

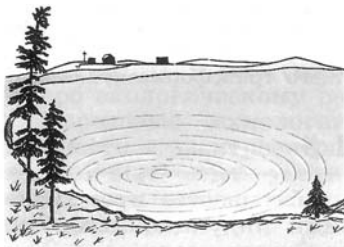
פרק 6. גלים מכניים

בפרק זה נלמד על תכונות גלים מכניים, כולל גלי קול.

§42 תופעות הגלים

כל אחד מאתנו צפה כיצד מתפזרות טבעות של גלים בעקבות זריקת אבן על פני מים שוקטים (ציור 103); כולנו מכירים את גלי הים הנעים אל החוף; כולנו קראנו סיפורים על מסעות בים ועל הכוח האדיר של גלי הים, המטלטלים בקלות אוניות ענק כקליפות אגוז; אולם כשצופים בתופעות אלה לא קל להקיש שתקתוק של שעון מגיע לאוזנינו באמצעות גלים המתפשטים באוויר, ושהאור, שהודות לו אנו רואים הכול, גם הוא תנועה גלית. תופעות של גלים נפוצות ביותר בטבע, והסיבות הפיזיקליות הגורמות להופעתם מגוונות מאוד. אולם בדומה לתנודות, כל סוגי הגלים מתוארים כמותית על-ידי חוקים זהים או דומים. שאלות רבות וקשות להבנה מתבהרות, אם נשווה תופעות גליות בתחומי הפיזיקה השונים.

מהו גל? מדוע נוצרים גלים?



ציור 103

חלקיקים בודדים של כל גוף – מוצק, נוזלי או גז – משפיעים זה על זה: אם חלקיק כלשהו מתחיל לבצע תנודה, מתפשטת תנועה זו לכל הכיוונים הודות להשפעה הדדית בין החלקיקים. גל הוא תנודה, המתפשטת במרחב במהלך הזמן.

באוויר, במוצק ובנוזל נוצרים גלים מכניים הודות לכוחות אלסטיים, היוצרים קשרים בין חלקי גוף שונים. בתהליך יצירת גלים על פני המים משתתפים כוחות כבידה וכוחות מתיחות פני המים.

בתכונות העיקריות של תנועה גלית ניתן להבחין בדוגמת הגלים שעל פני המים. הגלים מהווים נחשולים מעוגלים מתפשטים, והמרחקים בין הקמרים של הנחשולים שווים. אולם אם נניח על פני המים חפץ קל – לדוגמה, קופסת גפרורים – הוא לא ייגרר על-ידי הגל, אלא יבצע תנודות מעלה-מטה בלא לזוז ממקומו כמעט.

כאשר הגל מתפשט, מתרחשת העתקת מצבה של נקודת תווך מתנוודת – ולא

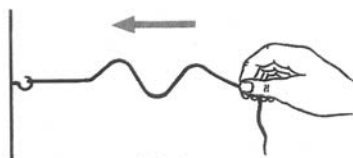
תופעת הגלים

מעבר של חומר. תנודות המים שנוצרו מועברות לאזורים סמוכים, מתפשטות באטיות לכל הכיוונים וגוררות עמן מטה ומעלה חלקיקי תווך חדשים. לא מתרחשת זרימת מים, אלא תנועה של צורת פני השטח בלבד.

מהירות הגל

האפיון החשוב ביותר של הגל הוא מהירות התפשטותו, כלומר – מהירות התפשטותו במרחב לכל הכיוונים. מהירות התפשטותם של גלים, מכל סוג שהוא, היא סופית. גלים על פני המים נוחים לצפייה, משום שמהירותם התפשטותם אינה גבוהה.

גלי רוחב וגלי אורך

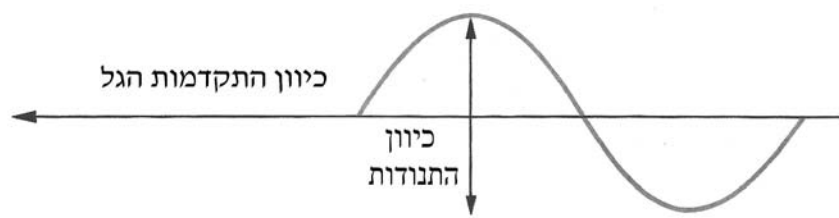


ציור 104

קל ונוח לצפות בגלים המתפשטים לאורך חבל גמיש. אם נקשור את קצהו האחד של החבל, נמתח אותו מעט וננדנד את קצהו האחר, יתפשט גל לאורך החבל (ציור 104). מהירות התפשטות הגל תהיה גדולה יותר אם החבל יהיה מתוח יותר.

הגל יגיע לקצה הקשור וייסוג לאחור. במהלך התפשטות הגל מתרחש שינוי בצורת החבל, אולם כל נקודת חבל מתנוודת סביב מצב שיווי-משקלה הקבוע. שימו לב: במהלך התפשטות הגל לאורך החבל מתנוודת כל נקודת חבל בכיוון המאונך לכיוון התפשטות הגל (ציור 105). גלים מסוג זה מכונים גלי רוחב.

אולם לא כל גל הוא גל רוחב. תנודות עשויות להתרחש גם לאורך כיוון התפשטות הגל (ציור 106). במקרה זה מכונה הגל גל אורך.



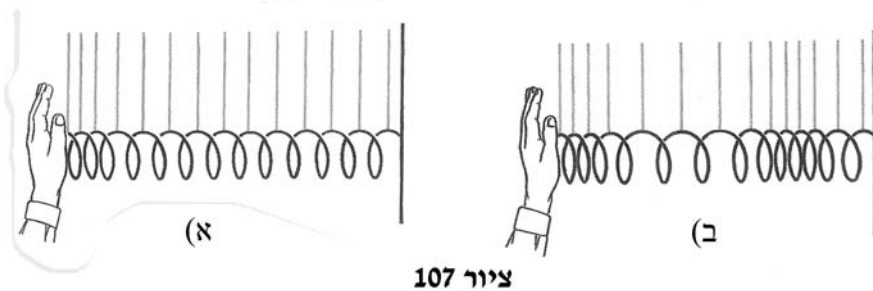
ציור 105



ציור 106



קל לראות את גל האורך המתפשט בקפיץ רך וארוך שקוטרו גדול. אם ניתן מכה קלה בכף היד על קצהו האחד של הקפיץ (ציור 107א), ניתן יהיה לראות כיצד הצטופפות הסליל (זעזוע אלסטי) מתפשט לאורך הקפיץ.



באמצעות סדרת מכות עוקבות ניתן לעורר בקפיץ את הגל, המהווה אזורי הצטופפות והידלדלות עוקבים של סלילי הקפיץ, המתקדמים זה אחר זה (ציור 107 ב). תנודות סלילי הקפיץ מתרחשות בכיוון התפשטות הגל.

אנרגיית הגל

במהלך התפשטות הגל המכני מועברת תנועה מחלק אחד של הגוף לאחר. מעבר התנועה קשור במעבר אנרגיה. התכונה הבסיסית של כל הגלים, ללא קשר לסוג הגל, היא **מעבר אנרגיה ללא מעבר חומר**. האנרגיה מופקת מהמקור, המעורר את תנודות קצה החבל, הקפיץ, המיתר וכדומה, ומועברת באמצעות הגל: דרך כל חתך של התווך זורמת אנרגיה באופן רציף. אנרגיה זו מורכבת מאנרגיה קינטית של חלקיקי החבל ומאנרגיה פוטנציאלית של עיוות אלסטי. הקטנה הדרגתית של משרעת התנודות במהלך התפשטות הגל נגרמת בשל התמרת חלק מהאנרגיה המכנית לאנרגיה פנימית.

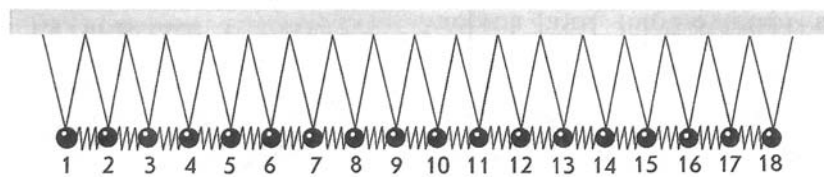
גל הוא תנודות המתפשטות במרחב במהלך הזמן. מהירות הגל סופית. הגל מעביר אנרגיה ואינו מעביר את חומר התווך.

נכיר את תהליך התפשטות הגל. נעקוב אחר תנועה של חלקיקי חומר בודדים במהלך התנועה הגלית.

נדון בגל רוחבי, המתפשט לאורכו של חבל גומי.

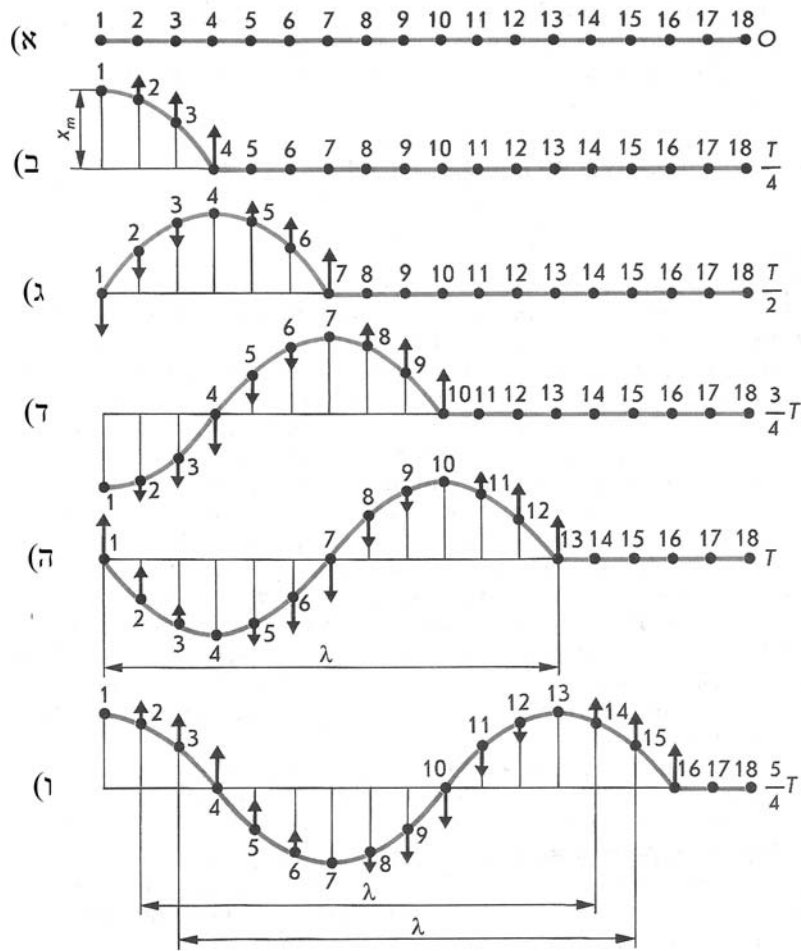
כל קטע של החבל בעל מסה ואלסטי. במהלך העיוות של החבל מופיעים בכל חתך כוחות אלסטיים, המנסים להחזיר את החבל למצבו ההתחלתי. הודות לתכונת ההתמד אין קטע החבל המתנוודד עוצר במצב שיווי-המשקל, אלא עובר אותו וממשיך לנוע, עד אשר הכוחות האלסטיים עוצרים בעדו במצב ההתרחקות המרבית ממצב שיווי-המשקל.

נתבונן בשרשרת כדורי מתכת זהים, התלויים בקצה חוטים והקשורים ביניהם באמצעות קפיצים (ציור 108). מסות הקפיצים קטנות בהרבה ממסות הכדורים. במודל זה מופרדות תכונות ההתמד של המסה ותכונת האלסטיות: המסה מרוכזת בכדורים, והאלסטיות – בקפיצים. הפרדה זו אינה משמעותית בחקירת התנועה הגלית.

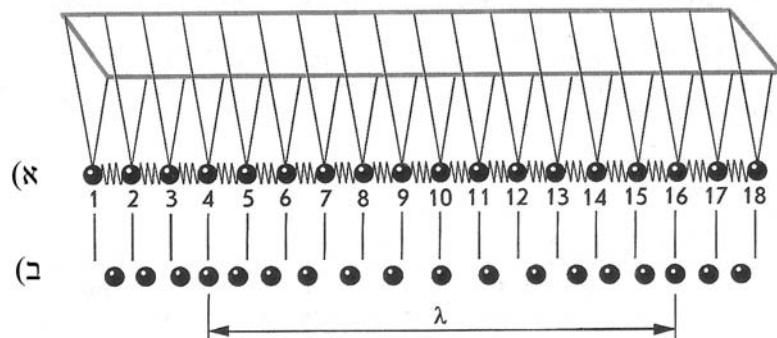


ציור 108

אם נטה את הכדור השמאלי הקיצוני במישור אופקי בניצב לשרשרת הכדורים, יתעוות הקפיץ, ועל כדור 2 יפעל כוח, המושך אותו לצד שבו נמצא כדור 1. תנועת כדור 2 תיעשה בעקבות תנועת כדור 1, אך הודות לתכונת ההתמד תתאחר בזמן. אם ננדנד את כדור 1 בזמן מחזור T , יתנוודד כדור 2 גם הוא בעקבות כדור 1 באותו משך זמן מחזור, אולם בפיגור מסוים במופע. כך יתחיל להתנוודד כדור 3 בהשפעת הכוח האלסטי המופיע עקב תנועת כדור 2, והפיגור במופע אחר כדור 1 יהיה גדול עוד יותר. לבסוף יבצעו כל הכדורים תנועות מאולצות באותה התדירות, אולם במופע שונה, וכך יתפשט לאורך השרשרת גל רוחבי.



ציור 109



ציור 110

התפשטות הגלים המכויים

בציורים 109א, ב, ג, ד, ה ו-ו מתואר תהליך התפשטות הגל. מתוארים בהם במבט-על מיקומי הכדורים ברגעי זמן עוקבים במרווחים של רבע זמן מחזור התנודות. החצים ליד הכדורים מתארים את וקטורי המהירות ברגע המתאים.

באמצעות מודל זה של שרשרת כדורים כבדים, הקשורים בקפיצים (ראו ציור 110א), ניתן ללמוד על תהליך ההתפשטות של גל אורך. הכדורים תלויים כך, שהם יכולים להתנודד לאורך השרשרת בלבד. אם ננדנד את כדור 1 בזמן מחזור T, יתקדם לאורך השרשרת גל אורכי, המורכב מאזורים עוקבים של הצטופפות והידלדלות של כדורים (ציור 110ב). ציור זה תואם לציור 109ה במקרה של התפשטות גל רוחבי.

§44 אורך הגל, מהירות הגל

נעסוק במאפיינים הפיזיקליים של הגל: האורך והמהירות.

