

## יסודות האלקטרו דינמיקה (המשך)

נמשיך בלימודי האלקטרו דינמיקה, ונכיר שדות מגנטיים שאינם משתנים בזמן. נכיר גם שדות מגנטיים ושדות חשמליים המשתנים בזמן. כזכור, בספרנו הקודם התוודענו לשדות חשמליים שאינם משתנים בזמן.

### פרק 1. השדה המגנטי

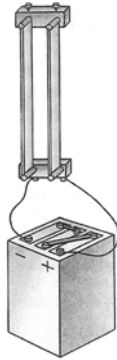
מטענים חשמליים נייחים יוצרים סביבם שדה חשמלי, ואילו מטענים חשמליים נעים יוצרים סביבם שדה מגנטי. נלמד את תכונותיו.

#### §1 פעולות גומלין בין הזרמים, השדה המגנטי

מטענים נעים מהווים את זרם החשמל; לכן השדה המגנטי, שנוצר על-ידי זרם חשמל, מהווה תווך שבו פועלים זרמים חשמליים הדדית זה על זה.

בין מטעני חשמל נייחים פועלים כוחות, המתוארים על-ידי **חוק קולון**. בהתאם לתורת הפעולה מקרוב יוצר כל אחד מהמטענים שדה חשמלי, הפועל על המטען האחר.

אולם בין המטענים יכולים לפעול גם כוחות מסוג אחר, ואפשר לגלותם באמצעות הניסוי הבא:



שני מוליכים מתיל גמיש תלויים אנכית ומחוברים בקצותיהם התחתונים למקור זרם (ראו ציור 1). התילים נטענים, אך משיכה או דחייה של המוליכים אינן ניכרות;<sup>1</sup> אך אם נחבר את הקצוות העליונים של התילים כך שיעברו בהם זרמים במגמות מנוגדות, יידחו המוליכים זה מזה (ראו ציור 2). אם יזרמו הזרמים באותה מגמה, יימשכו התילים זה לזה (ראו ציור 3).

#### ציור 1

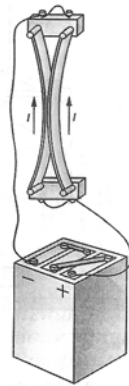
<sup>1</sup> המוליכים נטענים ממקור זרם, אך עבור הפרש הפוטנציאלים של כמה וולטים השורר ביניהם מטעניהם זניחים. משום כך גם כוחות קולון בין המוליכים זניחים ואינם ניכרים.

השדה המגנטי

פעולות הגומלין בין מוליכים, שעובר בהם זרם, מכונות פעולות מגנטיות, והכוחות הפועלים בין מוליכים נושאי זרם מכונים כוחות מגנטיים.



ציור 2



ציור 3

### השדה המגנטי

בהתאם לתורת הפעולה מקרוב אין הזרם, העובר באחד המוליכים, יכול לפעול במישרין על הזרם שבמוליך האחר.

בדומה להיווצרות השדה חשמלי במרחב סביב מטעני חשמל נייחים, נוצר במרחב סביב הזרמים שדה, המכונה שדה מגנטי.

זרם החשמל שבאחד המוליכים יוצר סביבו שדה מגנטי, הפועל על הזרם שבמוליך האחר; וכך גם פועל השדה, הנוצר על-ידי הזרם העובר במוליך השני, על המוליך הראשון.

שדה מגנטי מהווה צורה מיוחדת של תורך, שבאמצעותו מתבצעות פעולות גומלין בין חלקיקים טעונים ונעים.

נמנה את התכונות הבסיסיות של השדה המגנטי, כפי שהן מתגלות באופן ניסויי:

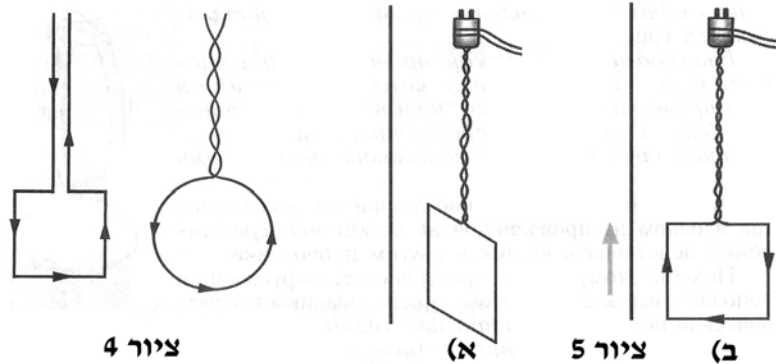
1. שדה מגנטי נוצר על ידי זרם חשמל (מטענים נעים).
2. השדה המגנטי מתגלה בפעולתו על זרם חשמל (על מטענים נעים).

### לולאה נושאת זרם בשדה מגנטי

ניתן לחקור את השדה המגנטי באמצעות לולאה קטנה כמסגרת תיל קטנה ושטוחה בעלת צורה כלשהי (ראו ציור 4). יש למקם את החוטים המחוברים את הלולאה עם מקור הזרם קרובים זה לזה או ללפפם יחדיו, ואז יתאפס כוח השדה החשמלי השקול של התילים, ולא ישפיע על מערכת הניסוי.

השדה המגנטי

כדי לראות כיצד פועל השדה על הלולאה, נבצע את הניסוי הבא:  
 נתלה מסגרת קטנה העשויה מכמה ליפופים של תיל והיכולה להסתובב בקלות.  
 במרחק הגדול בהרבה מן הממד האורכי של המסגרת נקבע תיל אנכי (ראו ציור 5  
 א). כאשר מעבירים זרם דרך התיל ודרך המסגרת, מסתובבת המסגרת ומתייצבת,  
 כך שהתיל נמצא במישור המסגרת (ראו ציור 5 ב). אם נשנה את מגמת הזרם  
 בתיל או בלולאה, תסתובב המסגרת ב- $180^\circ$ .

