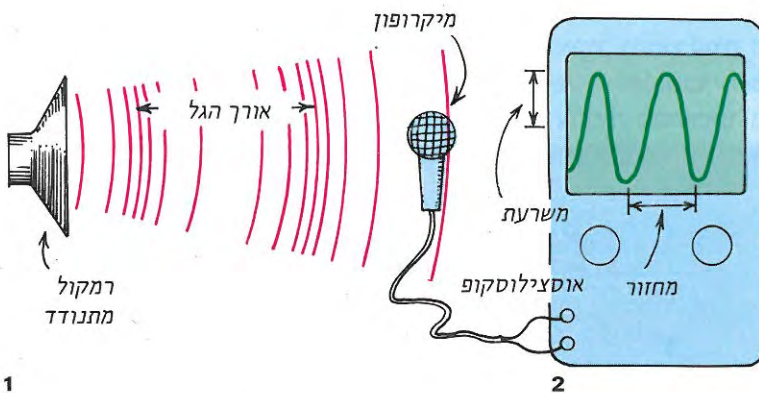
איור 19.2
ציפופים וקילוסים
נעים מהקולן דרך
הצינור.

ושוב של מחבט בחדר המלא בכדורי פינג-פונג. עקב תנודותיו של המקור נוצרת סדרה מחזורית של ציפופים וקילוסים. תדירותו של המקור המתנודד ותדירות הגל שהוא יוצר שוות.

נסו להרהר לרגע בפסיקה של הקול בזמן שאתם מאזינים לצלילים השקטים הבוקעים ממכשיר הרדיו שבחדרכם. הרמקול* שבמכשיר הוא חרוט עשוי נייר המתנודד בקצב שמכתיב את חשמלי הפועל עליו. מולקולות האוויר הפוגעות ללא הרף בחרוט המתנודד של הרמקול מתחילות להתנודד גם הן. מולקולות אלה עצמן פוגעות באופן מחזורי במולקולות הסמוכות להן, וכך הלאה. כתוצאה מכך בוקעת מן הרמקול תבנית קצבית של אוויר דחוס וקלוש חליפות, השוטפת את חלל החדר כולו בתנועה גלית. האוויר המתנודד באופן הזה גורם לתנודות בעור התוף שבאוזניים, המוליך את התנודות עד לתאי החוש לקול שבאוזן הפנימית, ואלה יוצרים דחפים חשמליים הנשלחים באמצעות עצב השמע אל המוח. בדרך זו שומעים אתם את צלילי המוסיקה.



איור 19.3
גלים של אוויר צפוף ושל
אוויר קלוש שיוצר חרוט
הרמקול המתנודד מהווים
את צלילי המוסיקה הנעימים
שאנו שומעים.



איור 19.4

(1) הרמקול במכשיר הרדיו הוא חרוט נייר המתנודד בקצב של אות חשמלי. הקול שנוצר גורם להיווצרות תנודות דומות במיקרופון, המוצגות על גבי האוסצילוסקופ. (2) צורת הגל על צג האוסצילוסקופ מספקת לנו מידע על הקול.

* שימו לב! "רמקול" אינו עושה את הקול רם יותר, חזק יותר, אלא יוצר את הקול בעקבות הפעלה חשמלית.

התווך המוליך את הקול

רוב הקולות שאנו שומעים מועברים באוויר. ואולם, כל חומר גמיש - מוצק, נוזל, גז או פלסמה - יכול להעביר את הקול*. בהשוואה למוצקים ולנוזלים, האוויר הוא מוליך קול גרוע יחסית. אם תניחו שעון מתקתק על גבי השולחן מחוץ לטווח השמיעה, תוכלו לשמוע אותו אם תצמידו את האוזן למשטח השולחן. האינדיאנים באמריקה נהגו להצמיד את אוזניהם לקרקע כדי להאזין לקולות שלא ניתן היה לשמעם באוויר. בפעם הבאה שתלכו לשחות, בקשו מחבר להקיש שתי אבנים זו בזו מתחת לפני המים במרחק מה מכם בשעה שאתם צוללים. תגלו שהמים הם מוליך קול מצוין. אילו ערכתם אותו ניסוי עצמו בחלל ריק (ואקום) ולא במים, לא הייתם שומעים דבר. הקול אינו מתפשט בריק. כדי שהקול יוכל להתפשט דרוש לו תווך חומרי; בהעדר תווך שיכול להצטופף ולהתקלש, לא ייתכן קיומו של קול.

מהירות הקול

אם נתבונן באדם ההולם בפטיש הרחק מאיתנו, נבחין מיד שחולף זמן ניכר בין התרחשות המכה לבין הרגע שבו קולה מגיע לאוזנינו. הרעם נשמע רק אחרי הבזק הברק. עובדות אלה, הידועות לכולנו, מלמדות שדרוש לקול זמן ניכר כדי לנוע ממקום למקום. גודלה של מהירות הקול תלוי בתנאי הרוח, בטמפרטורה ובלחות האוויר. הוא אינו תלוי ברום הקול ולמעשה גם לא בתדירותו. כל הקולות שאנו שומעים נעים במהירות שווה. מהירות הקול באוויר יבש בטמפרטורה של 0° צלסיוס היא כ-330 מטרים בשנייה, שהם בקירוב 1200 קילומטרים בשעה. כאשר האוויר מכיל אדי מים, המהירות גדלה מעט. באוויר חם הקול נע מהר יותר מאשר באוויר קר. ואמנם ניתן היה לצפות לכך, שכן מולקולות האוויר החם נעות מהר יותר ולכן מתנגשות זו בזו לעיתים תכופות יותר, ולפיכך הן יכולות להעביר את הדופק בפרק זמן קצר יותר**. לכל התחממות של האוויר במעלה אחת מעל 0° צלסיוס, מהירות הקול באוויר גדלה ב-0.6 מטר בשנייה. וכך, באוויר בטמפרטורת חדר רגילה של כ- 20° צלסיוס, הקול מתקדם במהירות של כ-340 מטרים בשנייה. במים הקול מתקדם במהירות גדולה בערך פי ארבעה ממהירותו באוויר, ואילו בפלדה מהירות הקול גדולה פי 15 ממהירותו באוויר.

שאלות

1. האם נעים אזורי הצפיפות הגבוהה ואזורי הצפיפות הנמוכה (הקילוישים) בגל קול באותו כיוון או בכיוונים מנוגדים זה לזה?
2. באיזה מרחק מתרחשת סופת רעמים, אם חולפות 3 שניות בין הבזק הברק לבין קול הרעם?

תשובות:

1. הם נעים באותו כיוון.
2. בהנחה שמהירות הקול באוויר היא 340 מ'ש', הוא יתקדם ב-3 שניות מרחק של $(340 \times 3) = 1020$ מטרים. הסופה מרוחקת איפוא מעט יותר מקילומטר אחד מאיתנו.

* נזכור מפרק 11 כי חומר אלסטי כמו פלדה (בניגוד למקרה, שהוא חומר אי-אלסטי) יכול להתנדנד ולהעביר את הגל בלא שתאבד אנרגיה.

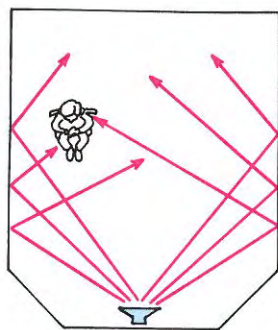
** מהירות הקול בגז היא בערך $\frac{3}{4}$ ממהירותן הממוצעת של מולקולות הגז.

החזרת קול

לתופעה של החזרת קול אנו קוראים הד. חלק גדול מאנרגיית הקול מוחזר אם הקול פוגע במשטח קשיח ותלך; חלק קטן יותר מוחזר אם הוא פוגע במשטח רך, מחוספס ובעל בליטות. אנרגיית הקול שאינה מוחזרת מהמשטח נבלעת בו או עוברת דרכו.

