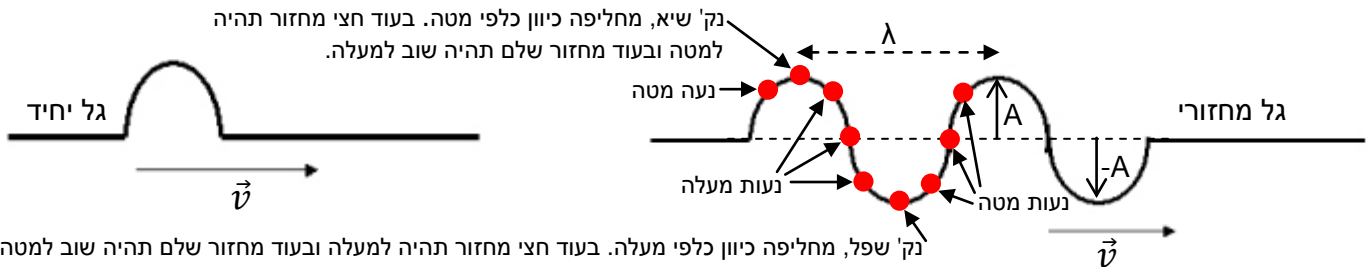


גל הוא הפרעה המתקדמת במרחב. כל הפרעה גלית, למעט זו האלקטרומגנטית (אור), זקוקה לתווך שבו תוכל להתקדם. כשאנו מנדנדים חבל בקצהו, למשל, מתקדם לאורכו גל שעבורו משמש החבל כתווך. עבור גלי הים, המים משמשים תווך ועבור גלי הקול, האוויר משמש תווך. אילולא היו החבל, המים והאוויר בנמצא, לא היו הגלים שהזכרו לעיל מתקיימים. הפרעה גלית יכולה להיות יחידה או מחזורית. בד"כ אנו נתקלים בהפרעה גלית מחזורית (להלן "גל מחזורי"), אך ניעור יחיד של חבל בקצהו מהווה דוגמה טובה להפרעה גלית יחידה (להלן "גל יחיד") – דבשת המתקדמת לאורכו של החבל.



כשאנו מתבוננים בגל המתקדם לאורכו של חבל אופקי, אנו רואים שכל נקודה על החבל נעה מעלה ומטה בתורה, אך לא ימינה ושמאלה. **מולקולות החבל מתנדדות במאונך לכיוון ההתקדמות של הגל.** גל כזה נקרא "גל רוחב". גם גלי הים הם גלי רוחב, כיוון שמולקולות המים נעות מעלה ומטה בעוד הגל מתקדם אופקית אל עבר החוף. הצופים באצטדיון יוצרים גל רוחב כאשר כל צופה קם ומתיישב בתורו: הצופים נעים מעלה ומטה בעוד ה"גל" שהם יוצרים מתקדם אופקית לרוחב האצטדיון. כאשר **מולקולות התווך מתנדדות במקביל לכיוון ההתקדמות של הגל**, הגל מכונה "גל אורך". גל קול הוא דוגמה לגל אורך - אם הוא מתקדם אופקית, למשל, אז מולקולות האוויר מתנדדות שמאלה וימינה - במקביל לכיוון ההתקדמות של הגל.

מושגים

כשאנו מאפיינים גל מחזורי כלשהו, אנו עושים שימוש במושגים הבאים:

נקודות שיא (Peaks), הנקודות הגבוהות ביותר בגל ברגע מסוים.

נקודות שפל (Troughs), הנקודות הנמוכות ביותר בגל ברגע מסוים.

משרעת הגל (Amplitude) – A[m], הגובה של נקודות השיא.

העתק (Displacement) – $\psi[m]$, הגובה של נקודה כלשהי על הגל. ההעתק המרבי הוא המשרעת: $-A \leq \psi \leq A$

אורך הגל (Wavelength) – $\lambda[m]$, המרחק שבין שיא לשיא או בין שפל לשפל.