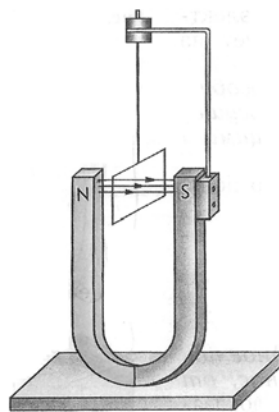


ציור 4

א

ציור 5

ב



ציור 6

ידוע לנו ששדה מגנטי נוצר לא רק על-ידי זרם  
 חשמל, אלא גם על-ידי מגנטים קבועים. אם נתלה  
 את הלולאה נושאת הזרם בין קטביו של מגנט,  
 היא תסתובב עד שמישור הלולאה יתייצב במאונך  
 לקו המחבר את קוטבי המגנט (ראו ציור 6).

אם כן, השדה המגנטי משפיע על כיוון  
 המישור של לולאה הנושאת זרם.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> כפי שמראה הניסוי, מתבצעת בשדה אחיד על הלולאה פעולת כיוון בלבד. בשדה שאינו  
 אחיד תנוע הלולאה ותימשך אל התיל נושא הזרם, או תידחה ממנו.

**השדה המגנטי**

---

מטענים נעים (זרם חשמל) יוצרים שדה מגנטי.  
השדה המגנטי מתגלה בפעולתו על זרם חשמל.

---

?

1. אילו פעולות גומלין מכונות מגנטיות? מנו את התכונות העיקריות של השדה המגנטי.

---

## §2 וקטור השדה המגנטי, קווי שדה

---

השדה החשמלי מתאפיין בעוצמתו, שהיא גודל וקטורי. נחוץ להגדיר גודל, המאפיין באופן כמותי את השדה המגנטי. הגדרה זו אינה פשוטה, מכיוון שפעולות מגנטיות מורכבות יותר מפעולות חשמליות. מאפיין השדה המגנטי מכונה **וקטור השדה המגנטי** ומסומן באות  $\vec{B}$ . נחקור את כיוונו של הוקטור  $\vec{B}$ .

---

### המחט המגנטי

למדנו מהניסוי שלולאה קטנה נושאת זרם, התלויה על חוטים דקים (שאינם מפעילים כוחות פיתול אלסטיים על הלולאה בעת סיבובה) והנמצאת בשדה מגנטי, מסתובבת עד שהיא מתייצבת במצב מסוים. כך גם סובבת המחט המגנטית במצפן, שהוא מגנט קטן ומוארך בעל שני קטבים: דרומי S וצפוני N.

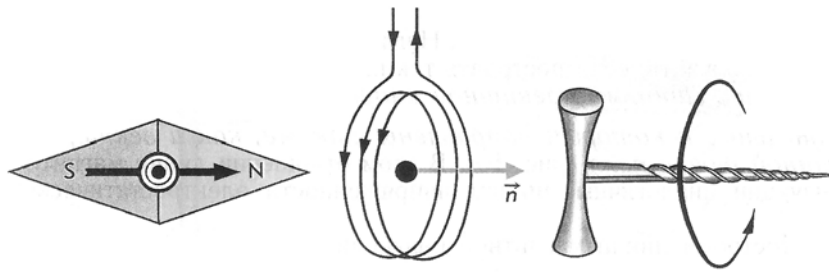
### כיוון וקטור השדה המגנטי

הודות להשפעת השדה המגנטי על סיבוב המחט המגנטית או על סיבובה של לולאה נושאת זרם בשדה המגנטי, ניתן לגלות את קו הכיוון של וקטור השדה המגנטי ואת מגמתו על קו כיוונו.

את מגמת וקטור השדה מגדירים מהקוטב הדרומי S לצפוני N של המחט המגנטית, המתייצבת באופן חופשי בשדה. כיוון השדה המגנטי, הנוצר בקרבת לולאה נושאת זרם, אנכי למישור הלולאה נושאת הזרם (ראו ציור 7).

מגמתו החיובית של וקטור אנכי זה הוא מגמת התקדמות בורג בעל הברגה ימנית, כאשר מסובבים אותו במגמת הזרם העובר במסגרת (ראו ציור 7).

השדה המגנטי

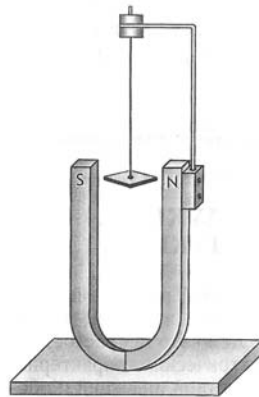


ציור 7

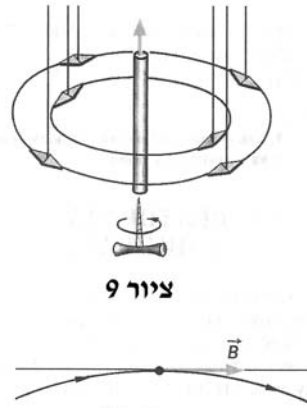
באמצעות לולאה נושאת זרם או באמצעות מחט מגנטית ניתן לגלות את כיוון וקטור השדה המגנטי ואת מגמתו בכל נקודה בשדה.

ציורים 8 ו-9 מתארים ניסויים באמצעות מחט מגנטית, הדומים לניסויים באמצעות לולאה נושאת זרם (ראו ציורים 5-6).

בשדה מגנטי של תיל ישר נושא זרם מתייצבת המחט המגנטית בכל נקודת שדה בכיוון המשיק למעגל (ראו ציור 9). מישור המעגל מאונך לתיל, העובר דרך מרכז המעגל. את מגמת וקטור השדה המגנטי מגלים בעזרת כלל הבורג: אם הבורג מתקדם במגמת הזרם במוליך, מראה מגמת הסיבוב של ידית הבורג את מגמת וקטור השדה המגנטי.



ציור 8



ציור 9

ציור 10

כל מי שמשותף בניווט לילי בסיוע מצפן מבצע ניסוי לגילוי הכיוון והמגמה של וקטור השדה המגנטי של כדור הארץ.

