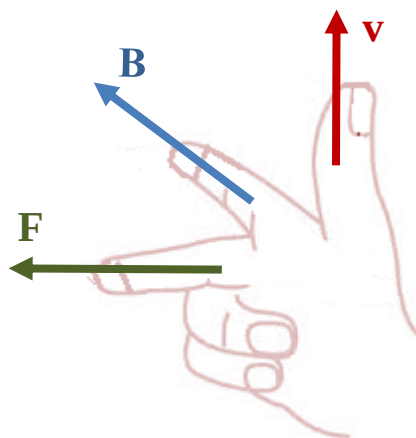


מגנטיות

כוח על חלקיק בשדה מגנטי



◀ "חוק לורנץ": מציאת גודל הכוח הפועל על מטענים הנעים בתוך שדה מגנטי.

◀ כלל היד הימנית: קביעת כיוון הכוח הפועל על מטענים הנעים בתוך שדה מגנטי.

◀ השדה המגנטי ויחידותיו.

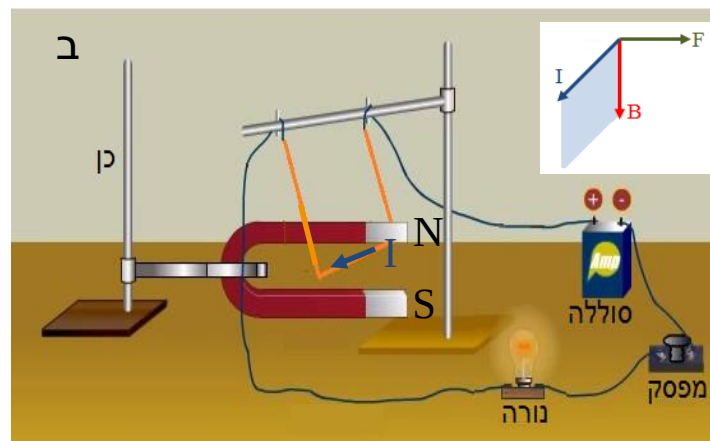
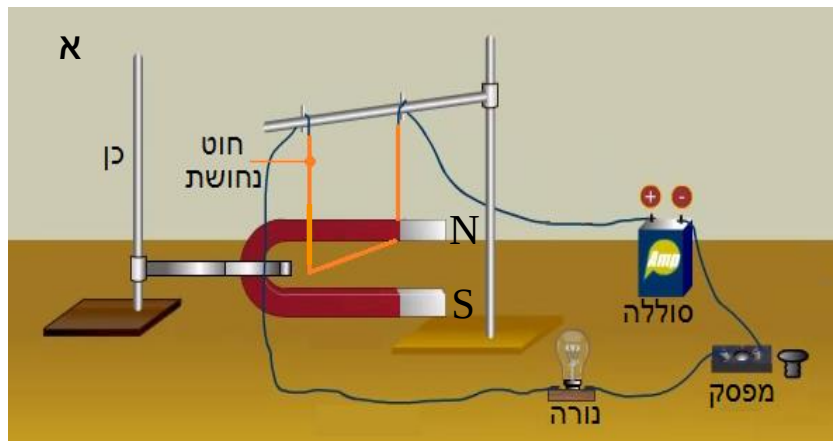
◀ השוואה בין הכוח המגנטי על מטען לכוח החשמלי.

◀ מסלול התנועה של מטען הנע בזווית לקווי השדה המגנטי.

תזכורת – כוח על תיל מוזרם בשדה מגנטי

בסרטון ראינו ששדה מגנטי משפיע על תיל שזורם בו זרם חשמלי.

כאשר מציבים תיל שלא זורם בו זרם בין שני קטביו של מגנט פרסה, החוט נשאר באותו המצב. (תרשים א)



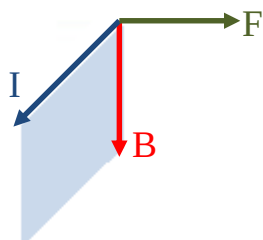
כאשר סוגרים את המפסק זורם זרם דרך החלק התחתון של תיל הנחושת בכיוון החוצה מהמסך.

במצב זה בו כיוון השדה המגנטי הוא כלפי מטה פועל על התיל כוח בכיוון ימינה. (תרשים ב)

מסקנה:

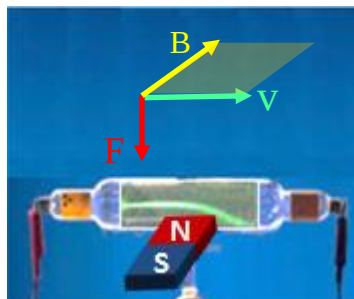
על תיל נושא זרם בתוך שדה מגנטי פועל כוח

הניצב למישור הנוצר על ידי כיוון הזרם וכיוון השדה המגנטי.

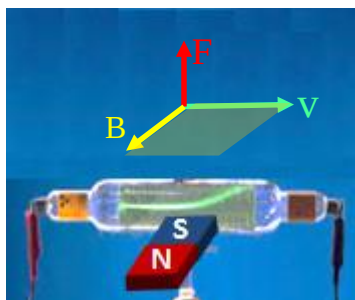


אם הזרם דרך תיל הנחושת הופך כיוון (פנימה אל תוך המסך), על התיל יפעל כוח בכיוון שמאלה.

תזכורת – כוח הפועל על חלקיק טעון בשדה מגנטי



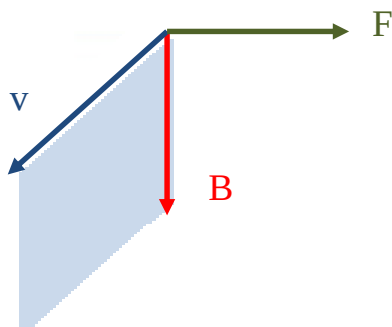
כמו כן, צפינו בניסוי עם השפופרת הקתודית שכאשר פועל שדה מגנטי פנימה אל תוך המסך בניצב לכיוון תנועת אלומת האלקטרונים, האלומה סוטה לכיוון מטה, בכיוון שניצב למישור המוגדר על ידי הכיוון המקורי של תנועת האלקטרונים ולכיוון השדה המגנטי.



כשנהפוך את המגנט ב- 180° , כך שקווי השדה המגנטי היוצאים ממנו הם החוצה מהמסך בניצב לכיוון תנועת אלומת האלקטרונים, האלומה סוטה לכיוון מעלה, גם כן בכיוון שניצב למישור המוגדר על ידי הכיוון המקורי של תנועת האלקטרונים ולכיוון השדה המגנטי.

מסקנה:

על מטענים הנעים (זרם חשמלי) בתוך שדה מגנטי פועל כוח הניצב למישור שנוצר על ידי כיוון תנועת המטענים וכיוון השדה המגנטי.



עוצמת הכוח המגנטי הפועל על חלקיק בתנועה – "כוח לורנץ"

בניסויי ההדגמה ראינו שהשדה המגנטי מפעיל כוח על תיל נושא זרם. זרם הוא מטענים בתנועה לכן חשוב לדעת את חוקיות הכוח המגנטי הפועל על מטען בתנועה.

מניסויים בהם מודדים את הכוח המגנטי F הפועל על חלקיק טעון הנע במהירות v בניצב לכיוון השדה המגנטי שעוצמתו B , מתקבל:

1. קיים יחס ישר בין גודלו של הכוח המגנטי לגודלו של המטען, $F \propto q$.
2. קיים יחס ישר בין גודלו של הכוח המגנטי לגודלו של השדה המגנטי, $F \propto B$.
3. קיים יחס ישר בין גודל הכוח המגנטי לגודל המהירות הכוח, $F \propto v$.
4. על מטען חשמלי הנמצא במנוחה בתוך שדה מגנטי לא פועל כוח מגנטי.

$$F = qvB$$

מסקנות אלו מוצאות את ביטוי המתמטי בנוסחה:

לכוח שמפעיל השדה המגנטי על חלקיקים טעונים קוראים "**כוח לורנץ**".

$$B = \frac{F}{q \cdot v}$$

היחס $\frac{F}{q \cdot v}$ מגדיר למעשה את עוצמת השדה המגנטי B :

הביטוי של כוח לורנץ מאפשר לנו להגדיר יחידת מידה לעוצמת השדה המגנטי:

$$[B] = \frac{[F]}{[q][v]} = \frac{N}{C \cdot \frac{m}{s}} \equiv T$$

ליחידה זו נקרא "טסלה" (Tesla) ונסמן אותה ב-T.

