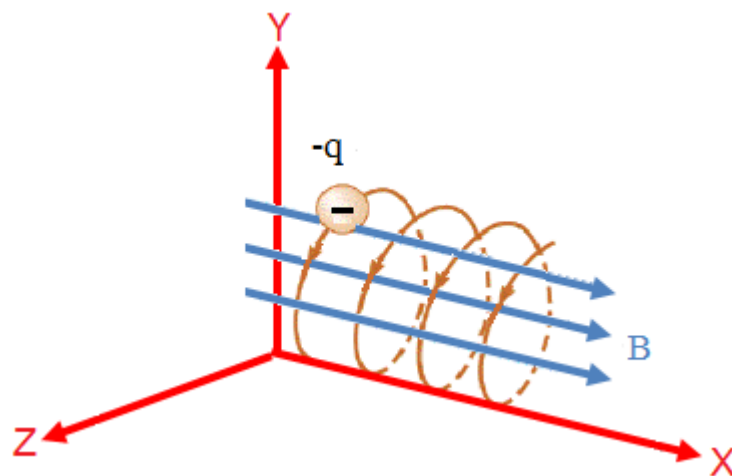


## מגנטיות

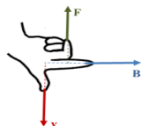
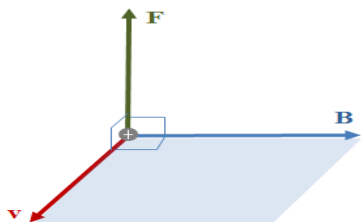
## כוח על חלקיק הנע בשדה מגנטי



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

◀ הכוח המגנטי הפועל על חלקיק טעון הנע בשדה מגנטי

◀ כיוון הכוח על מטען חיובי נקבע על פי כלל היד הימנית

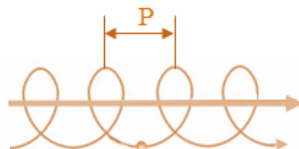


◀ על מטען הנע במקביל לקווי השדה המגנטי לא פועל כוח מגנטי, ולכן הוא ימשיך לנוע במהירות קבועה לאורך קו ישר.

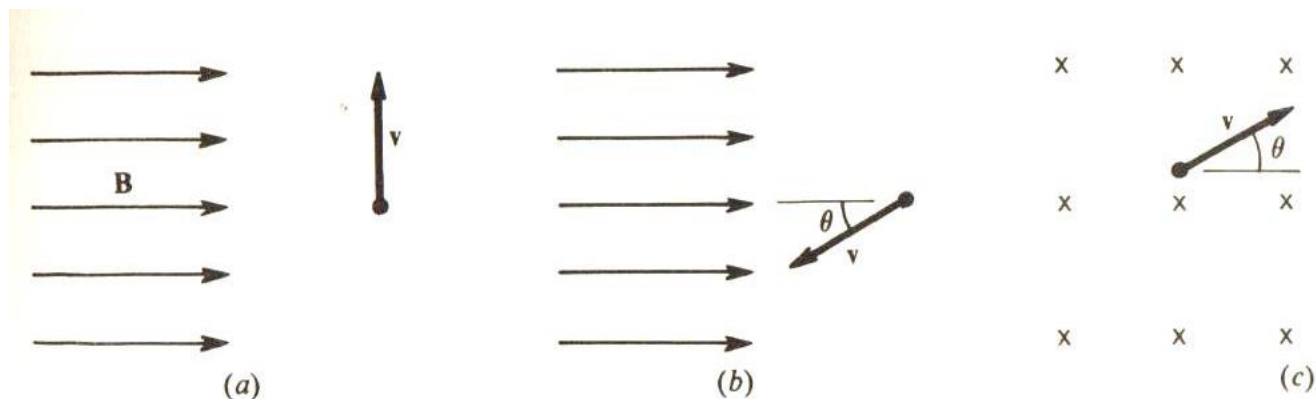
◀ חלקיק טעון הנכנס לשדה בניצב לכיוון השדה, נע בתנועה מעגלית בה הכוח הוא קבוע בגודלו,

רדיוס המסלול הוא:  $r = \frac{mv}{qB}$       וזמן המחזור:  $T = 2\pi \frac{m}{qB}$

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



חלקיק חיובי בעל מטען  $q$  חודר לשדה מגנטי  $B$  במהירות  $v$ .  
קבעו עבור כל מצב  $a$ ,  $b$ ,  $c$  את הכיוון ואת הגודל של הכוח המגנטי הפועל על החלקיק.