הקול מוחזר ממשטח חלק בדומה לאופן שבו מוחזר ממנו אור - זווית ההחזרה שווה לזווית הפגיעה (איור 19.5). לעיתים, כשהקול מוחזר מקירותיו של חדר, מן התקרה ומהרצפה, גלי הקול המוחזרים מתערבבים ומשבשים זה את זה. תופעה זו מכונה **הדהוד**. לעומת זאת, אם כושר הבליעה של המשטחים המחזירים גבוה מדי, עוצמת הקול תהיה נמוכה במיוחד והצלילים בחדר או באולם יישמעו חלופים. החזרות הקול בחדר גורמות לו להישמע רענן ומלא צבע. בוודאי הבחנתם בכך כששרתם לעצמכם במקלחת. כשמתכננים אולם להופעות ולקונצרטים, צריך למצוא את האיזון בין תופעת ההדהוד לבין בליעת הקול בקירות ובתקרה. תחום המחקר העוסק בקול ובתכונותיו נקרא אקוסטיקה.

לעיתים עדיף להציב מאחורי הבמה משטחים בעלי כושר החזרה גבוה, שמטרתם לכוון את הקול לעבר הקהל. ישנם אולמות קונצרטים שבהם תלויים משטחי החזרה מעל לבמה. המשטחים התלויים באולם האופרה שבסן פרנציסקו, ארה"ב, עשויים פלסטיק מבריק המחזיר גם את האור (איור 19.6). הצופים באולם יכולים להביט במשטחי החזרה אלה ולראות את בבואותיהם המוחזרות של חברי התזמורת (משטחי ההחזרה מפלסטיק קמורים מעט, וכך מוגדל שדה הראייה של הצופים). הן הקול והן האור מקיימים אותו חוק החזרה, לכן אם במשטח מסוים ניתן לראות כלי מכלי התזמורת, אפשר גם לשמוע אותם, ובלבד שהוא גדול מספיק. הקול מן הכלי ינוע אל המשטח המחזיר וממנו לאוזניכם.



איור 19.5

זווית הפגיעה של הקול שווה לזווית ההחזרה שלו.



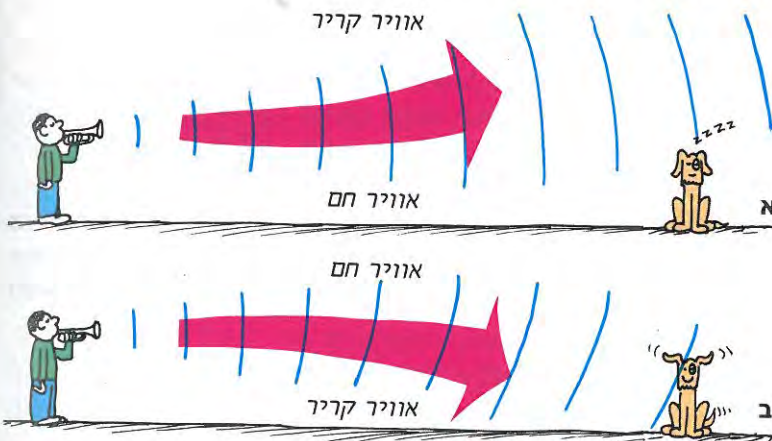
איור 19.6

לוחות הפלסטיק שמעל לתזמורת מחזירים הן את האור והן את הקול. קל למדי לכוונם: מה שרואים הוא מה ששומעים.

שבירת קול

כשחלקים שונים של גל הקול נעים במהירויות שונות, הגל אינו שומר על כיוונו המקורי. הדבר עשוי לקרות כאשר נושבות רוחות שאינן אחידות או בעת תנועת הקול דרך אוויר שהטמפרטורה שלו אינה אחידה. שינוי זה בכיוונו של גלי הקול עקב מעבר בתווך לא-אחיד מכונה **שבירה**. ביום חם האוויר הסמוך לקרקע עשוי להיות חם במידה ניכרת מהאוויר הרחוק יותר מהקרקע, ולפיכך מהירות הקול סמוך לקרקע גבוהה יותר. במצב זה, אם תדברו אל חבר העומד במרחק מה מכם הוא יתקשה לשמוע אתכם, מפני שגלי הקול מתכופפים כלפי מעלה והתחושה המתקבלת היא של קול שאינו נישא למרחק.

אם ברק מבזיק במרחק שאינו גדול מדי, נשמע את קול הרעם. אם הברק נוצר רחוק מאוד, אנו עשויים שלא לשמוע את הרעם בשל תופעת השבירה. בגבהים הגבוהים יותר התקדמות הקול איטית יותר והוא מתכופף כלפי מעלה. לעיתים, ביום קר או בלילה, כשהאוויר הסמוך לקרקע קר יותר מזה שמעליו, מתרחשת תופעה הפוכה. במצב זה מהירות הקול סמוך לקרקע נמוכה יחסית. המהירות הגבוהה יותר ברום גורמת לנטיית הקול לעבר הקרקע. התוצאה היא שניתן לשמוע את הקולות למרחק רב מן הרגיל (איור 19.7).



איור 19.7

גלי הקול מתכופפים ומשנים כיוון באוויר שהטמפרטורה שלו אינה אחידה.

שבירת קול מתרחשת גם מתחת למים, שם מהירות הקול משתנה עם השינוי בטמפרטורה. עובדה זו מהווה בעיה לספינות המשגרות אותות על-שמעיים אל קרקעית האוקיינוס כדי למפות באמצעות ההדים המוחזרים את הקרקעית. לעומת זאת, צוללות השואפות להתחמק מגילוי מפיקות תועלת רבה מן התופעה. שכבות המים בעלות הטמפרטורות השונות גורמות לשבירת הקול, וכך נותרים פערים או "כתמים עיוורים" שמהם לא מוחזרים גלי קול, ובהם יכולות הצוללות להסתתר. אלמלא תופעת השבירה, ניתן היה לגלות את הצוללות בקלות יחסית. רופאים מנצלים את ההחזרות והשבירות המרובות של גלים על-שמעיים ("אולטרה סאונד") בשיטה המאפשרת "להתבונן" אל תוך הגוף בלי לגרום לו נזק ובלי להזדקק לשימוש בקרני X (קרני רנטגן). כשגלי קול בתדירויות גבוהות חודרים אל הגוף, הם מוחזרים יותר מגבולות האיברים הפנימיים ומתקבלת תמונת קווי המתאר של איברים אלה. כאשר הגלים העל-שמעיים פוגעים בעצם בתנועה, לקול המוחזר יש תדירות שונה במקצת - היסט דופלר. הרופא המסתייע בתופעה זו יכול "לראות" את ליבו הפועם של עובר 11 שבועות בלבד לאחר תחילת ההיריון (איור 19.8).



איור 19.8

עובר המתגלה באמצעות גלים על-שמעיים (אולטרה סאונד) נראה על צג המכשיר.

איור 19.9

הדולפין פולט קולות בתדירות גבוהה ביותר כדי לאתר עצמים בסביבתו ולזהותם. הוא חש במרחק לפי הזמן שחולף בין שיגור אות הקול לבין קליטת ההד. את הכיוון הוא מזהה לפי פער הזמנים שבין קליטת ההד באוזן האחת לבין קליטתו בשנייה. מזונו העיקרי של הדולפין הוא דגים, והיות ששמיעתם של הדגים מוגבלת לתדרים נמוכים הם אינם חשים בכך שהדולפין מנסה לצוד אותם.

שיטת השימוש בהד המוחזר של קולות על-שמעיים חדשה אולי לבני האדם, אך לא-כן עבור העטלפים והדולפינים. העטלפים פולטים ציוצים על-שמעיים ועל פי ההדים המוחזרים הם מאתרים גופים שונים - ובכלל זה חרקים קטנים - המצויים בתעופה. גם הדולפינים מסוגלים לעשות זאת, ואף יותר מכך*. בעזרת הגלים העל-שמעיים שהם משמיעים הם מסוגלים "לראות" מבעד לגופם של בעלי חיים אחרים - ובכללם בני אדם. העור, השרירים והשומן הינם שקופים כמעט לגבי הדולפינים, וכך הם "רואים" מתווה דק של קווי המתאר החיצוניים של היצור, אך העצמות, השיניים וחללים המלאים בגז "נראים" להם בבירור. זו מיומנות שאנו, בני האדם, הגענו אליה רק לאחרונה הודות לשיטת האולטרה סאונד.