1[T] הוא שדה המפעיל כוח של 1[N] על חלקיק שמטענו 1[C]

כשהחלקיק נע במהירות של 1[m/s] בכיוון ניצב לשדה

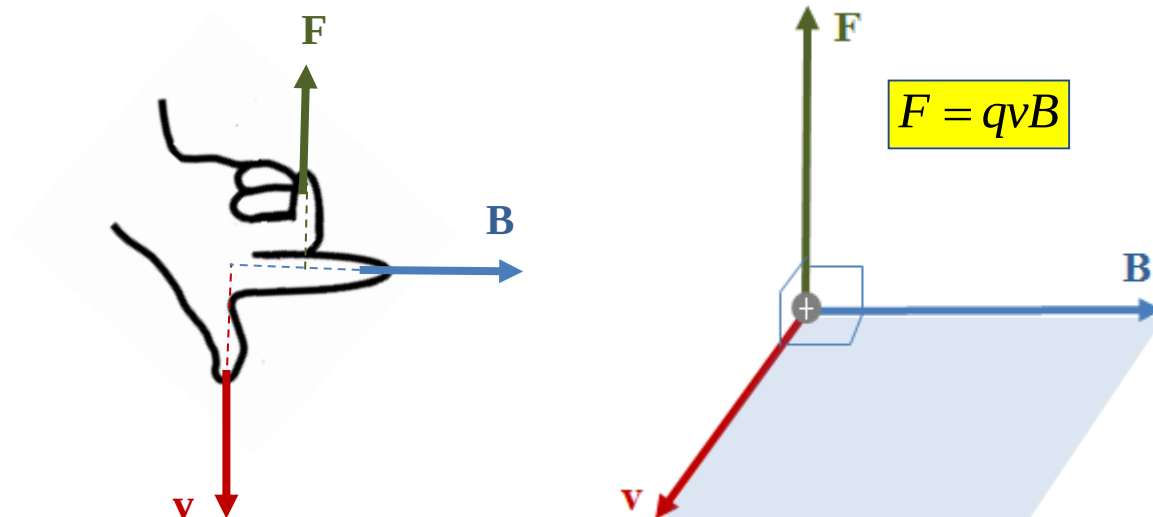
טסלה היא יחידת עוצמת שדה גדולה מאוד. עוצמת השדה המגנטי של מגנטים רגילים היא בין מאית לאלפית טסלה. לכן מקובל להשתמש ביחידת מידה קטנה יותר לעוצמת השדה המגנטי והיא גאוס (G):

$$1[G] = 10^{-4} [T]$$

סדר הגודל של השדה המגנטי הארצי הוא כרבע גאוס.

ראינו שווקטור מהירות המטען, וווקטור השדה המגנטי וווקטור הכוח המגנטי אינם במישור אחד. לצורך מציאת כיוון אחד מהם כשנתונים השניים האחרים נהוג להשתמש בכלל הידוע "כלל היד הימנית".
כאשר המטען הנע הוא חיובי יתקבל כיוון הכוח באופן הבא:

אם נשים את אצבע יד ימין בכיוון השדה המגנטי, ואת האגודל בכיוון תנועת המטען החיובי, תראה האמה את כיוון הכוח שמפעיל השדה המגנטי על המטען החיובי.



כפי שראינו בהדגמות, כיוון הכוח ניצב למישור, הנוצר על ידי כיוון המהירות וכיוון רכיב השדה הניצב למהירות.
אם המטען הנע הוא שלילי, כיוון הכוח יהיה הפוך למתואר בתרשים.

כללים לסימון מהירות, זרם, כוח ושדה מגנטי במרחב

כפי שניתן לראות שרטוט במישור אינו מספק, אלא מדובר בתיאור **מרחבי**, מכאן, שחייבים להגדיר כללים שיתארו גם כיוון נוסף: "פנימה" (אל תוך הדף) או "החוצה" (מתוך הדף).
ההסכם המקובל הוא: X (זנב החץ) פירושו אל תוך הדף, ו- • (ראש החץ) פירושו מחוץ לדף.



מהירות פנימה



מהירות החוצה



זרם פנימה



זרם החוצה

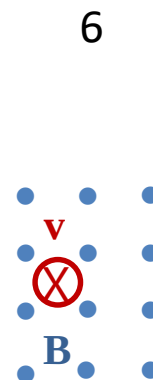
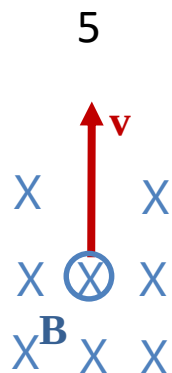
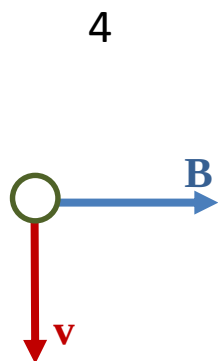
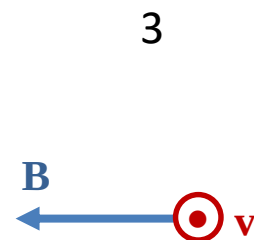
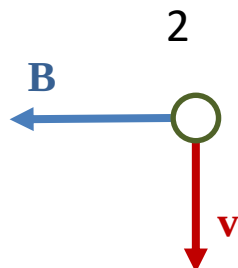
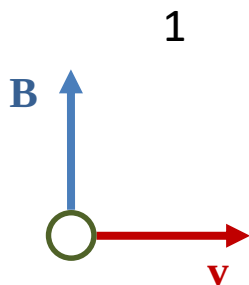


כוח פנימה

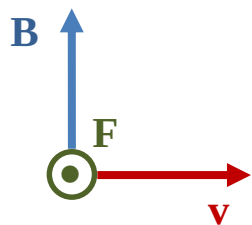


כוח החוצה

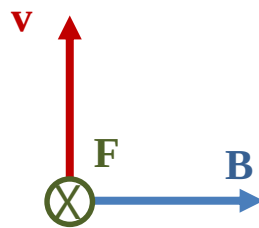
נתון כיוון המהירות של מטען חיובי הנע בשדה מגנטי, **שכיוונו** נתון בתרשימים, בשישה מקרים שונים. מהו כיוון הכוח המגנטי הפועל על המטען בכל אחד מהמקרים הבאים:



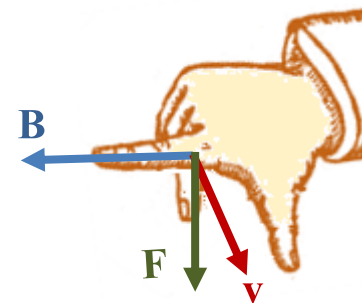
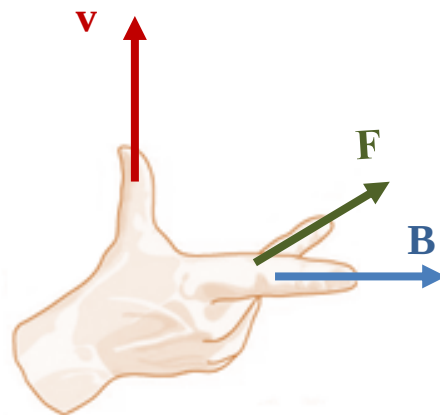
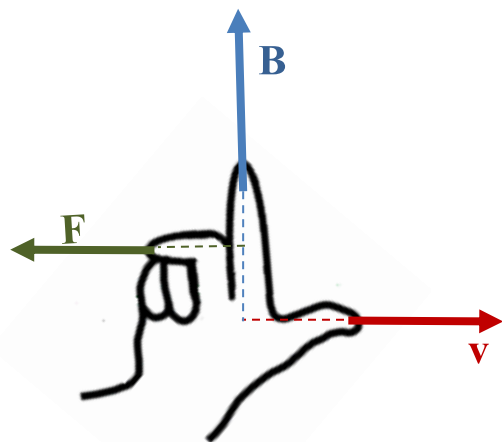
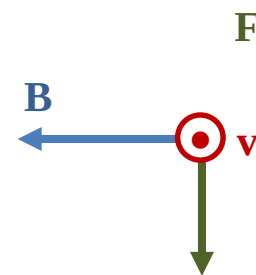
1



2



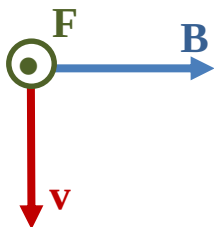
3



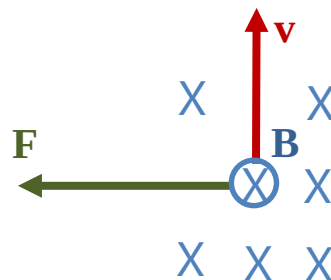
פתרון תרגיל מציאת כיוון הכוח המגנטי (4-6)

המשך פתרון:

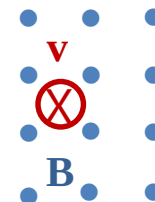
4



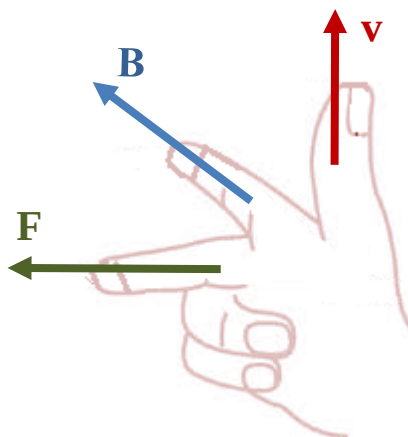
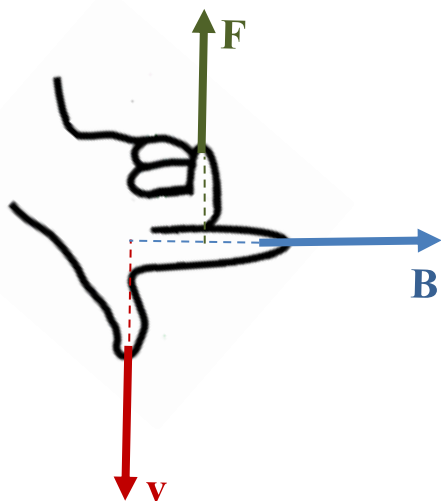
5



6



לא פועל כוח



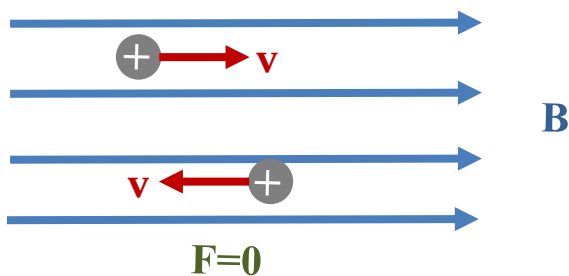
מה קורה אם תנועת המטען איננה בניצב לקווי השדה אלא בזווית אליהם?