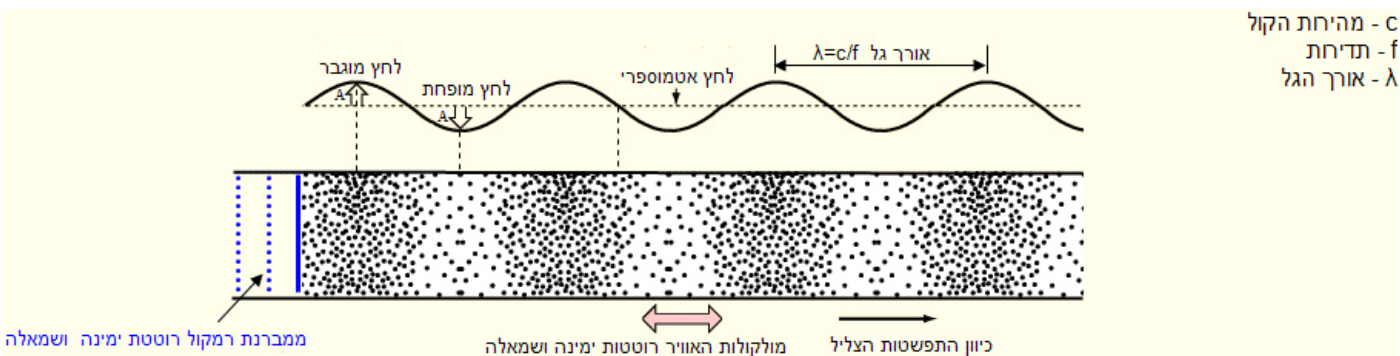
זמן המחזור של הגל (Period) – T[sec], משך הזמן שבו משלימה מולקולה שבתווך מחזור תנועה שלם (משיא לשפל ובחזרה לשיא, למשל). זהו גם משך הזמן הדרוש לגל בכדי להתקדם "אורך גל" אחד.

תדירות הגל (Frequency) – f[Hz], מספר מחזורי התנועה שמבצעת בשנייה אחת מולקולה שבתווך. זהו גם מספר אורכי הגל אשר "חולפים" בשנייה אחת על פני נקודה קבועה כלשהי שעל ציר ההתקדמות.

תדירות הגל זמן המחזור שלו הם הופכיים: $f=1/T$

מהירות הגל – $\vec{v}[m/s]$, מהירות ההתקדמות של הגל. **מהירות זו תלויה אך ורק בתווך שבו מתקדם הגל.**

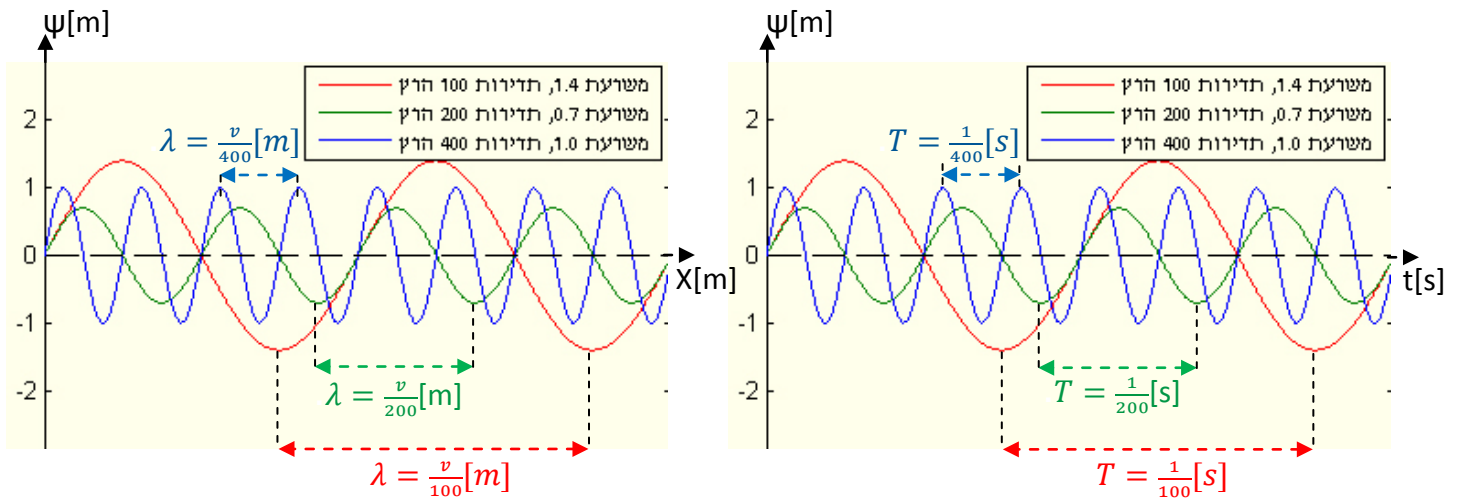
מהירותו של גל קול באוויר למשל היא 343m/s, ואינה מושפעת מתדירותו (אשר קובעת את גובה הצליל) או ממשרעתו (אשר קובעת את עוצמת הצליל). האירור הבא מראה "תצלום סטילס" של גל קול מחזורי בעל **תדר מסוים** המתקדם ימינה בתוך צינור.