במהלך התפשטות הגל הרוחבי יגיעו התנודות לכדור 13, וכדורים 1 ו-13 יתנודדו באותו מופע: כאשר כדור 1 נמצא בנקודת שיווי-המשקל ונע שמאלה (ראו ציור 109ה), נמצא גם כדור 13 בנקודת שיווי-משקל וגם הוא נע שמאלה. לאחר רבע זמן מחזור נמצא כדור 1 מוטה שמאלה למצבו המרבי, ובמצב זהה נמצא גם כדור 13 (ראו ציור 109ו). תנודות כדורים אלה נמצאות במופע זהה.¹ המרחק בין הנקודות הקרובות ביותר המתנודדות במופע זהה מכונה **אורך הגל**. לכן המרחקים בין הכדורים 1 ו-13, 2 ו-14, 3 ו-15 שווים לאורך הגל (ראו ציורים 109ה, ו). את אורך הגל מסמנים באות היוונית λ (למדא). בהתאם לציור 110ב שווה אורך גל אורכי למרחק בין הכדורים 2 ו-14 או בין הכדורים 4 ו-16.

כאשר הגל מתפשט, מתנודדות נקודות שונות של הגוף (כדורים שונים במודל הגל) במופע שונה, אם המרחק ביניהן אינו שווה ל- λ (n הוא מספר שלם).

¹ ליתר דיוק: תנודות כדור 13 מפגרות אחר תנודות של כדור 1 במופע של 2π ; אולם מכיוון ש- $\cos(\omega t - 2\pi) = \cos \omega t$, אין הפרש מופעים זה גורם להבדל במצב הכדורים המתנודדים, וניתן לומר שתנודות הכדורים מתרחשות במופע זהה.

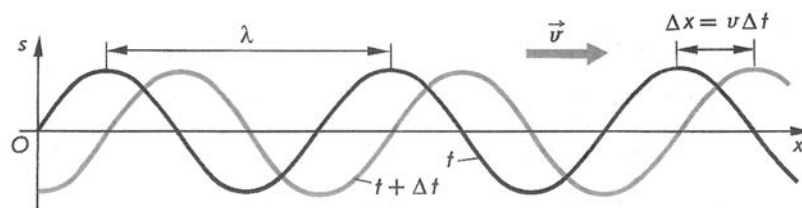
הכדורים 1 ו-7 (ראו ציור 109), הנמצאים במרחק $\lambda/2$ זה מזה, מתנוודדים במופע נגדי: כאשר כדור 1 נע שמאלה, כדור 7 נע ימינה, ולהפך.

בזמן מחזור אחד מתפשט הגל למרחק λ (ראו ציור 109), לכן מוגדרת מהירותו על-ידי הנוסחה:

$$(6.1) \quad v = \frac{\lambda}{T}$$

מכיוון שזמן המחזור T והתדירות קשורים ביחס:

$$T = \frac{1}{f}$$



ציור 111

אזי:

$$(6.2) \quad v = \lambda f$$

מהירות התפשטות הגל שווה למכפלת אורך הגל בתדירות התנוודות.

כאשר גל מתפשט בחבל, אנו נתקלים במחזוריות משני סוגים:

הראשונה: כל חלקיק בחבל מבצע תנוודות מחזוריות בזמן. אם התנוודות הרמוניות (כלומר מתרחשות לפי חוק פונקציית סינוס או פונקציית קוסינוס), התדירות ומשרעת התנוודות קבועות לאורך כל הנקודות בחבל, והתנוודות נבדלות במופע בלבד.

השנייה: בכל רגע נתון חוזרת צורת הגל על עצמה לאורך החבל במרחקים, שהם כפולות שלמות של אורך הגל λ . בציור 111 מתוארת צורת הגל ברגע מסוים (הקו השחור). במהלך הזמן נעה התמונה הזו במהירות v משמאל לימין.

כעבור פרק זמן Δt תהיה לגל הצורה המתוארת באותו ציור בקו אפור.

התפשטות הגלים המכויים

גם לגבי גל אורך מתקיימת הנוסחה (6.2), הקושרת את מהירות התפשטות הגל לאורך הגל ולתדירות התנודות.

כל הגלים מתפשטים במהירות סופית. אורך הגל תלוי במהירות התפשטות הגל ובתדירות התנודות.

?

1. מהו גל?
2. מה השוני בין גלי רוחב לבין גלי אורך? הביאו דוגמאות לשני סוגי הגלים.
3. מהן התכונות העיקריות של תנועה גלית?
4. מהו אורך הגל?
5. כיצד קשורה מהירות התפשטות הגל לאורך הגל?
6. לפי ציור 109 מצאו את הפרש המופעים בין התנודות של שני כדורים סמוכים; ושל שני כדורים, הנמצאים במרחק השווה לאורך הגל.

§45 משוואת גל מתפשט

נמצא משוואה, המתארת את תהליך התנודות בכל נקודה במרחב במהלך התפשטות הגל ההרמוני.¹

נסתכל על גל, המתפשט בחבל גומי ארוך ודק. את הציר Ox נכוון לאורך החבל, ואת ראשית הציר נמקם בקצהו השמאלי. את התזוזה של כל נקודה בחבל ממצב שיווי-משקלה נסמן באות s . כדי לתאר את התהליך הגלי, יש לדעת את התזוזה של כל נקודה של החבל בכל רגע של זמן. לשם כך יש לדעת את צורת הפונקציה:

$$s = s(x, t)$$

נאלץ את קצה החבל (בנקודה $x = 0$) לבצע תנודות הרמוניות בתדירות ω . אם המופע ההתחלתי שווה לאפס, יתרחשו התנודות של נקודה זו לפי החוק:

$$s = s_m \sin \omega t \quad (6.3)$$

¹ תנודות הגל ההרמוני מתרחשות בכל נקודה לפי החוק ההרמוני ובמשרעת זהה.

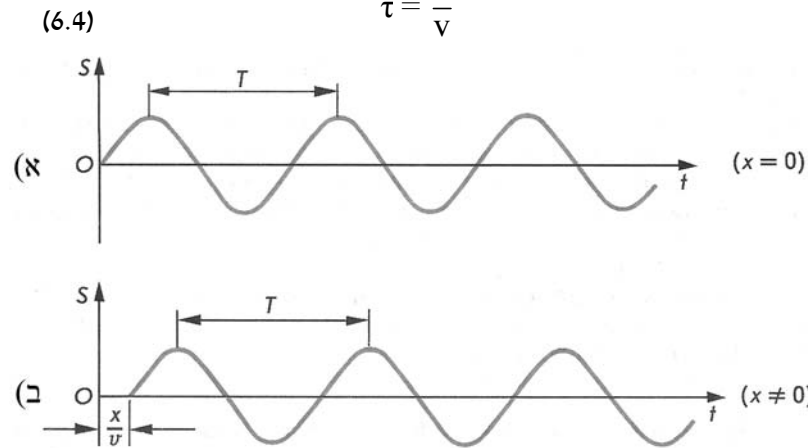
התפשטות הגלים המכויים

כאן s_m היא משרעת התנודות (ציור 112א).

התנודות מתפשטות לאורך החבל (ציר Ox) במהירות v , והן תגענה לנקודה

כלשהי של החבל x כעבור זמן:

$$\tau = \frac{x}{v}$$



ציור 112

נקודה זו תתחיל לבצע תנודות הרמוניות בתדירות ω , אולם לאחר זמן τ (ציור

112ב). אם נזיח את דעיכת הגל במהלך התפשטותו, תתרחשנה התנודות בנקודה x

עם אותה משרעת s_m , אולם במופע שונה:

$$(6.5) \quad s = s_m \sin [\omega(t - \tau)] = s_m \sin \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \right]$$

זוהי המשוואה של גל, המתפשט בכיוון חיובי של ציר Ox.

§46 גלים בתווך

בחבל גומי, במיתר או במוט עשויים הגלים להתפשט בכיוון אחד בלבד – לאורך הציר; ואילו בגז, בנוזל או בגוף מוצק, הממלאים אזור מסוים של המרחב (התווך), מתפשטות התנודות, שהופיעו במקום אחד, לכל הכיוונים.

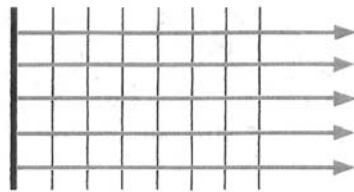
גל המתפשט ממקור כלשהו בתווך תופס בהדרגה אזורים חדשים של המרחב. נבחין בזאת בציור 103, בו מתוארים גלים מעגליים, שנוצרו מהטלת אבן למים, המתפשטים על פני המים. במרוצת הזמן נפרסת האנרגיה שנושאים הגלים לשטח הולך וגדל. לכן האנרגיה, העוברת דרך יחידת שטח בשנייה אחת, פוחתת עם

התפשטות הגלים המכויים

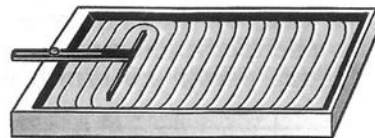
ההתרחקות מהמקור, וכן הולכת וקטנה גם משרעת התנודות, שהרי האנרגיה של גוף מתנודד פרופורציונית לריבוע המשרעת. הדבר נכון לא רק לגבי תנודות של משקולת על קפיץ או למטוטלת, אלא לגבי כל חלקיק מתנודד בתווך. ובכן, משרעת הגל בתווך הולכת וקטנה עם מידת ההתרחקות של הגל מהמקור – גם אם האנרגיה המכנית אינה מותמרת לאנרגיה פנימית עקב כוחות ההתנגדות המולקולריים הפועלים בתווך.

גל מישורי, חזית הגל וקטור הגל

שונה מגל, המתפשט במים עקב הטלת אבן, הוא הגל המישורי. ניתן ליצור גל כזה, אם נטבול בתווך אלסטי לוח מוארך, ונאלץ אותו להתנודד בכיוון האנך לאורכו. כל נקודות התווך הקרובות ללוח יבצעו תנודות במשרעת שווה ומופע זהה. תנודות אלה יתפשטו כגלים בכיוון האנך ללוח, וכל נקודות התווך, הנמצאות במישור המקביל ללוח, תהיינה באותו מופע. המשטחים בעלי המופע הזה מכונים **חזית הגל**. במקרה של גל מישורי חזיתות הגל מישוריות (ציור 113). גל יחשב מישורי רק בריחוק מקצות הלוח (ליד קצות הלוח חזיתות הגל מתעקמות).



ציור 113



ציור 114

הקו המאונך לחזית הגל מכונה **וקטור הגל**. כאשר דנים בכיוון התפשטות הגל, מתכוונים לכיוון וקטור הגל. וקטורי הגל של גלים מישוריים הם ישרים מקבילים, ולאורכם מתרחש מעבר האנרגיה.

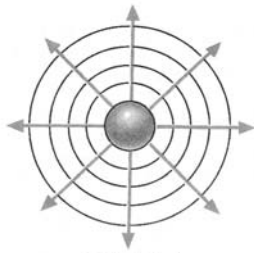
במהלך התפשטות גל מישורי אין אורך חזיתות הגל משתנה עם ההתרחקות מהלוח (או כמעט שאינו משתנה), לכן אין האנרגיה של הגל מתפזרת במרחב, ומשרעת התנודות הולכת וקטנה עקב פעולת כוחות החיכוך בלבד.

על פני המים קל ליצור גלים, הממחישים את מושג הגלים המישוריים במרחב. כדי לעשות זאת יש לנדנד מוט, הנוגע במים בכיוון המאונך לפני המים. כל חלקיקי המים, הנמצאים על הקו המקביל למוט, יתנוודו באותו מופע (ציור 114).



גל כדורי

דוגמה אחרת של גל בתווך היא **גל כדורי**. הוא נוצר כאשר מכניסים לתוך התווך כדור פועם (ציור 115). במקרה זה תהייה חזיתות הגל כדוריות, ווקטורי הגל מרחביים ומכוונים לאורך הרדיוסים של הכדור הפועם.



ציור 115

משרעת תנודות החלקיקים בגל כדורי הולכת וקטנה ככל שמתרחקים מהמקור. האנרגיה הנפלטת על-ידי המקור מתפזרת באופן אחיד על פני השטח של הגל הכדורי, שרדיוסו גדל בהתמדה עם התפשטות הגל.

גל רוחבי וגל אורכי בתווך

כפי שכבר ידוע לכם, עשוי הגל להיות רוחבי או אורכי. בגל רוחבי מתרחשות תנועות חלקיקי התווך בכיוון המאונך לכיוון התפשטות הגל. לתהליך זה מתלווה היווצרות עיוות אלסטי, המכונה **עיוות הזזה**: שכבות של חומר זזות זו יחסית לזו. כאשר מתרחש עיוות הזזה בגוף מוצק, נוצרים כוחות אלסטיים, המנסים להחזיר את הגוף למצבו המקורי. כוחות אלה גורמים לתנודות חלקיקי התווך. הזזה יחסית של שכבות בגזים ובנוזלים אינה גורמת להיווצרות כוחות אלסטיים, ולכן אין מתקיימים גלים רוחביים בגזים ובנוזלים. גלים רוחביים קיימים במוצקים בלבד.¹

בגל אורכי נוצר עיוות לחץ. כוחות אלסטיים, הקשורים בעיוות זה, נוצרים הן במוצקים הן בנוזלים ובגזים. כוחות אלה גורמים לתנודות של אזורים בודדים של התווך, ולכן עשויים גלים אורכיים להתפשט בכל סוגי תווך. בגופים מוצקים גדולה יותר מהירות הגלים האורכיים ממהירות הגלים הרוחביים. מביאים זאת בחשבון כאשר מודדים את המרחק מתחנה סייסמולוגית למוקד רעידת אדמה: הגל האורכי נקלט ראשון בתחנה, מכיוון שמהירותו בקרום כדור הארץ גדולה מזו של הגל הרוחבי. כעבור זמן-מה מגיע הגל הרוחבי, שנוצר ברגע היווצרות הגל האורכי.

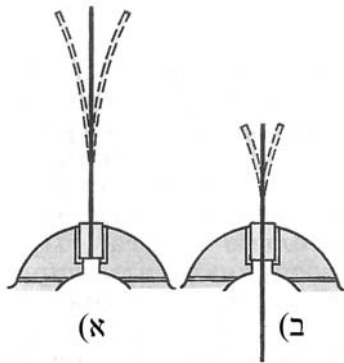
אם ידועות מהירויות ההתפשטות של גל אורכי ושל גל רוחבי בקרום כדור הארץ, ניתן למצוא את המרחק למוקד רעידת האדמה.

¹ גלים רוחביים נוצרים גם על פני נוזל, אולם לא בתוכו.

את הגלים על פני המים או בחבל גומי אפשר לראות. בתווך שקוף – כאוויר או נוזל – הגלים בלתי נראים, אולם בתנאים מסוימים אפשר לשמוע אותם.

יצירת גלי קול

אם נחזיק סרגל ברזל ארוך במלחציים או נצמידו בחוזקה אל קצה השולחן ונכופף את קצהו, אפשר לגרום לו להתנדוד (ציור 116א). תנודות אלה לא ייקלטו על-ידי האוזן; אבל אם נקצר את הקצה הבולט של הסרגל (ציור 116ב), נכופף ונשחרר – נשמע את הקול.