כיוון המהירות משפיע על גודלו של הכוח המגנטי באופן הבא:

- I. על מטענים שמהירותם מקבילה לקווי השדה לא פועל כוח מגנטי.
 - II. על מטענים שמהירותם ניצבת לקווי השדה מתקבל הכוח המגנטי הגדול ביותר.
 - III. כאשר הזווית α שבין כיוון השדה המגנטי לבין כיוון המהירות שונה מ- 90° , הכוח המגנטי הפועל על המטען קטן יותר (ביחס למקרה II).
- גודלו של הכוח נמצא ביחס ישר ל- $\sin \alpha$, $F \propto \sin \alpha$.

ניתן לסכם זאת בקשר הבא:

$$F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$$



❖ כאשר המהירות מקבילה לווקטור השדה - לא פועל כוח.

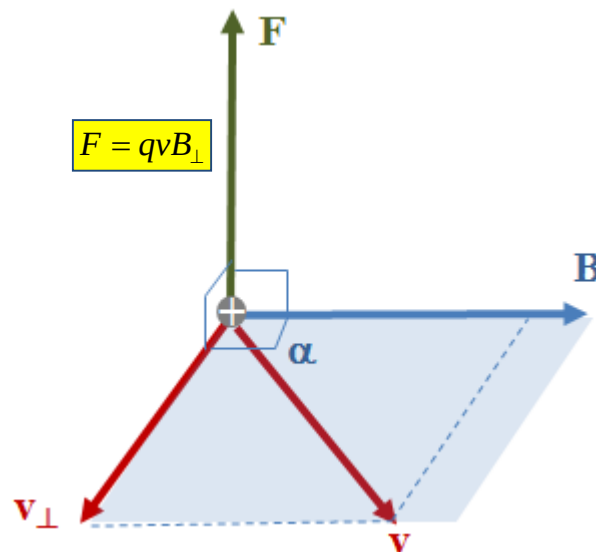
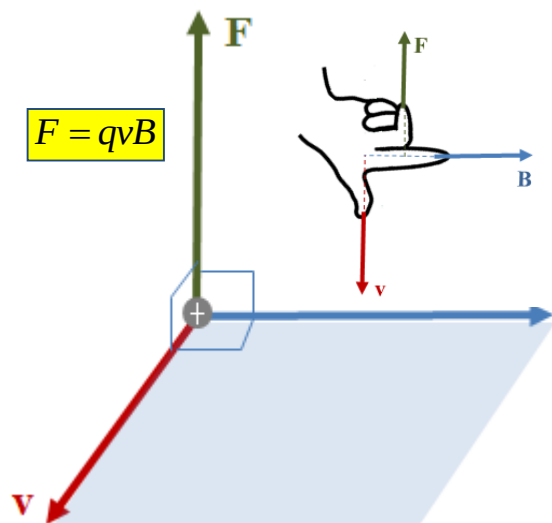
❖ גודל הכוח המגנטי תלוי בגודל המטען, בגודל השדה המגנטי וברכיב הניצב לווקטור השדה

$$F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$$

המגנטי.

❖ כיוון ווקטור הכוח ניצב למישור שנוצר בין ווקטור המהירות לווקטור השדה.

❖ כיוון הניצבות עבור מטען חיובי נקבע עפ"י כלל יד ימין.



מסלול תנועת חלקיקים טעונים בשדה מגנטי – קו ישר

תנועה של חלקיקים טעונים בשדה מגנטי קיימת בטבע. למשל- חלקיקים טעונים שמגיעים מהשמש ונכנסים לשדה המגנטי של כדור הארץ.

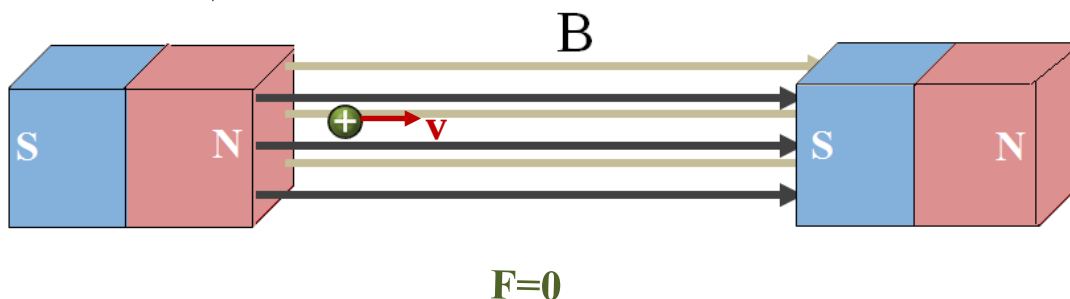
נראה מהי צורת מסלול התנועה של מטען חשמלי בשדה מגנטי **קבוע בזמן**.

נבחין בין שלושה מקרים, בהתאם לזווית הכניסה של החלקיקים לתחום השדה המגנטי:

1. מטען הנכנס במקביל לקווי השדה המגנטי:

על המטען לא פועל כוח מגנטי, ולכן המטען ימשיך לנוע במהירות קבועה לאורך קו ישר.

$$F = qvB\sin \alpha = qvB\sin 0 = 0$$

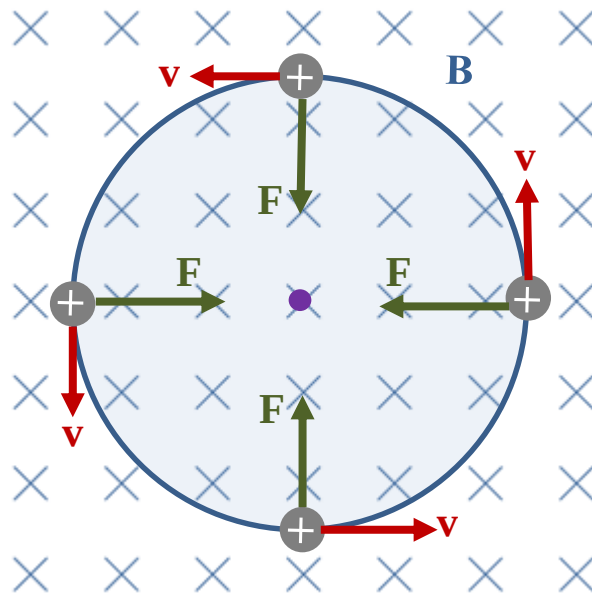


מסלול תנועת חלקיקים טעונים בשדה מגנטי - מעגל

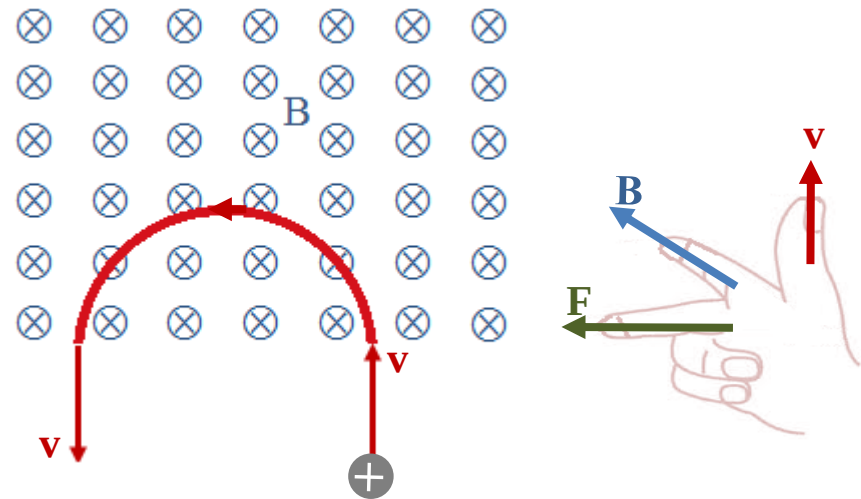
2. מטען הנמצא בתוך שדה מגנטי אחיד ונע בתוכו במאונך לקווי השדה:

על פי כלל יד ימין, הכוח יהיה תמיד מאונך לכיוון המהירות (כלומר, הכוח מאונך לכיוון ההעתק), לכן הוא קבוע. זהו כוח מרכזי ולכן אינו מבצע עבודה.