## השדה המגנטי

## קווי שדה מגנטי

כדי לקבל תמונה, הממחישה את השדה המגנטי, נשרטט מפה של קווי שדה מגנטי. קו שדה מגנטי הוא עקום, שבכל נקודותיו משיק לו הווקטור  $\vec{B}$  (ראו ציור 10). מבחינה זו דומים קווי השדה המגנטי לקווי השדה האלקטרוסטטי.

נשרטט את קווי השדה המגנטי של תיל ישר נושא זרם. מהניסויים המתוארים לעיל נובע, שקווי השדה המגנטי הם מעגלים בעלי מרכז משותף, הנמצאים במישור המאונך לתיל (ראו ציור 11), ומרכז המעגלים נמצא על ציר המוליך. החצים שעל הקווים מורים את מגמתו של וקטור השדה המגנטי, המשיק לקו השדה.

נתאר את מפת קווי השדה המגנטי של סילונית ישרה נושאת זרם. את מפת קווי השדה המגנטי, ששורטטה בסיוע מחט מגנטית או לולאות קטנות נושאות זרם, ניתן לראות בציור 12 (בחתך של הסילונית). אם אורך הסילונית גדול בהרבה מקוטרה, יהיה השדה המגנטי שבתוכה אחיד, וקווי השדה שבתוכה יהיו מקבילים זה לזה.

את מפת קווי השדה ניתן להמחיש באמצעות שבבי ברזל זעירים, כי כל שבב ברזל בשדה מגנטי מתנהג כמחט מגנטית קטנה. מספר רב של מחטים כאלה מאפשר לגלות את הכיוון (אך לא את המגמה) של השדה בנקודות רבות במישור, ולהבחין טוב יותר במהלך קווי השדה. כמה מפות של שדות מגנטיים נראות בציורים 13–16.

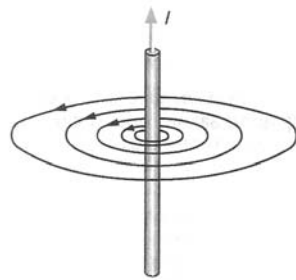
## שדה מערבולת

**לקווי שדה מגנטי תכונה חשובה: אין להם לא התחלה ולא סוף; קווי השדה הם קווים סגורים.**

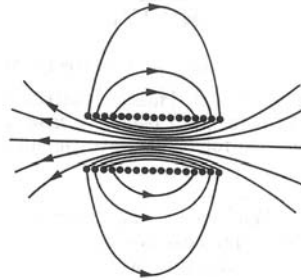
בשדה האלקטרוסטטי מוצאם של קווי השדה במטען החיובי, וסיומם במטען השלילי.

שדות בעלי קווי שדה סגורים מכונים **שדות מערבולת**. השדה המגנטי הוא שדה מערבולת.

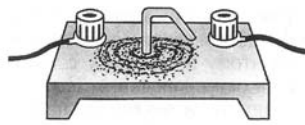
קווי השדה המגנטי הסגורים מהווים תכונה בסיסית של השדה המגנטי. תכונה זו היא תולדה של העובדה, שלשדה מגנטי אין מקורות: לא קיימים בטבע מטענים מגנטיים הדומים למטענים חשמליים.



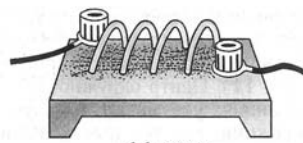
ציור 11



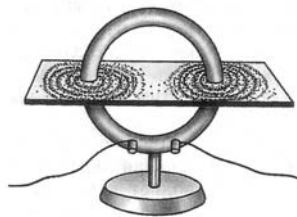
ציור 12



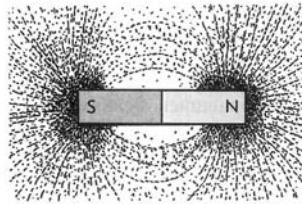
ציור 13



ציור 14



ציור 15



ציור 16

בסעיף זה למדנו כיצד לקשור לכל נקודה בשדה המגנטי כיוון ומגמה, שהם למעשה אלה של וקטור השדה המגנטי. בכיוון ובמגמה אלה מתייצבת מחט מגנטית או האנך למישור של לולאה קטנה נושאת זרם. למדנו שלשדה המגנטי אין מקורות; לא קיימים מטענים מגנטיים.

?

1. כיצד נעות לולאה סגורה נושאת זרם ומחט מגנטית בשדה מגנטי אחיד?
2. מנו שיטות לגילוי כיוונו ומגמתו של וקטור השדה המגנטי.
3. מהם קווי שדה מגנטי?
4. אילו שדות מכונים שדות מערבולת?

השדה המגנטי

### §3 ערכו של וקטור השדה המגנטי, כוח אמפר

עד כה למדנו למצוא את כיוונו ומגמתו של וקטור השדה המגנטי; אך יש לדעת כיצד לחשב את הגודל B של השדה כדי לנסח חוק, המגדיר את הכוח הפועל על מוליך נושא זרם בשדה מגנטי.

שדה מגנטי פועל על כל חלקיו של מוליך נושא זרם. ידיעת הכוח, הפועל על כל קטע קטן של המוליך, מאפשרת לחשב את הכוח הפועל על כל המוליך. החוק, המגדיר את הכוח הפועל על קטע קטן של המוליך (על זרם אלמנטרי או על רכיב שזרם זורם בו), נתגלה בשנת 1820 על-ידי **אנדרה-מרי אמפר**<sup>1</sup>. מכיוון שלא ניתן ליצור זרם אלמנטרי מבודד, ביצע **אמפר** ניסויים עם מוליכים סגורים. בשינוי צורתם ומקומם של המוליכים הסגורים הצליח לגלות את הביטוי לכוח, הפועל על רכיב זרם בודד.