c - מהירות הקול
f - תדירות
 λ - אורך הגל

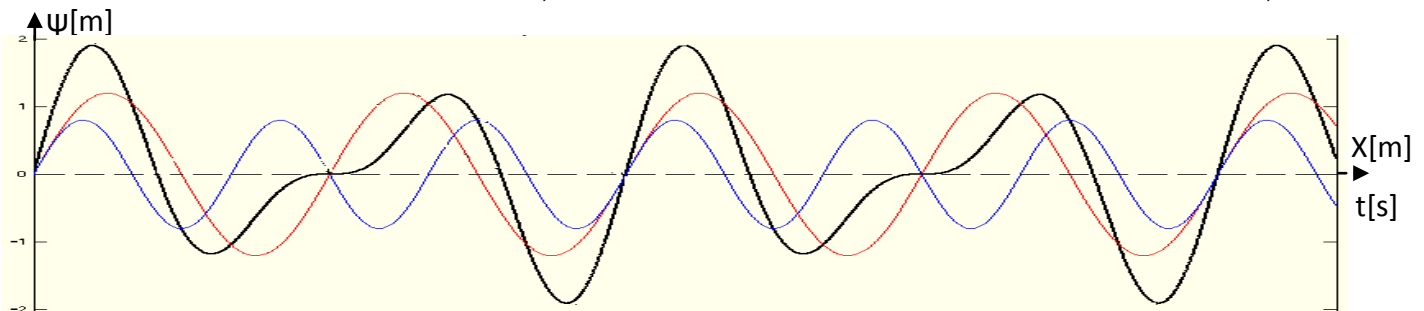
ניתן להבחין כי לחץ האוויר משתנה באופן מחזורי לאורכו של הצינור. אורך הגל הוא המרחק שבין שיאי לחץ (או תתי לחץ) סמוכים. לו היה התצלום עובר הנפשה, היו אזורי הלחץ השונים נראים כשהם מתקדמים ימינה במהירות הקול. זאת למרות שמולקולות האוויר עצמן אינן נסחפות ימינה כפי שקורה במשב רוח, אלא רק מתנדדות ימינה ושמאלה סביב מיקום המנוחה שלהן. תצלום סטילס נוסף, לו בוצע כעבור זמן מחזור T, היה נראה זהה לזה המוצג כאן.

הקשר שבין מהירות הגל, אורכו ותדירותו נתון במשוואת הגל: $v = \lambda \cdot f$
אנו רואים שככל שגבוהה תדירות הגל, קצר אורכו (מהירות הגל קבועה כל עוד התווך אינו משתנה, חשוב לזכור זאת).
 שני האיורים הבאים מתארים שלושה גלים מחזוריים בעלי משרעות שונות ותדירויות שונות הנעים באותו התווך.
 האיור השמאלי מציג תמונה על ציר מקום, ז"א "תצלום סטילס" של הגלים **ברגע מסוים**.
 האיור הימני מציג תמונה על ציר זמן, ז"א מציג את העתקה של **נקודה מסוימת** על הגל כתלות בזמן.