כזכור, מסלולו תנועתו של גוף שהכוח שפועל עליו ניצב למהירותו הוא מעגל.



חלקיק חיובי נמצא כבר בתוך השדה ואז נע בתנועה מעגלית.



חלקיק חיובי המגיע מחוץ לשדה משלים חצי מעגל ואז יוצא מהשדה המגנטי

הסיבה לכך שחלקיק טעון, הנכנס לשדה בניצב לכיוון השדה, נע בתנועה מעגלית אינה רק כי הכוח הפועל עליו מכוון במאונך למהירות, אלא העובדה שגודל הכוח הוא קבוע, כי המהירות קבועה והשדה אחיד.

כשהחלקיק כבר נע במעגל, מתקיים החוק השני של ניוטון:

$$\sum F_R = ma_R$$

הכוח הגורם לתאוצה הוא **כוח לורנץ**

$$qvB \sin 90 = m \frac{v^2}{r}$$

ומכאן נקבל את הרדיוס r של המעגל:

$$r = \frac{mv}{qB}$$

<https://sites.google.com/site/physicsflash/home/cyclotron>

על העיקרון של תנועה במסלולים מעגליים של גופים טעונים בשדה מגנטי אחיד, מבוססים כמה ממאיצי החלקיקים, הגורמים לחלקיקים לנוע במהירויות גבוהות.

זמן המחזור של תנועת החלקיק הוא:

$$T = \frac{2\pi \cdot r}{v} = \frac{2\pi \frac{mv}{qB}}{v} = 2\pi \frac{m}{qB}$$

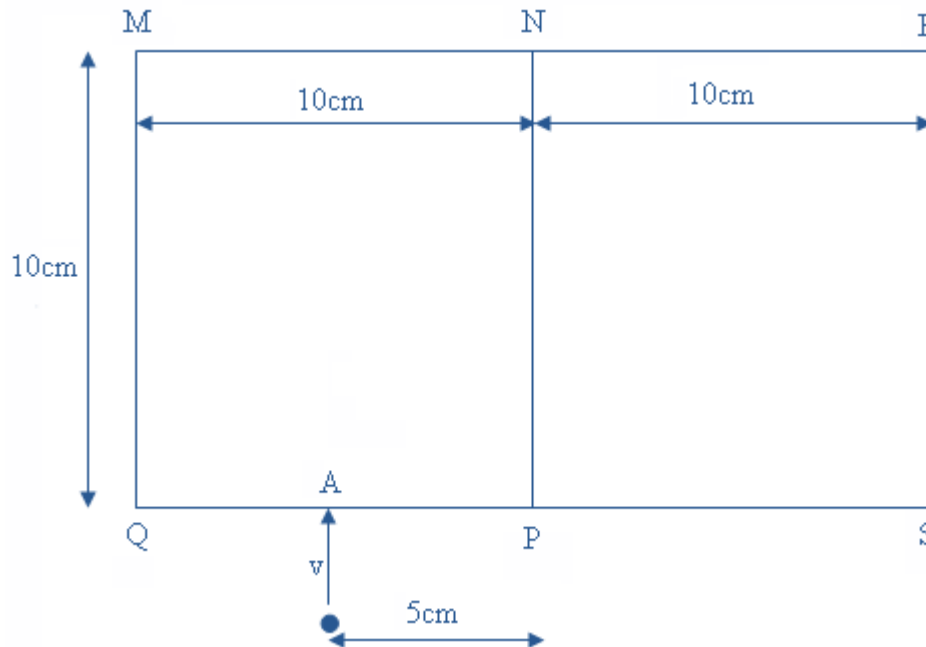
$$T = 2\pi \frac{m}{qB}$$

זמן מחזור זה, ולכן גם התדירות והמהירות הזוויתית, **אינם תלויים** במהירות התנועה של החלקיק וגם לא ברדיוס מסלולו.

תרגיל 1: תנועה במסלול מעגלי

נתונים שני אזורי MNPQ ו-NRSP שבהם שוררים שדות מגנטיים אחידים, שגודל כל אחד מהם הוא $B=5T$.

כיווני השדות מנוגדים זה לזה וניצ. ממדי האזורים בתרשים שלפניך:



בנקודה A, הנמצאת במרכז הקטע QP, נכנס בכיוון ניצב לשדה חלקיק שגודל מהירותו v , כמתואר בתרשים. מסת החלקיק $m = 6.6 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ומטענו $q = +3.2 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

במהלך תנועתו עובר החלקיק מאזור MNPQ ונכנס לאזור NRSP בניצב לקטע NP.

- א- העתיקו את התרשים למחברתך וציינו בו את כיווני השדות המגנטיים בשני האזורים (סמן עבור שדה הנכנס אל הדף, וסמן עבור שדה היוצא מהדף). הסבירו כיצד קבעת את הכיוונים.
- ב- הוסיפו לתרשים שהעתקת את מסלול החלקיק מרגע כניסתו לאזור MNPQ עד רגע צאתו מהאזור NRSP.
- ג- חשבו את v .
- ד- חשבו את פרק הזמן שעבר מרגע הכניסה של החלקיק לאזור MNPQ עד רגע צאתו מהאזור NRSP.

פתרון תרגיל 1: תנועה במסלול מעגלי

א- מאחר והחלקיק החיובי נע כלפי מעלה וימינה לעבר האזור הימני, אזי פועל עליו כוח ימינה, ולכן על פי כלל יד ימין, כיוון השדה באזור השמאלי הוא מחוץ לדף, כיוון השדה באזור הימני הוא אל תוך הדף (מנוגד לשדה השמאלי).

ב- בכניסה לאזור השמאלי יפעל עליו כוח בכיוון ימינה והוא יבצע רבע סיבוב כלפי ימינה. אח"כ בכניסה לאזור הימני, על פי כלל יד ימין, יפעל על החלקיק כוח כלפי מעלה, ולכן הוא יבצע רבע סיבוב כלפי מעלה.

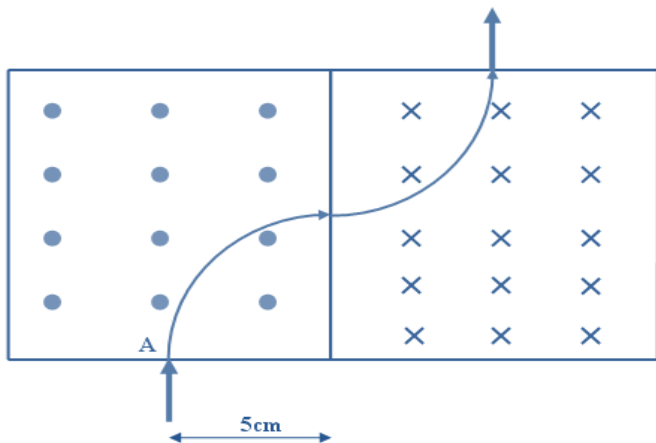
ג- כאשר חלקיק נע במאונך לשדה המגנטי אחד מתקיים:

$$v \cdot B \cdot q = \frac{mv^2}{R}$$

$$R = \frac{m \cdot v}{B \cdot q} \Rightarrow 0.05 = \frac{6.6 \cdot 10^{-27} \cdot v}{5 \cdot 3.2 \cdot 10^{-19}}$$

$$v = 1.2 \cdot 10^7 \left[\frac{m}{s} \right]$$

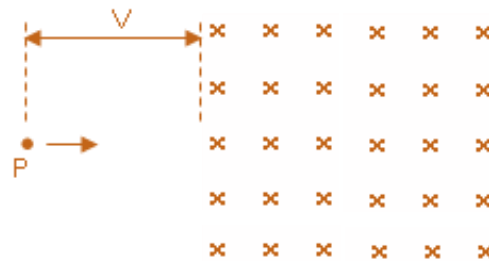
ד- הזמן הוא מחצית זמן סיבוב שלם.



$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi \cdot 0.05}{1.2 \cdot 10^7} = 2.6 \cdot 10^{-8} [s]$$

$$t = \frac{T}{2} = \frac{2.6 \cdot 10^{-8}}{2} = 1.3 \cdot 10^{-8} [s]$$

פרוטון p , שמסתו m_p ומטענו q_p , מואץ ממנוחה משמאל לימין על ידי מתח V , ונכנס לאזור שבו שורר שדה מגנטי. השדה מאונך לדף וכיוונו – אל תוך הדף (ראה תרשים).



רוצים שהפרוטון ייצא מן השדה המגנטי במאונך לכיוון תנועתו המקורי, במרחק אופקי d מנקודת הכניסה שלו. לשם כך מכבים את השדה המגנטי בזמן t מהרגע שבו נכנס אליו הפרוטון.