ציור 116

הסרגל דוחס את שכבת האוויר הצמודה אליו מצד אחד, ובזמן זמנית יוצר מצב של תת-לחץ מהצד האחר. אזורי לחץ היתר ואזורי תת-לחץ אלה מתחלפים בזמן ומתפשטים משני צדי הסרגל כגל אלסטי רוחבי. הגל מגיע לאוזננו וגורם להיווצרות תנודות לחץ בקרבתה, וזה הבסיס לתחושת השמע של מנגנון השמיעה.

האוזן קולטת תחושת קול מתנודות שתדירותן

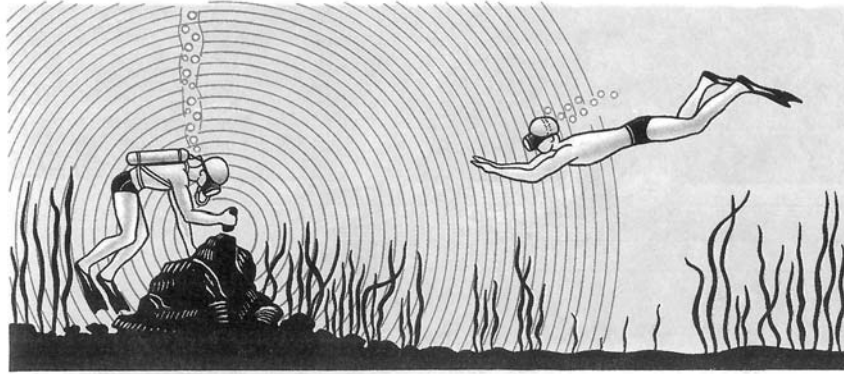
בין 17 ל-20,000 הרץ. תנודות אלה מכונות **תנודות קול** או **תנודות אקוסטיות**. **אקוסטיקה** היא מדע הקול. ככל שקצהו הבולט של הסרגל קצר יותר, כך גבוהה יותר תדירות תנודותיו. לכן אנו מתחילים לשמוע קול כאשר קצה הסרגל קצר מספיק.

כל גוף – מוצק, נוזלי או גז – המתנדוד בתדר אקוסטי, יוצר בתווך שמסביבו גל קול.

גלי קול בסוגי תווך שונים

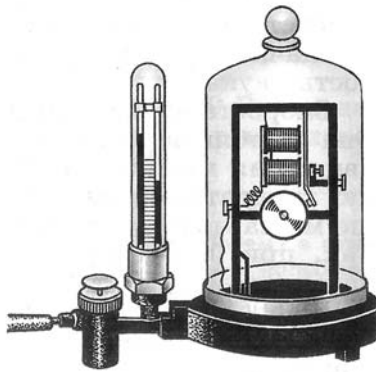
ברוב המקרים מגיעים גלי הקול לאוזננו באמצעות האוויר, אבל אין לאוויר יתרון על פני תווך אחר מבחינת יכולתו של גל קול להתפשט בו, והקול מתפשט גם בנוזל ובגופים מוצקים. במהלך צלילה אפשר לשמוע קול הנוצר בתוך המים ממרחק רב (ציור 117).

הקרקה מוליכת קול טובה. האגדות על אודות קרבות היסטוריים מעידות על מודיעין שהושג באוזן הצמודה לקרקע, וכך מגלה את שעטות פרסות סוסי האויב ממרחקים, בטרם נראו פרשיו בקו האופק.



ציור 117

אם נצמיד לאוזן את קצהו של סרגל עץ ארוך ונקיש בקצהו השני, יישמע קול הנקישה היטב. אם נרחיק מעט את הסרגל מהאוזן, נגלה שהקול נשמע חלש יותר.



ציור 118

גלי קול אינם יכולים להתפשט בריק. כדי להוכיח זאת נציב פעמון חשמלי בתוך מכל המחובר למשאבת אוויר (ציור 118). במהלך ירידת לחץ האוויר בתוך המכל נחלש קול הפעמון עד שנפסק כליל.

חומרים כגון קלקר, צמר-גפן ושעם אינם מעבירים היטב את הקול. לכן משתמשים בחומרים אלה כדי ליצור בידוד אקוסטי בבתיים נגד רעש ממקור חיצוני.

חשיבות הקול

כדי שנוכל להתמצא בבטחה בעולמנו, צריך המוח לקבל מידע על המתרחש מסביב. לחושי הראייה והשמיעה תפקיד מרכזי במשימה זו. חושי המישוש, הריח והטעם משמעותיים פחות לעניין זה.

את רוב המידע מקבלים אנו באמצעות האור. האור הנפלט ממקור אור –

גלי קול

השמש, נורה וכדומה – מוחזר מהגופים שסביבנו ויוצר בעין את דמויותיהם; וכך ניתן להסיק על מקומם ועל תנועתם.

גלי הקול המוחזרים מגופים, או גלי הקול הנפלטים מהגופים עצמם, מספקים לנו מידע על העולם מסביבנו. בדיבורינו אנו מייצרים גלי קול, קולטים אותם באוזנינו, וכך מתקשרים בינינו.

באמצעות שמיעת הקולות המופקים מאיברי הגוף הפנימיים ניתן להעריך את תקינות עבודת הריאות ופעילות הלב.

מהירות התפשטות הקול

בדומה לכל הגלים האחרים מתפשטים גלי הקול במהירות סופית. אפשר לגלות זאת באמצעות כמה דוגמאות: אור מתפשט במהירות עצומה – 300,000 קילומטרים לשנייה – ולכן הבזק אור מירי מגיע לעינינו כמעט מיד לאחר הירי. לעומתו, מגיע לאוזנינו קול הירי באיחור. תופעה דומה מתגלה לצופה במשחק כדורגל באצטדיון: הוא רואה בעיטה בכדור, ורק כעבור זמן-מה שומע אותה. כולכם שמתם לב לברק המופיע לפני שנשמע הרעם. אם אזור הסערה רחוק, עשוי איחור הרעם להגיע לעשרות שניות. לגל הקול מצטרף הד, המהווה גל קול המוחזר מעצמים רחוקים כמו בניין, יער, צוק תלול וכו'.

מהירות הקול באוויר בטמפרטורה 0°C היא 331 מ"ש. זאת מהירות די גבוהה, ורק בעת האחרונה החלו מטוסים לטוס במהירויות העולות על מהירות הקול.

מהירות הקול באוויר אינה תלויה בצפיפות האוויר. היא שווה בערך למהירות הממוצעת של התנועה התרמית של המולקולות, ובדומה לה פרופורציונית המהירות לשורש הטמפרטורה המוחלטת. ככל שמת מולקולות הגז גדולה יותר, כן קטנה יותר מהירות הקול בגז זה. כך בטמפרטורה של 0°C מהירות הקול במימן היא 1,270 מ"ש, ובפחמן דו-חמצני היא שווה ל- 258 מ"ש.

מהירות הקול במים גבוהה יותר מאשר באוויר. לראשונה היא נמדדה בשנת 1827 באגם זינווה שבשווייץ. בסירה אחת הציתו אבק שריפה, ובו-זמנית הקישו בפעמון תת-ימי (ציור 119א). הסירה השנייה היתה במרחק 14 ק"מ מהראשונה.

הקול נקלט באמצעות משפך אפרכסת הטבול בתוך המים (ציור 119ב). על-פי



הפרש הזמן בין הבזק האור לבין הגעת הקול מצאו את מהירות הקול. בטמפרטורה של 8°C מהירות הקול במים שווה ל- $1,435$ מ"ש'.

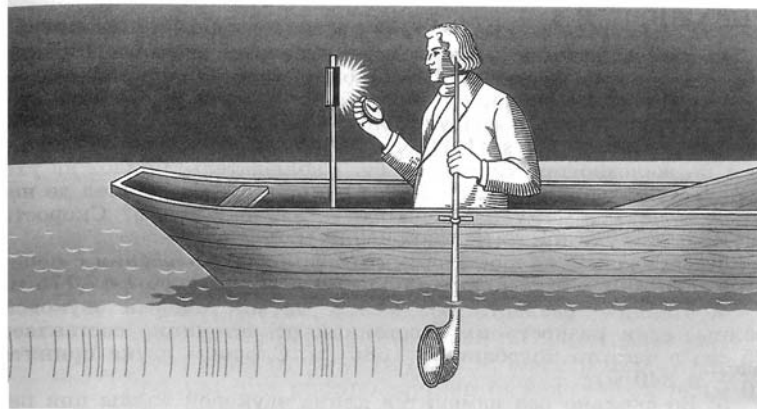
מהירות הקול במוצקים גבוהה יותר מאשר בנוזלים ובאוויר. לדוגמה: בתוך פלדה בטמפרטורה 15°C מהירות הקול שווה ל- $4,980$ מ"ש'. עובדה זו ניתן לגלות כך: אם חבר שלכם יקיש בקצה מסילת ברזל ואתם תצמידו אוזן לקצה האחר, תשמעו שני קולות: קודם יגיע הקול לאוזניכם באמצעות המסילה, ורק אחר-כך באמצעות האוויר.

לפי תדירות התנודות ומהירות הקול באוויר ניתן לחשב את אורך הגל (ראו סעיף 44). הגלים הארוכים ביותר הנקלטים באוזן הם בעלי אורך גל של $\lambda \approx 19$ m, והקצרים ביותר – בעלי אורך גל של $\lambda \approx 17$ mm.

תנודות בתדירות אקוסטית ($17 - 20,000$ Hz) יוצרות בתוך שמסביבן גל קול, שמהירות התפשטותו תלויה בתכונות התווך ובטמפרטורה שלו.

?

1. איזה גל מכונה מישורי? כדורי?
2. מדוע לא קיימים גלים רוחביים בגזים ובנוזלים?
3. אילו תנודות מכונות אקוסטיות?

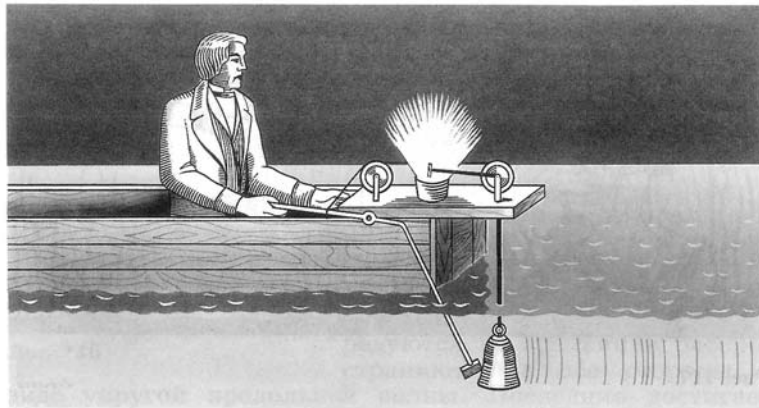


ציור 119 ב'

גלי קול

מקבץ תרגילים 6

1. ההד מירי רובה הגיע ליורה כעבור 4 שניות לאחר הירי. באיזה מרחק מהצופה נמצא המחסום שממנו הוחזר הקול? מהירות הקול באוויר: 330 מ"ש'.
2. במרחק $s = 1,060 \text{ m}$ מכים בפטיש במסילת רכבת. הצופה שומע את הקול באוזן הצמודה למסילה $\tau = 3 \text{ sec}$ לפני שהגיע אליו באוויר. מהי מהירות הקול בברזל? מהירות הקול באוויר: 330 מ"ש'.
3. מצאו את מהירות הקול במים, אם תנודות בעלות זמן מחזור $T = 0.005 \text{ sec}$ גורמות לגל קול בעל אורך גל של $\lambda = 7.175 \text{ m}$.
4. מצאו את הפרש המופעים בין שתי נקודות של גל קול, אם הפרש המרחקים מהמקור לכל אחת מהן הוא 25 ס"מ, ותדירות התנודות היא $\nu = 680 \text{ Hz}$.
5. פי כמה ישתנה אורך גל של גל קול במעברו מאוויר למים? מהירות הקול במים: 1,435 מ"ש', ובאוויר – 340 מ"ש'.



ציור 119 א'

גלי קול

תקציר פרק 6

1. גל הוא תנודה המתפשטת במרחב במהלך הזמן. הגל נושא אנרגיה, אולם אינו מעביר את חומר התווך.
2. נבדיל בין גלים רוחביים לבין גלים אורכיים: בגל רוחבי מתרחשות התנודות במאונך לכיוון התפשטות הגל, ובגל האורכי – לאורך כיוון זה.
3. המרחק בין נקודות הגל הקרובות ביותר, שבהן מתרחשות התנודות במופע זהה, מכונה אורך הגל.
4. כל הגלים מתפשטים במהירות סופית. אורך הגל תלוי במהירות הגל ובתדירות התנודות: $\lambda = \frac{v}{\nu}$.
5. גלים אורכיים בתווך בעלי תדירות תנודות מ-17 עד 20,000 הרץ מכונים גלי קול או גלים אקוסטיים. מהירות גלי הקול תלויה בתכונות התווך ובטמפרטורה שלו. בהמשך נכיר את התכונות החשובות ביותר של גלים מכל סוג שהוא: התאבכות ועקיפה.

פרק 7. גלים אלקטרומגנטיים

הכרנו גלים מכניים. הגלים המכניים מתפשטים בחומר: בגז, בנוזל ובגוף מוצק. קיים סוג גלים נוסף, שאינו זקוק לחומר כלשהו כדי להתפשט; אלה הם הגלים האלקטרומגנטיים. להם שייכים, בין היתר, גלי הרדיו וגל האור. שדה אלקטרומגנטי יכול להתקיים בריק, כלומר במרחב שאינו מכיל אטומים. למרות ההבדל המשמעותי בין גלים אלקטרומגנטיים לגלים מכניים מתנהגים הגלים האלקטרומגנטיים בהתפשטותם בדומה לגלים המכניים.

§48 מהו גל אלקטרומגנטי?

גלים מכניים נוצרים הודות להשפעה הדדית בין חלקיקי החומר. נראה כיצד נוצרים גלים של שדה אלקטרומגנטי.

גלי קול

כיצד מתפשטות השפעות אלקטרומגנטיות

כמו חוקי הטבע הבסיסיים, כך גם חוקי האלקטרומגנטיות, שהתגלו על-ידי **מקסוול**, מופלאים הם מההיבט הבא: הם יכולים ללמד הרבה יותר ממה שניתן להקיש מהעובדות שמהן התקבלו.

בין שפע ההשלכות המעניינות והחשובות, הנובעות מחוקי השדה האלקטרומגנטי של **מקסוול**, מושכת אחת תשומת לב מיוחדת: המהירות הסופית של התפשטות ההשפעה האלקטרומגנטית.

בהתאם לתורת הפעולה מרחוק, משתנה כוח קולון מיד כשנזיז את המטען המשרה את השדה; הפעולה מתבצעת באופן מיידי. מנקודת מבטה של הפעולה מרחוק לא ייתכן אחרת: הרי המטען האחד "מרגיש" את נוכחות השני מבעד הריק.