התאבכות

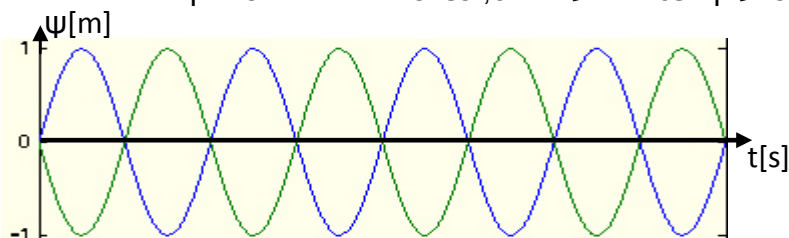
גל מחזורי בסיסי הוא סינוסואידלי, ז"א נראה כמו הגלים שלעיל. כאשר שני גלים כאלה (או יותר) נעים באותו התווך הם מתאבכים ויוצרים "גל חדש" אשר מהווה סכום (סופרפוזיציה) שלהם. צורתו של הגל החדש היא בד"כ לא סינוסואידלית. באיור הבא, הגל השחור הוא תוצאת התאבכותם של הגל האדום והגל הכחול, אשר לכ"א מהם תדירות משלו ומשרעת משלו.



אם לשניהם הייתה אותה התדירות, הגל השחור היה אף הוא סינוסואידלי (אפשר להוכיח זאת אך לא נעשה זאת כאן).
אנו נעסוק רק במקרים כאלה, ולכן לא נציין יותר את היותם של הגלים סינוסואידיים. פשוט נבין שהם כאלה.

מופע

מופע משמעו תזמון. כשאומרים על שני גלים (או יותר) שהם **באותו מופע**, אפשר להתכוון למספר דברים, אך אנו, היות שדיונינו יעסקו מעתה רק בהתאבכויות של גלים בעלי תדירות זהה, נאמץ את הפירוש הבא:
 אם לנקודה כלשהי בתווך מגיעים שני גלים **באותו המופע**, הם מתאבכים בה באופן בונה כך ששיאיהם ונקודות השפל שלהם חוברים בה יחדיו לסירוגין ומתגברים זה את זה. התאבכות שכזו תיקרא "התאבכות בונה".
 משרעת התנודות שתתקבלנה בנקודה כזו תהיה שווה לסכום המשרעות של שני הגלים המתאבכים.
 באופן דומה, כשנאמר על שני גלים שהם מגיעים לנקודה כלשהי **במופע הפוך**, נתכוון לכך שהם מתאבכים בה באופן הורס כך ששיאו של האחד חובר לנקודת שפל של רעהו. התאבכות שכזו תיקרא "התאבכות הורסת".
 משרעת התנודות שתתקבלנה בנקודה כזו תהיה שווה להפרש המשרעות של שני הגלים המתאבכים. במידה ולשני הגלים המתאבכים ישנן משרעות שוות, תתקבלנה תנודות שמשרעתן אפס - רוגע מוחלט, כפי שמודגם באיור שלהלן:



האיור מתאר את שמתרחש **לאורך זמן** בנקודה מסוימת בתווך, אשר אליה מגיעים **במופע הפוך** שני גלים שווים תדירות ומשרעת. הקו השחור (על ציר הזמן) מתאר את סכומם בכל רגע ורגע: 0

בתרשים הבא מוצג "תצלום סטילס" של בריכת מים אשר בה טבולים שני כדורים S_1 ו- S_2 . המרחק בין הכדורים הוא d , והם מתנוודים יחדיו מעלה ומטה **באותה התדירות** f . עקב התנוודותם זו, מתפשט סביב כ"א מהם גל מעגלי.

המעגלים שבתרשים מתארים את שיאי הגלים האלה, ומכך נובע שהמרחק בין מעגלים סמוכים הוא בעצם אורך הגל λ . קל לראות בתרשים ש- $d=5\lambda$ או $\lambda=d/5$.

מה עוד ניתן לראות בתרשים?

שברגע בו צולמה התמונה חלפו **בנקודה A**

שיאים של שני הגלים. כעבור חצי זמן מחזור יחלפו בנקודה זו שפלים של שני הגלים, וכעבור זמן מחזור שלם שוב יחלפו בה שיאים של שני הגלים. **בנקודה A** נוצרת התאבכות בונה אם כך.

בנקודה B חלפו ברגע הצילום שפלים של שני הגלים. כעבור חצי זמן מחזור יחלפו בנקודה זו שיאים של שני הגלים, וכעבור זמן מחזור שלם שוב יחלפו בה שפלים של שני הגלים. אם כך, גם **בנקודה B** נוצרת התאבכות בונה.