א- בטאו את הזמן t באמצעות נתוני השאלה.

ב- בטאו את המרחק האופקי d באמצעות נתוני השאלה.

ג- כיצד ישתנו תשובותיך לסעיפים א-ב, אם המתח המאיץ יגדל פי 2?

ד- כיצד ישתנו תשובותיך לסעיפים א-ב, אם במקום הפרוטון יאיצו חלקיק α (שהוא גרעין הליום המורכב משני נויטרונים ומשני פרוטונים)? הניחו כי מסת חלקיק זה גדולה פי 4 ממסת הפרוטון.

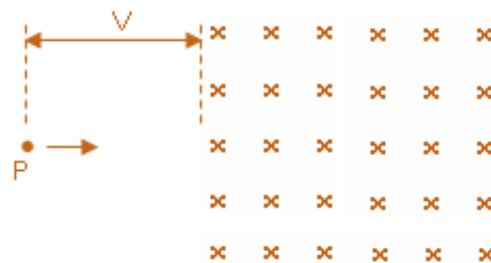
ה- בניסוי אחר הפעילו גם שדה חשמלי באזור השדה המגנטי, כך שהפרוטון נע בקו ישר לאורך כל הדרך. ציינו את כיוון השדה החשמלי ובטאו את עוצמתו באמצעות נתוני השאלה.

א- הפרוטון יבצע תנועה מעגלית בשדה המגנטי, ולאחר רבע זמן מחזור כיוון תנועתו יהיה מאונך לכיוון המקורי. בהתאם לחוק שני של ניוטון:

$$v \cdot B \cdot q = \frac{m \cdot v^2}{r} \Rightarrow B \cdot q = \frac{m \cdot v}{r}$$

$$v = \frac{2\pi \cdot r}{T}$$

$$B \cdot q = \frac{m \cdot \frac{2\pi \cdot r}{T}}{r} \Rightarrow T = \frac{2\pi \cdot m}{q \cdot B} \Rightarrow t = \frac{T}{4} = \frac{\pi \cdot m}{2 \cdot B \cdot q}$$



ב- המרחק האופקי שבו יצא הפרוטון שווה לרדיוס המעגל. לצורך חישוב הרדיוס נמצא תחילה את מהירות הפרוטון בעזרת שיקולי אנרגיה:

$$V \cdot q = \frac{m \cdot v^2}{2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2 \cdot V \cdot q}{m}}$$

$$v = \frac{2\pi \cdot r}{T} \Rightarrow r = \frac{v \cdot T}{2\pi} = \frac{\sqrt{\frac{2 \cdot V \cdot q}{m}} \cdot \frac{2\pi \cdot m}{B \cdot q}}{2\pi} \Rightarrow r = \frac{1}{B} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot V \cdot m}{q}}$$

ג- זמן המחזור אינו תלוי במתח המאיץ, ולכן התשובה לסעיף א' לא תשתנה.

ד- רדיוס הסיבוב יגדל פי :
$$r_1 = \frac{1}{B} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 2 \cdot V \cdot m}{q}} \Rightarrow r_1 = \sqrt{2} \cdot r$$

זמן המחזור יגדל פי 2 ורדיוס הסיבוב יגדל פי $\sqrt{2}$:

$$T = \frac{2\pi \cdot m}{q} \Rightarrow T_1 = \frac{2\pi \cdot 4m}{2q} \Rightarrow T_1 = 2 \cdot T$$

$$r = \frac{1}{B} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot V \cdot m}{q}} \Rightarrow r_1 = \frac{1}{B} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot V \cdot 4m}{2q}} \Rightarrow r_1 = \sqrt{2} \cdot r$$

ה- על מנת שהפרוטון ינוע בקו ישר, השדה החשמלי צריך להפעיל על הפרוטון כוח חשמלי המאזן את

פעולתו של הכוח המגנטי. לפי כלל יד ימין, השדה המגנטי מפעיל על הפרוטון כוח שכיוונו כלפי

מעלה. כיוון השדה החשמלי חייב להיות כלפי מטה בכדי שעל הפרוטון יפעל כוח כלפי מטה. איזון

יושג כאשר:

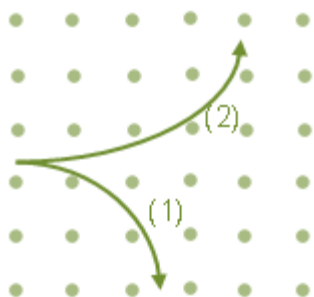
$$E \cdot q = v \cdot B \cdot q \Rightarrow E = v \cdot B = \sqrt{\frac{2 \cdot V \cdot q}{m}} \cdot B$$

נתונים חלקיקים הטעונים במטען חשמלי. הניחו כי כוח הכובד הפועל על החלקיקים זניח.
עבור כל אחד משני המצבים, המתוארים בסעיפים א-ב, קבעו אם הוא אפשרי או בלתי אפשרי, ונמקו כל אחת מהקביעות.

א- החלקיקים נעים באזור שבו שורר שדה מגנטי בלי שיפעל עליהם כוח מגנטי.

ב- החלקיקים נמצאים במנוחה באזור שבו שוררים גם שדה חשמלי וגם שדה מגנטי (כל אחד מן השדות קבוע), והכוח השקול הפועל עליהם שווה לאפס.

שני חלקיקים (1) ו-(2) נכנסים במאונך לשדה מגנטי אחיד. השדה המגנטי מאונך למישור הדף וכיוונו "אל הקורא". בתרשים א מוצגים חלקים מהמסלולים של החלקיקים בשדה המגנטי.



תרשים א

ג- קבעו איזה סוג מטען יש לכל אחד מהחלקיקים (1) ו-(2) – חיובי או שלילי. נמקו את קביעותיכם.

ד- לשני החלקיקים יש מסה שווה, והמהירויות הזוויתיות שלהם בתוך השדה שוות. הראו שהמטענים של שני החלקיקים שווים בגודלם.

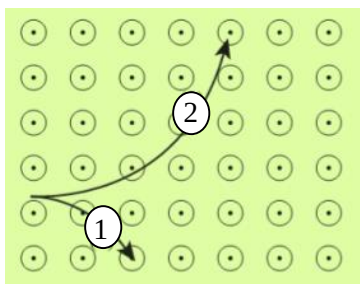
א- מצב זה אפשרי.

כאשר החלקיקים נעים לאורך קו השדה הם ינועו מבלי שיפעל עליהם כוח מגנטי.
הכוח נתון בביטוי: $F = v \cdot B \cdot q \cdot \sin \alpha$, וכאשר $\alpha = 0^\circ$ הכוח F שווה לאפס.

ב- מצב זה אינו אפשרי

הכוח החשמלי פועל על החלקיק הטעון אבל על החלקיק לא פועל כוח מגנטי כי מהירותו שווה לאפס. כדי שהכוח השקול הפועל על החלקיק יהיה שווה לאפס, צריך לפעול עליו כוח מגנטי השווה בגודלו ומנוגד בכיוונו לכוח החשמלי.

ג- לפי כלל היד הימנית המטען של חלקיק 1 חיובי, והמטען של חלקיק 2 שלילי.



T- מאחר והחלקיקים נכנסים במאונך לשדה המגנטי, כל אחד מהחלקיקים מבצע תנועה מעגלית כאשר הכוח המגנטי הוא הכוח השקול הפועל על כל חלקיק.

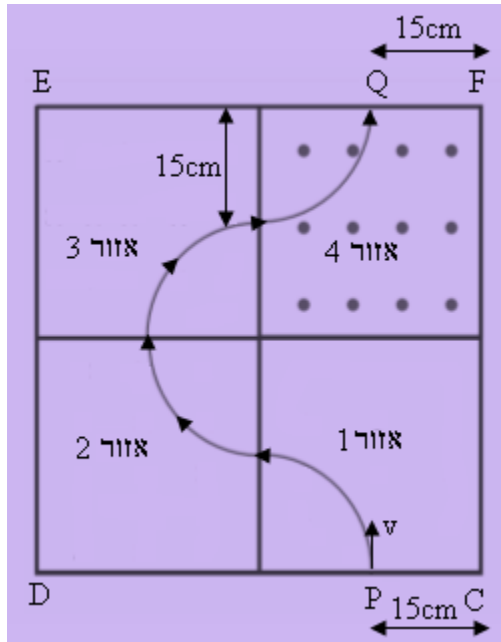
לפי החוק השני של ניוטון:

$$v \cdot B \cdot q = m \frac{v^2}{R} \Rightarrow q = \frac{m \cdot v}{B \cdot R} \Rightarrow v = \omega \cdot r$$

$$q = \frac{m \cdot \omega \cdot r}{B \cdot R} = \frac{m \cdot \omega}{B}$$

נתון: $m_1 = m_2$, $\omega_1 = \omega_2$, ולכן: $q_1 = q_2$.