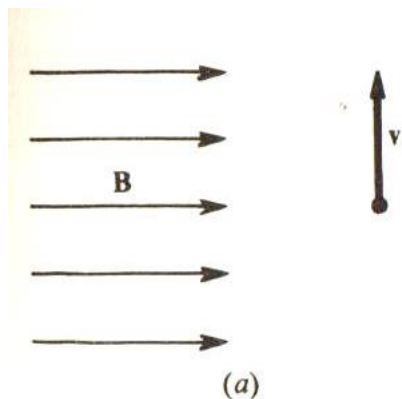


◀ במצב a: החלקיק נע בניצב לכיוון השדה ולכן גודלו של הכוח הפועל עליו הוא:

$$F = qvB \sin 90 = qvB$$

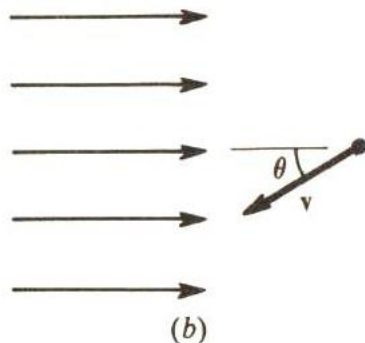
◀ כיוון הכוח הוא פנימה אל תוך הדף.

◀ המסלול הוא מעגלי במגמה פנימה אל הדף.



- במצב b: החלקיק נע בזווית  $\theta$  לכיוון השדה. רכיב המהירות המקביל (במקרה זה הוא אנטי-מקביל) לכיוון השדה אינו מושפע, ונותר בגודלו ובכיוונו.
- על הרכיב הניצב לכיוון השדה פועל כוח מגנטי שכיוונו החוצה מהדף.
- גודלו של הכוח הפועל על החלקיק הוא:

$$F=qvB\sin\theta$$



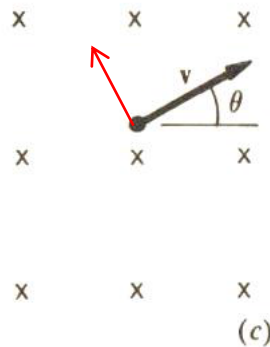
- מסלול התנועה הוא בורגי בהתקדמות שמאלה

במצב C: החלקיק נע בניצב לכיוון השדה.

על החלקיק פועל כוח מגנטי שכיוונו מעלה, בניצב לכיוון התנועה של החלקיק (חץ אדום).

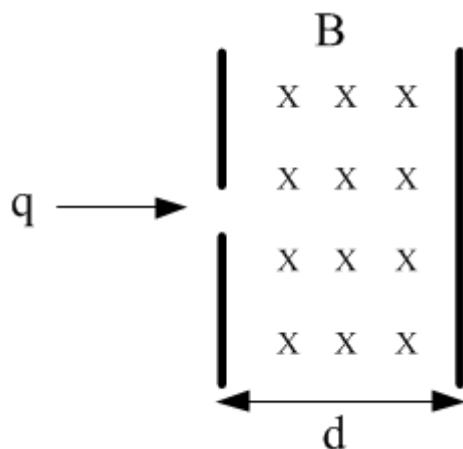
גודלו של הכוח הפועל על החלקיק הוא:

$$F=qvB$$



המסלול הוא מעגלי נגד כיוון השעון.

חלקיק בעל מטען  $q$ , מסה  $m$  ואנרגיה קינטית  $E$  חודר לאזור בין שני לוחות בו שורר שדה מגנטי  $B$ .  
מה צריך להיות גודלו המינימלי של  $B$ , על מנת שהחלקיק לא יתנגש בלוח הנגדי?  
נתון המרחק בין הלוחות  $d$ .



מה צריך להיות גודלו המינימלי של B על מנת שהחלקיק לא יתנגש בלוח הנגדי?