ספינת מחקר עורכת סקר של עומק האוקיינוס באמצעות גלים על-שמעיים שמהירותם במי-ים היא 1530 מ'ש'. מה עומק המים אם משך ההשהיה עד להחזרת ההד מקרקעית האוקיינוס הוא 2 ש'?

שאלה

תנועה גלית לסוגיה נושאת עימה אנרגיה. בגלים אלקטרומגנטיים נמצא אנרגיה רבה בקרני X, אנרגיה פחותה במעט בקרניים על-סגולות ועוד פחות מכך באור הנראה. בהשוואה לאלה, האנרגיה בגלי הקול היא זעומה. הסיבה לכך היא שיצירת גלי קול כרוכה בהשקעת אנרגיה מעטה ביותר. כך למשל, 10,000,000 בני אדם המדברים יחד מפיקים קול בעל אנרגיה שאינה עולה על זאת הדרושה להבזק אחד של מבזק מצלמה. אנו מסוגלים לשמוע רק בזכות רגישותה המופלגת של האוזן האנושית. מעטים מאוד הם המיקרופונים המסוגלים לגלות צלילים חלשים מאלה שאנו יכולים לשמוע.

אנרגיה בגלי קול

תשובה: 1530 מ'.

* החוש העיקרי של הדולפין הוא חוש השמיעה, שכן לעיתים קרובות הראייה אינה חוש יעיל ביותר במעמקי האוקיינוס האפלים והעכורים. אמנם חוש השמיעה הוא חוש סביל (פאסיבי), אך עבור הדולפין זהו חוש פעיל. הדולפין משגר קולות אל סביבתו ומבחין בסובב אותו על פי ההדים המוחזרים. מעניינת אף יותר היא העובדה שהדולפין מסוגל לשחזר את תמונת הסביבה שנוצרה במרחו בצורת גלי קול שהוא משדר לדולפינים אחרים, וכך הוא מתאר להם את תמונת סביבתו כפי שהוא "רואה" אותה. אין הוא זקוק למילה או לסימן מוסכם כדי לדווח על הימצאותו של "דג", למשל.

אנרגיית הקול אובדת באוויר בצורת חום. ככל שתדירות הקול גבוהה יותר, תהליך הפיכת האנרגיה לחום באוויר מהיר יותר. לפיכך, גלי קול שתדירותם נמוכה ינועו באוויר למרחקים גדולים יותר מגלי קול שתדירותם גבוהה יותר. זו הסיבה לכך שצופרי ערפל של ספינות מפיקים צליל שתדירותו נמוכה במיוחד.

תנודות מאולצות

אם נכה בקולן שאינו מורכב על תיבת תהודה, הצליל שיופק עשוי להיות חלש למדי. אם נצמיד אותו קולן עצמו אל משטח השולחן ואז נכה בו באותה עוצמה, הקול יהיה רם יותר במידה ניכרת. זאת משום שבאמצעות הקולן אנו מאלצים את השולחן להתנודד, והשולחן במשטחו הגדול יגרום לתנועת אוויר רב יותר. ניתן ליצור בשולחן תנודות כאלה באמצעות קולן בעל כל תדירות שהיא. זו דוגמה לתופעה המכונה **תנודות מאולצות**. הרעידות הנוצרות ברצפתו של בית חרושת עקב פעולתן של המכונות הכבדות הן תנודות מאולצות. דוגמה מענגת יותר לתופעה זו מספקת תיבת התהודה של כלי מיתר כדוגמת הכינור.

תדירות עצמית

אם יישמט מידנו מפתח צינורות וייפול על רצפת בטון, לא יעלה על דעתנו כי הצליל שנשמע נוצר מנפילת קערת עץ. הסיבה לכך היא ששני העצמים מתנודדים בצורות שונות בעת פגיעתם בקרקע. הקישו על מפתח הצינורות, והצליל שיווצר יהיה שונה מזה שיופק אם תקישו בקערת העץ או בכל חפץ אחר. כל עצם העשוי מחומרים אלסטיים, אם יופרע ממנוחה, יתנודד בסדרה של תדירויות המיוחדות לו בלבד, אשר ביחד יוצרות את הצליל האופייני לעצם הזה. נהוג לדבר על **התדירות העצמית** של העצם, התלויה בגורמים כדוגמת גמישותו של העצם וצורתו. פעמונים וקולנים הם דוגמאות מובהקות לעצמים המתנודדים בתדירות עצמית המאפיינת אותם. מעניין לציין כי כל הדברים כמעט, מכווכבי לכת ועד האטומים הזעירים המרכיבים את החומר, מתאפיינים בקפיציות משל עצמם ומתנודדים בתדירותם העצמית או בסדרה של תדירויות טבעיות כאלה. התדירות העצמית של העצם היא התדירות שבה נדרשת כמות האנרגיה המועטה ביותר כדי ליצור בו תנודות מאולצות.



איור 19.10
תדירותו העצמית של
הפעמון הקטן גדולה מזו של
הפעמון הגדול והוא מצלצל
בצליל גבוה יותר.

כאשר תדירות התנודות המאולצות של עצם תואמת את תדירותו העצמית, משרעת התנודות גדלה והולכת באורח חד. זו התופעה המכונה **תהודה** (ובלועזית: רֶזוֹנַנְס). מקור המילה תהודה הוא בעובדה שהעצם המתנודד מחזיר כהד את התדירות המנדנדת אותו. תהודה לא תתרחש בגוש מָרָק שאינו גמיש,

תהודה



איור 19.11

נדנדו את רגליכם בקצב
תדירותה העצמית של
הנדנדה ותצליחו להגדיל את
המשרעת במידה ניכרת.

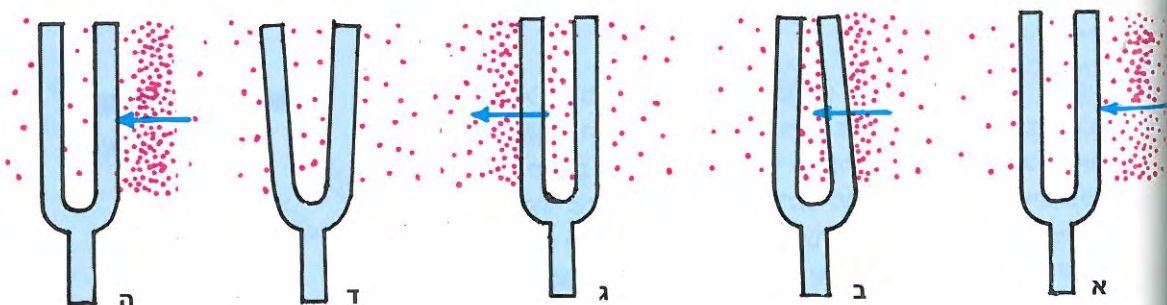
גם לא בממחטה נופלת. תהודה מתרחש בגוף רק אם פועל בו כוח אלסטי
המנסה להחזירו למצבו הבלתי מופרע ואם הוענקה לו די אנרגיה כדי לקיים בו
את התנודות.

איור 19.12

שלבי התהודה.

(א) הציפוף הראשון פוגע
בשן הקולן ומעניק לה דחיפה
רגעית קלה; (ב) שן הקולן
מתכופפת ואז (ג) חוזרת
למקומה התחילי בדיוק ברגע
שמגיע קילוש, והיא (ד)
ממשיכה אל מעבר לנקודת
שיווי המשקל. ברגע שהיא
חוזרת למקומה התחילי (ה)
מגיע לשם הציפוף הבא
והמחזור חוזר על עצמו.
תנועת השן עתה תהיה גדולה
יותר מאחר שהיא כבר
נמצאת בתנועה.

