

תוכן עניינים

i.....	מבוא
4.....	פרק 1: אמצעי דיבור פשוטים: תהליך מעבר הקול בתווך
7.....	צינור דיבור
9.....	זמן לניסוי
10.....	טלפון מאהבים
11.....	זמן לניסוי
12.....	טבע הקול
14.....	דיון במכשירים
16.....	שלוש נקודות לסיכום
18.....	איזה סוג תהליך הוא הקול?
18.....	זמן לחשוב
20.....	מאמרים והרחבה לפרק 1
21.....	פרק 2: גיטרה, תקליט ורמקול: גלי קול
21.....	אפיון צלילים
21.....	זמן לניסוי
22.....	זמן לניסוי
23.....	גלי קול
24.....	אורך גל
25.....	זמן מחזור
26.....	תדירות
27.....	כיצד מפרשים צלילים?
27.....	זמן לניסוי
30.....	זמן לניסוי
31.....	הקשר בין אורך גל, תדירות ומהירות קול
32.....	פונקציית גל של צליל טהור

34	רדיאנים - יחידות טבעיות למדידת זוויות
38	התאמה בין תווים מוסיקליים לבין תדרים
39	תרגילים לפרק 2
41	פתרונות לתרגילים לפרק 2
43	פרק 3: צינורות דיבור ופסי רכבת: מהירות הקול בחומרים שונים
49	שאלה למחשבה
50	מהירות הקול באוויר
56	השוט הצולף ובום על קולי
57	זמן לניסוי
61	גלגל מתגלגל
61	תרגילים לפרק 3
63	פתרונות לתרגילים לפרק 3
64	פרק 4: כיצד מודדים קול?
64	מהי עוצמת צליל
64	זמן לניסוי
66	לחץ הקול בפיקים
66	לחץ קול אפקטיבי
67	עוצמת הקול - אנרגיה ביחידה זמן
70	סולם הדציבלים
75	רמת השמע של מקהלה
77	שינוי עוצמת הקול עם המרחק
77	זמן לניסוי
80	מה לא מונע צינור דיבור?
80	זמן לניסוי
86	תרגילים לפרק 4
88	פתרונות לתרגילים לפרק 4

89	פרק 5: תעלומות בשני קולנים ובעוגב
89	תעלומת 2 הקולנים - התאבכות בזמן
90	זמן לניסוי
91	זמן לניסוי
94	תעלומת בצינורות עוגב - התאבכות במרחב
95	זמן לניסוי
97	זמן לניסוי
99	גל קול עומד בצינור פתוח
104	גל קול עומד בצינור סגור
108	זמן לניסוי
110	גל קול עומד בצינור עם קצה אחד סגור וקצה אחד פתוח
112	כלי נשיפה בחורף ובקיץ
112	זמן לניסוי
114	מיתרי גיטרה
114	זמן לניסוי
116	כיצד אנחנו מדברים?
117	המטאלופון
117	זמן לניסוי
118	כוסות מזמרות
119	זמן לניסוי
121	תרגילים לפרק 5
124	פתרונות לתרגילים לפרק 5
125	פרק 6: הסטטוסקופ
126	כניסה של פולס בודד
128	כניסה של אות גלי
129	מידת ההגברה
130	תדרים מסתוריים
131	מעבדה לחקר הסטטוסקופ

133	מאמרים להרחבה והעמקה
134	פרק 7: רמקול, מיקרופון ומערכות בקרה
134	הרמקול
135	רמקול מפזר
136	רמקול אלקטרודינמי
137	זמן לניסוי
138	רמקול פיזואלקטרי
139	רמקול אלקטרוסטטי
141	התקנת רמקול
141	זמן למחקר ומחשבה
144	פזואינברטור - הופך פאזה
145	מונו וסטריאו
145	זמן לניסוי
146	מיקרופון
146	זמן לניסוי
149	מיקרופון פחמי
149	מיקרופון אלקטרו-דינמי (מיקרופונים דינמיים)
150	מיקרופון סרט
150	מיקרופון סליל
151	מיקרופון קיבולי (קונדנסר)
151	מיקרופון גבישי (פיזואלקטרי)
152	לוח בקרה במערכת הגברה
154	מאמרים להרחבה והעמקה