**אנדרה-מרי אמפר (1775–1836)**



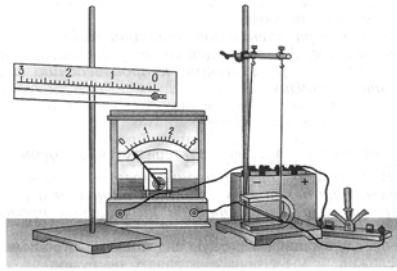
פיזיקאי ומתמטיקאי צרפתי, מאבות האלקטרודינמיקה. **אמפר** הציג לראשונה את המושג **זרם חשמל**, ופיתח את תורת המגנטיות, המבוססת על הנחת הזרמים המולקולריים. הוא גילה את הפעולות המכניות שבין זרמים חשמליים, וקבע את החוקים הכמותיים העוסקים בגודל הכוחות שביניהם. **מקסוול** כינה את אמפר "ניוטון של החשמל". **אמפר** שלח ידו גם למחקרים בתחומי המכניקה, תורת ההסתברות והאנליזה המתמטית.

<sup>1</sup> ליתר דיוק: **אמפר** ניסח חוק עבור כוח, הפועל בין שני קטעים קטנים של מוליכים נושאי זרם. הוא תמך בתורת הפעולה מרחוק, ולא השתמש במושג השדה; אך בהתאם למסורת וכאות הוקרה למדען הדגול מכונה הביטוי לכוח המגנטי, הפועל על מוליך נושא זרם בשדה מגנטי, **חוק אמפר**.



### גודל וקטור השדה המגנטי

נבדוק באופן ניסויי במה תלוי הכוח, הפועל על מוליך נושא זרם בשדה מגנטי. כד נוכל להגדיר את ערכו של וקטור השדה המגנטי, ולאחר מכן למצוא את **כוח אמפר**. את הפעולה של השדה המגנטי על מוליך נושא זרם נלמד באמצעות המערכת המתוארת בציור 17.



ציור 17

המוליך תלוי חופשי ואופקית בין קוטבי מגנט קבוע, שצורתו כצורת פרסה. השדה המגנטי מתרכז וכלוא בין הקטבים, ולכן הכוח המגנטי פועל למעשה רק על קטע  $\Delta l$  של המוליך הנמצא בין הקטבים. הכוח נמדד בעזרת דינמומטר רגיש, הקשור למוליך באמצעות שני מוטות (אינם נראים בציור).

עוד נלמד שהכוח, שמפעיל השדה המגנטי על המוליך נושא הזרם, מכיוון אופקית ובניצב למוליך ולקווי השדה המגנטי.

כאשר נגדיל את עוצמת הזרם פי 2, ניווכח שהכוח הפועל על המוליך גדל גם הוא פי 2. אם נוסיף לצד המגנט הקיים מגנט זהה, נגדיל פי 2 את גודל האזור שבו קיים השדה המגנטי, וכך נאריך פי 2 את קטע המוליך, שעליו פועל השדה – ניווכח שוב שהכוח יגדל פי 2. כוח זה **כוח אמפר** הוא, ותלוי גם בזווית שבין הווקטור  $\vec{B}$  לבין כיוון המוליך. אפשר להוכיח זאת על-ידי שינוי שיפוע התומך, שבו מותקנים המגנטים, וכך תשתנה הזווית בין המוליך לבין קווי השדה. **כוח אמפר יגיע לערכו המרבי  $\vec{F}_m$ , כאשר כיוון השדה המגנטי יהיה ניצב לכיוון המוליך.**

אם כן, הכוח המרבי, הפועל על קטע של מוליך נושא זרם באורך  $\Delta l$ , נמצא ביחס ישר למכפלת עוצמת הזרם  $I$  באורך הקטע  $\Delta l$ :  $F_m \sim I \Delta l$ .

מעובדה ניסויית זו נגלה את גודלו של וקטור השדה המגנטי.

מאחר ש-  $F_m \sim I \Delta l$ , היחס  $\frac{F_m}{I \Delta l}$  אינו תלוי בעוצמת הזרם, גם לא באורך הקטע של המוליך.



כך ניתן להשתמש ביחס זה כמאפיין של השדה המגנטי במקום שבו נמצא הקטע המוליך.<sup>1</sup>

גודל וקטור השדה המגנטי הוא היחס שבין הכוח המרבי שפועל מצדו של השדה המגנטי על קטע מוליך הנושא זרם, ללבין מכפלת עוצמת הזרם לאורך הקטע:

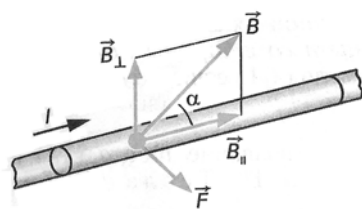
$$(1.1) \quad B = \frac{F_m}{I\Delta l}$$

שדה מגנטי מתאפיין במלואו על-ידי וקטור השדה המגנטי  $\vec{B}$ . בכל נקודה בשדה ניתן לגלות את כיוונו של וקטור השדה המגנטי, את מגמתו ואת שיעור גודלו, אם מודדים את הכוח הפועל על קטע של מוליך נושא זרם. החוק, המגדיר את השדה המגנטי של זרם אלמנטרי, הוא מורכב, ולפיכך לא נלמד אותו כעת.

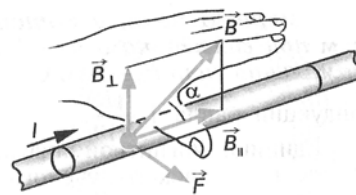
#### שיעור גודלו של כוח אמפר

נניח שווקטור השדה המגנטי  $\vec{B}$  יוצר זווית  $\alpha$  עם כיוון קטע מוליך נושא זרם (ראו ציור 18). כיוון קטע הזרם הוא הכיוון, שבו זורם הזרם במוליך. הניסיון מלמד ששדה מגנטי, שווקטור השדה מכווון בו לאורך המוליך נושא הזרם, אינו משפיע על הזרם. לכן גודלו של הכוח תלוי בגודל הרכיב של וקטור  $\vec{B}$  הניצב למוליך, כלומר, בערך  $B_{\perp} = B \sin \alpha$ , ואינו תלוי ברכיב  $B_{\parallel}$ , המכוון לאורך המוליך. בהתאם ל-(1.1) שווה כוח אמפר המרבי:

$$F_m = I\Delta l B$$



ציור 18



ציור 19

<sup>1</sup> בדומה למסקנה זו, היחס שבין הכוח, הפועל על המטען מצדו של שדה חשמלי, לבין גודלו של המטען אינו תלוי בגודל המטען, ולכן מאפיין הוא את השדה החשמלי בנקודת המרחב הנתונה.