תופעה מוכרת לכולנו המדגימה תהודה מתרחשת בנדנדה בגן השעשועים.
כאשר מנדנדים את הנדנדה, יש להתאים את קצב הדחיפות לתדירותה העצמית.
יותר משחשוב הכוח שבו מנדנדים, חשוב התזמון. גם אם ננדנד את רגלינו
תנודות קלות בלבד או נדחף קלות את היושב על הנדנדה, אך נעשה זאת בקצב
השווה לתדירותה של הנדנדה המיטלטלת, משרעת התנודות תגדל עוד ועוד. ניתן
לערוך בכיתה הדגמה פשוטה של תופעת התהודה. אם נציב שני קולנים בעלי
תדירות עצמית שווה במרחק של כמטר זה מזה ונכה באחד, בתוך שניות יתחיל
גם הקולן האחר להתנווד. זהו שחזור בקנה מידה זעיר של ניסוי דחיפת הנדנדה
- הגורם החשוב הוא התזמון. כאשר סדרה של גלי קול פוגעת בשני הקולן, כל
ציפוף הפוגע בשן מעניק לה דחיפה קלה. הואיל ותדירותן של דחיפות אלה
תואמת את תדירותו העצמית של הקולן, הדחיפות העוקבות יגדילו בהדרגה את
משרעת התנודות. הסיבה לכך היא שכל דחיפה קלה מתרחשת בזמן הנכון
ופועלת בכיוון שבו שן הקולן נעה באותו רגע (איור 19.12).



אם תדירויותיהם של הקולנים אינן מתואמות, הדחיפות לא תהיינה מתוזמנות לתנודות הקולן השני. במצב זה לא תתרחש תהודה. בשעה שמכוונים את מקלט הרדיו לתחנה רצויה, מתאימים את תדירותה העצמית של המערכת האלקטרונית שבמכשיר לתדירותו של אחד מן האותות הרבים הסובבים אותו. במצב זה המכשיר נמצא בתהודה עם תחנה מסוימת ומשמיע את שידוריה ולא את שידורי כל התחנות בעת ובעונה אחת.

מדוגמת הנדנדה ניתן ללמוד כי תופעת התהודה אינה ייחודית לתנודות גליות. היא תתרחש כל אימת שיופעלו דחיפות על גוף מתנודד, בקצב השווה לזה של תדירותו העצמית. יחידה של חיל הפרשים שעברה בשנת 1831 על גשר להולכי רגל ליד העיר מנצ'סטר שבאנגליה גרמה לקריסתו, משום שצעדה בקצב שהיה שווה לתדירותו העצמית של הגשר. מאז מקובל להורות לחיילים במצעד "לשבור" את הקצב בשעה שהם עוברים על גשר. אסון אחר של קריסת גשר התרחש בארה"ב, בשעה שרוח סערה גרמה בו לתהודה (איור 19.13).

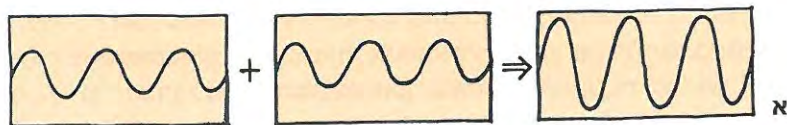


איור 19.13

בשנת 1940, ארבעה חודשים לאחר הקמתו, נהרס גשר מיצ'י טאקומה שבמדינת וושינגטון, ארה"ב, עקב תהודה שנגרמה על ידי רוח. הסערה, שלא היתה עזה במיוחד, גרמה לכוח מתנודד בתהודה עם התדירות העצמית של הגשר, ועקב כך גדלה משרעת התנודות בהדרגה עד לקריסתו של הגשר.

תופעות של תהודה סובבות אותנו מכל עבר. לא רק את צלילי המוסיקה מכתיבה התהודה; היא קובעת את צבעי השלכת בסתי, את גובהה של גיאור הים, את פעולתם של לייזרים ועוד מגוון עצום של תופעות המוסיפות יופי לעולם שמסביבנו.

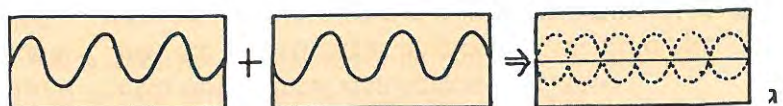
ככל סוג אחר של גלים, גם גלי הקול יכולים להתאבך. היזכרו בתופעת התאבכות הגלים שנדונה בפרק הקודם. השוואה בין תופעות ההתאבכות בגלי רוח ובגלי אורך מוצגת באיור 19.14. בשני המקרים, כאשר שיא של גל אחד חופף שיא של גל אחר מתקבלת משרעת מוגדלת. לעומת זאת, כאשר שיא של גל אחד חופף שקע של גל אחר, מתקבלת משרעת מוקטנת. בגלי קול, שיא-גל פירושו אזור של ציפוף (דחיסה) ואילו שקע של גל פירושו אזור של קילוש (צפיפות מוקטנת). התאבכות מתרחשת הן בגלי רוח והן בגלי אורך.



התאבכות שני גלי רוחב זהים במופע שווה יוצרת גל בעל משרעת מוגדלת.



התאבכות שני גלי אורך זהים במופע שווה יוצרת גל בעל עוצמה מוגדלת.



שני גלי רוחב זהים במופע מנוגד מבטלים זה את זה כשהם מתרכבים.



שני גלי אורך זהים במופע מנוגד מבטלים זה את זה כשהם מתרכבים.

איור 19.14

התאבכות בגלי רוחב ובגלי אורך.

דוגמה מעניינת של התאבכות קול מתוארת באיור 19.15. אם תהיו במרחק שווה משני רמקולים הפולטים צלילים זהים בתדירות קבועה, הקול שתשמעו יהיה רם יותר מכיוון שהשפעות שני הרמקולים מתחברות זו לזו. הציפופים והקילופים של גל הקול מגיעים במתואם, או במופע שווה. אם, לעומת זאת, תזוזו הצידה כך שהפרש הדרכים מן הרמקולים אליכם יהיה שווה למחצית אורך-גל, אזי יתמלא אזור קילופ של הגל מהרמקול האחד על ידי אזור הציפוף של הגל מהרמקול האחר. זו התאבכות סותרת. ממש כפי שבגלי מים שיאו של גל מים אחד ממלא בדיוק את השקע של גל מים אחר. אם תימצאו במקום שבו אין משטחים מחזירים, כמעט שלא תשמעו כל קול!

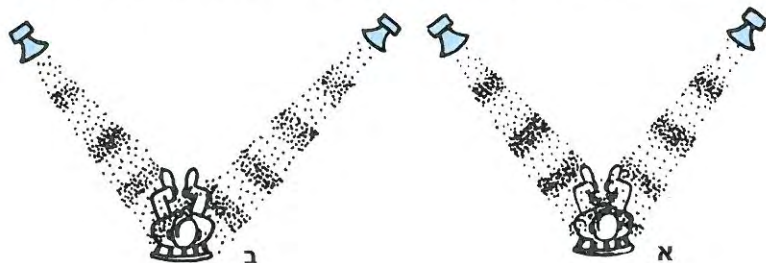
אם הקול הנפלט מהרמקולים כולל טווח רחב של תדירויות, לא בכל אורכי הגל תתרחש התאבכות הורסת עבור הפרש מסוים בין אורכי הדרכים. בדרך כלל, התאבכות מסוג זה אינה מהווה בעיה, מכיוון שלרוב יש די החזרות-קול הממלאות את הצלילים שהתבטלו. עם זאת, באולמות תיאטרון או באולמות קונצרטים שלא תוכננו כראוי ניתן לאתר לעיתים "נקודות מתות", שבהן מתרחשת התאבכות בין גלי הקול הישירים לבין הגלים המוחזרים מהקירות

איור 19.15

התאבכות של גלי קול.