מבוא

אילו התמוטט סלע גדול בלב המדבר או עץ היה נופל בלב יער רחוק, במרחק של מאות קילומטרים מיצור חי כלשהו, האם היה משמיע קול בנפילתו? אנשים שונים ישיבו תשובות שונות לשאלה עתיקה זו. מבחינה אובייקטיבית יש שיאמרו כי הקול יישמע מכיוון שקול אינו מתקיים רק בראש המאזין. לעומת זאת, מבחינה סובייקטיבית, יש שיאמרו כי קול מחייב מישהו שיאזין לו. מה נכון? האם תשובה מורכבת זו קשורה למהות הקול? על מנת לענות על שאלה זו, נבין מהו קול. למעשה, קול הוא גל הנוצר מתנודות של גופים שונים. הצלילים אותם אנו שומעים הם בתחום השמע בהם האוזן יכולה לקלוט, בניגוד גמור לתחומים אחרים בהם האוזן אינה יכולה לקלוט כדוגמת על שמע (אולטרא סאונד) ותת שמע (אינפרא סאונד). למעשה, כשאנו שומעים קולות, אנו חשים גלים המתקדמים באוויר שתדירותם נמצאת בתחום השמע. קיימים בעלי חיים ויונקים כמונו המסוגלים לשמוע בתחומי העל שמע כדוגמת העטלף. בעל חיים זה תר ומנווט אחר טרפו באמצעות פליטת גלים על קוליים וגילוי ההדים החוזרים מהם. לאחר שהקול נפלט מנחיריו של העטלף, הוא יכול להיות מוחזר כהד מחרק כלשהו, ולחזור לאוזני העטלף. התנועות של העטלף ושל החרק יחסית לאוויר גורמות לתדירות הנשמעת על ידי העטלף להיות שונה בכמה קילוהרץ מהתדירות שהוא עצמו פלט. העטלף מתרגם אוטומטית הבדל זה למהירות היחסית שבינו לבין החרק וכך למעשה הוא יכול להתביית עליו. דוגמא לחיות השומעות בתת שמע הינם הפילים. הפילים משתמשים בגלי הקול התת שמעיים לתקשורת בין בני מינם על פני טווחים של קילומטרים בעיקר לצורך מציאת בני זוג. אם כן, ראינו כי בע"ח משתמשים לצורך קיומם היומיומי בגלי קול בטווחים שונים. גם בני האדם עושים זאת בטווחים שהם עצמם שומעים ובכאלה שלא. לדוגמה, צוותי חיפוש גיאולוגיים משתמשים בגלי קול כדי לבדוק הימצאות נפט בקרום כדור הארץ. אוניות נושאות מתקנים פולטי קול לצורך גילוי מכשולים תת ימיים. במקצועות הרפואה משתמשים בגלי קול בתדירות גבוהה כדי ליצור תמונות ממוחשבות של רקמות רכות. גם בטווחי השמע של האדם קיים שימוש בלתי תלוי בקול והאדם, ברבות השנים, למד לחקות את האופן בו משתמשים בע"ח שונים לצורך פיתוחם של מכשירים שונים. אולם, גם בתחום השמע ידע האדם לעשות שימוש משכיל ומיוחד במינו. דוגמה לכך, בשימוש במוסיקה לגווינה, שמהווה חלק בלתי נפרד מחיינו, עושים מעין "משחק" בצלילים אותם מסוגל האדם לשמוע. בכל מערכת היוצרת קול מוסיקלי יהא זה מיתר או כינור, עוגב או פסנתר ההרמוניה היסודית ועוד אחת או יותר מההרמוניות הגבוהות יותר נוצרות בו-זמנית. לפיכך, אנו שומעים אותן יחדיו- כלומר, הן משתלבות, מחסירות אחת את השנייה (מתאבכות) ויוצרות גל אחד משותף. כשכלים שונים מנגנים את אותו התו, הם יוצרים תדירות יסודית זהה, אבל הרכב שונה בכל כלי וכלי, של עוצמת ההרמוניות הגבוהות. לדוגמה ההרמוניה הרביעית של