השדה המגנטי

זאת – עבור הזווית  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ . עבור זווית  $\alpha$  כללית הכוח אינו פרופורציונלי ל- $\vec{B}$ , אלא לרכיב  $B_{\perp} = B \sin \alpha$ . לכן הביטוי לגודל הכוח  $F$ , הפועל על קטע קטן של מוליך  $\Delta l$  בשדה מגנטי  $\vec{B}$ , היוצר זווית  $\alpha$  עם קטע המוליך שבו זורם זרם  $I$ , הוא:

$$(1.2) \quad F = B |I| \Delta l \sin \alpha$$

ביטוי זה מכונה **חוק אמפר**.

**כוח אמפר שווה למכפלת וקטור השדה המגנטי בעוצמת הזרם, באורך קטע הזרם ובסינוס הזווית שבין כיוון השדה המגנטי לבין כיוון קטע המוליך.**

#### מגמתו של כוח אמפר

בניסוי המתואר לעיל היה וקטור  $\vec{F}$  ניצב לקטע הזרם ולווקטור  $\vec{B}$ . כיוונו מוגדר לפי הכלל המכונה "כלל יד שמאל": אם נמקם את כף יד שמאל כך, שהרכיב הניצב של השדה המגנטי מכווון לכף היד, וארבע האצבעות מכוונות בכיוון הזרם, תצביע הבהוה, המתוחה הצידה ב- $90^\circ$ , בכיוון הכוח הפועל על הקטע (ראו ציור 19).

#### יחידת השדה המגנטי

הגדרנו גודל חדש: עוצמת השדה המגנטי. עתה יש להגדיר עבורו את היחידה. יחידת עוצמת השדה המגנטי נקבעה כשיעורה של עוצמת שדה מגנטי הפועלת על קטע מוליך שאורכו 1 מטר, ושעוצמת הזרם העובר דרכו היא 1 אמפר, בכוח מרבי ששיעורו 1 ניוטון. בהתאם לנוסחה (1.1) יחידת עוצמת השדה המגנטי היא:

$$1 \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}}$$

יחידה פיזיקלית זו מכונה **טסלה (T)** על שמו של המדען היוגוסלבי **ניקולא טסלה (1856–1943)**.

בהתבסס על מדידת הכוח, הפועל בשדה מגנטי על קטע של מוליך נושא זרם, הגדרנו את שיעור גודלו של וקטור השדה המגנטי. לאחר מכן ניסחנו את חוק אמפר עבור הכוח הפועל על קטע מוליך נושא זרם, הנמצא בשדה מגנטי.

### השדה המגנטי

?

1. כיצד נגדיר את שיעור גודלו של וקטור השדה המגנטי?
2. מהו ערכו של גודל הווקטור של כוח אמפר?
3. נסחו את הכלל לגילוי הכיוון והמגמה של כוח אמפר.
4. באילו יחידות פיזיקליות מבוטאת עוצמת השדה המגנטי?

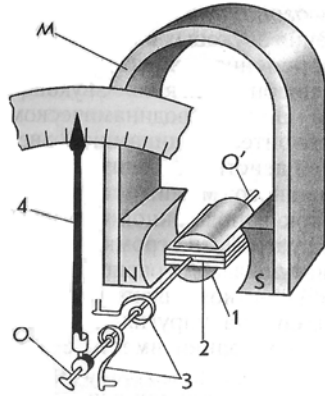
#### §4 מכשירי מדידה חשמליים

השימוש במכשירי מדידה מגנטו-אלקטריים – אמפרמטרים ו-וולטמטרים – מתבסס על ההשפעה של השדה המגנטי על סליל סגור הנושא זרם (סעיף 2).

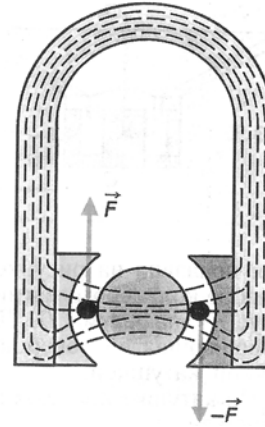
מכשיר מדידה אלקטרו-מגנטי בנוי כך (ראו ציור 20): על מסגרת מלבנית קלה, העשויה מאלומיניום (2), מורכב מחוג (4), וסליל כרוך סביבה. המסגרת מוחזקת בשני חלקי צירים 'OO'. במצב של שיווי-משקל מחזיקים אותה שני קפיצים ספירליים דקים (3).

המומנטים האלסטיים, הפועלים מצדם של הקפיצים, מייצבים את המסגרת במצב שיווי-משקל, ושיעור המומנט שהם מפעילים על המסגרת פרופורציונלי לזווית הסיבוב של המחוג ממצב שיווי-משקלו. הסליל נמצא בין קוטבי מגנט קבוע, שצורתו מיוחדת כנראה בציור. בתוך המסגרת והסליל נמצאת ליבה גלילית (1) מברזל רך. מבנה כזה מבטיח כיוון רדיאלי של קווי השדה המגנטי באזור שבו נמצא הסליל (ראו ציור 21).