(א) הגלים מגיעים במופע שווה ומתאבכים התאבכות בונה כשהמרחקים מן הרמקולים שווים.

(ב) הגלים מגיעים במופע מנוגד ומתאבכים התאבכות הורסת כשהבדל המרחקים הוא חצי אורך גל (או $\frac{3}{2}, \frac{5}{2}$ וכו').



ונוצרים אזורים של משרעת נמוכה. אם במקום כזה תסיתו את ראשכם סנטימטרים אחדים ימינה או שמאלה, תבחינו בהבדל ניכר ברום הקול. ניתן לערוך הדגמה מרשימה ביותר של התאבכות קול אם מנגנים צלילי מונו באמצעות זוג רמקולים של מערכת סטריאו המשדרים במופע מנוגד (איור 19.16). רמקולים משדרים במופע מנוגד אם מחליפים את תילי המבוא באחד מהם (תיל חיובי להדק שלילי ותיל שלילי להדק חיובי). במצב זה, כאשר האות המשודר הוא אות מונו, אזי בזמן שרמקול אחד משדר ציפוף של גל קול, הרמקול האחר משדר קילוש. הקול שנוצר אינו כה מלא וצליליו אינם רמים כפי שהיו נשמעים מרמקולים המחוברים כראוי במופע שווה; זאת משום שהגלים הארוכים יותר מתבטלים עקב התאבכות. גלים קצרים יותר יתבטלו אם נקרב את הרמקולים זה אל זה, ואם נציב אותם צמודים, פנים אל פנים, כמעט שלא יישמע קול כלל! רק התדירויות הגבוהות ביותר יינצלו אולי מביטול הדדי. חייבים לנסות זאת כדי להתרשם כראוי מן התופעה.

איור 19.16

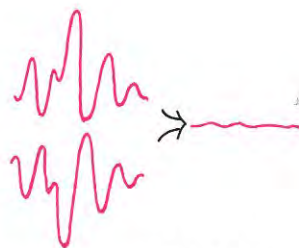
חיבורי התיל החיובי והתיל השלילי של אחד הרמקולים במערכת הסטריאו הוחלפו זה בזה וכתוצאה מכך הרמקולים משדרים במופע מנוגד. כשהרמקולים מרוחקים זה מזה צליל המונו המופק אינו מלא. אם מצמידים את הרמקולים פנים אל פנים, כמעט שאין שומעים קול. מתרחשת התאבכות מושלמת כמעט, שעה שציפופים מן הרמקול האחד ממלאים קילושים מהרמקול האחר!



התאבכות הורסת של קול היא תופעה שימושית בטכנולוגיה של מניעת רעש. מכשירים רועשים כדוגמת מקדחות רוטטות מצוידים לעיתים במיקרופונים, אשר מעבירים את הקול שמשמיע המכשיר למערכת אלקטרונית היוצרת תבנית של גלי קול שהיא מעין בבואת ראי של הקולות המקוריים. אות בבואת הראי הזה מוזן לאוזניות שחובש מפעיל המקדחה. ציפופים (או קילושים) של גלי הקול מהמקדחה מתבטלים על ידי קילושים (או ציפופים) תואמים בבבואת הראי הקולית הנוצרת באוזניות. צירוף האותות מחריש את רעשי המקדחה. אותו עיקרון מיושם לעיתים בעממי קול אלקטרוניים במכוניות - הקול הנגדי משודר מרמקולים המותקנים ברכב והוא מסוגל לבטל כ-95 אחוזים מן הרעש המקורי.

פעילות

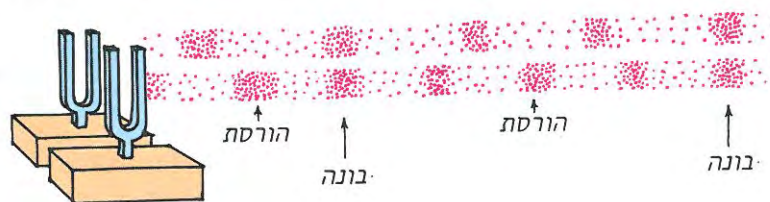
כאשר משמיעים שני צלילים הנבדלים זה מזה בתדירויותיהם אך במעט, עוצמת הקול המורכב שנוצר משתנית באופן מחזורי: קול רם, אחר כך קול חלש, וחוזר חלילה. שינוי מחזורי זה ברום הקול נקרא **פעילות** והוא תוצאה של התאבכות גלי הקול. הקישו בשני קולנים שתדירויות הצלילים שהם משמיעים נבדלות במעט זו מזו. מאחר שקולן אחד מתנווד בתדירות שונה במעט מן הקולן השני, תנוודותיהם של הקולנים יהיו מתואמות לרגע, אחר כך בלתי מתואמות, כעבור זמן קצר נוסף שוב יהיו מתואמות, וכך הלאה. כאשר הגלים המורכבים מגיעים לאוזנינו במתואם - למשל כאשר אזור ציפוף מן הקולן האחד חופף את אזור



איור 19.17

כשתמונת ראי של אות קולי מתרכבת עם האות עצמו, הקול מתבטל.

הציפוף מן הקולן האחר - עוצמת הקול תהיה בשיאה. כעבור רגע, כאשר הקולנים בלתי מתואמים, ציפוף שמקורו בקולן האחד פוגש קילוש מן הקולן האחר, והתוצאה היא עוצמת קול מזערית (איור 19.18). הקול שמגיע לאוזנינו פועם בין העוצמה המרבית לעוצמה המזערית ויוצר תופעה של רָעָדוּד (טַרְמולוּ).



איור 19.18

התאבכות גלי הקול משני מקורות בעלי תדירויות שונות במעט מחוללת פעימות.

נוכל להבין את תופעת הפעימות אם נחשוב על המקרה המקביל של שני אנשים הצועדים זה בצד זה בקצב צעדים שונה אך מתקדמים במהירות שווה. ברגע מסוים הם יצעדו בצעד מתואם, מעט אחר כך בצעד בלתי מתואם, כעבור עוד רגע שוב יצעדו במתואם, וכך הלאה. נניח שאחד מהשניים, אולי בעל הרגליים הארוכות יותר, פוסע בדיוק שבעים פסיעות בדקה אחת. חברו, בעל הרגליים הקצרות יותר, צועד שבעים ושתיים פסיעות במשך אותו זמן. בכל דקה ישלים האיש הנמוך שני צעדים יותר מחברו הגבוה. אם נהרהר בכך נבין מיד כי בדיוק פעמיים בכל דקה פסיעותיהם של השניים תהיינה מתואמות לרגע. וככלל, אם פוסעים שניים זה בצד זה בקצב צעדים שונה, מספר הפעמים בכל דקה שהם פוסעים במתואם שווה להפרש בין תדירויות הצעידה שלהם, הנמדדות במספר הפסיעות לדקה. הדברים תקפים גם לגבי זוג הקולנים. אם קולן אחד מתנדנד בתדירות של 264 תנודות בשנייה והקולן האחר מתנדנד 262 פעמים בשנייה, הם יהיו מתואמים פעמיים בכל שנייה. תישמע תדירות פעימות של 2 הרץ. גובה הצליל (הטון) הכולל שיישמע יהיה זה של התדירות הממוצעת - 263 הרץ.

מהי תדירות הפעימות כאשר משמיעים יחד שני קולנים - האחד בתדירות 262 הרץ והאחר בתדירות 266 הרץ? ומה תדירותן כאשר תדירויות הקולנים הן 262 הרץ ו-272 הרץ?

שאלה

אם נציב שני מסרקים בעלי מרווחי שיניים שונים זה מעל זה, נבחין בתבנית המכונה תבנית מוארה (moiré), אשר קשורה לתופעת הפעימות (איור 19.19). מספר "הפעימות" ליחידת אורך שווה להפרש בין מספרי השיניים ליחידת אורך בשני המסרקים.