הדו האמצעי (באמצע הפסנתר) עשויה להיות חזקה יחסית בכלי מסוים וחלשה או נעדרת בכלי אחר. לפיכך, כלים שונים נשמעים לנו באופן שונה גם אם מנגנים בהם את אותו התו. זה מה שהיה קורה לגלים המשולבים של כינור ובגיטרה, גם אם היו מנגנים באותו התו. אם כן, ראינו את ההכרח הקיומי של גלי הקול, אך מהי ההגדרה הטובה והמדויקת ביותר לכל מה שתיארנו עד כה ומשותפת לכלל בעלי החיים ולא משנה באיזה תדירות הם שומעים ומהו השימוש בו הם עושים? כהגדרה רחבה יותר, **גל קול מוגדר כגל אורכי בתדירות כלשהי המתקדמת בתווך. התווך יכול להיות מוצק, נוזל או גז.** רוב הקולות שאנו שומעים מועברים באוויר. בהשוואה למוצקים ונוזלים, האוויר הוא מוליך קול גרוע. הדוגמה הטובה ביותר מתבטאת היטב בחוף הים. אם נצמיד את אוזננו לקרקע חולית יבשה לחלוטין ונכה בקרקע, לא נשמע דבר. אם נתקדם מרחק קצר לקרקע רטובה, נשמע את המכות היטב. הסיבה לכך נעוצה בכך שהקרקע היבשה מלאה באוויר העוטף את גרגרי החול ולכן הולכת הקול נמוכה מאוד. לעומת זאת בקרקע רטובה, הקרקע נוזלית והולכת הקול בתווך נוזלי טובה מאוד. גורמים סביבתיים רבים משפיעים על התקדמות הקול בתווך. מהירות הקול בטמפרטורה של 0° צלסיוס היא כ-330 מטרים בשנייה. כאשר האוויר מכיל אדי מים מהירות זו גדלה. שינוי טמפרטורה יכולה אף היא להאט או להגביר את מהירות הקול.

הקול מופיע במקומות שונים במקרא והבולט ביותר בהם הוא בפרשת יתרו בפסוק: "וכל העם רואים את הקולות ואת הלפידים ואת קול השופר ואת ההר עשן, וירא העם וינעו ויעמדו מרחוק". האם באמת ניתן לראות קול? האם התופעה שעם ישראל ראה את הקולות ניתנת להסברה בכלים פיזיקליים ולא רק בפירושים שונים? האם מעמד הר סיני היה כה נשגב וגדול ככל הנראה עד שהתיאור יצא מגדרו? האם מטרת התובנה היא לסחוף את הצופים וליטוע בהם את האמונה באלוקים? בעיון בחלק מפרשנות המקרא כמעט כל התשובות אפשריות ואף ההסברים המובאים, חושפים את הראיה הפסיכולוגית. דוגמה לכך היא תופעה הידועה כסינסתזיה (ערבוב חושי) שמשמעותה מיזוג קוגניטיבי בין חושים שונים. שכיחות התופעה באוכלוסייה היא כ-4% (1 ל-23) ואין הבדל בשכיחות בין גברים לנשים. מתועדים יותר מ-50 סוגים שונים של סינסתזיה. למשל, בסינסתזיה גרפמה-צבע אותיות וספרות נתפסות כמלוות בחוויה של צבע (פוטיזם), בסוג אחר של סינסתזיה, מילים יכולות לגרום לתחושת טעם על הלשון. בסוג אחר, יחידות זמן, כגון שנים או חודשים, נחווים כממוקמים במיקום ספציפי וקבוע במרחב. אופן נוסף בו ניתן להציג הינו ההבנה שאולי "רואים" משמעותו איננה ראייה חושית אלא הבנה. בפרשת ראה לדוגמה התורה אומרת: "ראה אנכי נותן לפניכם היום ברכה וקללה". כאשר שם ברור שאין מדובר במשמעות של ראייה, אלא של הבנה, ואולי גם אצלנו ביחס לקולות במעמד הר סיני, הבין עם ישראל את משמעות הקולות, ואת עוצמת ההתגלות שהיתה סביבו. ואולי ייתכן להבין גם בדרך נוספת. כידוע ישנו הבדל בין חוש השמיעה לחוש הראייה. חוש