בהתאם לתורת הפעולה מקרוב מתרחש הכול אחרת לגמרי ומורכב בהרבה: תזוזת המטען האחד משנה את השדה החשמלי בקרבתו, ושדה חשמלי משתנה זה יוצר שדה מגנטי משתנה באזורים סמוכים של המרחב. השדה המגנטי המשתנה יוצר שדה חשמלי משתנה, וחוזר חלילה.

באופן כזה יוצרת תזוזת המטען החשמלי "זעזוע" של שדה אלקטרומגנטי, והוא מתפשט ו"כובש" אזורים נוספים של המרחב מסביב, ובדרכו בונה מחדש את השדה החשמלי שהיה קיים עד לתזוזת המטען. לבסוף מגיע ה"זעזוע" למטען האחר ומפעיל עליו כוח; אולם זה לא יקרה ברגע תזוזת המטען הראשון: תהליך ההתפשטות של הזעזוע האלקטרומגנטי, שהתגלה על-ידי **מקסוול**, מתרחש במהירות סופית, אף אם גבוהה מאוד. זו התכונה הבסיסית של השדה האלקטרומגנטי, אשר אינה משאירה מקום לספק באשר לקיומו.

מקסוול הוכיח באופן מתמטי, שמהירות התפשטות זעזוע אלקטרומגנטי זה שווה למהירות התפשטות האור בריק.

הגל האלקטרומגנטי

תארו לעצמכם שהמטען החשמלי אינו זז מנקודה אחת לאחרת, אלא מבצע תנודות מהירות לאורך ישר כלשהו. המטען נע בדומה לגוף התלוי בקפיץ, אך התנודות מתרחשות בתדירות גבוהה בהרבה. במקרה זה יתחיל להשתנות באופן מחזורי השדה החשמלי בקרבתו של המטען, וזמן מחזור השינויים יהיה שווה לזמן

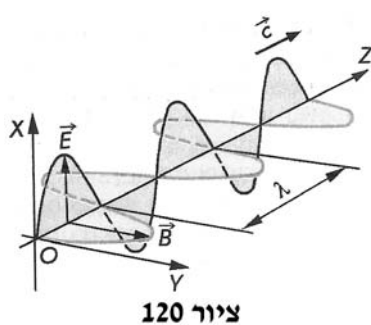


מחזור התנודות של המטען. השדה החשמלי המשתנה ייצור שדה מגנטי משתנה באופן מחזורי, ויגרום להופעת שדה חשמלי משתנה במרחק גדול יותר מהמטען, וכך הלאה.

לא נלמד בפירוט את התהליך המורכב של היווצרות השדה האלקטרומגנטי על-ידי מטען מתנווד, אלא נציג את התוצאה הסופית.

במרחב שמסביב למטען נוצרת מערכת שדות – חשמלי ומגנטי, המאונכים זה לזה והמשתנים באופן מחזורי – שמתפשטת ו"כובשת" אזורים יותר ויותר גדולים ורחוקים מהמטען. ציור 120 מתאר "צילום רגעי" של מערכת כזו במרחק רב מהמטען המתנווד.

נוצר **גל אלקטרומגנטי**, המתפשט לכל הכיוונים מהמטען המתנווד.



אין דומה הגל האלקטרומגנטי, המתואר בציור 120 כזעזוע של תווך כלשהו, לגל על פני המים. בציור מתוארים בקנה מידה כלשהו וקטורים \vec{E} ו- \vec{B} בנקודות מרחב שונות, הנמצאות על ציר Oz ברגע זמן נתון. אין כאן גבעות ושקעים של תווך, כבמקרה של גלים מכניים על פני המים.

בכל נקודת מרחב משתנים השדה החשמלי והשדה המגנטי בזמן באופן מחזורי. ככל שהנקודה נמצאת רחוק יותר מהמטען המתנווד – מאוחר יותר יגיעו אליה תנודות השדות. לכן מופע התנודות שונה במרחקים שונים מהמטען המתנווד.

בכל נקודת מרחב מתרחשות תנודות הווקטורים \vec{E} ו- \vec{B} במופע שווה. המרחק בין שתי נקודות קרובות ביותר, שבהן מופע התנודות, הוא אורך הגל λ . ברגע זמן נתון משתנים הווקטורים \vec{E} ו- \vec{B} במרחב באופן מחזורי, כאשר אורך הגל הוא λ .

כיווני הווקטורים של השדה החשמלי ושל השדה המגנטי מאונכים לכיוון התפשטות הגל; **הגל האלקטרומגנטי הוא גל רוחבי**.



הווקטורים \vec{E} ו- \vec{B} בגל האלקטרומגנטי מאונכים זה לזה, וכאמור ניצבים לכיוון התפשטות הגל. אם נסובב בורג ימני מווקטור \vec{E} לווקטור \vec{B} , תהיה תנועת הבורג במגמת מהירות הגל \vec{c} (ראו ציור 120).

היווצרות גלים אלקטרומגנטיים

גלים אלקטרומגנטיים נוצרים על-ידי מטענים מתנוודדים, שמהירותם משתנה בזמן, כלומר הם נעים בתאוצה. קיום התאוצה הוא התנאי לפליטת הגלים האלקטרומגנטיים. שדה אלקטרומגנטי נפלט לא רק כאשר המטען החשמלי מתנוודד, אלא בכל שינוי מהיר של מהירותו, ולאו דווקא תוך כדי תנודה. ככל שתאוצת המטען גדולה יותר, תהיה עוצמת הגל הנפלט גדולה יותר.

אפשר לתאר זאת כך: כאשר חלקיק טעון נע במהירות קבועה, מלווים אותו השדה החשמלי והשדה המגנטי שנוצרו כמו שובל מתנופף. כאשר החלקיק מאיץ, מתגלה תכונת ההתמד, המאפיינת את השדה האלקטרומגנטי; השדה "ניתק" מהחלקיק ומתחיל להתקיים באופן עצמאי בצורת גלים אלקטרומגנטיים.

ברגע זמן נתון משתנה אנרגיית השדה האלקטרומגנטי של הגל במרחב באופן מחזורי עם שינויי הווקטורים \vec{E} ו- \vec{B} . הגל המתפשט נושא עמו אנרגיה, הנעה במהירות c לאורך מגמת ההתפשטות של הגל, וכך משתנה אנרגיית הגל האלקטרומגנטי בכל אזור שהוא במרחב באופן מחזורי בזמן.

מקסוול היה משוכנע בקיומם של הגלים האלקטרומגנטיים, אולם הוא לא זכה לגילויים הניסויי. רק עשר שנים לאחר מותו התגלו הגלים האלקטרומגנטיים באופן ניסויי על-ידי הרץ.

גלים אלקטרומגנטיים נוצרים הודות לשדה חשמלי משתנה, שיוצר שדה מגנטי משתנה. השדה המגנטי המשתנה יוצר שדה חשמלי משתנה.

?

1. כיצד מכוונים וקטורים \vec{E} , \vec{B} , ו- \vec{c} אחד יחסית לאחר בגל אלקטרומגנטי?
2. כיצד צריך לנוע חלקיק טעון, כדי שיקרין גלים אלקטרומגנטיים?

גלי קול

§ 48 יסודות תורת מקסוול ומשוואות מקסוול

1. **תורת מקסוול** היא תיאוריה שלמה ועקבית של שדה אלקטרומגנטי אחיד, הנוצר על-ידי מערכת מטענים וזרמים חשמליים כלשהם. **תורת מקסוול** פותרת את הבעיה העיקרית של האלקטרודינמיקה: חישוב שדה חשמלי ושדה מגנטי, הנוצרים על-ידי התפלגות נתונה של מטענים וזרמים. תורת מקסוול מהווה הכללה של החוקים הבסיסיים, המתארים תופעות חשמליות ומגנטיות, כגון: משפט גאוס, חוק אמפר וחוק ההשראה האלקטרומגנטית.
2. **תורת מקסוול** אינה מסבירה את המבנה המולקולרי של התווך ואת מגננוני התהליכים, הגורמים להיווצרות ולהתפשטות של הגל האלקטרומגנטי. תכונות התווך מוגדרות על-ידי המקדם הדיאלקטרי היחסי ϵ , המקדם המגנטי היחסי μ , ועל-ידי המוליכות החשמלית הסגולית γ , אשר אמורים להימדד בניסוי.
3. **תורת מקסוול** היא מקרוסקופית: היא עוסקת בשדות אלקטרומגנטיים במערכות, שמידותיהן גדולות בהרבה ממידות האטומים והמולקולות שמהם הן בנויות.
4. **תורת מקסוול** מבוססת על עקרון **הפעולה מקרוב**, שעל-פיו נוצרות פעולות חשמליות ומגנטיות באמצעות שדה אלקטרומגנטי, והן מתפשטות במהירות סופית השווה למהירות האור בתווך הנתון. מסקנה חשובה זאת מהווה בסיס לתורת האור, שפיתח **מקסוול** מאוחר יותר.

המשוואה הראשונה של מקסוול

המשוואה הראשונה של מקסוול מהווה את חוק ההשראה האלקטרומגנטית, הרשום בצורה אינטגרלית:

$$\int_L \vec{E} \, dl = - \frac{d\Phi_m}{dt}$$

המשמעות היא:

שינוי השטף המגנטי (Φ_m) גורם להיווצרות של שדה מערבולת חשמלי \vec{E} , כאשר עוצמת השדה, המסתכמת באינטגרל המסלולי לאורך המעגל החשמלי L , נמצאת ביחס ישר לקצב שינוי השטף. על-פי **מקסוול**, נוצר השדה החשמלי לאו דווקא במעגל מוליך, אלא בכל מעגל סגור דמיוני הנמצא בשדה מגנטי משתנה.

משוואות מקסוול

המשוואה השנייה של מקסוול

המשוואה השנייה היא הכללה של **חוק אמפר**, הטוען שזרם חשמל גורם להיווצרות שדה מגנטי.

מקסוול הוסיף למושג זרם החשמל כגורם לשדה מגנטי איבר חדש, המבטא את שינוי השדה החשמלי, בנוסף להיותו תנועה מסודרת של מטענים; מושג חדש זה כונה "זרם ההעתק". מקורו של השם בתנועה מסודרת של מטענים, הקשורים בתוך תווך דיאלקטרי, הגורמת להיווצרות זרם במעגלים "פתוחים" (זרם חילופין, שבדומה לזרם ישר, הזורם במעגלים "סגורים", גורם להדלקת נורת להט). הצורה האינטגרלית של המשוואה השנייה של **מקסוול** היא:

$$\int_L \vec{H} \, dl = I + \frac{d\Phi_E}{dt}$$

המשמעות של המשוואה היא, ששדה מגנטי נוצר עקב כל אחד משני הגורמים: נוכחות זרם חשמלי "רגיל" I ; ושינוי השטף החשמלי דרך המשטח הכלוא בתוך המעגל החשמלי L . השדה המגנטי נוצר בכל רגע שמתרחש שינוי השטף.

שתי המשוואות יחד מהוות בסיס להוכחה התיאורטית של קיום שדה אלקטרומגנטי אחיד: כתוצאה משינוי השדה החשמלי (עקב תנועה מקרית של מטענים) נוצר, על-פי המשוואה השנייה, שדה מגנטי. שדה זה לא יישאר קבוע בזמן, אלא ישתנה ויגרום, על-פי המשוואה הראשונה, להיווצרות שדה חשמלי משתנה; ותהליך הדדי זה יחזור על עצמו שוב ושוב וייצור את הגל האלקטרומגנטי.

המשוואות השלישית והרביעית של מקסוול

שתי המשוואות הנוספות של **מקסוול** עוסקות במקורות ה"קבועים" של השדות: במטענים. **מקסוול** הניח שמשפט **גאוס** מתקיים עבור כל שדה חשמלי: אלקטרוסטטי ומשתנה. המשוואה השלישית של מקסוול היא משפט **גאוס** המוכר לנו:

$$\int_S \vec{E} \, ds = 4\pi k \sum q_i$$

כאשר אגף שמאל מבטא את שטף השדה החשמלי דרך מעטפת S , ואגף ימין נמצא ביחס ישר לסכום כל המטענים הכלואים בתוך המעטפת.

משוואות מקסוול

מקסוול הניח שמשפט **גאוס** מתקיים גם עבור שדה מגנטי; אולם עקב אי-קיומם של מטענים מגנטיים בטבע, צורתה של המשוואה הרביעית היא:

$$\int_S \vec{H} \, ds = 0$$

משוואות **מקסוול** קיימות גם בצורה דיפרנציאלית, הקושרת את ערכי השדות בכל נקודה עם שינויי השדות בזמן ובמרחב בסביבת אותה הנקודה (ולא כאינטגרל על ההיקף או על השטח); אולם הפעולות והפונקציות המתמטיות, המתארות קשרים אלה, אינן נלמדות במסגרת קורס זה.

משוואות מקסוול מהוות את היסוד לא רק לתורה האלקטרומגנטית, אלא גם לתורת היחסות (העוסקת בתכונות הבסיסיות של המרחב והזמן) ולתורת האור.

כדי להשתמש במשוואות **מקסוול** לצורך פתרון בעיות מעשיות יש להוסיף אליהן את המשוואות המתארות את תכונות התווך המסוים (המגדירות את ערכי ϵ , μ ו- γ של התווך).

נכיר כיצד נוצרים גלים אלקטרומגנטיים. תהליך ההיווצרות של גלים אלה מורכב, וניגע בו בתיאור כללי בלבד.

גל אלקטרומגנטי נוצר הודות לקשר ההדדי שבין השדות החשמליים והמגנטיים המשתנים: שינוי בשדה אחד גורם להופעת השדה השני. בסעיפים 12 ו-17 למדנו שככל שמשתנה מהר יותר השדה המגנטי בזמן – כך גדולה יותר עוצמת השדה החשמלי הנוצר; וככל שמשתנה מהר יותר השדה החשמלי – כך גדולה יותר עוצמת השדה המגנטי.

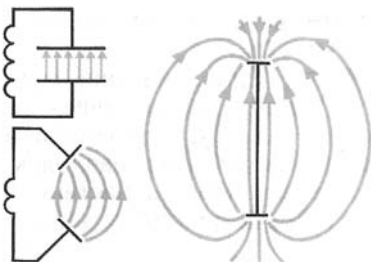
לכן כדי ליצור גלים אלקטרומגנטיים חזקים יש ליצור תנודות אלקטרומגנטיות בעלות תדירות גבוהה מספיק. זה התנאי המבטיח שינויים מהירים של עוצמת השדה החשמלי \vec{E} ושל עוצמת השדה המגנטי \vec{B} . את התנודות – בתדירות גבוהה בהרבה מתדירות זרם החילופין התעשייתי (50 הרץ) – ניתן ליצור באמצעות מעגל תנודות.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{תדירות התנודות:}$$

והיא תהיה גבוהה יותר ככל שהשראות והקיבול קטנים יותר.