פעימות עשויות להתרחש בגלים מכל סוג שהוא והן משמשות אמצעי יעיל להשוואת תדירויות. כך למשל, מכון הפסנתרים מכון מיתר מסוים בפסנתר תוך כדי האזנה לפעימות הנוצרות בין צלילו של המיתר לבין צליל של קולן תקני. כאשר



איור 19.19

מרווחי השיניים השונים של המסרקים יוצרים תבנית מוארה הדומה לתופעת הפעימות.

כאשר תדירויות הקולנים 262 הרץ ו-266 הרץ, האוזן שומעת צליל בן 264 הרץ המשתנה בקצב פעימות של 4 הרץ (266 פחות 262). כאשר תדירויות הקולנים 262 הרץ ו-272 הרץ, יהיו כאלה שישמע צליל בן 267 הרץ הפועם בקצב של עשר פעימות בשנייה. תדירויות פעימה העולות על 10 הרץ הן מהירות מכדי שרובנו נוכל להבחין בהן.

תשובה:

התדירויות זהות, הפעילות נעלמות. חברי התזמורת מכוונים את כליהם בהאיזון לפעילות הנוצרת בין הכלים לבין צליל תקני המופק מפסנתר או מכלי אחר. גם הדולפינים מנצלים את הפעילות, וזאת לשם סקירת תנועותיהם של העצמים הסובבים אותם. כאשר דולפין שולח אותות קול אל סביבתו, עשויות להיווצר פעימות כאשר ההדים המוחזרים שהוא קולט מתאבכים עם הקולות שהוא משדר. כשאין תנועה יחסית בין הדולפין לבין העצם המחזיר את הקול, התדירות המשודרת וזו המוחזרת שוות, ולא תיווצרנה ביניהן פעימות. אך כאשר יש ביניהם תנועה יחסית, להד תהיה תדירות שונה עקב תוצא דופלר, ובין הקול המשודר להד המוחזר תיווצרנה פעימות כאשר הם יתחברו זה לזה. הדולפינים מסתמכים על הקול יותר מאשר על האור.

שידורי רדיו

מקלט רדיו פולט קולות, אך מעניין לציין שהוא אינו קולט גלי קול. מקלטי הרדיו, כמו גם מכשירי הטלוויזיה, קולטים גלים אלקטרומגנטיים - גלים אשר דומים לגלי אור אך תדירותם נמוכה בהרבה. גלים אלה, שנדון בהם באריכות בחלק ו' של ספרנו, נבדלים באופן קיצוני מגלי קול - לא רק במהותם השונה בתכלית, אלא גם בתדירותיהם הגדולות פי כמה וכמה - הרבה מעבר לגבול תדירות השמע של האדם.

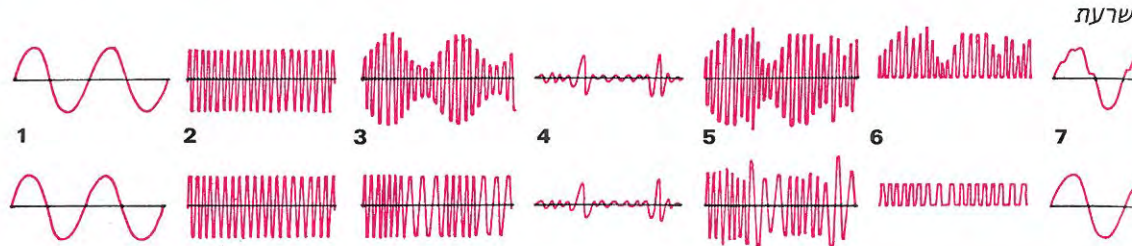
לכל תחנת שידור מוקצה תדר מסוים שבו היא משדרת. הגל האלקטרומגנטי המשודר בתדר זה הוא **הגל הנושא**. את אות הקול שמעוניינים להעביר, ושתדירותו נמוכה יחסית, "מרכיבים" על הגל הנושא בעל התדירות הגבוהה בהרבה. קיימות שתי שיטות עיקריות לעשות זאת: ביצירת שינויים במשרעת הגל הנושא התואמים את תנודות גל הקול, או בשינויים קלים בתדירותו (איור 19.20). הרכבה זו של תבנית גל הקול על גל הרדיו בעל התדירות הגבוהה נקראת **אֶפְנוֹן** (בלועזית: מודולציה). השיטה של אֶפְנוֹן משרעת הגל הנושא נקראת **אֶפְנוֹן משרעת** או **אֶפְנוֹן תְּנוּפָה** (את"נ, ובלועזית: AM - amplitude modulation). תחנות AM משדרות בתחום התדרים 535-1605 קילו-הרץ. השיטה שבה מאפננים את תדירותו של הגל הנושא נקראת **אֶפְנוֹן תדר** (את"ד, ובלועזית: FM - frequency modulation). תחנות FM משדרות בתחום תדרים גבוה יותר - 88 עד 108 מגה-הרץ. את שיטת אֶפְנוֹן המשרעת אפשר להשוות לשינויים בעוצמת האור של נורה בשעה שצבע האור נשאר קבוע, ואילו את שיטת אֶפְנוֹן התדר - לשינוי צבע האור של נורה שעוצמתה קבועה.

שאלה

האם נכון לומר כי בכל מקרה, ללא יוצא מן הכלל, כל גל רדיו נע מהר יותר מכל גל קול?

תשובה:

כן, מפני שכל גל רדיו נע במהירות האור. גל רדיו הוא גל אלקטרומגנטי וניתן לראות בו מעין אור שתדירותו נמוכה מאוד. לעומת זאת, גל קול הוא הפרעה מכנית המתקדמת דרך תווך חומרי באמצעות חלקיקי החומר המתנוודים ופוגעים זה בזה. באוויר מהירות הקול היא 340 מ'ש', כמיליונית ממהירותו של גל רדיו. בחומרים אחרים הקול מתקדם מהר יותר, אך בשום מקרה לא במהירות האור. שום גל קול אינו יכול להתקדם במהירות האור.



איור 19.20

אותות רדיו AM ו-FM. (1) גלי קול מגיעים למיקרופון. (2) גל נושא בתדירות רדיו שנוצר על ידי המשרד ללא אות קול. (3) הגל הנושא מאופנן על ידי האות. (4) התאבכות. (5) הגל הנושא ואות הקול מושפעים מן ההתאבכות. (6) מקלט הרדיו קוטע את מחציתו השלילית של הגל הנושא. (7) הגל שנותר אינו נקי ב-AM בשל ההתאבכות, אך נקי ב-FM, מכיוון שהקצוות של צורת הגל קטועים מבלי לגרום לפגיעה באות.

הכוונת הכפתור במכשיר הרדיו לבחירת תחנה מסוימת דומה להזזת מסות הצמודות לשינוי של קולן כדי לגרום לו להגיב בתהודה לקול שיוצר קולן אחר. בבחירת תחנת רדיו מסוימת מכוונים את תדירותו של מעגל חשמלי שבתוך המקלט כך שיתאים לתדירות התחנה המבוקשת ויגיב בתהודה לגלים המשודרים ממנה. למעשה בוחרים גל נושא אחד מרבים אפשריים. אחר כך מפרידים את אות הקול המורכב מן הגל הנושא, מגבירים אותו, והוא מועבר לרמקול. בהחלט נעים לשמוע רק תחנה אחת בכל פעם.

תדירות עצמית תדירות שבה גוף אלסטי נוטה להתנווד מאליו. יצירת תנודות מאולצות בגוף בתדירות זו גורמת לתהודה.

תהודה התופעה של היווצרות תנודות מאולצות גדלות והולכות בגוף, כאשר פועלים עליו בתדירות התואמת את תדירותו העצמית.

פעילות סדרה של גלים המתעצמים ונחלשים חליפות, הנוצרים עקב התאבכות של שני גלים הנבדלים מעט בתדירותם. בגלי קול הן נשמעות כעליות וירידות ברום הקול.