◀ כאשר החלקיק חודר לשדה המגנטי הוא נע במסלול מעגלי.

◀ על מנת שלא יפגע בלוח הנגדי רדיוס המעגל צריך להיות קטן מ-d.

◀ כדי לחשב את רדיוס המסלול נחשב תחילה את מהירות החלקיק:

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

$$v = \sqrt{\frac{2E}{m}}$$

◀ כעת נמצא את הביטוי לרדיוס:

$$F = qvB = \frac{mv^2}{r}$$

$$r = \frac{mv^2}{qvB} = \frac{mv}{qB} = \frac{m\sqrt{\frac{2E}{m}}}{qB} = \frac{\sqrt{2mE}}{qB}$$

◀ נחשב את המקרה הגבולי בו  $r=d$ :

$$d = \frac{\sqrt{2mE}}{qB}$$

$$B = \frac{\sqrt{2mE}}{qd}$$

פרוטון נורה במהירות של  $8 \times 10^6 \text{ m/s}$  ובזווית של  $30^\circ$  מעלות לשדה מגנטי המכוון לציר x (ראו תרשים).

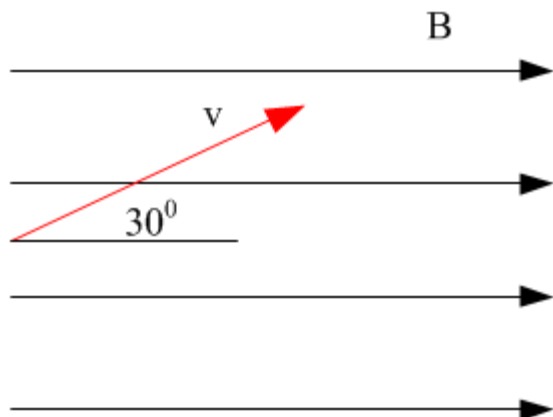
נתון כי:  $m = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ,  $q = +1.6 \times 10^{-19}$ ,  $B = 0.15 \text{ T}$

**א-** הסבירו מדוע מסלול התנועה של הפרוטון הוא בורגי (לולייני).

**ב-** מהו רדיוס הסיבוב של מסלול הפרוטון?

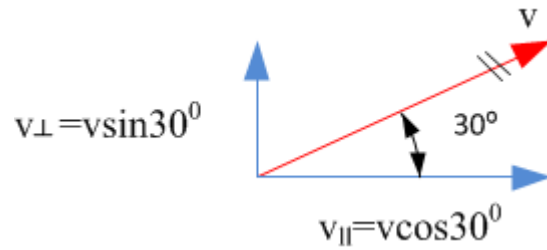
**ג-** מהו זמן המחזור של התנועה?

**ד-** מהי הפסיעה של המסלול?



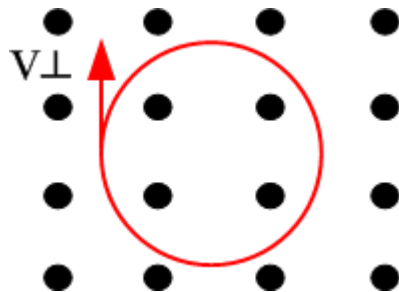
א- הסבירו מדוע מסלול התנועה של הפרוטון הוא בורגי (לולייני).

◀ נפרק את מהירות הפרוטון לרכיב הניצב לשדה המגנטי ולרכיב המקביל לו.



◀ רכיב התנועה המקביל לשדה המגנטי אינו מושפע מהכוח המגנטי ולכן יישאר קבוע בגודלו ובכיוונו.

◀ רכיב התנועה הניצב לשדה המגנטי מושפע מהכוח. השפעה זו מתבטאת בתנועה מעגלית במהירות קבועה (ראו תרשים).



◀ השילוב בין שתי התנועות הללו יוצר את המסלול הלולייני

ב- מהו רדיוס הסיבוב של מסלול הפרוטון?

◀ המסלול המעגלי נוצר רק מההשפעה של השדה המגנטי על רכיב התנועה הניצב לו.