כתוצאה מכך אף בסטיית המחוג יהיו הכוחות, הפועלים על הסליל מצדו של השדה המגנטי, מרביים, וגודלם יהיה קבוע עבור זרם שאינו משתנה. הווקטורים  $\vec{F}$  ו-  $-\vec{F}$  הם כוחות אלה; מקורם בשדה המגנטי, והם מפעילים מומנט כדי לשוב את הסליל. הסליל מסתובב עד שהכוחות האלסטיים, שמקורם בקפיצים, מפעילים מומנט, המאזן את המומנט שמפעילים הכוחות שמקורם בשדה המגנטי. אם נגדיל את עוצמת הזרם פי 2, ניווכח שהמחוג יסתובב לזווית הגדולה פי 2, משום שהכוחות הפועלים על הסליל מצדו של השדה המגנטי פרופורציונליים לעוצמת הזרם:  $F_m \sim I$ .



ציור 20



ציור 21

הודות לעובדה זו ניתן למדוד את עוצמת הזרם על-פי זווית הסיבוב של הסליל, אך קודם לכן יש לכייל את המכשיר: יש לקבוע אילו זוויות סיבוב של המחוג מתאימות לערכי זרם ידועים.

מכשיר דומה עשוי למדוד מתח, אך יש לכיילו כך שזווית סיבוב המחוג תתאים לערכי המתח הידועים. עם זאת יש לזכור, שהתנגדות הוולטמטר גדולה בהרבה מהתנגדות האמפרמטר.

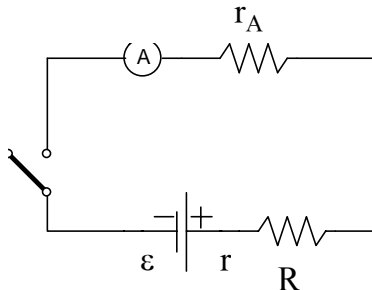
מומלץ מאוד להתבונן בקרביים של המכשיר ולזהות את רכיביו המתוארים כאן.

?

1. אילו הם המומנטים, המתאזנים בתום סטיית המחוג של מכשיר מדידה אלקטרומגנטי?
2. מדוע הכוחות המגנטיים, הפועלים על תילי הסליל של המכשיר, אינם תלויים בזווית הסטייה של הסליל?
3. במה שונה הוולטמטר מהאמפרמטר?

מכשירי מדידה

#### § 4 מכשירי מדידה, הרחבת תחום המדידה



כדי למדוד זרם במקטע של מעגל, מחברים למקטע זה מכשיר למדידת זרם בטור: אמפרמטר. עוצמת הזרם במעגל פשוט, הכולל מקור זרם בעל כ"מ  $\varepsilon$  ונגד חיצוני  $R$ , שווה ל:

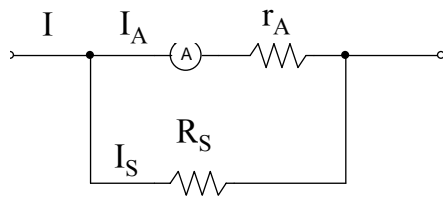
$$I = \frac{\varepsilon}{R+r}$$

כאשר:  $r$  – ההתנגדות הפנימית של המקור. אבל כאשר מחברים את האמפרמטר, עוצמת הזרם העובר במעגל משתנה:

$$I_A = \frac{\varepsilon}{R + r + r_A}$$

מהשוואת שני הביטויים לעוצמת הזרם במעגל הטורי ברור ששיאת המדידה תהיה קטנה ביותר, כאשר ההתנגדות הפנימית של האמפרמטר תהיה קטנה מאוד בהשוואה להתנגדות החיצונית של המעגל.

ניח שבעזרת אמפרמטר נתון, בעל התנגדות פנימית  $r_A$ , אפשר למדוד זרם מרבי  $I_A$  (עוצמת זרם גדולה יותר תשרוף את סליל האמפרמטר). האם אפשר לעשות שימוש באמפרמטר זה כדי למדוד זרמים גדולים יותר? מסתבר שאפשר – אם נחבר למכשיר נגד נוסף  $R_S$ , במקביל, המכונה **שאנט** (מהמילה האנגלית shunt – פיצול).



נמצא מה צריכה להיות התנגדותו של הנגד הנוסף  $R_S$ , כדי שהזרם הנמדד יוכל להיות גדול מהזרם המקסימלי  $I_A$ . לפי חוקי קירכהוף נקבל:

$$I = I_A + I_S$$

$$I_A r_A = I_S R_S$$

מכאן נחלץ את הזרם הנמדד  $I$ :

$$I = I_A \frac{R_S + r_A}{R_S} = I_A \left( 1 + \frac{r_A}{R_S} \right)$$

מכשירי מדידה

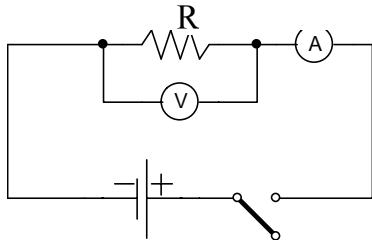
כלומר: ניתן למדוד זרם, שעוצמתו גדולה מהזרם המרבי היכול לעבור דרך האמפרמטר. הוא מוגדר בתלות בהתנגדות הפנימית של האמפרמטר ובתלות בהתנגדות הנגד הנוסף (השאנט), שאותה ניתן לחשב על-פי הנוסחה:

$$R_S = r_A \cdot \frac{I_A}{I - I_A}$$

כך, לדוגמה, אם באמצעות אמפרמטר, המיועד למדידת זרמים עד 10 A, יש צורך למדוד זרם עד 100 A, יש להשתמש בנגד בעל ההתנגדות של:

$$R_S = r_A \cdot \frac{10}{100 - 10} = \frac{1}{9} r_A$$

מאחר שההתנגדות הפנימית של האמפרמטר צריכה להיות קטנה, ברור הקושי בשימוש בנגדים נוספים: התנגדותם צריכה להיות קטנה עוד יותר מההתנגדות הפנימית של האמפרמטר עצמו – ועם זאת יש לחשב את ערכה במדויק.

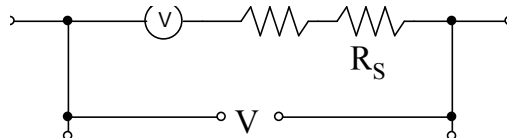


כדי למדוד מתח משתמשים בוולטמטר, המחובר במקביל למקטע המעגל, שבין קצותיו יש למדוד את הפרש הפוטנציאלים.