גל נושא גל, לרוב בתדר רדיו, שמשנים את תכונותיו בתהליך האפנון.

אפנון תהליך ההרכבה של צורת גל אחד על גל אחר בעל תדירות גבוהה ממנו.

אפנון משרעת (אפנון תנופה, את"י, AM) שיטת אפנון שבה משנים את משרעת הגל הנושא בשיעור מתכונתי למשרעת האות שרוצים להעביר.

תקציר מונחים

תת-שמעי קול שתדירותו נמוכה מכדי שאדם יוכל לשמעו - פחות מ-20 הרץ.

על-שמעי קול שתדירותו גבוהה מכדי שאדם יוכל לשמעו - מעל 20,000 הרץ.

ציפוף (אזור דחיסה) אזור של צפיפות גבוהה מהרגיל בתווך שגל אורך עובר בו.

קילוש אזור של לחץ נמוך מהרגיל בתווך שגל אורך עובר בו.

הדהוד גל קול מוחזר המתערב בקול המקורי.

שבירה הסטת מסלולו של גל בעוברו בתווך לא-אחיד או במעבר מתווך לתווך. השבירה מתרחשת עקב שינוי במהירות הגל.

תנודות מאולצות יצירת תנודות בגוף באמצעות כוח חיצוני מתנווד המופעל על הגוף.

אפנון תדר (את"ד, FM) שיטת אפנון שבה משנים את תדירותו של הגל הנושא בשיעור מתכונתי למשרעת האות שרוצים להעביר. בשיטה זאת, משרעת הגל הנושא המאופק אינה משתנה.

שאלות חזרה

1. כיצד מגדירים קול בפסיקה?

מקור הקול

2. כיצד נוצרים כל הקולות?

3. מה הקשר בין תדירות לבין גובה הצליל?

4. מהו תחום הצלילים הממוצע שאנו מסוגלים לשמוע?

5. הסבירו את ההבדל בין גלים תת-שמעיים לגלים על-שמעיים.

גלי קול באוויר

6. הסבירו מהו ציפוף ומהו קילוש.

7. האם ציפופים וקילופים בגל נעים בכיוון אחד או בכיוונים מנוגדים? הוכיחו את טענתכם.

8. כיצד נוצרים הקולות בחרוט הקרטון של הרמקול במכשיר הרדיו?

תווכים המעבירים גלי קול

9. מהי דרגת מוליכות הקול של האוויר בהשוואה לנוזלים ולמוצקים?

10. מדוע אין הקול עובר בריק (ואקום)?

מהירות הקול

11. באילו גורמים שכיחים תלויה מהירות הקול? באילו דברים היא אינה תלויה?

12. מהי מהירות הקול באוויר יבש בטמפרטורה 0° צלסיוס?

13. האם מהירות הקול גבוהה יותר באוויר חם מאוויר קר? נמקו.

14. מהו היחס בין מהירות הקול במים ובפלדה לבין מהירות הקול באוויר?

החזרת קול

15. מהו הד?

16. מהו חוק ההחזרה לגלי קול?

17. מהו הדחוף?

שבירה של גלי קול

18. מהו הגורם לשבירה של גלי קול?

19. כאשר מהירותם של גלי הקול קטנה יותר סמוך לקרקע, לאן הם מתכופפים - כלפי מעלה או כלפי מטה?

20. מדוע לעיתים נשברים גלי הקול מתחת למים?

21. האופן הסביל שבו אנו רואים את סביבתנו באור יום שונה מהאופן הפעיל שבו אנו חוקרים אותה בחשיכה בעזרת פנס. איזו משתי הצורות של תפיסת הסביבה דומה לאופן שבו הדולפין קולט את סביבתו?

אנרגיה בגלי קול

22. היכן תימצא, בדרך כלל, אנרגיה רבה יותר - בגל קול רגיל או באור רגיל?

23. מה קורה, בסופו של דבר, לאנרגיה של הקול באוויר?

24. מדוע נעים גלי קול שתדירותם נמוכה למרחקים גדולים יותר מגלי קול שתדירותם גבוהה?

25. מדוע משמיעים צופרי ערפל של ספינות צליל בעל תדירות נמוכה?

תנודות מאולצות

26. צליל של קולן נשמע חזק יותר כשמצימידים את הקולן לשולחן. מדוע?

27. ציינו שלוש דוגמאות לפחות לתנודות מאולצות.

תדירות עצמית

28. מנו לפחות שני גורמים הקובעים את תדירותו העצמית של עצם.

29. מהו הקשר בין שיעור האנרגיה הדרוש כדי לחולל תנודות מאולצות בעצם לבין תדירותו העצמית?

תהודה

30. מה ההבדל בין תנודות מאולצות לבין תהודה?

31. מה דרוש כדי לגרום לתהודה בגוף?

32. כיצד בורר מכשיר הרדיו תחנת שידור אחת ואינו משמיע את כל התחנות בו-זמנית?

33. מדוע חייבים חיילים להפסיק לצעוד בקצב אחיד כשהם עוברים על גשר?

התאבכות

34. האם ייתכן שגל אחד יבטל גל אחר? נמקו.

35. באילו סוגי גלים מתרחשת תופעת ההתאבכות?

36. הסבירו את ההבדל בין התאבכות בונה לבין התאבכות הורסת.

37. מהו הגורם ל"נקודות מתות" אקוסטיות באולמות תיאטרון או באולמות קונצרטים שלא תוכננו כראוי?

פעילות

38. איזו תופעה פיסיקלית גורמת להיווצרות פעימות?
39. מה תהיה תדירות הפעימות אם נשמיע יחד שני קולנים שתדירותיהם 370 הרץ ו-374 הרץ?
40. כיצד מסייעת תופעת הפעימות לכיוון של כלי נגינה?

שידורי רדיו

41. במה נבדלים גלי רדיו מגלי קול?
42. מה ההבדל בין גל נושא לבין גל קול?
43. מה ההבדל בין AM לבין FM?
44. באיזה מובן ניתן לומר שברירה של תחנת שידור במקלט הרדיו דומה להתאמת קולנים למצב של תהודה?

3. מיתחו פיסת גומי של בלון קרוע על גבי רמקול של רדיו ישן (אך בלא שתהיה מתוחה מדי). הדביקו פיסת מראה קלה מאוד, פיסת נייר אלומיניום מבריקה או חתיכת מתכת מלוטשת על הגומי סמוך לשוליים. הקרינו אלומת אור צרר על המראה בזמן שאתם משמיעים מוסיקה החביבה עליכם והתבוננו בצורות הנאות המוחזרות על הקיר או על מסך.

יריעת גומי דקיקה
מתוחה על רמקול

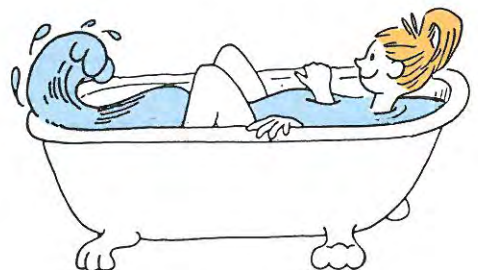


תרגילים

1. מדוע משמיעות הדבורים זמזום במעופן?
2. חתולים יכולים לשמוע קולות בתדירויות של עד 70,000 הרץ. עטלפים משדרים וקולטים ציוצים בתדירויות גבוהות ביותר, עד 120,000 הרץ. מי מהשניים שומע קולות בעלי אורך גל קצר יותר: החתול או העטלף?
3. בעת צפייה בתחרות ריצה אתם רואים את העשן מאקדח המזניק לפני שאתם שומעים את קול הירייה. הסבירו.
4. מהם השינויים החלים בצפיפות האוויר בנקודה שגל קול חולף דרכה? הסבירו.
5. ברגע שבו נוצר אזור של לחץ גבוה סמוך לשן של קולן מוסיקלי מתנווד, מצידו החיצוני, מה נוצר באותו רגע באמצע, בין השיניים?
6. מדוע כה שקט בחוץ כשהכל מכוסה שלג?
7. אם נשאב את האוויר מבקבוק לא נוכל לשמוע פעמון המצלצל בתוכו, אך נוכל לראותו. מה ניתן ללמוד מכך על ההבדל בין קול לאור?
8. מדוע מכנים לעיתים את הירח "הכוכב השקט"?
9. תוך כדי מזיגת מים לכוס זכוכית אתם מקישים עליה קלות בכפית. כאשר הכוס מתמלאת, האם צליל ההקשה ייעשה גבוה יותר או נמוך יותר? (מה צריך לעשות כדי להשיב על השאלה?)
10. אילו היתה מהירות הקול תלויה בתדירות, כיצד היתה נשמעת מוסיקה ממרחק רב?
11. אם מכפילים את תדירותו של קול, איזה שינוי יחול במהירותו? באורך הגל שלו?