תרגיל 4: תנועה במסלול מעגלי



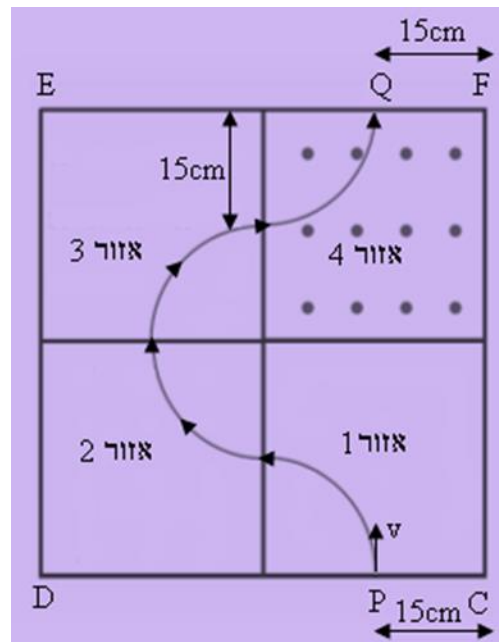
ריבוע CDEF מחולק לארבעה אזורים 1-4 (ראה תרשים). כל אחד מארבעת האזורים הוא ריבוע שממדיו $30[\text{cm}] \times 30[\text{cm}]$.
 בכל אזור שורר שדה מגנטי אחיד שגודלו $B = 1\text{ T}$, וכיוונו ניצב לריבוע CDEF. באזור 4 השדה "יוצא מהדף".
 חלקיק א טעון חודר לתחום הריבוע CDEF בנקודה P (ראה תרשים), שמרחקה מהנקודה C הוא $15[\text{cm}]$, במהירות שכיוונה ניצב לקו CD ולכיוון השדה המגנטי ושגודלה $v = 3.6 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$.
 מסת החלקיק $6.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ (ראה תרשים).

- א-** האם המטען החשמלי של חלקיק א הוא חיובי או שלילי? נמקו.
- ב-** מהם כיווני השדות המגנטיים באזורים 1, 2, 3? (כתבו $\otimes$ אם כיוון שדה "לתוך הדף", ו $\odot$ אם כיוון השדה "יוצא מהדף"). נמקו.
- ג-** חשבו את המטען של חלקיק א.
- ד-** האם לאורך מסלול התנועה של חלקיק א מנקודה P לנקודה Q, וקטור המהירות של החלקיק משתנה:
 (1) בכיוונו? נמקו. (2) בגודלו? נמקו.

ה. חשבו את משך הזמן שבו חלקיק א נע מנקודה P לנקודה Q.

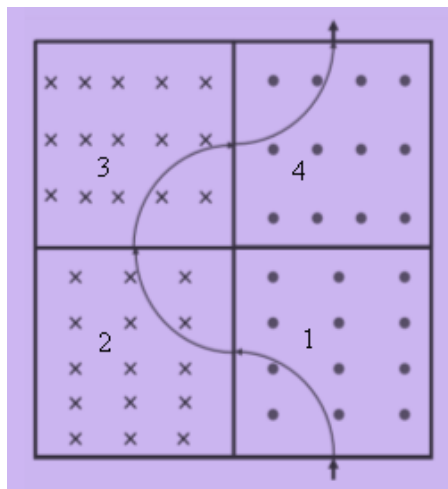
ו. בנקודה Q (ראה תרשים) משגרים לתוך אזור 4 בזה אחר זה שני חלקיקים, ב ו- ג, באותו גודל מהירות, v , במאונך ל- EF ולשדה המגנטי שבאזור 4. לשני החלקיקים ב ו- ג מסות זהות למסה של חלקיק א.

לחלקיק ב יש מטען זהה למטען של חלקיק א ולחלקיק ג יש מטען מנוגד למטען של חלקיק א. איזה משני החלקיקים – ב או ג – ינוע לאורך מסלול התנועה של חלקיק א? נמק. (הנח כי אין אינטראקציה בין החלקיקים במהלך תנועתם בשדות המגנטיים).



פתרון תרגיל 4: תנועה במסלול מעגלי

א- המטען הוא שלילי. בעת כניסתו של המטען לאזור 4, כיוון הכוח הפועל על החלקיק הוא כלפי מעלה. מאחר ובאזור זה כיוון השדה הוא "יוצא מהדף", לכן לפי כלל היד הימנית, הסימן של המטען הוא שלילי.



ב- לפי כלל יד ימין, ראו פתרון בתרשים.

ג- באזור 4 החלקיק מבצע רבע של מסלול מעגלי.

לפי החוק השני של ניוטון:

$$\sum F = ma_R$$

$$q \cdot v \cdot B = \frac{mv^2}{R} \Rightarrow q = \frac{mv}{B \cdot R} = \frac{6.67 \cdot 10^{-27} \cdot 3.6 \cdot 10^6}{1 \cdot 0.15} = 1.6 \cdot 10^{-19} [C]$$

ד- (1) בכל נקודה במסלול, על החלקיק פועל כוח המאונך לכיוון תנועתו, לכן וקטור המהירות משתנה בכיוונו.

(2) גודל המהירות אינו משתנה. הכוח המגנטי אינו מבצע עבודה כי הוא מאונך לכיוון התנועה בכל רגע; אין שינוי

באנרגיה הקינטית ולכן גם אין שינוי במהירות.

ה- הזמן שווה לזמן מחזור (4 רבעי מעגל):

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi \cdot 0.15}{3.6 \cdot 10^6} = 2.6 \cdot 10^{-17} [s]$$

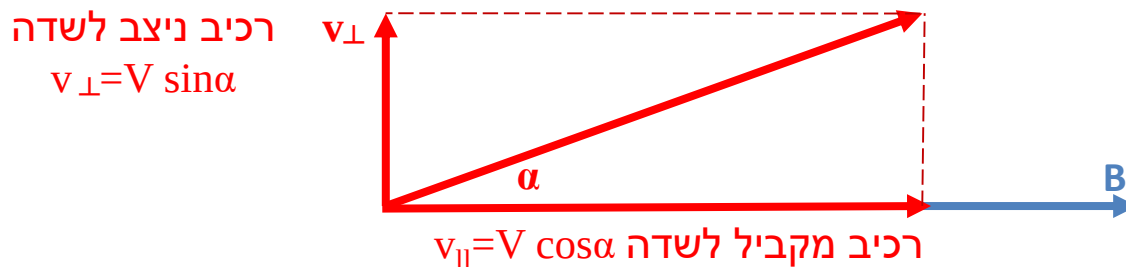
ו- חלקיק ג' ינוע לאורך מסלול התנועה של חלקיק א'.

מאחר וכיוון המהירות הפוך וכל שאר הפרמטרים נותרו קבועים, החלקיק ינוע באותו המסלול בתנאי שסימנו הפוך.

מסלול תנועת חלקיקים טעונים בשדה מגנטי - מסלול בורגי

מקרה 3: כאשר המטען נכנס בזווית לקווי השדה המגנטי:

נפרק את ווקטור המהירות לרכיבים: רכיב מקביל לשדה ורכיב ניצב לשדה.

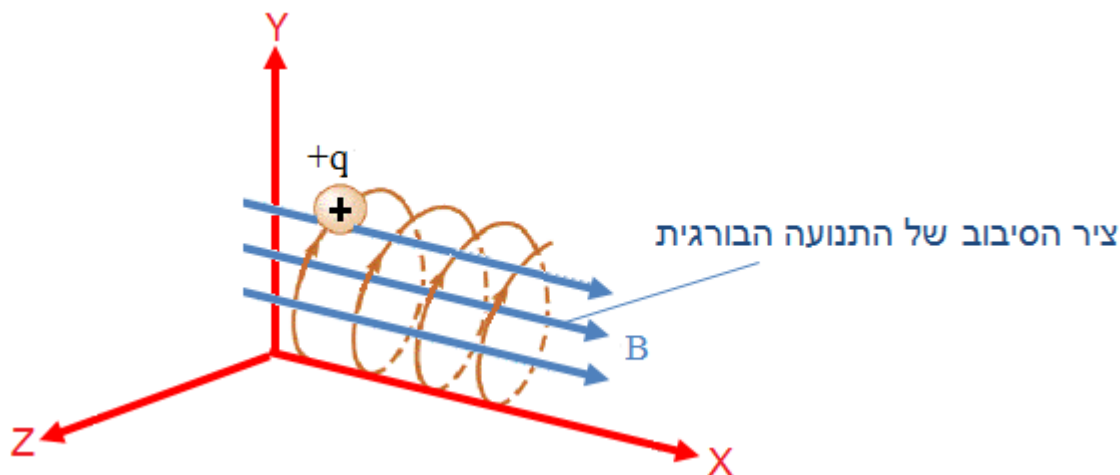


על רכיב המהירות בכיוון המקביל לשדה לא פועל כוח מגנטי ולכן בציר זה גודל רכיב המהירות וכיוונו יישמר.

גם כאן השדה אינו מבצע עבודה והמהירות והאנרגיה הקינטית לא משתנים.

על רכיב המהירות בכיוון הניצב לשדה פועל כוח בניצב למהירות ולווקטור השדה ולכן תיווצר תנועה מעגלית

במישור yz הניצב לווקטור השדה.