ההתנגדות הפנימית של הוולטמטר צריכה להיות גבוהה, כדי שהזרם שיעבור דרכו יהיה

קטן בהשוואה לזרם שעובר דרך הנגד R, שבין קצותיו יש למדוד את הפרש הפוטנציאלים:  $R \ll r_V$ .

בדומה לשימוש בשאנט באמפרמטר אפשר להרחיב את תחום המדידה של הוולטמטר באמצעות הוספת נגד נוסף **בטור**. נניח שבאמצעות וולטמטר בעל התנגדות פנימית  $r_V$ , המיועד למדידת מתח מרבי  $V_0$  – השווה למכפלת הזרם המרבי  $I_0$  בהתנגדות הפנימית  $r_V$ :  $V_0 = I_0 \cdot r_V$  – יש למדוד מתח גבוה יותר. מחברים לוולטמטר נגד נוסף **בטור** בעל התנגדות  $R_S$ :



מכשירי מדידה

אם צריך למדוד מתח  $V_0 < V$ , יש אפוא להשתמש בנגד הנוסף, ואת התנגדותו

$$V = (r_v + R) \cdot I_0$$

מחלצים את  $R$  :

$$R = \frac{V}{I_0} - r_v = \frac{V}{V_0} r_v - r_v = r_v \cdot \left( \frac{V}{V_0} - 1 \right)$$

בצורה זו אפשר להרחיב באופן משמעותי את תחום המדידה, המוגבל על-ידי גודל הזרם המרבי דרך המכשיר.

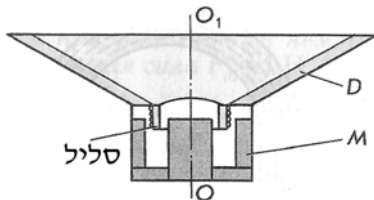
### §5 שימוש בחוק אמפר, רמקול

אם ידועים הכיוון והגודל של הכוח, הפועל על כל קטע של מוליך נושא זרם בשדה מגנטי, ניתן לחשב את הכוח, הפועל על המוליך הסגור כולו במציאת שקול הכוחות, הפועלים על כל אורכו של הקטע המוליך.

נעזרים בחוק אמפר לחישוב הכוחות, הפועלים על מוליכים נושאי זרם בשדה מגנטי. מוליכים כאלה נמצאים במכשירים אלקטרוניים רבים, ובפרט במנועי חשמל. עתה נבחן כיצד בנוי ופועל רמקול.

רמקול משמש ליצירת גלי קול בהשפעת זרם חשמלי משתנה (זרם חלופין) בתדר של גלי הקול. בבניית רמקול אלקטרודינמי מיושמת השפעת השדה המגנטי של מגנט קבוע על זרם משתנה בסליל נייד.

המבנה הסכמטי של הרמקול מתואר בציור 22. הסליל הקולי (1) נמצא במרווח בתוך מגנט טבעתי  $M$ . לסליל קשור חרוט קטום העשוי מנייר עבה – הדיאפרגמה  $D$ . הדיאפרגמה מותקנת על תומכים אלסטיים, המאפשרים לה לרטוט עם הסליל הנייד.



ציור 22

דרך הסליל עובר זרם, המשתנה בתדר גלי הקול. מקורו של זרם זה ממיקרופון או ממקלט הרדיו או מכל מכשיר אחר, הממיר גלים, שמקורם בגלי קול, לזרמים חשמליים.

בהשפעת כוח אמפר רוטט הסליל לאורך

רמקול



ציר הרמקול  $OO_1$  (ראו ציור 22) בהתאם לרטט תנודות הזרם. התנודות מועברות לדיאפראגמה, והמשטח הקוני שלה יוצר גלי קול.

רמקולים איכותיים משחזרים ללא עיוותים משמעותיים גלי קול בתחום התדרים בין 40 ל-15,000 הרץ; אך מכיוון שמערכות כאלה מורכבות מאוד, נהוג להשתמש במערכות המורכבות מכמה רמקולים, שכל אחד מהם יוצר קול בתחום תדרים משלו.

החיסרון הכללי של כל הרמקולים הוא נצילותם הנמוכה: הם פולטים בין 1% ל-3% מכלל האנרגיה הנכנסת לרמקול.

הקול, הבוקע ממקלט הרדיו ומכל מכשיר המשמיע קול, נוצר בשל הרטט של סליל נושא זרם, הנמצא בשדה של מגנט קבוע.

?

1. ציינו את כיווני וקטור השדה המגנטי, הזרם החשמלי וכוח אמפר בסכמה של רמקול.

### §6 פעולת השדה המגנטי על מטען נע, כוח לורנץ

זרם החשמל הוא אוסף של חלקיקים טעונים, הנעים באופן מסודר. השפעת השדה המגנטי על מוליך נושא זרם היא תולדה של פעולת השדה המגנטי על חלקיקים טעונים, הנעים בתוך המוליך. נמצא את הכוח הפועל על חלקיק טעון אחד.

הכוח, הפועל על חלקיק טעון הנע בשדה מגנטי, מכונה **כוח לורנץ** – לכבודו של הפיזיקאי ההולנדי **הנדריק לורנץ** (1853–1928), אבי התורה האלקטרונית של מבנה החומר. את הכוח הזה ניתן למצוא באמצעות חוק אמפר.

גודלו של **כוח לורנץ** שווה ליחס בין הכוח, הפועל על קטע מוליך שאורכו  $\Delta l$ , לבין מספר החלקיקים הטעונים  $N$ , הנעים באופן מסודר בקטע זה של המוליך:

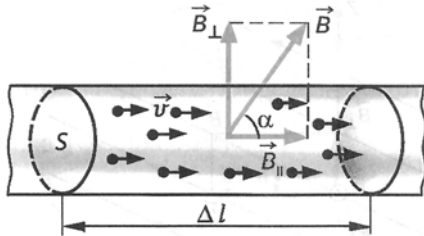
$$F_L = \frac{F}{N}$$

נתבונן בקטע של מוליך דק, ישר ונושא זרם (ראו ציור 23).