הראייה הוא חוש ממשי, מציאותי. כאשר אדם רואה משהו, הרי שיש בכך משהו ברור ומוחלט, למרות שיש בכך גם משהו מוגבל, כי הראייה היא ראיית המציאות. מנגד, כאשר אדם שומע דבר מסוים הרי שאין כאן בהכרח דבר מוחשי וברור. אדם שומע קולות, כאשר את המשמעות לקולות הוא מעניק על פי הבנתו. למשל, אדם יודע שקולות מסוימים משמעותם היא מילה מסוימת, ואם כך, כשהוא שומע קול זה, הוא מדמיין מילה זו. כשאדם שומע כסא זו ממילא הוא מדמיין לעצמו כסא. כך גם לגבי קולות אחרים בטבע: כשאדם שומע ציוץ של ציפורים הרי שהוא מדמיין ציפורים. בשמיעה, אדם יכול לדמיין גם דברים שהם מעבר למציאות. אדם יכול לדמיין דברים גבוהים, עמוקים ועליונים. דברים שאינם קיימים במציאות אלא רק במחשבה והבנה הפנימית. אמנם דבר זה איננו מוחלט. הדמיון נותן עוצמה ומעוף, אך איננו מדויק כמו המציאות הנגלית לעיניים. אדם שלא ראה הר געש יכול לנסות לדמיין מהו הר געש, אבל לא יצליח לעולם להגיע לדמיון מוחלט. אדם שלא ראה עץ מסוים, לא יכול לדמיין אותו בצורה מלאה. במעמד הר סיני, עם ישראל הגיע למציאות שבה הוא היה מסוגל לראות את המציאות הפנימית. ה"שפת אמת" (תרל"ז, ד"ה פנים בפנים) מבאר שלמרגלות הר סיני קיבלנו את ההכנה, את הכוח הפנימי והנפשי לקבל את התורה.

האם ניתן בכל זאת להסביר תופעה עתיקת יומין זו בכלים מדעיים? מסתבר שקיימת תופעה בפיזיקה הקרויה אפקט אקוסטו אופטי. תופעה זו מקורה באינטראקציות בין גלי קול לגלי אור (לדוגמה שבירה של לייזר אור על ידי אולטרא-סאונד). באופן כללי, השפעות אקוסטו-אופטיות מבוססות על השינוי של מדד שבירה של מדיום עקב הימצאות גלי קול במדיום זה. גלי קול מייצרים סריג אינדקס שבירה בחומר, וזה הסורג ש"נראה" על ידי גל האור.

לאור צורכי הסטודנטים והמורים המלמדים, ומתוך רצון לעדכן את הוראת הפיזיקה החלטנו לפתח סביבת לימוד מקורית בהוראת הקול. הסיבה לכך נעוצה בעובדה כי נושא חשוב זה המשוויד להוראת הגלים אינו תופס מקום כלל בהוראת הפיזיקה, וגם אם כן, באופן המצומצם ביותר. בחיבור זה מובא לפניכם פיתוח הבנתי והדרגתי של מושג הקול תוך המחשה ניסויית מובנית של הקול ועד לביטויים המתמטיים המתארים תופעה מופלאה זו. ההמחשות נבחרו כך שקורא סקרן יוכל לחזור על רוב הניסויים בסביבה ביתית ללא צורך בציוד מעבדה מיוחד. גם לקוראים שאינם בקיאים ברזי המתמטיקה הפיזיקלית המתארת את הקול, חיבור זה מהווה חוויה ייחודית ובלתי תלויה בהבנת נושא זה היכולה לפתוח אשנב חדש להוראת הפיזיקה לרמות שונות. בסיומו של כל פרק, נוסף תירגול מעשי ולעיתים גם עיוני המעמיקים ומאפשרים ראייה עמוקה נוספת. בנוסף, למעוניינים, קיימות הפניות בסיומו של כל פרק המאפשרות הרחבה והעמקה ע"י קריאת מאמרים הקשורים לנושאים הרלוונטיים המובאים בכל פרק. לסיום, תקווה בליבנו כי השימוש בקנקן המתואר בחיבור זה, ירחיב דעת ויגרום לאנשים ללמוד פיזיקה מתוך הבנה והנאה.