מעגל תנודות פתוח

אולם תדירות גבוהה של תנודות אלקטרומגנטיות עדיין אינה מבטיחה פליטה חזקה של גלים אלקטרומגנטיים. במעגל רגיל, המתואר בציור 73 (אפשר לכנותו מעגל סגור), כמעט כל השדה המגנטי מרוכז בתוך הסליל, והשדה החשמלי – בתוך הקבל. במרחק לא רב מהמעגל השדה האלקטרומגנטי כמעט שאינו קיים. מעגל כזה פולט גלים אלקטרומגנטיים חלשים מאוד.



ציור 121

על מנת ליצור גלים אלקטרומגנטיים השתמש היינריך הרץ במכשיר פשוט, המכונה **המשדר של הרץ**. מכשיר זה מהווה **מעגל תנודות פתוח**.

את המעגל הפתוח אפשר ליצור ממעגל סגור, אם נפתח בהדרגה את לוחות הקבל (ציור 121), ובמקביל נקטין את שטח הלוחות ואת מספר הליפופים בסליל, עד שנגיע לתיל ישר.



זהו המעגל הפתוח. ההשראות והקיבול של **משדר הרץ** קטנים, ולכן תדירות התנודות של המעגל גבוהה.

במעגל פתוח המטענים אינם מרוכזים בקצוות, אלא מפוזרים בכל התיל. ברגע נתון מכיוון הזרם בכל חתך של המוליך לצד אחד, אולם עוצמת הזרם שונה בחתכים שונים: בקצוות היא שווה לאפס, ובאמצע מגיעה ל**מְרָבָה** (נזכיר שבמעגלי זרם חילופין רגילים עוצמת הזרם בכל חתך ברגע נתון שווה). השדה האלקטרומגנטי עוטף את כל המרחב מסביב למעגל.

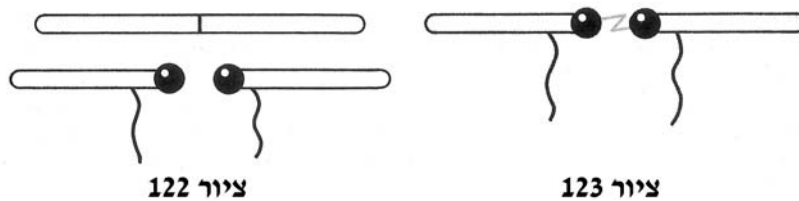
היינריך הרץ (1857 – 1894)



מדען גרמני. הוכיח לראשונה באופן ניסויי ב-1886 את קיומם של הגלים האלקטרומגנטיים. במהלך המחקר בגלים אלקטרומגנטיים גילה **הרץ** את הזהות של התכונות העיקריות של הגלים האלקטרומגנטיים ושל גלי האור. העבודות של **הרץ** מהוות הוכחה ניסויית לתורת השדה האלקטרומגנטי, ובפרט לתורת האור.

משוואות מקסוול בצורתן המודרנית נכתבו על-ידי **הרץ**. בשנת 1886 צפה **הרץ** לראשונה בתופעה הפוטואלקטרית.

בזמנו של **הרץ** עוררו תנודות במעגל כך: את התיל חתכו בתווך כך שיישאר מרווח אוויר קטן, המכונה **מרווח הניצוצות** (ציור 122). את שני חלקי המוליך טענו להפרש פוטנציאלים גבוה. כאשר הגיע הפרש הפוטנציאלים לערך גבולי מסוים נוצר ניצוץ (ציור 123), המעגל נסגר, ובמעגל הפתוח הופיעו תנודות.



התנודות במעגל פתוח דועכות משתי סיבות: עקב התנגדות אקטיבית של המעגל ועקב איבוד אנרגיה בעת שהמעגל פולט גלים אלקטרומגנטיים. לאחר שהתנודות נפסקות, נטענים שוב שני המוליכים עד לפריצת הניצוץ, וכך הלאה.

ניסויי הרץ

כדי לקבל תנודות בלתי מרוסנות במעגל תנודות פתוח מחברים אותו כיום דרך מעגל השראה למעגל תנודות של מתנד, המבוסס על טרנזיסטור, או למתנד מסוג אחר.

הניסויים של הרץ

הרץ יצר גלים אלקטרומגנטיים באמצעות עירור מתנד ממקור מתח גבוה בסדרת הבזקים של זרם חילופין בתדירות גבוהה. תנודות מטעני החשמל במתנד יוצרות גל אלקטרומגנטי; אולם את התנודות במתנד לא מבצע חלקיק אחד, אלא מספר אלקטרונים עצום, הנעים בתיאום יחדיו. בגל אלקטרומגנטי מאונכים הווקטורים \vec{E} ו- \vec{B} זה לזה. הווקטור \vec{E} נמצא במישור, העובר דרך המתנד, והווקטור \vec{B} ניצב למישור זה. פליטת הגלים מתרחשת בעוצמה מרבית בכיוון הניצב למישור המתנד. לאורך המתנד אין קרינה.

בניסויי הרץ נקלטו הגלים האלקטרומגנטיים בעזרת מתנד-מקלט הדומה למתנד-משדר. בהשפעת השדה החשמלי המשתנה, המעורר על-ידי גל אלקטרומגנטי, מתעוררות במקלט תנודות של זרם. אם התדירות העצמית של המקלט שווה לתדירות הגל האלקטרומגנטי, מתרחשת תהודה. התנודות במקלט מתרחשות במשרעת גדולה, כאשר הוא מוצב במקביל למשדר. הרץ גילה את התנודות האלה כאשר ראה ניצוצות במרווח קטן מאוד בין מוליכי המקלט. המדען לא רק יצר גלים אלקטרומגנטיים, אלא גם גילה שהם מתנהגים בדומה לסוגי גלים אחרים. לדוגמה: הוא צפה בהחזרת הגלים האלקטרומגנטיים מלוח מתכת בהתאבכות הגלים בהחזרה. כאשר מחברים גלים הבאים מהמתנד ומלוח המתכת, נוצרים אזורים מקסימום ומינימום של תנודות. אם נזיז את המתנד לכאן ולכאן, ניתן יהיה למצוא את מקומות המקסימום ולחשב את אורך הגל.

מהירות הגלים האלקטרומגנטיים

בניסויי הרץ היה אורך הגל כמה עשרות סנטימטרים. הרץ חישב את התדירות העצמית של המתנד, ומצא את מהירות הגל האלקטרומגנטי לפי הנוסחה $v = \lambda \nu$.

המהירות שהתקבלה קרובה מאוד למהירות האור:

$$c \approx 300,000 \text{ km/sec}$$

ניסויי הרץ

ניסויי הרץ הוכיחו את המסקנות התיאורטיות של מקסוול בצורה מושלמת.

כדי ליצור תנאים לפליטת הגלים האלקטרומגנטיים יש ליצור תנודות אלקטרומגנטיות במעגל תנודות פתוח.

?

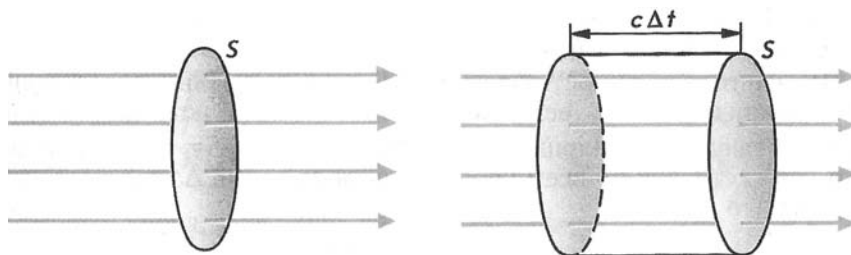
1. מדוע לא ניתן ליישם במעגל תנודות רגיל (פתוח) פליטה וקליטה של גלים אלקטרומגנטיים?
2. מהי מהירות ההתפשטות של פעולות אלקטרומגנטיות הדדיות?
3. משדר ומקלט בניסויי הרץ ממוקמים במאונך זה לזה. האם יופיעו תנודות במתנד של המקלט?

§50 צפיפות השטף האלקטרומגנטי

גלים אלקטרומגנטיים נושאים עמם אנרגיה. לתכונות האנרגטיות של הקרינה משמעות רבה, מכיוון שהן קובעות את השפעת מקורות הקרינה על קולטי הקרינה. נכיר כעת את אחת התכונות העיקריות של הקרינה.

צפיפות שטף הקרינה

נסתכל על משטח ששטחו S , שדרכו מעבירים הגלים האלקטרומגנטיים אנרגיה. בציור 124 מתואר משטח כזה: הקווים הישרים מציינים את כיוון התפשטות הגלים. אלה הן "קרניים": קווים המאונכים למשטחים, שבכל נקודה שלהם מתרחשות התנודות במופע (פאזה) זהה. משטחים כאלה מכונים **חזיתות גל** (ראו סעיף 46).



ציור 124

ציור 125

צפיפות שטף האנרגיה האלקטרומגנטית I היא היחס בין אנרגיה אלקטרומגנטית ΔW , העוברת בזמן Δt דרך משטח ששטחו S המאונך לקרניים, לבין מכפלת השטח S בזמן Δt :

$$(7.1) \quad I = \frac{\Delta W}{S \Delta t}$$

בפועל זהו הספק הקרינה האלקטרומגנטית, כלומר אנרגיה העוברת דרך יחידת שטח ביחידת זמן. את צפיפות שטף הקרינה במערכת היחידות SI מבטאים בוואטים למטר מרובע (W/m^2). לפעמים מכנים גודל זה **עוצמת הגל**.

נבטא את I באמצעות צפיפות האנרגיה האלקטרומגנטית ומהירות התפשטותה c . נבחר משטח, ששטחו S והמאונך לקרניים, ונבנה עליו כבסיס גליל שגובהו $c\Delta t$ (ציור 125). נפח הגליל: $\Delta V = Sc\Delta t$. אנרגיית השדה האלקטרומגנטי, הכלואה בתוך הגליל, שווה למכפלת צפיפות האנרגיה בנפח: $\Delta W = wc\Delta tS$. כל האנרגיה הזאת תעבור דרך הבסיס הימני של הגליל בזמן Δt . לכן מ- (7.1) מקבלים:

$$(7.2) \quad I = \frac{wc\Delta tS}{S\Delta t} = wc$$

כלומר: **צפיפות שטף הקרינה שווה למכפלת צפיפות האנרגיה האלקטרומגנטית במהירות התפשטותה.**

נמצא את תלות צפיפות שטף הקרינה המגנטית במרחק מהמקור. לשם כך נדרשת הגדרת מושג חדש.

מקור קרינה נקודתי

מקורות הקרינה של גלים אלקטרומגנטיים עשויים להיות שונים. הפשוט ביותר הוא **מקור נקודתי**.

מקור קרינה נחשב לנקודתי, אם מידותיו קטנות בהרבה מהמרחק, שבו נבדקת פעולתו, ואם פולט הוא גלים אלקטרומגנטיים לכל הכיוונים.¹ מקור נקודתי הוא מודל פשטני של המציאות, בדומה לגוף נקודתי, לגז אידיאלי וכדומה.

¹ מתנד הרץ אינו מהווה מקור נקודתי, שכן שיעור האנרגיה הנפלטת ממנו תלוי בכיוון היחסי לציר המתנד.



כוכבים פולטים אור, כלומר אנרגיה אלקטרומגנטית. מכיוון שהמרחקים מהכוכבים גדולים בהרבה ממידותיהם, מהווים הכוכבים מודל טוב למקור נקודתי.

תלות צפיפות שטף הקרינה במרחק למקור

האנרגיה שנושאים גלים אלקטרומגנטיים מתפזרת במהלך הזמן על פני שטח הולך וגדל. לכן האנרגיה, העוברת דרך יחידת שטח ביחידת זמן – כלומר צפיפות שטף הקרינה – הולכת וקטנה במהלך התרחקותה מהמקור.

נמצא את תלות צפיפות שטף הקרינה במרחק מהמקור. נחקור מקרה של מקור נקודתי, הממוקם במרכז כדור שרדיוסו R . שטח קליפת הכדור: $S = 4\pi R^2$. אם נניח שבזמן Δt פולט המקור אנרגיה ΔW לכל הכיוונים, אזי:

$$(7.3) \quad I = \frac{\Delta W}{S\Delta t} = \frac{\Delta W}{4\pi\Delta t} \cdot \frac{1}{R^2}$$

צפיפות שטף הקרינה של מקור נקודתי פרופורציונית הפוך לריבוע המרחק מהמקור.¹

תלות צפיפות שטף הקרינה בתדירות

פליטת הגלים האלקטרומגנטיים מתרחשת כאשר מואצים חלקיקים טעונים (ראו סעיף 48). עוצמות השדות החשמלי והמגנטי פרופורציוניות לתאוצה a של החלקיקים. התאוצה בתנודות הרמוניות פרופורציונית לריבוע התדירות, ולכן עוצמות השדה החשמלי והמגנטי נמצאות ביחס ישר לריבוע התדירות:

$$(7.4) \quad E \sim a \sim \omega^2, \quad B \sim a \sim \omega^2$$

צפיפות האנרגיה של שדה חשמלי פרופורציונית לריבוע עוצמת השדה. אפשר להוכיח שאנרגיית השדה המגנטי פרופורציונית לריבוע עוצמת השדה המגנטי. הצפיפות הכללית של אנרגיית השדה האלקטרומגנטי שווה לסכום ערכי הצפיפות של אנרגיית השדות החשמלי והמגנטי. לכן צפיפות שטף הקרינה I לפי (7.2) תהיה פרופורציונית ל:

$$(7.5) \quad I \sim w \sim (E^2 + B^2)$$

¹ בדיוק כך קטנה עם המרחק, בכל כיוון שהוא, גם צפיפות שטף הקרינה של מתנד הרץ.



מכיוון שבהתאם ל- (7.4), $E \sim \omega^2$ ו- $B \sim \omega^2$, אזי תהיה:

$$I \sim \omega^4 \quad (7.6)$$

צפיפות אנרגיית הקרינה פרופורציונית לחזקה הרביעית של התדירות.

כאשר תדירות התנודות של חלקיקים טעונים גדלה פי 2, גדלה האנרגיה הנפלטת פי 16! באנטנות של משדרי רדיו מעוררים תנודות בתדירות גבוהה: מעשרות אלפים לעשרות מיליוני הרץ.

גלים אלקטרומגנטיים מעבירים אנרגיה. צפיפות שטף הקרינה (עוצמת הגל) שווה למכפלת צפיפות האנרגיה במהירות התפשטותה. עוצמת הגל פרופורציונית לחזקה הרביעית של התדירות ופרופורציונית הפוך לריבוע המרחק מהמקור.

?

1. איזה גודל מכונה צפיפות שטף הקרינה האלקטרומגנטית?
2. איזה מקור קרינה מכונה מקור נקודתי?
3. מדוע זרם חילופין ברשת חשמל ביתית כמעט שאינו נחשב כמקור הפולט גלים אלקטרומגנטיים?