◀ לכן, מהחוק השני של ניוטון:

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

$$r = \frac{m(v_{\perp})^2}{qv_{\perp}B} = \frac{mv_{\perp}}{qB} = \frac{mv \sin 30}{qB} = \frac{1.67 \times 10^{-27} \cdot 8 \times 10^6 \sin 30}{1.6 \times 10^{-19} \cdot 0.15}$$

$$r = 0.278m$$

ג- מהו זמן המחזור של התנועה?

◀ זמן המחזור נקבע על פי משך הזמן בו מסיים הפרוטון מעגל אחד שלם.

◀ את זמן המחזור נחשב על פי אורך המעגל ומהירות הפרוטון.

$$T = \frac{2\pi r}{v_{\perp}} = \frac{2\pi \cdot 0.278}{8 \times 10^6 \cdot \sin 30}$$

$$T = 4.36 \times 10^{-7} \text{ s}$$

ד- מהי הפסיעה של המסלול?

▶ הפסיעה של התנועה הלוליינית היא המרחק בו מתקדם הפרוטון בכיוון אופקי בזמן שהוא משלים מעגל אחד.

▶ התנועה האופקית היא במהירות קבועה השווה לרכיב המהירות המקביל לשדה המגנטי.

$$d = v_{//} \cdot T$$

▶ לכן, המרחק האופקי בו יתקדם הפרוטון במהלך סיבוב אחד הוא (הפסיעה של המסלול הלולייני):

$$d = 6.93 \times 10^6 \cdot 4.36 \times 10^{-7} = 3.02m$$

שני חלקיקים טעונים חיובית במטען  $q$  חודרים בנקודה  $P$  לתוך שדה מגנטי אחיד  $B$  לאחר שהואצו (ממנוחה) על ידי מתח  $V$ . החלקיקים מבצעים מסלולים מעגליים ופוגעים בלוח צילום (ראו תרשים).

**א-** מהו כיוון השדה המגנטי?

**ב-** הראו כי גודל המהירות של שני החלקיקים אינו משתנה במהלך התנועה המעגלית.

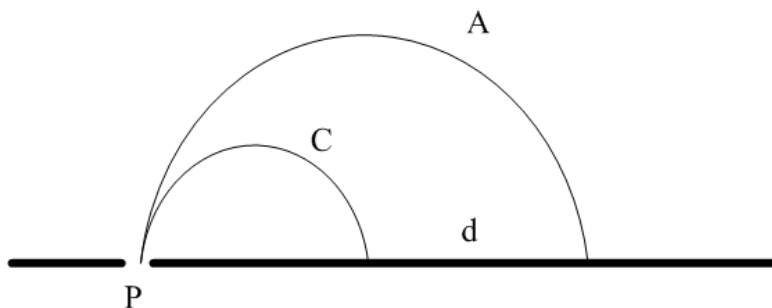
**ג-** נתון כי מסתו של חלקיק  $A$  גדולה פי 4 ממסתו של חלקיק  $C$ . (מסתו של  $C$  שווה ל- $m$ ).

1. מהו זמן התנועה של חלקיק  $C$  בתוך השדה המגנטי?

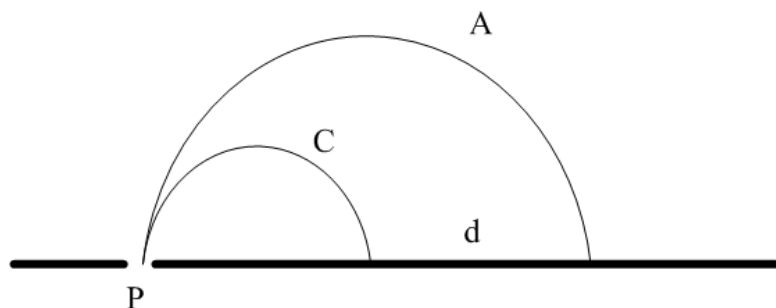
2. פי כמה גדול זמן זה מזמן התנועה של חלקיק  $A$ ?

**ד-** מה גודלו של המרחק  $d$  המסומן בתרשים?

הערה: את התשובות בטאו בעזרת הגדלים  $B, V, q, m$ .



שני חלקיקים טעונים חיובית במטען  $q$  חודרים בנקודה  $P$  לתוך שדה מגנטי אחיד  $B$  לאחר שהוצאו (ממנוחה) על ידי מתח  $V$ . החלקיקים מבצעים מסלולים מעגליים ופוגעים בלוח צילום (ראו תרשים).