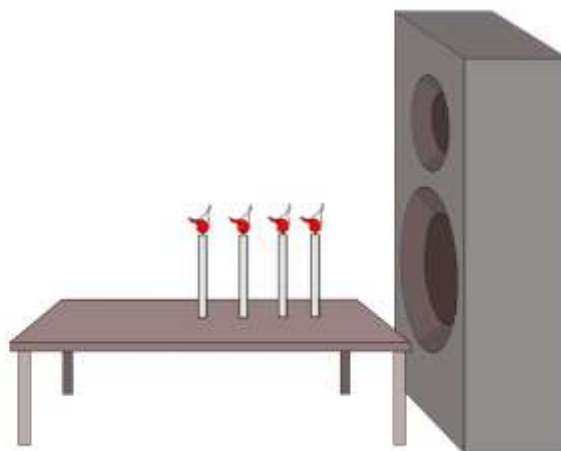
אז מהו קול, לאור מה שראינו בטלפון צינורות וטלפון מאהבים? על כך נדבר בקטע הבא.

טבע הקול

נתחיל את הדיון בטבע הקול מתעלומה מיסטית. במאה ה-19, כאשר רחובות אירופה וכן אולמות התרבות הוארו באמצעות להבות אש המופקות על ידי מנורות גז (דומות מאוד לתנורי הגז וגזיות של היום) החלו להתפשט שמועות על להבות אש שרוקדות בקצב המוסיקה בקונצרטים. היו שהסבירו את התופעה המסתורית בנוכחותן של רוחות רפאים שבאו גם הן להאזין לצלילי המוסיקה. ננסה גם אנחנו לחזור על התופעה ולהסביר אותה מבלי לערב אורחים מהעולם האחר.

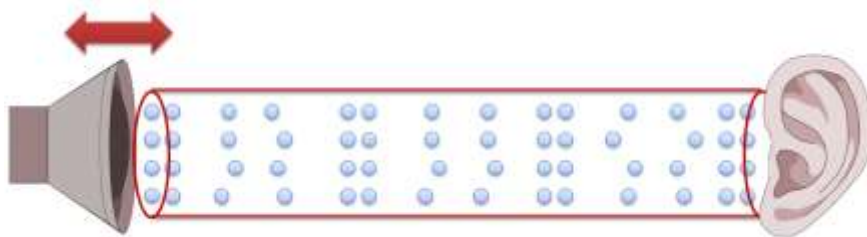
זמן לניסוי

נציב מספר נרות מול רמקול חזק.



1. ננגן צליל נמוך ברמקול. התבוננו בלהבה. כיצד היא מתנהגת? מדוע?
2. הגבירו לאט את עוצמת הקול. מה השתנה בתנועת הלהבה? מדוע?
3. ננגן צליל גבוה. כיצד הלהבה נעה עתה? שערו מדוע.
4. מה ניתן ללמוד על טבע הקול מהתנהגות הלהבות?

ממברנת הרמקול מהווה משטח שמתנוודד קדימה-אחורה. לכן, קול נוצר על ידי מקור מתנוודד. ניתן לראות כי "הלהבות הרוקדות" מתנוודדות גם הן קדימה-אחורה. לא למטה-למעלה, לא נוטות קדימה, אלא, מתנוודדות קדימה-אחורה! הדבר מלמד אותנו כי מקור הקול – הממברנה במקרה זה, מניד את מולקולות התווך הקרובות אליו קדימה ואחורה. מולקולות אלה בתורן, מתנגשות בשכנותיהן הקרובות וגורמות גם להן לנוע קדימה-אחורה וכך הלאה כפי שניתן לראות באיור 5.