יהיו אורך הקטע  $\Delta l$  ושטח חתך המוליך  $S$  קטנים מאוד, כך שווקטור השדה



המגנטי  $\vec{B}$  אינו משתנה בין גבולות קטע זה. עוצמת הזרם  $I$  במוליך תלויה במטען



ציור 23

החלקיקים  $q$ , בריכוז החלקיקים הטעונים (מספר המטענים ביחידת נפח) ובמהירות תנועתם המסודרת  $v$ , והיא מוגדרת על-ידי הנוסחה הבאה:

$$(1.4) \quad I = qnvS$$

גודל הכוח, הפועל על קטע הזרם הנבחר בשדה המגנטי, הוא:

$$F = |I| \Delta l B \sin \alpha$$

נציב כאן את הביטוי (1.4) לעוצמת הזרם:

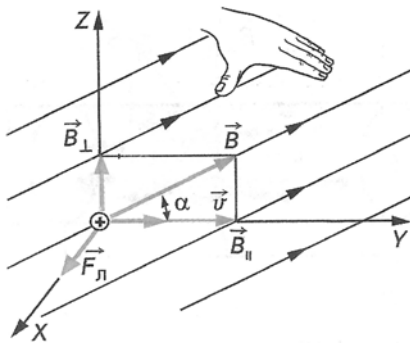
$$F = |q| nvS \Delta l B \sin \alpha = v|q|NB \sin \alpha$$

כאשר:  $N = nS \Delta l$  – מספר החלקיקים הטעונים בנפח הנתון.

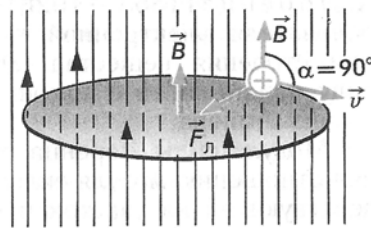
לכן על כל מטען, הנע בשדה מגנטי, פועל כוח לורנץ השווה:

$$(1.5) \quad F_L = \frac{F}{N} = |q| v B \sin \alpha$$

כאשר:  $\alpha$  – הזווית בין וקטור מהירות המטענים לבין וקטור השדה. כוח לורנץ ניצב לווקטורים  $\vec{B}$  ו- $\vec{v}$ , וכיוונו ומגמתו מוגדרים על-ידי "כלל יד שמאל" – הכלל הקובע את כיוונו של כוח אמפר: אם כף יד שמאל מוחזקת כך שרכיב וקטור השדה  $\vec{B}$ , הניצב למהירות המטען, מכווון אל תוך כף היד, וארבע האצבעות מצביעות למגמת התנועה של מטען חיובי (כנגד מגמת התנועה של מטען שלילי), תראה הבוהן המתוחה הצידה ב- $90^\circ$  את כיוון כוח לורנץ  $\vec{F}_L$  הפועל על המטען (ראו ציור 24).



ציור 24



ציור 25

## כוח לורנץ

אם גם שדה חשמלי פועל על המטען  $q$  בכוח  $\vec{F}_E = q\vec{E}$ , הרי בנוכחות שני שדות – שדה חשמלי ושדה מגנטי – הכוח השקול, הפועל על המטען, שווה:

$$\vec{F} = \vec{F}_E + \vec{F}_L$$

**מכיוון שכוח לורנץ מכוון בניצב למהירות החלקיק, אין הוא מבצע עבודה. על-פי משפט האנרגיה הקינטית (ראו ספר פיזיקה 10), אין כוח לורנץ משפיע על מידת האנרגיה הקינטית האצורה בחלקיק, ולכן גם לא על גודלו של וקטור המהירות. בהשפעת כוח לורנץ משתנה רק הכיוון של וקטור המהירות החלקיק.**

#### גילוי תופעת כוח לורנץ

ניתן לגלות את השפעת כוח לורנץ על אלקטרונים נעים, אם נקרב אלקטרומגנט (או מגנט קבוע) אל מסך הטלוויזיה. בהשפעת שינוי הזרם באלקטרומגנט ניתן לראות כיצד סוטה אלומת האלקטרונים (עיוותים על המסך), וכי הסטייה גדלה ככל שגדלה עוצמת השדה המגנטי. כאשר משנים את מגמת הזרם באלקטרומגנט, משנה העיוות את מגמתו.

ניתן לגלות את תלותו של **כוח לורנץ** בזווית  $\alpha$  שבין הווקטורים  $\vec{B}$  ו- $\vec{v}$ , במידת הסטייה המשתנה של אלומת האלקטרונים על מסך הטלוויזיה, כאשר משנים את הזווית בין ציר המגנט לציר השפופרת.

#### תנועה של חלקיק טעון בשדה מגנטי אחיד

נסתכל בתנועת חלקיק בעל מטען  $q$  בשדה מגנטי אחיד  $\vec{B}$ . וקטור השדה המגנטי מכוון בניצב למהירות ההתחלתית  $\vec{v}$  של החלקיק (ראו ציור 25). כוח לורנץ תלוי במטען החלקיק, בגודל מהירות החלקיק ובעוצמת השדה המגנטי. מכיוון שהשדה המגנטי אינו משנה את גודל מהירותו של החלקיק הנע, גם גודלו של כוח לורנץ אינו משתנה. כוח זה מאונך למהירות, ולכן הוא הקובע את שיעור התאוצה הצנטריפטלית של החלקיק. אם לחלקיק מהירות קבועה בגודלה ותאוצה צנטריפטלית שאינה משתנה בגודלה, הוא נע במעגל בתנועה קבועה. נמצא את רדיוס המעגל  $r$ .

על-פי החוק השני של ניוטון נקבל (ראו ציור 25):

$$\frac{mv^2}{r} = |q|vB$$