§51 המצאת הרדיו

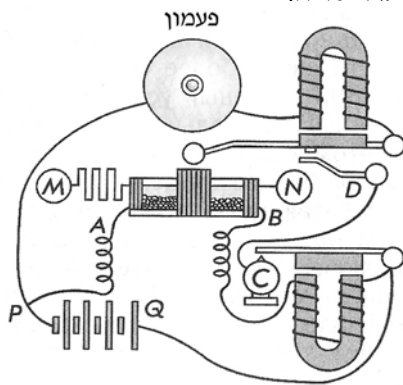
ניסויי הרץ פורסמו בשנת 1888, והם משכו את תשומת לבם של פיזיקאים בכל העולם. המדענים התחילו לחפש דרכים לשכלול המתנד והמקלט של גלים אלקטרומגנטיים.

באיטליה עסק בכך המהנדס ג' **מרקוני**, וברוסיה – מרצה במכללת הקצינים בשם א' **פופוב**. תחילה הוא חזר על ניסויי הרץ, ואחר כך השתמש בשיטה רגישה יותר לקליטת גלים.

כמכשיר ה"מרגיש" במישרין את הגלים השתמש **פופוב** בצינור זכוכית, ובו שתי אלקטרודות. בצינור נמצאת אבקת מתכת שרסיסה זעירים. פעולת המכשיר מבוססת על השפעת הפריצות החשמליות על אבקות מתכת. בתנאים רגילים גבוהה התנגדות המכשיר, מכיוון שאין מגע טוב בין הרסיסים. הגל האלקטרומגנטי המגיע יוצר במכשיר זרם חילופין שתדירותו גבוהה. בין הרסיסים עוברים ניצוצות זעירים

מקורות הקשורת הרדיו

המצמידים אותם זה לזה, והתנגדות המכשיר יורדת באופן חד (בניסויים של פופוב ירדה ההתנגדות מ- 100,000 אום ל- 500 – 1000 אום, כלומר פי 100–200). ניתן להחזיר את המכשיר למצב ההתחלתי, אם ננער אותו. כדי להבטיח את רציפות הקליטה הנחוצה לתקשורת אל-חוטית השתמש פופוב במעגל של פעמון חשמלי, כדי להרעיד את המכשיר לאחר קליטת האות. מעגל הפעמון נסגר באמצעות חיישן רגיש בעת הגעת הגל האלקטרומגנטי. בתום קליטת הגל נפסקת מיד עבודת הפעמון, מכיוון שהפטישון של הפעמון מקיש לא רק בכיפת הפעמון, אלא גם בצינור הזכוכית של מכשיר הקליטה. לאחר הניעור מוכן המכשיר לקליטת גל חדש. תיאור המקלט של פופוב, כפי שפורסם בעיתון מדעי לראשונה.



ציור 126

מובא בציור 126. כדי לשפר את רגישות המכשיר חיבר פופוב את אחד הקצוות של המכשיר לאדמה, את האחר חיבר לחוט המורם לגובה, וכך יצר את האנטנה הראשונה לתקשורת אל-חוטית. ההארכה הופכת את השכבה המוליכה של הקרקע לחלק ממעגל תנודות פתוח, המגדיל את טווח הקליטה.

אף-על-פי שמקלטי רדיו מודרניים דומים רק במעט למקלט של פופוב, עקרונות פעולתם זהים לאלה של המקלט הראשון. גם למקלט המודרני יש אנטנה, שבה מעורר הגל המגיע תנודות אלקטרומגנטיות חלשות מאוד. כמו במקלט הראשון, אין אנרגיית התנודות האלה משמשת במישרין לתקשורת. אותות חלשים אלה מבצעים תפקידי בקרה ושליטה במקורות האנרגיה המסופקים למעגלים אחרים. היום מתבצעת בקרה כזו על-ידי מכשירים מבוססי מוליכים למחצה.



בשנת 1895 הדגים פופוב את פעולת המכשיר שלו בפני חברי האקדמיה למדעים של רוסיה, ומאז שכלל ופיתח מכשירי שידור וקליטה. היעד שהציב לפניו היה לפתח מכשיר לשידור האותות למרחקים גדולים.

עקרונות תקשורת הרדיו

תחילה הודגם קשר רדיו לטווח 250 מ', ולאחר מכן הצליח פופוב לקיים קשר לטווח 600 מ'. בתמרוני הצי הרוסי בשנת 1899 הוא יצר קשר רדיו לטווח 20 ק"מ, ובשנת 1901 הרחיק הטווח ל-150 ק"מ. הגדלת טווח הקשר האל-חוטי היתה אפשרית הודות למבנה חדש של המשדר: "מתנד הניצוצות" הורכב ממעגל תנודות, הקשור באמצעות השראה לאנטנת שידור ומכוון לתדר התהודה של האנטנה. השתנו גם באופן משמעותי שיטות הקליטה של האות. במקביל לפעמון חיברו מכשיר טלגרף, שאפשר רישום אוטומטי של האותות. בשנת 1899 גילו את אפשרות קליטת האותות בעזרת הטלפון.

עבודות הפיתוח של תקשורת רדיו התנהלו בחברת **מרקוני** באיטליה, ובאותה תקופה הצליח **מרקוני** לקיים קשר רדיו בין שני צדי האוקיינוס האטלנטי.

§52 עקרונות תקשורת הרדיו

אלה עקרונות תקשורת הרדיו: באנטנת השידור נוצר זרם חילופין שתדירות גבוהה, היוצר במרחב שדה אלקטרומגנטי משתנה, המתפשט בצורת גל אלקטרומגנטי. בהגיע הגל האלקטרומגנטי לאנטנת הקליטה, הוא גורם להופעת זרם חילופין באותה התדירות שבה שידר המשדר.

השלב החשוב ביותר בהתפתחות קשר רדיו היה פיתוחו של מתנד תנודות אלקטרומגנטיות בלתי מרוסנות בשנת 1913.

מלבד משלוח אותות טלגרף, המכילים קבוצות של הבזקים קצרים וארוכים יותר של גלים אלקטרומגנטיים, התאפשר קשר רדיו-טלפוני אמין ואיכותי, הכולל משלוח דיבור או מוזיקה, באמצעות גלים אלקטרומגנטיים.

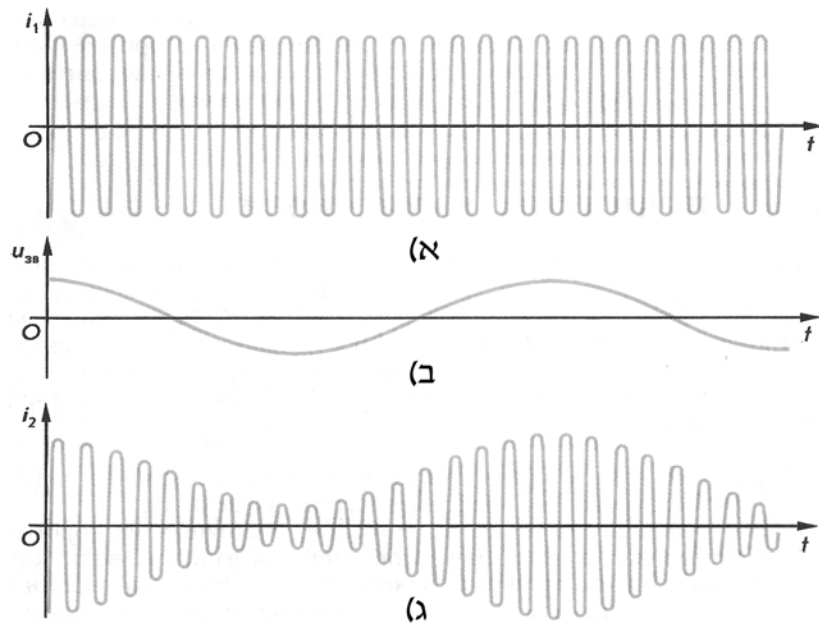
תקשורת רדיו-טלפונית

תהליך תקשורת רדיו-טלפונית מתחיל מהתמרת תנודות אוויר של גל קול באמצעות המיקרופון לתנודות חשמליות בעלות אותה צורה. לכאורה נראה שאם נגביר את התנודות האלה ונעבירן לאנטנה, ניתן יהיה לשדר מוזיקה ודיבור למרחקים באמצעות גלים אלקטרומגנטיים; אולם במציאות שיטת תמסורת זו בלתי ישימה, משום שתנודות קול בעלות תדירות נמוכה, וגלים אלקטרומגנטיים בעלי תדירות שכזאת אינם נפלטים כמעט כלל.

האפנון

כדי ליישם תקשורת רדיו-טלפונית צריך להשתמש בתנודות בתדר גבוה, הנפלטות מאנטנה בעוצמה רבה. תנודות בלתי מרוסנות בעלות תדירות גבוהה מיוצרות במתנד, כגון זה המבוסס על טרנזיסטור.

ככלל על מנת להעביר קול משנים את התנודות, שתדירותן גבוהה, באמצעות תנודות חשמליות שתדירותן נמוכה (בתדירות קול). הליך זה מכונה **אפנון**. אפנון המשרעת בתדר של קול מתנודות, שתדירותן גבוהה, מכונה **אפנון המשרעת**. בציר 127 מתוארים 3 גרפים: א. גרף תנודות בעלות תדירות גבוהה, המכונות **גל נושא**; ב. גרף תנודות בעלות תדירות הקול, כלומר התנודות המאופננות; ג. גרף תנודות בתדירות גבוהה, המאפננות את משרעת הקול. ללא אפנון יכולים אנו לכל היותר לבדוק אם פועלת התחנה, אם לאו. ללא אפנון לא היתה אפשרות תקשורת טלגרף, טלפון וטלוויזיה.



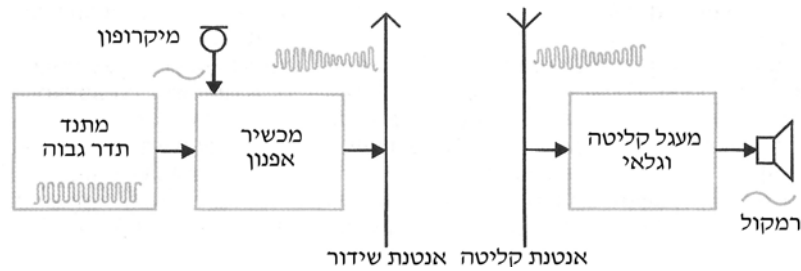
ציור 127

האפנון הוא תהליך אטי, והוא גורם לשינויים במערכת תנודות בעלות תדירות גבוהה, שבמהלכם מספיקה המערכת לבצע הרבה מאוד תנודות בתדירות גבוהה לפני שהמשרעת תשתנה משמעותית.

מקורות תקשורת הרדיו

הגילוי

מהגל המאופנן, שתדירותו גבוהה, משחזרים במקלט תנודות בעלות תדירות נמוכה. תהליך זה של המרת האות מכונה **גילוי** (detection). האות שמתקבל כתוצאה מהגילוי תואם לאות של הקול, אשר הוטבע במיקרופון של המשדר. לאחר ההגברה הופכות התנודות, שתדירותן נמוכה, לקול.



ציור 128

העקרונות הבסיסיים של תקשורת רדיו מתוארים בציור 128.

?

1. מדוע נחוץ אפנון תנודות לתקשורת אל-חוטית?
2. מהו תהליך גילוי התנודות?

§53 כיצד מתבצע אפנון וגילוי

הכרנו מהם אפנון וגילוי ולשם מה הם נחוצים. כעת נראה כיצד מתבצעים תהליכים האלה.

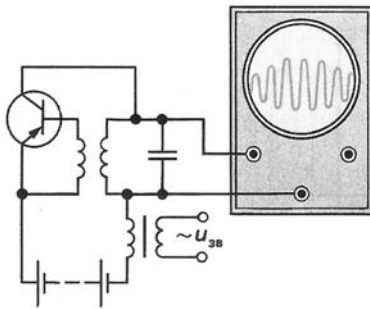
אפנון המשרעת

אפנון המשרעת של תנודות בעלות תדירות גבוהה מתבצע על-ידי השפעה מיוחדת על מתנד תנודות בלתי מרוסנות. לדוגמה: אפשר לבצע את האפנון על-ידי שינוי המתח, הנוצר על-ידי המקור של מעגל התנודות (ראו סעיף 36). ככל שהמתח במעגל המתנד גבוה יותר, נכנסת יותר אנרגיה מהמקור למעגל במשך זמן מחזור, וכך גדלה משרעת התנודות במעגל. הקטנת המתח גורמת לכמות פחותה של אנרגיה המסופקת למעגל מהמקור, ועמה קטנה גם משרעת התנודות במעגל.

כאשר משנים את המתח במעגל בתדירות הקטנה בהרבה מתדירות התנודות

עקרונות תקשורת הרדיו

הנוצרות במתנד, יהיו שינויי משרעת התנודות פרופורציוניים בקירוב לשינויי המתח. במערכת הפשוטה ביותר, בה מתבצע אפנון המשרעת, מחברים בטור למקור מתח קבוע מקור נוסף של מתח משתנה בתדירות נמוכה. מקור כזה עשוי להיות, למשל, סליל משני של שנאי, אם בסליל הראשוני עובר זרם בתדירות הקול (ציור 129). כתוצאה מכך תשתנה משרעת התנודות במעגל המתנד בהתאם לשינויי המתח שעל הטרנזיסטור. משמעות הדבר: אפנון של משרעת תנודות בעלות תדירות גבוהה על-ידי אות, המשתנה בתדירות נמוכה.



ציור 129

את פריסת התנודות המאופננות בזמן אפשר לראות במישרין על מסך האוסצילוגרף, אם נחבר לקטביו מתח ממעגל התנודות. במקרים מסוימים משתמשים באפנון תדירות, כלומר שינויי תדירות התנודות בהתאם לאות בקרה. יתרונותיו של אפנון התדירות הם יציבות טובה יותר מפני הפרעות.

הגילוי

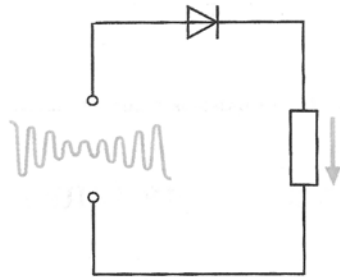
אות מאופן בעל תדירות גבוהה, הנקלט במקלט, לא יגרום לתנודות של ממברנת הטלפון או של ממברנת הרמקול בתדירות הקולית גם לאחר הגברה. הוא יכול ליצור תנודות בעלות תדירות גבוהה בלבד, שאינן נקלטות באוזן אנוש. לכן יש לגלות תחילה את האות בעל התדירות הקולית בתוך התנודות המאופננות בעלות התדירות הגבוהה.

הגילוי מתבצע על-ידי מכשיר המכיל רכיב בעל מוליכות חד-כיוונית המכונה **גלאי**. כרכיב כזה עשויה לשמש שפופרת אלקטרונית (דיודת ריק) או דיודה ממוליך למחצה.