איור 5: ממברנת הרמקול המהווה משטח המתנוודד קדימה-אחורה. ניתן לראות כי "הלהבות הרוקדות" מתנוודדות קדימה ואחורה.

חשוב מאוד להדגיש שלא מדובר כאן בסוג של זרם, כמו זרם של מים למשל. ואכן, כאשר שופכים מים מכוס לכוס, כל מולקולות המים מהכוס הראשונה מגיעות לכוס השנייה. לא כך בקול! מולקולות האוויר המעוררות על ידי המקור לא מגיעות אל המאזין, אלא מתקיים תהליך הדרגתי של מעבר רטט (אנרגיה קינטית) ממולקולה למולקולה דרך התנגשויות.

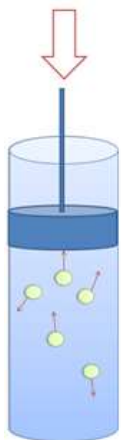
כך, מקור הקול המתנוודד יוצר בעצם סדרה של **ציפופים** (compression) ו**קילופים** (rarefaction) בתווך. הבאה נבין לעומק את הדברים. לשם כך, נגדיר 2 מושגים בסיסיים המאפשרים הסתכלות מאקרוסקופית על התווך. הכוונה בהסתכלות מאקרוסקופית היא שלא ננתח את תנועתן של מולקולות בודדות אלא נתבונן בתווך כבישות אחידה.

צפיפות - נגדיר צפיפות של גז שמסתו m הנמצא בכלי שנפחו V בעזרת המשוואה

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

אזור ציפוף הוא אזור בתווך שבו צפיפות המולקולות ρ גבוהה ביחס לצפיפות הממוצעת בתווך.

אזור קילוש הוא אזור בתווך שבו צפיפות המולקולות ρ נמוכה ביחס לצפיפות הממוצעת בתווך.



לחץ הגז - P . נתבונן בכלי עם גז בתוכו. קצהו האחד של הכלי סגור ובקצהו השני נמצאת בוכנה המסוגלת לנוע פנימה והחוצה (איור משמאל). מולקולות הגז נמצאות בתנועה מתמדת. כל מולקולה שמתנגשת בבוכנה, מפעילה עליה כוח. המולקולות נעות בכיוונים ומהירויות אקראיים בתוך הכלי. אי לכך הכוח הממוצע הכולל המופעל על הבוכנה על ידי מולקולות הגז הוא קבוע. כוח זה שווה לכוח שיש להפעיל על הבוכנה מבחוץ (הלחץ האדום העבה באיור) על מנת להחזיקה במקום ולשמור על נפח קבוע של הגז. כוח חיצוני זה ניתן למדידה בקלות יחסית על ידי הנחה של משקולות קטנות בעלות מסה ידועה על הבוכנה מלמעלה. היות והגז מפעיל כוח על כל שטח הבוכנה, מגדירים לחץ ככוח המופעל על יחידת שטח אחת של הבוכנה. עבור שטח S של הבוכנה

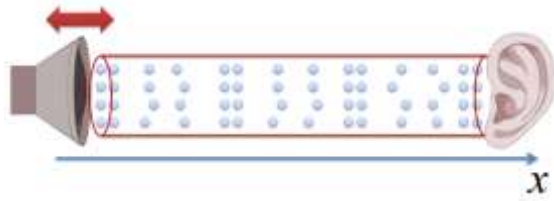
$$P = \frac{F}{S} \quad (1.2)$$

ככל שיש יותר מולקולות של הגז בכלי, כמות ההתנגשויות של המולקולות בבוכנה בשנייה אחת גדולה יותר, לכן, ככל שהגז צפוף יותר, הלחץ שהוא מפעיל על הבוכנה ועל דפנות הכלי, גדול יותר ולהפך, ככל שצפיפות הגז נמוכה יותר, הלחץ קטן יותר. באזור הציפוף לחץ הגז גבוה יותר ובאזור הקילוש לחץ הגז נמוך יותר. חשוב ביותר לציין כי בנוזל ובגז הלחץ מתפשט בצורה שווה לכל הכיוונים. לחץ האוויר ללא הקול הוא בעצם, הלחץ האטמוספרי $P_0 = 101,325 \frac{N}{m^2}$. עתה יש ברשותנו הכלים לדון בצינור דיבור ובטלפון מאהבים.