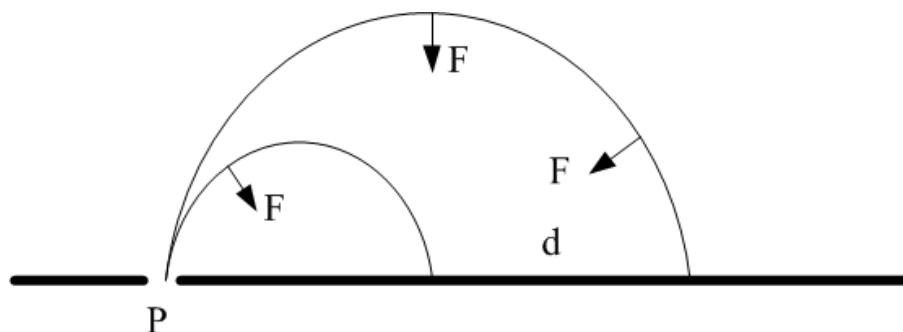


א- מהו כיוון השדה המגנטי?

ברגע כניסתם לשדה המגנטי, פועל על החלקיקים כוח בכיוון ימין. הואיל ומטענם של החלקיקים הוא חיובי, על פי כלל היד הימנית כיוונו של השדה המגנטי צריך להיות מחוץ לדף.

**ב- הראו כי גודל המהירות של שני החלקיקים אינו משתנה במהלך התנועה המעגלית.**

▶ בתוך השדה המגנטי פועל על החלקיקים כוח הניצב לכיוון תנועתם (כלומר למהירותם). כוח זה גורם לתאוצה המשפיעה על כיוון המהירות אך לא על גודלה. לכן, גודל מהירות החלקיקים נותר קבוע בכל המסלול, כפי שהייה ברגע הכניסה לשדה המגנטי (ראו תרשים).



ג- נתון כי מסתו של חלקיק A גדולה פי 4 ממסתו של חלקיק C. (מסתו של C שווה ל-m).

1. מהו זמן התנועה של חלקיק C בתוך השדה המגנטי?

▶ חלקיק C מבצע חצי מעגל בתוך השדה המגנטי. במשך זמן זה מהירותו קבועה.

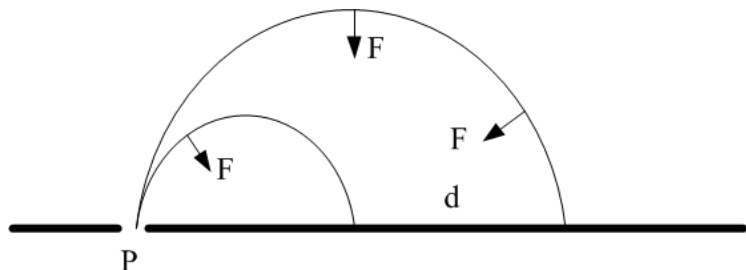
▶ נחשב את הזמן על פי חלוקת הדרך במהירות.

$$F = \frac{m_c v^2}{r} = qvB$$

$$v = \frac{qrB}{m_c}$$

$$t_c = \frac{x}{v} = \frac{\pi r m_c}{qrB}$$

$$t_c = \frac{\pi m_c}{qB}$$



ג- נתון כי מסתו של חלקיק A גדולה פי 4 ממסתו של חלקיק C. (מסתו של C שווה ל-m).  
2. פי כמה גדול זמן זה מזמן התנועה של חלקיק A?

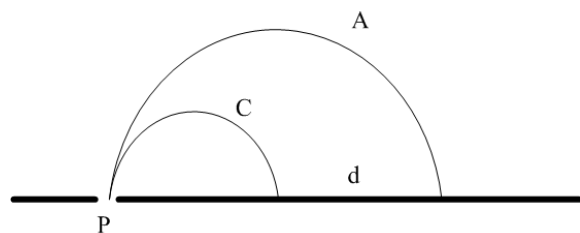
◀ את זמן התנועה של חלקיק C חישבנו בסעיף הקודם:

$$t_c = \frac{\pi m_c}{qB}$$

◀ הואיל ומסת החלקיק A גדולה פי 4 ממסת החלקיק C, הזמן עבורו יהיה:

$$t_A = \frac{\pi m_A}{qB} = \frac{\pi 4m_C}{qB}$$

$$t_A = 4t_c$$



ד- מה גודלו של המרחק d המסומן בתרשים?