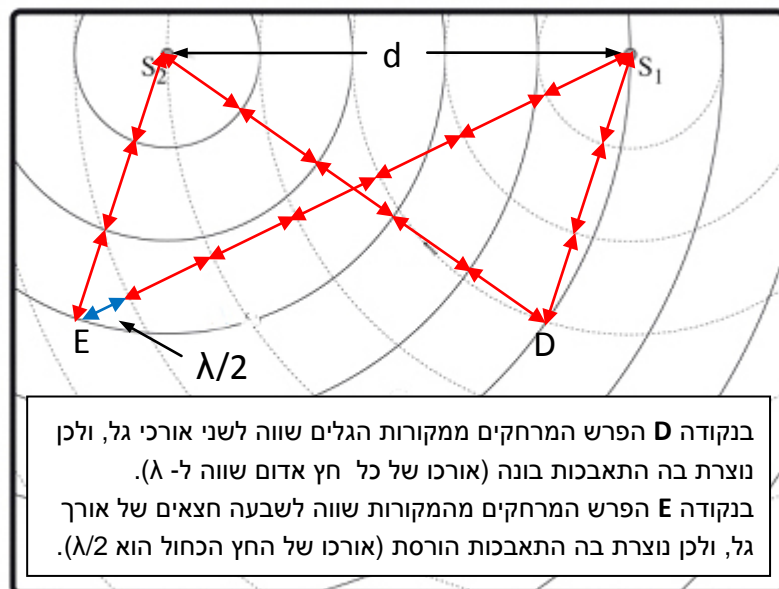
בנקודה C חלפו ברגע הצילום שיא של הגל מ- S_1 ושפל של הגל מ- S_2 . כעבור חצי זמן מחזור יחלפו בה שפל של הגל מ- S_1 ושיא של הגל מ- S_2 , וכעבור זמן מחזור שלם שוב יחלפו בה שיא של

הגל מ- S_1 ושפל של הגל מ- S_2 . **בנקודה C** נוצרת אם כן התאבכות הורסת.

כעת נשאל את השאלה המעניינת הבאה: האם יש משהו שאנו יכולים לומר על כל הנקודות שבהן ישנה **התאבכות בונה**, ועל כל הנקודות שבהן ישנה **התאבכות הורסת**? התשובה היא כן.

מאחר ושני הכדורים מתנוודים באופן מתואם, הגלים שהם מפיקים מתוזמנים: כאשר S_1 מפיק שיא גם S_2 מפיק שיא, וכאשר S_1 מפיק שפל גם S_2 מפיק שפל. בכל נקודה שהפרש המרחקים בינה לבין הכדורים (מקורות הגלים) שווה **לכפולה של אורך גל**, תתרחש התאבכות בונה. מתמטית נכתוב זאת כך: $d_1 - d_2 = n \cdot \lambda$, כאשר d_1 הוא המרחק שבין הנקודה ל- S_1 , d_2 הוא המרחק שבין הנקודה ל- S_2 , ו- n הוא מספר טבעי כלשהו.

באופן דומה, בכל נקודה שהפרש המרחקים בינה לבין הכדורים (מקורות הגלים) שווה **לכפולה אי-זוגית של חצי אורך גל**, תתרחש התאבכות הורסת. מתמטית נכתוב זאת כך: $d_1 - d_2 = (2n - 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$ ($2n - 1$ משמעו "מספר טבעי אי-זוגי").



נתבונן בנקודה **D** שבאיור משמאל. מרחקה מהמקור S_1 הוא שלושה אורכי גל, ומהמקור S_2 חמישה אורכי גל. הפרש המרחקים הוא אם כן שני אורכי גל (2λ), כפולה של אורך גל, ולכן תיווצר בנקודה **D** התאבכות בונה – גל שמשרעתו שווה לסכום המשרעות של הגלים המתאבכים.