דיון במכשירים

צינור דיבור נניח לשם נוחות, כי מקור הקול שלנו הוא ממברנה מתנודדת של רמקול. צינור הטלפון מגביל את המרחב שלנו למימד אחד. כמו שראינו בניסויים, הממברנה מתנודדת קדימה ואחורה לאורך ציר ה-x המסומן באיור המופיע בצד שמאל. כאשר הממברנה נעה קדימה, האוויר, באזור הקרוב לפני הממברנה, נלחץ וצפיפותו עולה. נוצר אזור ציפוף. כאשר הממברנה

נעה אחורה, צפיפות האוויר הנמצא לפניו יורדת ונוצר אזור לחץ נמוך הנקרא קילוש. הודות

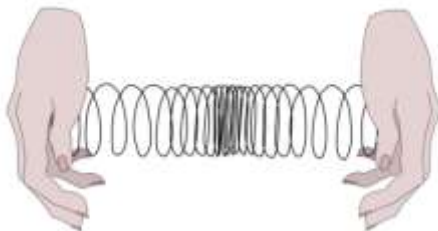


להתנגשויות בין מולקולות האוויר, אזורי ציפוף וקילוש אלה מתקדמים באוויר שבצינור ומגיעים אל האוזן הקשבת הנמצאת בקצה השני.

פיזיקאים קוראים לתופעה זו – התפשטות הפרעה אורכית בתווך. כלומר, התנודות וההתנגשויות של מולקולות התווך (אוויר במקרה שלנו)

מתרחשות במקביל לכיוון ההתקדמות של ההפרעה (קדימה-אחורה לאורך ציר ה-x).

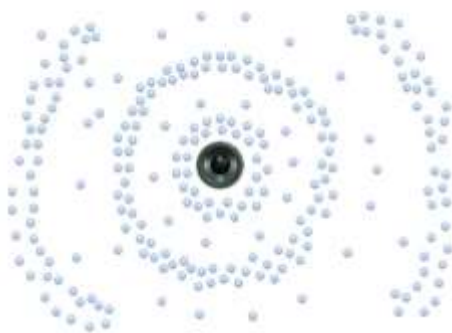
מכיוון שאין ביכולתנו לראות מולקולות בודדות נדגים את הרעיון של הפרעה אורכית באמצעות



קפיץ סלינקי. נמתח את הקפיץ על שולחן אופקי. קצה אחד של הקפיץ נשאר קבוע ואת הקצה השני נזיז קדימה ואחורה. אחרי כל תנועה של היד שלנו, נראה אזור ציפוף שמתקדם בקפיץ כמופיע באיור מצד שמאל. חשוב להדגיש שהקפיץ נשאר במקום ורק

הציפוף, או במילים אחרות, ההפרעה מתקדמת בו! זאת הדגמה למה שקורה בתווך כאשר עוברת בו הפרעת קול. מולקולות האוויר לא זורמות קדימה בצינור אלא, מתנודדות קדימה-אחורה סביב מיקומן המקורי.

כאשר מדברים באוויר הפתוח, בעקבות מנגנון ההתנגשויות בין המולקולות, ההפרעה מתפשטת



במידה שווה מהמקור לכל עבר ונוצרים אזורי ציפוף וקילוש כדוריים סביב המקור כפי שניתן לראות בתמונה משמאל. דבר זה ניתן להוכחה פיסיית ממש. כאשר נציב קערת מים על עמוד דק ונפעיל לחץ באזור מסוים על פני המים בקערה, אפילו קרוב לדופן, הקערה תישאר לעמוד על העמוד ולא תיפול. זאת משום שהלחץ המופעל באזור זה מתפשט בצורה שווה בכל הכיוונים במים ולכן, הקערה לא מתהפכת.