משילוב שתי התנועות יחד

מתקבלת תנועה בורגית:

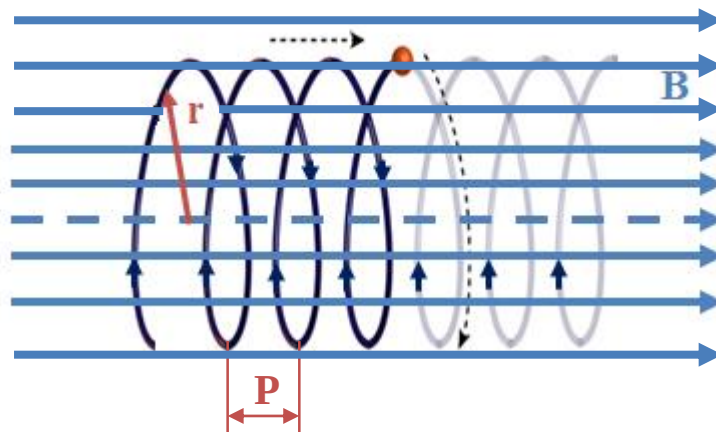
חישוב רדיוס סיבוב התנועה הבורגית

$$\sum F_R = ma_R$$

$$qvB \sin \alpha = m \frac{v^2}{r} \quad v_{\perp} = v \sin \alpha$$

$$qv_{\perp} B = m \frac{v_{\perp}^2}{r}$$

$$r = \frac{mv_{\perp}}{qB}$$



חישוב זמן המחזור של התנועה המעגלית:

$$T = \frac{2\pi \cdot r}{v_{\perp}} = \frac{2\pi \frac{mv_{\perp}}{qB}}{v_{\perp}} = \frac{2\pi m}{qB}$$

חישוב הפסיעה:

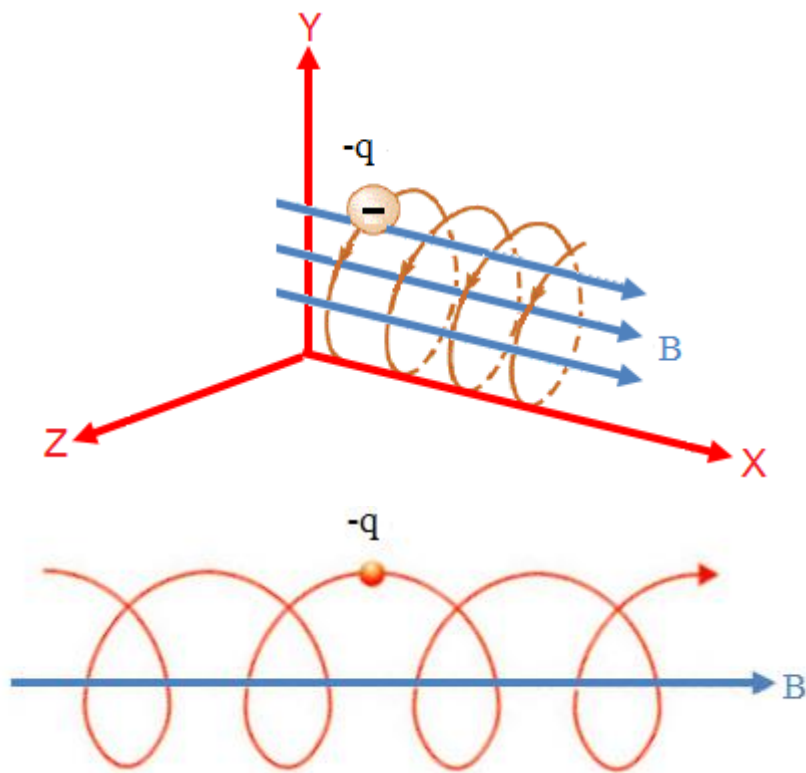
למרחק ההתקדמות במקביל לשדה בזמן מחזור אחד קוראים **פסיעה** ומסמנים אותה ב- P .

את הפסיעה מחשבים בעזרת רכיב המהירות המקביל וזמן המחזור:

$$P = v_x \cdot T = v \cos \alpha \cdot \frac{2\pi m}{qB}$$

מסלול תנועת מטען שלילי בשדה מגנטי - מסלול בורגי

אם המטען הנכנס בזווית לקווי השדה המגנטי הוא בעל אותה המסה ואותה המהירות, אבל שלילי, ישתנה רק כיוון הסיבוב של המטען. רדיוס סיבוב התנועה הבורגית, זמן המחזור וגודל הפגיעה לא ישתנו.

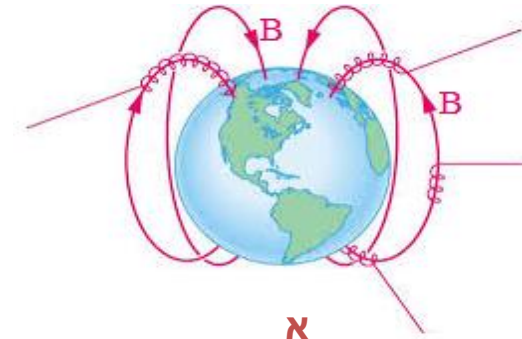


<https://www.youtube.com/watch?v=fwiKRis145E>

תכונה זו של המטענים, תנועתם מסביב לקווי השדה, מגינה עלינו מפני חלקיקים טעונים אנרגטיים המגיעים אל כדור הארץ מפני השמש. כאמור, לכדור הארץ יש שדה מגנטי, היוצא מקוטב אחד ונע אל הקוטב השני. מטענים הנקלעים לתוך השדה המגנטי, יחלו לנוע בצורה בורגית מסביב לקווי השדה, ולבסוף יחדרו אל כדור הארץ בקטבים (תרשים א). מרבית החלקיקים נכלאים בשדה המגנטי ולא מגיעים לכדור הארץ (חגורות ון אלן) ויוצרים את תופעה הידועה בשם **זוהר הקוטב** (בצפוני ובדרומי).



ב



א

זוהר הקוטב הוא תופעת טבע המתרחשת כאשר מטענים טעונים, שנכלאו סביב השדה המגנטי של כדור הארץ, נעים אל עבר הקטבים, ושם הם נעים מטה אל כדור הארץ. בזמן כניסת המטענים אל תוך האטמוספירה נוצרת אינטראקציה בינם לבין אטומים שבאטמוספירה ומשתחררת קרינה בצבעים שונים בהתאם לסוג האטומים. ירוק, שהוא הצבע הנפוץ ביותר, נוצר כתוצאה מפגיעה באטום חמצן.

תרגיל: תנועה לאורך מסלול בורגי (מתוך בחינת בגרות)

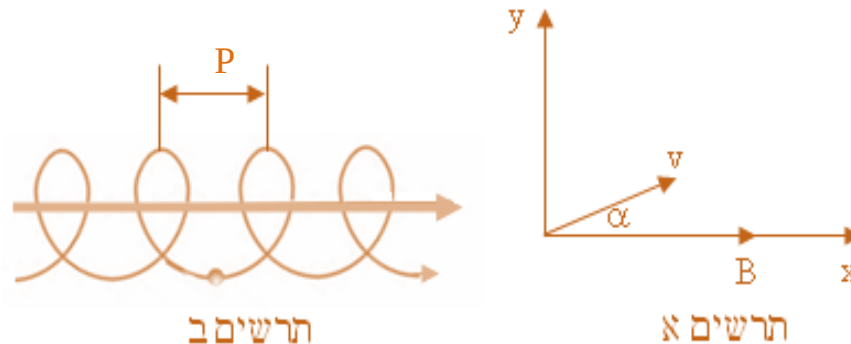
לשדה מגנטי אחיד B , שכיוונו "לתוך הדף", נכנס חלקיק במהירות שגודלה v וכיוונה ניצב לכיוון השדה. לחלקיק יש מסה m ומטען חשמלי חיובי q . (הניחו שעל החלקיק פועל רק הכוח המגנטי).

א- (1) שרטטו את המסלול של החלקיק. סמנו בשרטוט את מגמת תנועתו.

(2) בטאו באמצעות נתוני השאלה את רדיוס המסלול R ואת זמן המחזור T .

ב- אותו חלקיק נכנס לאותו שדה B במהירות שגודלה v , אך הפעם כיוונה מקביל לכיוון השדה. מהי צורת המסלול של החלקיק במקרה זה? האם מהירות החלקיק משתנה המסלול? נמקו.

ג- אותו חלקיק נכנס לאותו שדה B במהירות שגודלה v , אך הפעם כיוון המהירות יוצר זווית α עם כיוון השדה (תרשים א). וקטור המהירות נמצא (ברגע הכניסה) במישור xy . הכיוון של השדה המגנטי הוא בכיוון ציר ה- x .



(1) הסבירו מדוע החלקיק מבצע תנועה לאורך מסלול בורגי (תרשים ב).