◀ כדי לחשב את המרחק d נחשב את ההפרש בין קוטר המעגל של כל אחד מהחלקיקים.

$$F = \frac{mv^2}{r} = qvB$$

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

$$2r = \frac{2mv}{qB}$$

$$d = 2r_A - 2r_c = \frac{2m_A v_A}{qB} - \frac{2m_c v_c}{qB} = \frac{2}{qB} [m_A v_A - m_c v_c]$$

◀ כעת נחשב את מהירות הכניסה של כל אחד מהחלקיקים

$$qV = \frac{mv^2}{2}$$

$$v = \sqrt{\frac{2qV}{m}}$$

◀ המשך בשקף הבא.

◀ נציב את המהירות בביטוי ל-d:

$$d = \frac{2}{qB} [m_A v_A - m_c v_c]$$

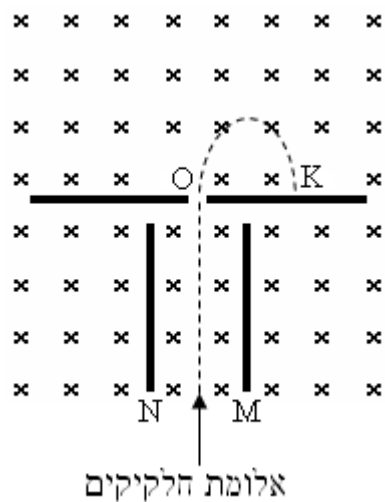
$$d = \frac{2}{qB} \left[ m_A \sqrt{\frac{2qV}{m_A}} - m_c \sqrt{\frac{2qV}{m_c}} \right]$$

$$d = \frac{2}{qB} \left[ \sqrt{2qVm_A} - \sqrt{2qVm_c} \right]$$

$$d = \frac{2}{qB} \left[ \sqrt{2qV4m} - \sqrt{2qVm} \right]$$

$$d = \frac{2}{qB} \sqrt{2qVm} = \sqrt{\frac{8qVm}{q^2 B^2}}$$

$$d = \sqrt{\frac{8Vm}{qB^2}}$$

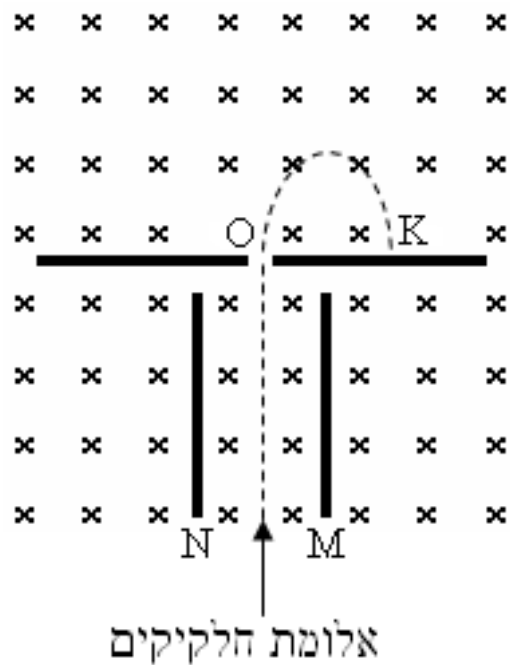


בשדה מגנטי אחיד, שעוצמתו  $B$  וכיוונו "לתוף הדף", נמצאים שני לוחות טעונים במטענים שווים ומנוגדים (מתקן זה נקרא קבל).  
בין לוחות הקבל,  $M$  ו- $N$ , הניצבים למישור הדף, שורר שדה חשמלי אחיד שעוצמתו  $E$ .  
אלומת חלקיקים נכנסת אל בין לוחות הקבל בניצב לשדות  $E$  ו- $B$ .  
החלקיקים נעים בין הלוחות במסלול ישר. חלקם עוברים דרך חריר  $O$  שבחיץ  $L$ , ולאחר מכן פוגעים בנקודה  $K$  (ראה תרשים).  
מטענו של כל חלקיק הוא  $q$  ומסתו  $m$ . כוחות הכבידה הפועלים על החלקיקים ניתנים להזנחה.