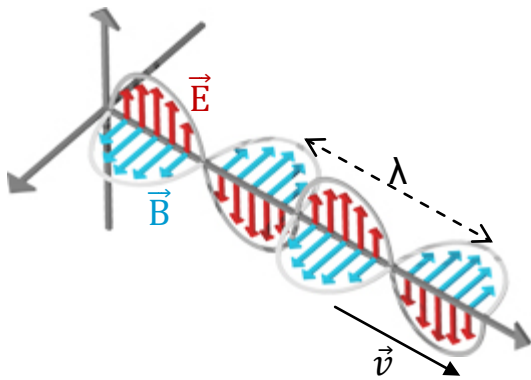
כעת נתבונן בנקודה **E**. מרחקה מהמקור S_1 הוא שלושה חצאים של אורך גל, ומהמקור S_2 שישה חצאים של אורך גל. הפרש המרחקים הוא אם כן שבעה חצאים של אורך גל ($7 \cdot \frac{\lambda}{2}$), כפולה אי-זוגית של חצי אורך גל, ולכן תיווצר בנקודה **E** התאבכות הורסת – גל שמשרעתו שווה להפרש המשרעות של הגלים המתאבכים.

בנקודה **D** הפרש המרחקים ממקורות הגלים שווה לשני אורכי גל, ולכן נוצרת בה התאבכות בונה (אורכו של כל חץ אדום שווה ל- λ).
בנקודה **E** הפרש המרחקים ממקורות הגלים שווה לשבעה חצאים של אורך גל, ולכן נוצרת בה התאבכות הורסת (אורכו של החץ הכחול הוא $\lambda/2$).

האם ניתן לדעת מהי תדירותם של הגלים? כמובן! תדירותו של גל זהה תמיד לתדירות התנוודות של המקור שלו. במקרה שלנו מתנוודים שני המקורות S_1 ו- S_2 בתדירות f , ולכן זוהי גם תדירותם של הגלים המופקים מהם.