(2) חשבו את פסיעת המסלול הבורגי P (המרחק שהתקדם החלקיק לאורך השדה המגנטי בהשלימו סיבוב אחד), אם נתון:

$$v = 6.25 \cdot 10^{-4} \text{ m/s} \quad M = 11.7 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \quad q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad B = 2.25 \text{ T}$$

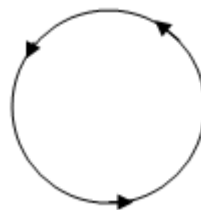
א- (1) על פי כלל יד ימין, יפעל על חלקיק חיובי כוח בכיוון שמאלה. כיוון הכוח מאונך לכיוון המהירות בכל רגע,

לכן יתקבל מסלול מעגלי.

$$v \cdot B \cdot q = \frac{m \cdot v^2}{R} \Rightarrow R = \frac{m \cdot v}{B \cdot q}$$

(2) על פי החוק השני של ניוטון :

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi \cdot \frac{m \cdot v}{B \cdot q}}{v} = \frac{2\pi \cdot m}{B \cdot q}$$



ב- המסלול הוא קו ישר. השדה המגנטי אינו מפעיל כוח על החלקיק; לכן (על פי החוק הראשון של ניוטון)

החלקיק מתמיד במצבו ונע במהירות קבועה.

ג- (1) נפרק את v לשני רכיבים קרטזיים v_x ו- v_y . v_y ניצב לשדה המגנטי B , ולכן רכיב זה ישנה את כיוונו של

החלקיק, והוא ינוע בתנועה מעגלית במישור yz .

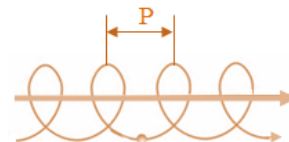
v_x מקביל לשדה המגנטי- B , ולכן לא יפעל כוח על החלקיק, והוא ינוע לאורך ציר X בתנועה קצובה.

שילוב התנועות, מעגלית במישור yz וקצובה לאורך ציר x , יוצר תנועה בורגית.

(2) במשך זמן מחזור אחד החלקיק מתקדם לאורך ציר X בתנועה קצובה:

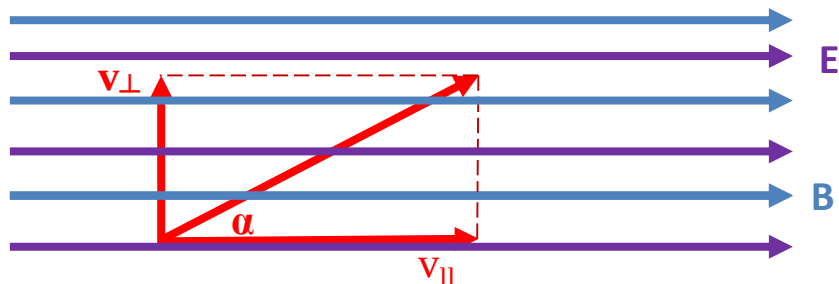
$$S = v_x \cdot T = v \cdot \cos \alpha \cdot \frac{2\pi \cdot m}{B \cdot q}$$

$$S = \frac{6.25 \cdot 10^4 \cdot \cos 53^\circ \cdot 2\pi \cdot 11.7 \cdot 10^{-27}}{2.25 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}} = 7.68 \text{ mm} = 7.68 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$



מסלול תנועת מטען חיובי בשדה מגנטי ושדה חשמלי מקבילים

ישנם מקרים בהם מטען נכנס בזווית לקווי שדה מגנטי ושדה חשמלי מקבילים. גם במקרה זה נפרק את וקטור המהירות לרכיבים: רכיב מקביל לשדה ורכיב ניצב לשדה.



כאשר מוסיפים שדה חשמלי, על הכוח המגנטי נוסף גם כוח חשמלי, המשפיע על רכיב המהירות המקביל לשדה החשמלי. אם המטען חיובי כיוון הכוח החשמלי יהיה כלפי ציר x החיובי והמטען יאיץ ימינה. הכוח החשמלי מבצע עבודה והאנרגיה הקינטית משתנה.

על רכיב המהירות בכיוון הניצב לשדה המגנטי פועל כוח מגנטי בניצב למהירות ולקווי השדה המגנטי, ולכן תיווצר תנועה מעגלית במישור yz הניצב לקווי השדה המגנטי.

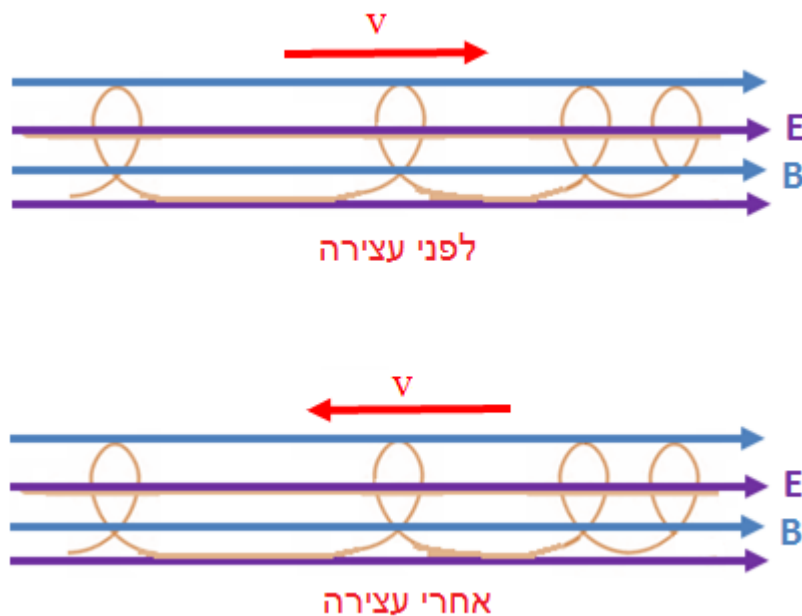
משילוב שתי התנועות יחד מתקבלת תנועה בורגית עם פסיעה גדלה והולכת.



מסלול תנועת מטען שלילי בשדה מגנטי ושדה חשמלי מקבילים

אם המטען הוא שלילי כיוון הכוח החשמלי יהיה כלפי ציר x השלילי, הפוך לכיוון המהירות ההתחלתית של האלקטרון, לכן בציר x האלקטרון יבצע תאווה עד לעצירה רגעית ואחר כך חזרה בכיוון שמאלה. שילוב של התנועה לאורך ציר x (בתאווה) ותנועה מעגלית במישור yz נותן תנועה בורגית עם פסיעה משתנה.

משילוב שתי התנועות יחד מתקבלת תחילה תנועה בורגית עם פסיעה הולכת וקטנה בכיוון ימינה, ואז הולכת וגדלה בכיוון שמאלה.

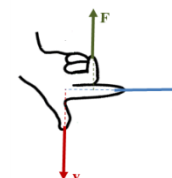
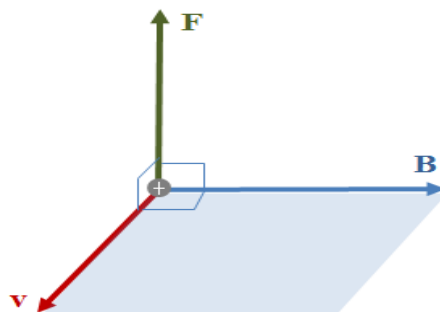


כוח חשמלי	כוח מגנטי
- פועל גם על מטען נע וגם על מטען נח. - כיוונו על מטען חיובי הוא ככיוון השדה החשמלי. - מבצע עבודה על המטען (האנרגיה של החלקיק משתנה)	- פועל על מטען נע. - כיוונו על מטען חיובי הוא מאונך למישור שנוצר על ידי וקטור השדה המגנטי ווקטור המהירות של המטען. - אינו מבצע עבודה על המטען (האנרגיה של החלקיק אינה משתנה).

◀ לכוח שמפעיל השדה המגנטי על חלקיקים טעונים נעים קוראים **"כוח לורנץ"**.

◀ גודל הכוח המגנטי תלוי בגודל המטען, בגודל השדה המגנטי וברכיב המהירות הניצב לווקטור השדה המגנטי. כיוון ווקטור הכוח ניצב למישור שנוצר בין ווקטור המהירות לווקטור השדה, כיוון הניצבות עבור מטען חיובי נקבע עפ"י כלל יד ימין.

$$F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$$



◀ על מטען הנכנס במקביל לקווי השדה המגנטי לא פועל כוח מגנטי, ולכן, המטען ימשיך לנוע במהירות קבועה לאורך קו ישר.

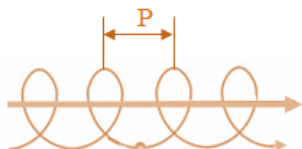
◀ חלקיק טעון הנכנס לשדה בניצב לכיוון השדה, נע בתנועה מעגלית בה הכוח הוא קבוע בגודלו,

$$T = 2\pi \frac{m}{qB}$$

: זמן המחזור T

$$r = \frac{mv}{qB}$$

: הרדיוס r של המסלול הוא:



◀ מטען הנכנס בזווית לקווי השדה המגנטי יבצע תנועה בורגית עם פסיעה קבועה.