- א- האם מטען החלקיקים הוא חיובי או שלילי? נמק.
- ב- מה כיוון השדה החשמלי? נמק.
- ג- בטאו את המרחק  $OK$  באמצעות  $q, m, B, E$ .
- ד- רוצים שהחלקיקים יפגעו בחיץ בנקודה קרובה יותר לחריר  $O$  (כלומר רוצים להקטין את  $OK$ ). ניתן לשנות אך ורק את עוצמות השדות  $E$  ו- $B$  (ולא, למשל, את מהירות החלקיקים). מה יש לעשות לשם כך? הסבר.

א- האם מטען החלקיקים הוא חיובי או שלילי? נמק.

◀ מטען החלקיקים הוא שלילי, כי בצאתם מהקבל פועל עליהם כוח מגנטי ימינה



ב- מה כיוון השדה החשמלי? נמק.

◀ כיוון השדה החשמלי הוא ימינה (מ- N ל- M). מאחר שכיוון הכוח המגנטי הוא ימינה, הכוח החשמלי חייב להיות בכיוון שמאלה. כיוונו של הכוח החשמלי על מטען שלילי הוא הפוך לכיוון השדה החשמלי, ולכן כיוון השדה החשמלי הוא ימינה.

ג- בטאו את המרחק OK באמצעות  $q, m, B, v, E$ .

◀ בין לוחות הקבל הכוח המגנטי שווה בגודלו ומנוגד בכיוונו לכוח החשמלי. לפי החוק הראשון של ניוטון מתקיים:

$$\Sigma F = 0$$

$$q \cdot E = q \cdot v \cdot B$$

$$v = \frac{E}{B}$$

◀ לאחר צאת החלקיקים מהקבל הם נעים בתנועה מעגלית ועל פי החוק השני של ניוטון:

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

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

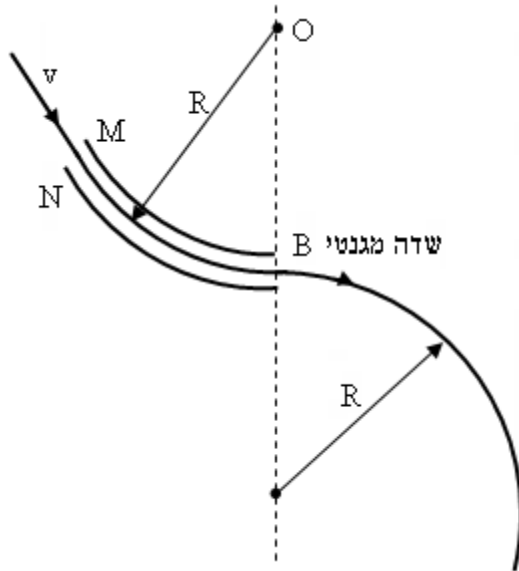
$$OK = 2R = \frac{2 \cdot m \cdot E}{B^2 \cdot q}$$

ד- רוצים שהחלקיקים יפגעו בחיץ בנקודה קרובה יותר לחריר O (כלומר רוצים להקטין את OK). ניתן לשנות אך ורק את עוצמות השדות E ו-B (ולא, למשל, את מהירות החלקיקים). מה יש לעשות לשם כך? הסבר.

◀ רדיוס המסלול נקבע על פי השדה המגנטי:

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

◀ מאחר ונדרש להקטין את הרדיוס, יש להגדיל את B. אולם נדרש גם שהמטענים ימשיכו לנוע בקו ישר בין הלוחות N-IM; לכן יש להגדיל את השדה החשמלי E אותו ביחס.  
◀ לסיכום: יש להגדיל את B ואת E באותו היחס.



התרשים שלפניך מתאר אלומה צרה של אלקטרונים הנעים במהירות  $v$ . האלקטרונים נכנסים אל בין שני לוחות גיליים,  $M$  ו- $N$ , בעלי מרכז משותף  $O$ .