מטלות בית

1. תלו בחוט את מדף הרשת של המקור, ואת קצות החוט הצמידו לאוזניים. בקשו מחבר להחליק קש, קיסם או חפץ אחר על תילי המגש או להקיש בהם קלות. תיהנו במיוחד מהתופעה אם תהיו רגועים בעת ביצוע הניסוי ואף תעצמו את עיניכם. אל תחמיצו את החוויה!
2. באמבטיה, הכניסו את ראשכם למים והאזינו לקול הנשמע כאשר אתם מקישים ציפורן בציפורן או מכים קלות על דופן האמבטיה מתחת למים. השוו את הקול לזה הנשמע כשהן האוזניים והן מקור הקול נמצאים מעל למים. החליקו קדימה ואחורה באמבטיה בתדירויות שונות (אף כי יש סכנה שהרצפה תירטב). שימו לב כיצד משרעת הגל של המים המשתכשכים גדלה במהירות כשאתם מחליקים בקצב הגלים. (משימה אחרונה זאת מרשימה במיוחד כשנמצאים לבד באמבטיה.)



12. מדוע הקול מתקדם מהר יותר באוויר חם?

13. מדוע הקול מתקדם מהר יותר באוויר לח? (רמז: בטמפרטורה שווה, למולקולות של אדי המים שבאוויר אותה אנרגיה קינטית ממוצעת כמו למולקולות הכבדות יותר של החנקן והחמצן שבאוויר. במצב זה, מהו היחס בין מהירותן של מולקולות H_2O לאלה של N_2 ו- O_2 ?)

14. האם היתה שבירת הקול אפשרית אילו לא היתה מהירות הקול מושפעת מהרוח, מן הטמפרטורה ומתנאים אחרים? נמקו.

15. מדוע ניתן לחוש ברטט שמחולל פיצוץ מרוחק בקרקע עוד בטרם שומעים את קולו?

16. אילו תנאי רוח יגרמו לקול להישמע היטב ממרחק רב? אילו תנאים יגרמו לו להישמע פחות טוב ממרחק רב?

17. גלים על-שמעיים (אולטרה סאונד) שימושים רבים בטכנולוגיה וברפואה. אחד התירונוות של גלים על-שמעיים על פני גלי קול נשמעים הוא שניתן להשתמש בעוצמות חזקות מבלי לסכן את האוזניים. התוכלו להצביע על עוד יתרון שיש לשימוש בגלים קצרים אלה? (רמז: מדוע חוקרים מעדיפים אור כחול על פני אור לבן לשם צפייה בפרטים זעירים באמצעות המיקרוסקופ?)

18. מדוע ההד חלש מן הקול המקורי?

19. כיצד ניתן לאמוד את מרחקה של סופת רעמים רחוקה?

20. שיטה מקובלת להערכת המרחק בקילומטרים בין צופה לבין מקום היווצרות ברק היא לחלק את מספר השניות שחלפו בין הבזק הברק לבין שמיעת הרעם ב-3. האם השיטה מדויקת?

21. אם אירוע המתרחש במרחק לא-ידוע משגר הן גלי אורך והן גלי רוחב שמהירויותיהם בתווך שונות זו מזו במידה ניכרת, כפי שקורה בקרקע בעת רעידת אדמה, כיצד ניתן לאתר את מקומו של האירוע?

22. טור אורך של חיילים צועד בעקבות תזמורת. מדוע אין קצב הצעידה של האחרונים בטור תואם את זה של הראשונים?

23. מדוע מפסיקים חיילים לצעוד בקצב אחיד כאשר הם עוברים על גשר?

24. מדוע חלש קולו של הנבל בהשוואה לקולות הנשמעים מכלי מיתר אחרים כמו הפסנתר, הגיטרה והבסון (קונטרה-בס)?

25. דיירי שיכונים יודעים לספר כי כאשר מגנים בדירות סמוכות, צלילי בס נשמעים ביתר בהירות. מדוע, לדעתכם, עוברים צלילים בתדר נמוך ביתר קלות דרך קירות, רצפות ותקרות?

26. אם מצמידים את ידיה האחיזה של קולן מוסיקלי לשולחן, הצליל נשמע חזק יותר. מדוע? כיצד יושפע מכך משך הזמן שבו יתנווד הקולן? הסבירו.

27. מדוע חדל בסופו של דבר קולן מוסיקלי מלהתנווד?

28. מדוע אינכם חשים בהפרעה עקב התאבכות הקול כאשר אתם מאזינים למוסיקה הבוקעת ממערכת סטריאו או ממערכת קואדרופונית, כמתואר באיור 19.15?

29. התקן מיוחד באוזניות שמרכיב מפעילו של כלי רועש - כמו פטיש אוויר או מקדח - יכול להעביר לאוזניו קולות במופע מנוגד לקולות שמשמיע הכלי. במצב זה, חרף הרעש העולה מן הכלי, המפעיל יכול לשמוע את קולכם בקלות בשעה שאתם אינכם מסוגלים לשמוע את קולו. הסבירו מדוע.

30. עצם ייכנס למצב של תהודה אם יפעל עליו כוח מנוגד בתדירותו העצמית של העצם או בתדירות שהיא מחלק של תדירותו העצמית. מדוע לא תתרחש תהודה אם הכוח המאלץ יפעל בתדירות שהיא כפולה שלמה של התדירות העצמית? (חישבו על דחיפת ילד בנדנדה.)

31. מכוונת פסנתרים שומעת 3 פעימות בשנייה כשהיא מאזינה לקול המורכב של הקולן שבידה ושל צליל הפסנתר שניגנה. לאחר שמתחה מעט את המיתר היא שומעת 5 פעימות בשנייה. האם עליה לרופף את המיתר או למתוח אותו עוד?

בעיות

1. חשבו את אורך הגל (באוויר) של צליל בן 340 הרץ. חשבו גם את אורך הגל (באוויר) של גל על-שמעי בן 34,000 הרץ.

2. ספינת מחקר מודדת את עומק המים באמצעות גלים על-שמעיים (אולטרה סאונד) שמהירותם במי-הים היא 1530 מ/ש. חשבו את עומק המים אם משך הזמן מרגע שידור האות מהספינה ועד חזרת ההד אליה מהקרקעית הוא 6 שניות.

3. עטלף המרחף במערה משמיע קול ושומע את ההד כעבור שנייה אחת. מהו מרחקו מקיר המערה?

4. אישה הנמצאת במרפסת מרוחקת דופקת מסמר בקיר ומכה בו בפטיש בקצב של מכה אחת בכל שנייה. דפיקות הפטיש נשמעות באוזניך בה בעת שהן נראות לעיניך. לבסוף נשמעת עוד דפיקה אחת לאחר שראית כי האישה חדלה להכות. מהו המרחק ממך אל האישה?

5. מהן תדירויות הפעימות שאפשר ליצור באמצעות שלושה קולנים שתדירויותיהם 256, 259 ו-261 הרץ?