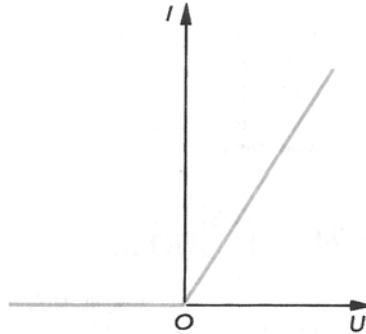
נתמקד בפעולת הגלאי, המבוסס על מוליך למחצה. נניח שרכיב זה מחובר בטור למקור תנודות מאופננות ולעומס¹ (ציור 130). רוב הזרם במעגל יעבור בכיוון אחד, המסומן בחץ, מכיוון שהתנגדות הדיודה במגמת החץ קטנה בהרבה מהתנגדותה במגמה ההפוכה.

¹ עומס של גלאי הוא נגד, שאליו מגיעות תנודות בעלות תדירות קולית.

אפשר להתעלם מהזרם ההפוך ולהניח שמוליכות הדיודה היא חד-כיוונית. את התלות מתח-זרם של הדיודה אפשר להציג בקירוב כקו שבור, המורכב משני קטעים ישרים (ציור 131).



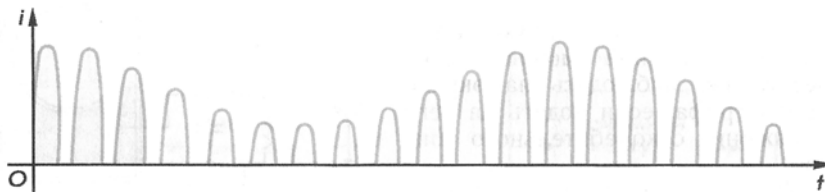
ציור 130



ציור 131

במעגל יזרום זרם בצורת הפעימות (ציור 130, 132). את הזרם הזה "מחלקים" בעזרת מסנן. המסנן הפשוט ביותר מורכב מקבל המחובר לעומס (ציור 133). באותם רגעי זמן, כאשר הדיודה מעבירה זרם, עובר חלק מהזרם דרך העומס, והחלק האחר מתפצל לקבל וטוען אותו (לפי החצים בציור 133). פיצול הזרם מקטין את עוצמת פעימות הזרם העובר דרך העומס, ובמרווח הזמן שבין הפעימות, כאשר הדיודה סגורה, מתפרק הקבל חלקית דרך העומס.

גם במרווח הזמן שבין הפעימות עובר הזרם דרך העומס באותה מגמה (חצים מקווקווים בציור 133). כל פעימה חדשה מטעינה את הקבל, ואזי עובר דרך העומס זרם בעל תדירות קולית, אשר צורתו משחזרת כמעט במדויק את צורת האות בעל התדירות הנמוכה מתחנת השידור (ציור 134).



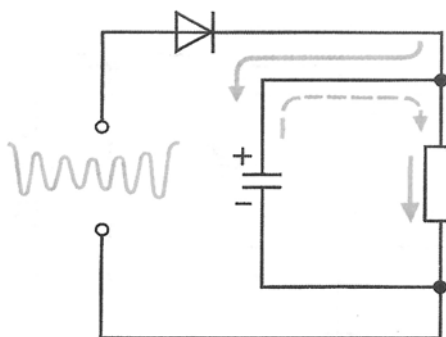
ציור 132

מסננים מורכבים יותר מחלקים פעימות קטנות בעלות תדירות גבוהה, ותנודות בעלות תדירות קולית מתקבלות חלקות יותר מהמתואר בציור 134.

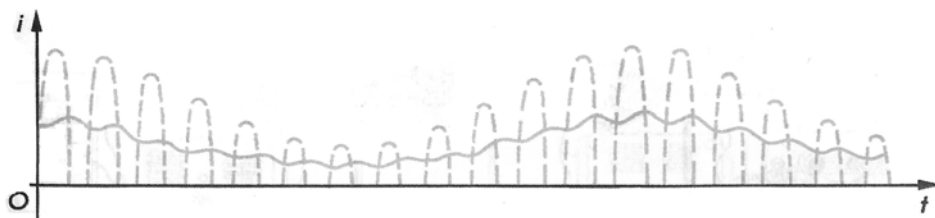
מקצועות הקשורת הרדיו

מקלט הרדיו הפשוט ביותר

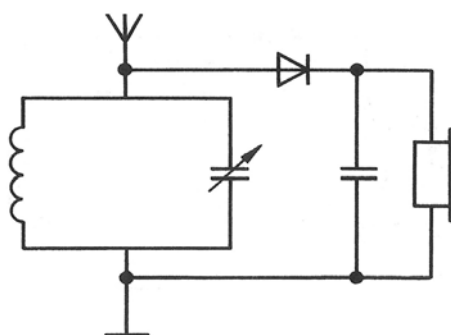
המקלט הפשוט ביותר מורכב ממעגל תנודות, הקשור לאנטנה, וממעגל המחובר אליו, המכיל גלאי, קבל וטלפון (ציור 135). במעגל התנודות מעוֹכְרוֹת תנודות מאופננות. סלילי הטלפון מהווים עומס, ודרכם עובר זרם בעל תדירות קולית. פעימות קטנות בתדירות גבוהה אינן משפיעות על תנודות הממברנה ואינן נקלטות באוזן.



ציור 133



ציור 134



ציור 135

אפשר לאפנן את המשרעת או את תדירות התנודות. קל ביותר לבצע את אפנון המשרעת. במהלך הגילוי מתיישר זרם החילופין, ופעימות בעלות תדירות גבוהה מוחלקות על-ידי המסנן.

?

1. במה תלויה משרעת תנודות משוב במתנד המבוסס על טרנזיסטור?
2. כיצד בנוי מקלט הרדיו הפשוט ביותר?

מקרונית הקשורת הרדיו

§54 תכונות הגלים האלקטרומגנטיים

גלים אלקטרומגנטיים נבלעים, מוחזרים ונשברים בדומה לכל סוגי הגלים האחרים. לא קשה לצפות בתופעות אלה.

מערכות רדיו מודרניות מאפשרות לערוך ניסויים מוחשיים כדי לצפות בתכונות הגלים האלקטרומגנטיים. נוח ביותר להשתמש בגלים בעלי אורכי גל בתחום הסנטימטרים. גלים אלה נוצרים על-ידי מתנד מיוחד, הפועל בתחום תדירויות גבוהות מאוד. את התנודות החשמליות מאפננים בתדירות קולית. האות הנקלט משוחזר ברמקול לאחר תהליך הגילוי.

גלים אלקטרומגנטיים נפליטים מאנטנת-שופר בכיוון הציר של השופר. אנטנת הקליטה, בצורת שופר גם היא, קולטת את הגלים שמתפשטים לאורך הציר. ציור 136 מתאר את מערך הניסוי.



ציור 136

בליעת הגלים האלקטרומגנטיים

מציבים את האנטנות זו מול זו, ולאחר שמגיעים לשמיעה טובה של הקול מהרמקול, חוצצים בין האנטנות בגופים דיאלקטריים שונים. נבחין אז בהפחתת רמת הקול.

החזרת הגלים האלקטרומגנטיים

אם נחליף את הגוף הדיאלקטרי בלוח מתכת, ייפסק הקול כליל: הגלים אינם מגיעים למקלט עקב ההחזרה. ההחזרה מתרחשת בזווית השווה לזווית הפגיעה, כמו במקרים של גלי אור וגלים מכניים. כדי להוכיח זאת מציבים את שופרי האנטנות בזוויות שוות ללוח המתכת (ציור 137). הקול נעלם, אם מסירים את הלוח או מסובבים אותו.

שבירת הגלים האלקטרומגנטיים

הגלים האלקטרומגנטיים משנים את כיוונם (נשברים) על גבול החומר הדיאלקטרי.



ציור 137

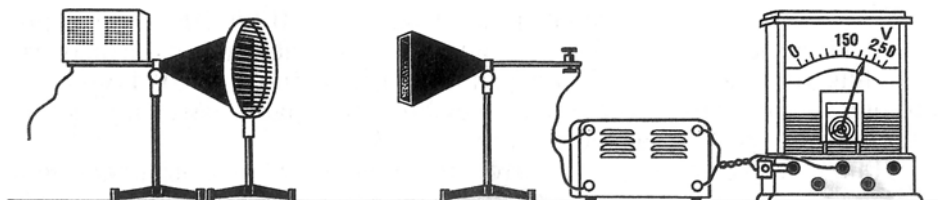
ציור 138

את זאת ניתן לגלות באמצעות מנסרה משולשת גדולה העשויה פרפין. את שופרי האנטנות מציבים בזווית זה לזה כמו בניסויי ההחזרה, אך מחליפים את לוח המתכת במנסרה (ציור 138). מסירים את המנסרה או מסובבים אותה – ונוכחים בהיעלמות הקול ובחזרתו.

רוחביות הגלים האלקטרומגנטיים

הגלים האלקטרומגנטיים הם גלים רוחביים. המשמעות היא שווקטורים \vec{E} ו- \vec{B} של השדה האלקטרומגנטי של הגל מאונכים לכיוון התפשטותו. תנודות עוצמת השדה החשמלי של הגל היוצא משופר השידור מתבצעות במישור מסוים, ותנודות וקטור השדה המגנטי – במישור המאונך לו. גלים, שבהם מתרחשות תנודות בכיוון מסוים, מכונים **גלים מקוטבים**. בציור 120 תיארנו גל מקוטב כזה. שופר הקליטה והגלאי קולטים גל מקוטב בכיוון מסוים בלבד.

אפשר להיווכח בכך על-ידי סיבוב של שופר המשדר או המקלט ב- 90° : הקול ייעלם.



ציור 139

תכונות הגלים האלקטרומגנטיים

את תופעת הקיטוב אפשר לראות באופן הבא: בין המשדר למקלט מציבים סריג, העשוי ממוטות מתכת מקבילים (ציור 139), כך שהמוטות יהיו אנכיים או אופקיים. באחד המצבים האלה, כאשר וקטור השדה החשמלי מקביל למוטות, מתעוררים בהם זרמים, והסריג מחזיר את הגל בדומה ללוח מתכתי מלא. כאשר הווקטור \vec{E} מאונך למוטות, לא נוצרים בהם זרמים, והגל האלקטרומגנטי עובר את הסריג.

עד כה הכרנו את התכונות העיקריות של גלים אלקטרומגנטיים. את ההיכרות המלאה עמם נדחה עד ללימודי האופטיקה. השדה המגנטי מתגלה בפעולתו של זרם חשמלי.

?

1. מנו את תכונות הגלים האלקטרומגנטיים הידועות לכם.
2. איזה גל מכונה גל מקוטב?

§55 התפשטות גלי רדיו

כאשר משתמשים בגלים אלקטרומגנטיים לתקשורת רדיו, גם המשדר וגם מקלט הגלים ממוקמים, בדרך כלל, קרוב לקרקע. צורתה ותכונותיה הפיזיקליות של הקרקע, כמו גם מצב האטמוספירה, משפיעים משמעותית על התפשטות גלי הרדיו.

ההשפעה החזקה ביותר על התפשטות גלי הרדיו יש לגז מיון, הנמצא בשכבות העליונות של האטמוספירה, בגובה בין 100 לבין 300 ק"מ מעל פני האדמה. השכבה הזאת מכונה **יונוספירה**. יינון האוויר בשכבות העליונות של האטמוספירה נגרם על-ידי הקרינה האלקטרומגנטית של השמש ועל-ידי זרמי חלקיקים טעונים, הנפלטים על-ידיה.



ציור 140

היונוספירה מוליכה זרם חשמלי כמו לוח מתכת, והיא מחזירה גלי רדיו בעלי אורך גל $\lambda > 10 \text{ m}$; אולם התכונה של היונוספירה להחזיר ולבלוע את גלי הרדיו

תכונות הגלים האלקטרומגנטיים

משתנה באופן משמעותי בהתאם לשעת היום ולעונת השנה.¹

תקשורת רדיו יציבה בין מקומות, המרוחקים על פני הקרקע, והנמצאים מחוץ לקו ראייה ישיר ביניהם, מתאפשרת הודות להחזרת הגלים מהיונוספירה ומתכונות הגלים לעקוף את משטחו הקמור של כדור הארץ. העקיפה בולטת יותר עבור אורכי גל ארוכים יותר. לכן תקשורת רדיו למרחקים ארוכים, המתבצעת באמצעות העקיפה, מתאפשרת באורכי גל ארוכים בלבד – הארוכים בהרבה מתחום ה-100 מ' (גלים בינוניים וארוכים).

גלים קצרים (תחום אורכי הגל בין 10 ל-100 מ') מתפשטים למרחקים גדולים בזכות החזרות מרובות מהיונוספירה ומפני הקרקע של כדור הארץ (ציור 140). באמצעות גלים קצרים אפשר לקיים תקשורת רדיו בין תחנות, הנמצאות בכל מרחק זו מזו.

גלים ארוכים פחות מתאימים לתקשורת כזו עקב בליעה משמעותית בשכבות החיצוניות של כדור הארץ וביונוספירה.

תקשורת רדיו תהיה אמינה ביותר אף בשידור באמצעות גלים ארוכים, אך למרחקים מוגבלים ובעוצמת שידור סבירה.

גלי רדיו קצרים במיוחד ($\lambda < 10 \text{ m}$) חודרים דרך היונוספירה וכמעט שלא עוקפים את פני השטח של כדור הארץ. לכן משתמשים בהם לתקשורת בין מקומות הנמצאים בקו ראייה ישיר ולקשר עם ספינות חלל.

התפשטות גלי רדיו תלויה באופן משמעותי באורך הגל. גלים קצרים ($\lambda \sim 10 - 100 \text{ m}$) עוברים החזרות רבות מהיונוספירה ומפני הקרקע; גלים ארוכים ($\lambda > 100 \text{ m}$) "גולשים" לאורך משטח כדור הארץ; גלים קצרים ביותר ($\lambda < 100 \text{ m}$) חודרים דרך היונוספירה.

¹ לכן תקשורת רדיו – ובמיוחד בתחום אורכי הגל הבינוניים (100 – 1000 m) – אמינה הרבה יותר בלילה ובחורף.

החזרת גלי רדיו ממחסומים שונים מוצאת שימוש רב בטכנולוגיה המודרנית. גלאים רגישים מאוד קולטים ומגבירים את האות המוחזר כדי לקבל מידע על מקום העצם שממנו הוחזר הגל.

גילוי ואיכון מדויק של גופים באמצעות גלי רדיו מכונה **איכון רדיו**. מערכת האיכון, המכונה **מכ"ם** (מגלה כיוון ומרחק), מורכבת ממשדר וממקלט. במערכות לאיכון רדיו משתמשים בתנודות חשמליות בעלות תדירות גבוהה ביותר ($10^8 - 10^{11}$ Hz). משדר בעל עוצמה גבוהה מחובר לאנטנה, המשדרת גל בכיוון אחד מוגדר. במערכות מכ"ם, הפועלות בתחום אורכי גל של 10 ס"מ ופחות, נוצר גל כזה באנטנה באמצעות מראות פרבוליות. עבור גלים בתחום אורכי גל של מטרים האנטנה היא מערכת מורכבת של מתנדים. הכיוונית באנטנות מסוג זה מושגת בזכות חפיפת הגלים: האנטנה בנויה כך, שהגלים הנפלטים בכל מתנד מתחברים ומגבירים זה את זה בכיוון מוגדר בלבד, ובכיוונים אחרים מתבצע הרס חלקי או מלא של הגלים.