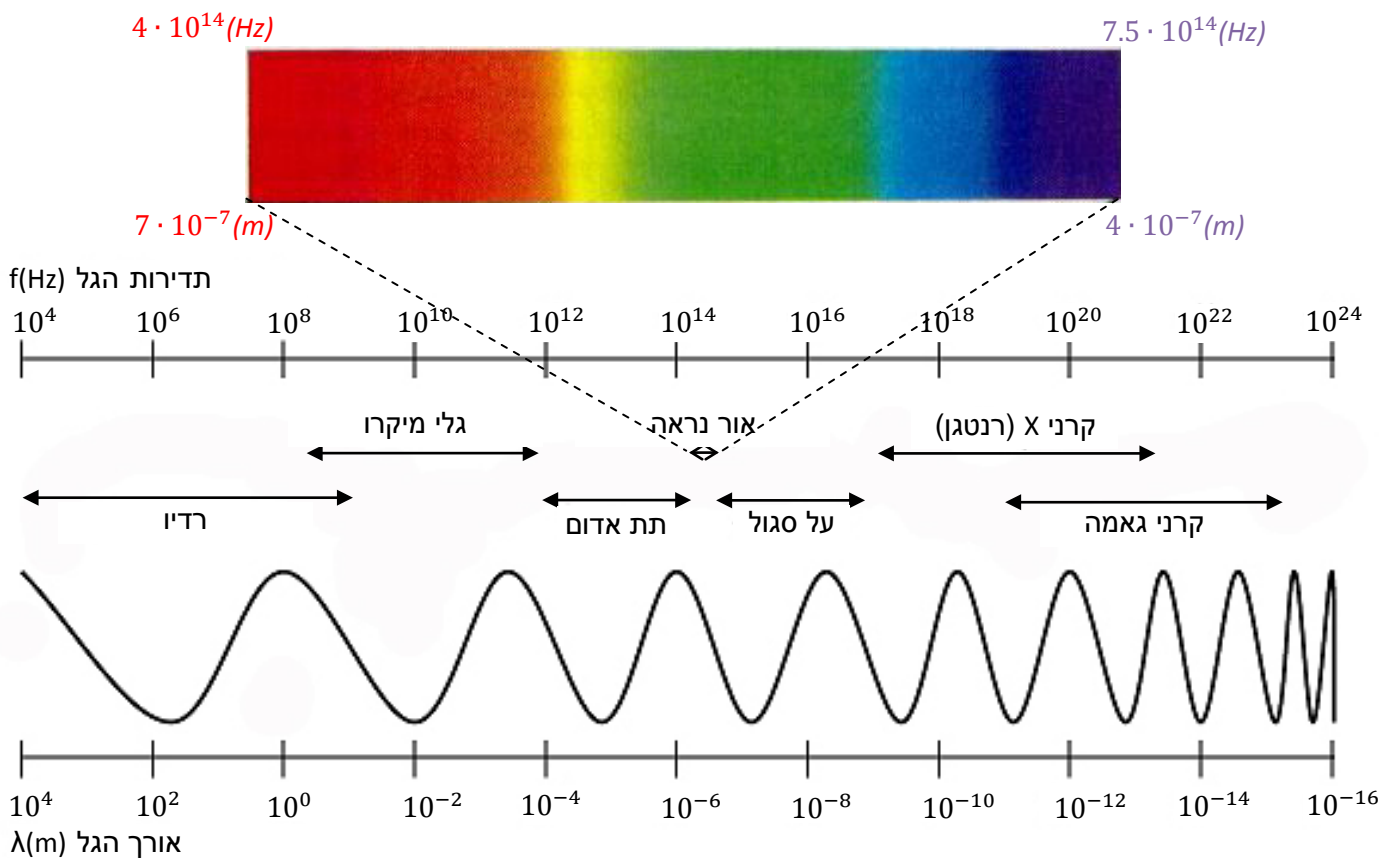
מהו זמן המחזור של הגלים? $T = 1/f$

מהי המהירות בה מתפשטים הגלים? $v = \lambda \cdot f = \frac{d}{5} f$



בניגוד לגלים מכאניים שבהם עסקנו קודם, גל אלקטרומגנטי איננו זקוק לתווך בכדי להתקדם במרחב. הוא נע במהירות האור ($3 \cdot 10^8 m/s$) ומורכב משדה חשמלי ושדה מגנטי המתנדודים במאונך לכיוון ההתקדמות שלו ובמאונך זה לזה. הגל האלקטרומגנטי הוא גל רוחב אם כן. גלים אלקטרומגנטיים משמשים אמצעי לשידורי רדיו וטלוויזיה, לתקשורת בין מכשירי קשר, כאמצעי הסריקה של רדאר, כאמצעי החימום של תנור מיקרוגל ועוד כהנה וכהנה, אך בראש וראשונה כאמצעי להעברת תמונת העולם שסביבנו אל עינינו. אור הוא שם נרדף לגל אלקטרומגנטי. אם אורך הגל שלו נמצא בתחום $400nm-700nm$ והוא פוגע בעינינו, היא מגיבה לכך בשליחת רצף של פולסים חשמליים אל מוחנו אשר מתרגמם לתמונה.

התרשים הבא מציג את הספקטרום (קשת אורכי הגל / התדירויות) האלקטרומגנטי. קשת הצבעים של התחום הנראה מוצגת בהגדלה, ואנו רואים שהגל הסגול קצר מהגל האדום, ז"א תדירותו גבוהה יותר. גלי הגאמה הם הקצרים יותר בספקטרום. את הערכים הרשומים מעל סקאלת התדירות יש לכפול ב-3 לשם הדיוק, והם רשומים ללא המקדם 3 מטעמי נוחות.



כיצד נוצר גל אלקטרומגנטי?

גל אלקטרומגנטי נוצר ממטען חשמלי בתאוצה. באנטנת השידור למשל, מואצים אלקטרונים הלוך ושוב ומייצרים גל אלקטרומגנטי המתפשט במרחב ומגיע אל אנטנת מכשיר הרדיו שבביתנו. האור שעינינו רואות, מקורו באלקטרונים המתנדודים באטומים (של השמש למשל, או של המנורה).

אנרגיה של גל

בתחילת הדיון הוגדר הגל כהפרעה המתקדמת במרחב, מבלי לציין את מה שאולי מובן מאליו: שהוא נושא עימו אנרגיה. אנרגיה זו עומדת ביחס ישר לריבוע משרעתו, וביחס ישר לתדירותו. ניתן לכן להשתמש בגלים, מכאניים או אלקטרומגנטיים, כדי להעביר אנרגיה ממקום למקום במרחב. כשאנו מנדנדים חבל בקצהו, הגל שמתקדם לאורכו נושא את האנרגיה שהשקענו בנדנוד החבל אל קצהו השני. גלי הים נושאים אל עבר החוף את האנרגיה שהשקיעה הרוח בייצורם. הגל האלקטרומגנטי נושא דרך המרחב את האנרגיה שהושקעה בייצורו, חלקה מגיע אל עינינו או אל אנטנת מקלט הרדיו שלנו.