הגל המוחזר נקלט על-ידי אותה אנטנה או על-ידי אנטנה אחרת, המכוונת אף היא בכיוון מוגדר. הכיוונית של הקרינה מאפשרת להגדיר "קרן של מכ"ם". הכיוון למטרה מוגדר ככיוון הקרן ברגע קליטת האות המוחזר.

כדי למצוא את המרחק למטרה משתמשים בקרינת הבזקים (פולסים). המשדר פולט גלים בהבזקים קצרים. משך כל הבזק כמה מיליוניות השנייה, והזמן בין ההבזקים הוא כפי 1,000 ארוך יותר. בזמן ההפסקות מתקבלים הגלים המוחזרים.

מציאת המרחק R נעשית על-ידי מדידת הזמן הכולל t של מהלך הגל למטרה ובחזרה ממנה. מכיוון שמהירות גלי הרדיו קבועה וערכה המקורב באטמוספירה הוא $c = 3 \cdot 10^8$ m/sec, אזי:

$$R = \frac{ct}{2}$$

עקב פיזור הגלים באטמוספירה מגיע למקלט רק חלק מזערי מהאנרגיה שפולט המשדר. לכן מגבירים גלאים של מכ"מים את האות הנקלט פי מיליון מיליונים (10^{12}). מקלט רגיש כזה צריך להיות, כמובן, מנותק ברגע שידור הפולס.



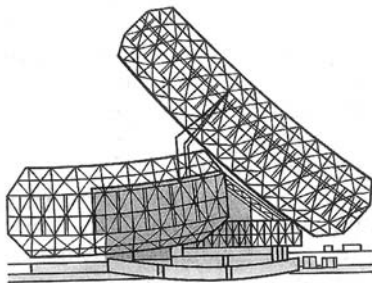
על מנת לסמן את האות הנשלח ואת האות המתקבל משתמשים בשפופרת אלקטרוניים. ברגע שליחת ההבזק סוטה מעלה הנקודה הבהירה, שנעה לרוחב המסך בקו ישר, ועל המסך נרשם אות ליד ראשית ציר המרחק (ציור 141). הכתם הזוהר על המסך ממשיך לנוע לאורך הציר, ובעת קליטת האות המוחזר החלש הוא סוטה שוב. המרחק בין האותות שנרשמו על המסך פרופורציונלי למשך הזמן t שבין שתי סטיות אלה, ולכן פרופורציונלי גם למרחק למטרה R . כך אפשר לכייל את הציר על המסך בקילומטרים.



ציור 141

מערכות איכון רדיו מגלות אוניות ומטוסים במרחקים עד כמה מאות קילומטרים. על פעילותן משפיעים מעט תנאי מזג האוויר ושעת היממה. מערכות איכון עוקבות אחר המטוסים הממריאים והנוחתים בשדות התעופה. מעקב רצוף זה מאפשר לפקחי טיסה קרקעיים להעביר לטייסים הוראות

מתאימות, וכך מספקים את רמת בטיחות הטיסה הנדרשת. את הצורה החיצונית של מערכת איכון תעופתית אפשר לראות בציור 142. מטוסים ואוניות מצוידים במערכות איכון לצורכי ניווט; המערכות משחזרות על המסך את מפת העצמים במרחב, המחזירים את גלי הרדיו המשוגרים אליהם.



ציור 142

השימוש באיכון רדיו מתרחב יותר ויותר. באמצעותו צופים במטאורים בשכבות גבוהות של האטמוספירה; שירותי החיזוי משתמשים באיכון רדיו לצפייה ולמעקב אחר עננים; משתמשים באיכון רדיו גם במשימות של חקר החלל: בשנת 1946 קלטו בארצות-הברית ובהונגריה אותות המוחזרים מפני הירח; ב-1961 קלטו ברוסיה

אותות שנשלחו לנוגה, וכך התאפשר למדענים למדוד את מחזור הסיבוב של נוגה סביב צירו. מבצעים גם איכון רדיו של כוכבי לכת אחרים במערכת השמש.

מערכות איכון רדיו נמצאות בשימוש נרחב לצורך גילוי מטוסים ואוניות, למעקב אחר עננים, לחקר החלל ועוד.



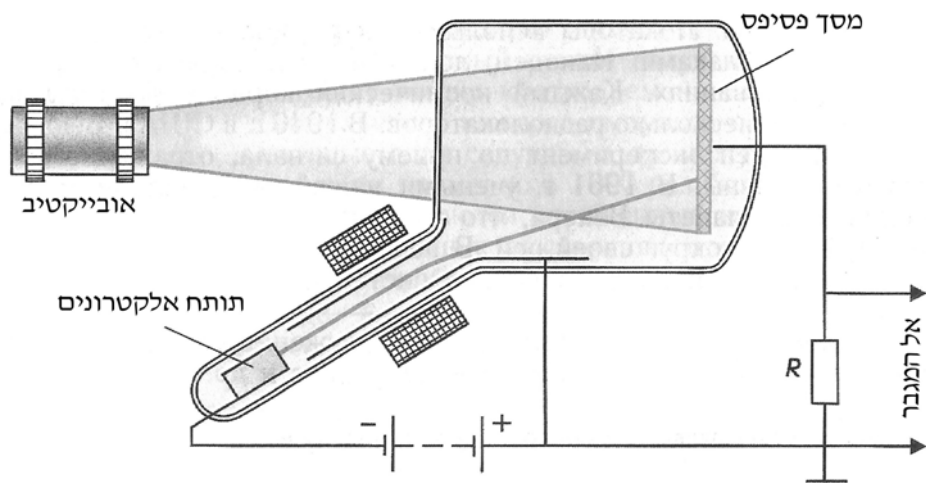
?

1. על אילו עקרונות מבוססת עבודת מערכת לאיכון רדיו?

§57 יסודות פעולת הטלויזיה

גלי רדיו נמצאים בשימוש לא רק למטרת העברת קול, אלא גם להעברת תמונות (טלויזיה).

זוהי עקרון העברת תמונה למרחק: בתחנת השידור מתבצעת התמרת הדמות לרצף אותות חשמליים, ואלה מאפננים את התנודות הנוצרות במתנד בעל תדירות גבוהה. הגל האלקטרומגנטי המאופנן מעביר את המידע למרחקים ארוכים, ובמקלט מבצעים את ההתמרה ההפוכה: תנודות בעלות תדירות גבוהה עוברות תהליך גילוי, והאות המתקבל הופך לדמות נראית. כדי להעביר תנועה משתמשים בעקרון הקולנוע: תמונות עוקבות של גוף נע משודרות עשרות פעמים בשנייה (בתקן שלנו: בתדר 50 הרץ).



ציור 143

באמצעות שפופרת ריק מיוחדת הופכת כל תמונה לסדרת אותות חשמליים (ציור 143). בתוך שפופרת השידור נמצא מסך הדומה לפסיפס, ועליו מוקרנת תמונה באמצעות מערכת אופטית. כל תא בפסיפס נטען כך, שגודל המטען תלוי בעוצמת האור הפוגע בתא. מטען התא משתנה כאשר פוגעת בו אלומת האלקטרונים שנוצרה בתותח האלקטרוני. האלומה עוברת בעקביות על כל התאים בשורת תאים, אחר

יסודות פעולת הטלויזיה

כך על תאי שורה אחרת, וכך סורקת את כל השורות (בסך הכול 625 שורות). גודל המטען שנשאר בתא, לאחר שהאלומה עברה בו, משפיע על גודל הזרם בנגד R. לכן משתנה המתח על הנגד בהתאם לשינוי ההארה לאורך השורות בתמונה.

אות דומה מתקבל במקלט הטלוויזיה לאחר תהליך הגילוי. זהו אות וידיאו, והוא הופך לתמונה על מסך שפופרת ריק אלקטרונית קולטת. בתותח האלקטרוניים של השפופרת נמצאת אלקטרודה נוספת, השולטת במספר האלקטרוניים באלומה – ולכן בבהירות המסך בנקודת הפגיעה של האלומה. מערכות סלילי ההטיה האופקית והאנכית מאלצות את אלומת האלקטרוניים לעבור על כל המסך באותה צורה, כפי שקרן האלקטרוניים עברה על פני המסך בשפופרת המשדרת. את התיאום בתנועת האלומות משיגים באמצעות שיגור אותות סנכרון מיוחדים. אותות טלוויזיה מועברים בתחום אורכי הגל הקצרים מאוד (מטרים).¹

גלים כאלה מתפשטים בטווח הראייה הישיר של האנטנה. לכן כדי לכסות שטח גדול צריך למקם את המשדרים צפוף וגבוה ככל שניתן.

לדוגמה: מגדל השידור המרכזי במוסקווה מתנשא לגובה 540 מ' ומכסה אזור שרדיוסו 120 ק"מ. כדי לכסות את שטחה של רוסיה מפעילים כמה אלפי תחנות שידור, ואת השידורים קולטים כ- 100 מיליון בני-אדם.

אזור הקליטה גדל בהתמדה הודות לשימוש בלוויינים המצוידים בממסרים.

כדי להעביר תמונה צבעונית, מפרידים את תמונת המקור לשלוש תמונות המתאימות לצבעי היסוד (אדום, ירוק וכחול), ומאחדים אותן בסוף תהליך הקליטה.

¹ אות וידיאו נושא הרבה יותר מידע מאשר אות קולי, ולכן הוא תופס תחום תדירויות רחב בהרבה. בתדירויות נמוכות יהיו האותות חופפים, ותחנות השידור היו "מפריעות" זו לזו.

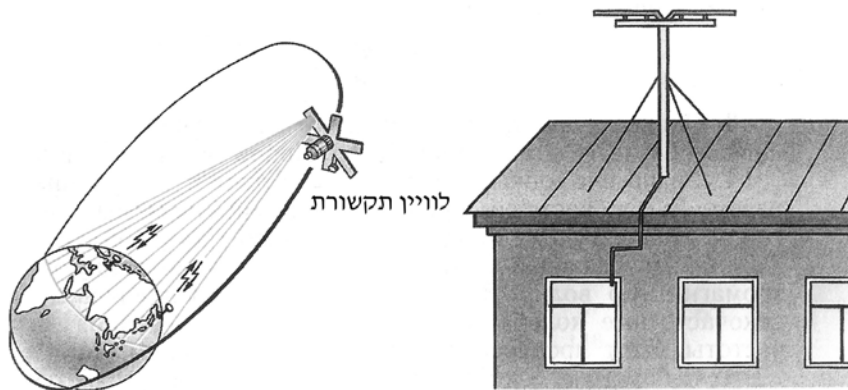
§58 התפתחות אמצעי התקשורת

בארצות רבות מתפתחות רשתות תקשורת, המאחדות אמצעי תקשורת שונים הנמצאים בבקרת מערכות מחשוב מרכזיות.

עד לא מזמן התנהלה תקשורת טלפונית בינעירונית בקווי טלפון התלויים בראשי עמודים, ואמינותם היתה ירודה עקב השפעת תנאי מזג האוויר (סערות וברקים, קרח המצטבר על החוטים בחורף וכו'). בזמן האחרון עוברים לתקשורת דרך כבלים תת-קרקעיים ותחנות תמסורת, ומשפרים את רמת הבקרה באמצעות המחשוב.

תחנות תמסורת משמשות להעברת גלים קצרים במיוחד (בעלי אורך גל של דצימטרים וסנטימטרים). גלים אלה מתפשטים בקו ראייה בלבד, ולכן מכילים קווי תקשורת שרשרת תחנות רדיו בעוצמה נמוכה, וכל אחת מעבירה אותות לתחנה סמוכה. לתחנות אלה עמודי אנטנות בגובה 60–80 מ', הנמצאים במרחקים 40 – 60 ק"מ זה מזה.

ההתפתחויות בתחום תקשורת לוויינים אפשרו לבנות רשתות תקשורת בינלאומיות, שבהן משתמשים בלווייני תקשורת, שחלקם סובבים במסלול שרדיוסו כ- 36,000 ק"מ, וזמן מחזור סיבובו 24 שעות (לוויין שידור כזה יישאר כל הזמן מעל אותה נקודה מעל פני הקרקע במישור קו המשווה), וחלקם במסלולים אליפטיים בעלי זמן מחזור סיבוב של כ- 12 שעות.



ציור 144

ציור 145

מקבץ תרגילים 7

1. בסכימה של מקלט רדיו, המתוארת בציור 135, נתון: $L = 2 \cdot 10^{-4} \text{ H}$, וידוע שהקיבול C יכול להשתנות מ- 12 nF עד 450 nF . לאילו אורכי גל מתוכנן מקלט הרדיו?
2. בציור 145 מתוארת אנטנת קליטה של מקלט טלוויזיה. מה אפשר לומר לגבי כיוון התנודות של וקטור השדה המגנטי המגיע מתחנת השידור?
3. האם קיימים הבדלים משמעותיים בין תנאי התפשטות גלי הרדיו על הירח לבין אלה שעל כדור הארץ?

תקציר פרק 7

1. בגל אלקטרומגנטי מתרחשות תנודות של עוצמת השדה החשמלי \vec{E} והשדה המגנטי \vec{B} . הווקטורים \vec{E} ו- \vec{B} מאונכים זה לזה ולכיוון התפשטות הגלים. גלים אלקטרומגנטיים הם גלים רוחביים.

2. צפיפות שטף הקרינה האלקטרומגנטית I היא היחס בין האנרגיה האלקטרומגנטית ΔW , העוברת בזמן Δt דרך משטח שטחו S והניצב לקרניים, לבין מכפלת השטח S בפרק הזמן Δt :

$$I = \frac{\Delta W}{S \Delta t}$$

צפיפות השטף של קרינה אלקטרומגנטית פרופורציונית לחזקה הרביעית של תדירות התנודות, ופרופורציונית הפוך לריבוע המרחק מהמקור:

$$I \sim \frac{\omega^4}{R^2}$$

3. ה' הרץ ייצר לראשונה גלים אלקטרומגנטיים. בהתבסס על הניסויים של הרץ פתחו מרקוני ופופוב את הרדיו.

4. תקשורת רדיו-טלפונית מתבצעת באופן הבא: המתנד יוצר תנודות בעלות תדירות גבוהה, המאופננות על-ידי תנודות בתדירות נמוכה (תדירות קול). האנטנה של תחנת השידור מקרינה גל אלקטרומגנטי מאופן. התנודות המאופננות מגיעות בתדירות גבוהה, ובאמצעות תהליך הגילוי הופכות במקלט לתנודות בתדירות נמוכה. בעזרת הגלים האלקטרומגנטיים מתבצעת תקשורת רדיו, איכון, תקשורת חלל ועוד.