הלוחות טעונים במטענים מנוגדים, כך שקווי השדה החשמלי שבין הלוחות מכוונים לאורך הרדיוס  $R$ .

בגלל המרחק הקטן בין הלוחות (בהשוואה לרדיוס  $R$ ), גודל השדה החשמלי  $E$  הוא קבוע בכל התחום שבין הלוחות, והאלקטרונים נעים בו בקשת מעגלית שרדיוסה  $R$ .

ביציאה מבין הלוחות הם מגיעים לאזור שבו שורר שדה מגנטי אחיד  $B$ . בהשפעת שדה זה נעים האלקטרונים שוב בקשת מעגלית שרדיוסה  $R$ . נתון:  $v=1.5 \times 10^7$  m/s  $R=0.1$

(1) קבע איזה מבין שני הלוחות ( $M$  או  $N$ ) טעון במטען חיובי, ואיזה מביניהם טעון במטען שלילי.

א-

(2) חשב את גודל השדה החשמלי  $E$  שבין הלוחות  $M$  ו- $N$ .

(1) מהו כיוון השדה המגנטי  $B$ ? נמק.

ב-

(2) חשב את עוצמת השדה המגנטי  $B$ .

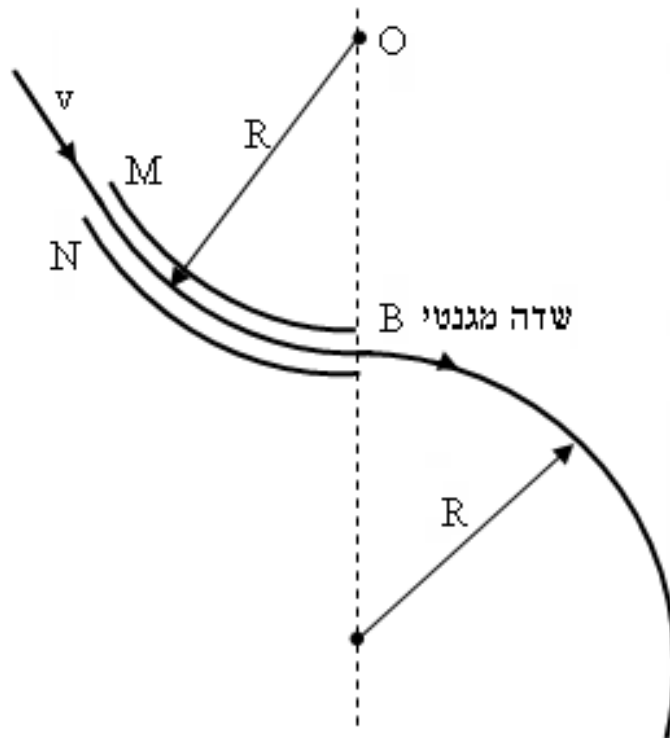
(1) האם השדה החשמלי מבצע עבודה על האלקטרונים? נמק.

ג-

(2) האם השדה המגנטי מבצע עבודה על האלקטרונים? נמק.

א- (1) קבע איזה מבין שני הלוחות (M או N) טעון במטען חיובי, ואיזה מהם טעון במטען שלילי.

◀ מאחר שהאלקטרונים נעים בתנועה מעגלית הכוח החשמלי הפועל עליהם הוא כלפי המרכז O. מכאן שהשדה החשמלי מכוון מ-M ל-N, לכן לוח M טעון במטען חיובי.



א- (2) חשב את גודל השדה החשמלי E שבין הלוחות M ו- N.

◀ על פי החוק השני של ניוטון

$$F = \frac{m \cdot v^2}{R}$$

$$F = q \cdot E$$

$$\frac{m \cdot v^2}{R} = q \cdot E \Rightarrow E = \frac{m \cdot v^2}{q \cdot R} = \frac{9 \cdot 10^{-31} \cdot (1.5 \cdot 10^7)^2}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 0.1} = 1.28 \cdot 10^4 \frac{N}{C}$$

ב- (1) מהו כיוון השדה המגנטי B? נמק.

◀ כיוון השדה המגנטי הוא פנימה לתוך הדף, על פי כלל יד ימין.

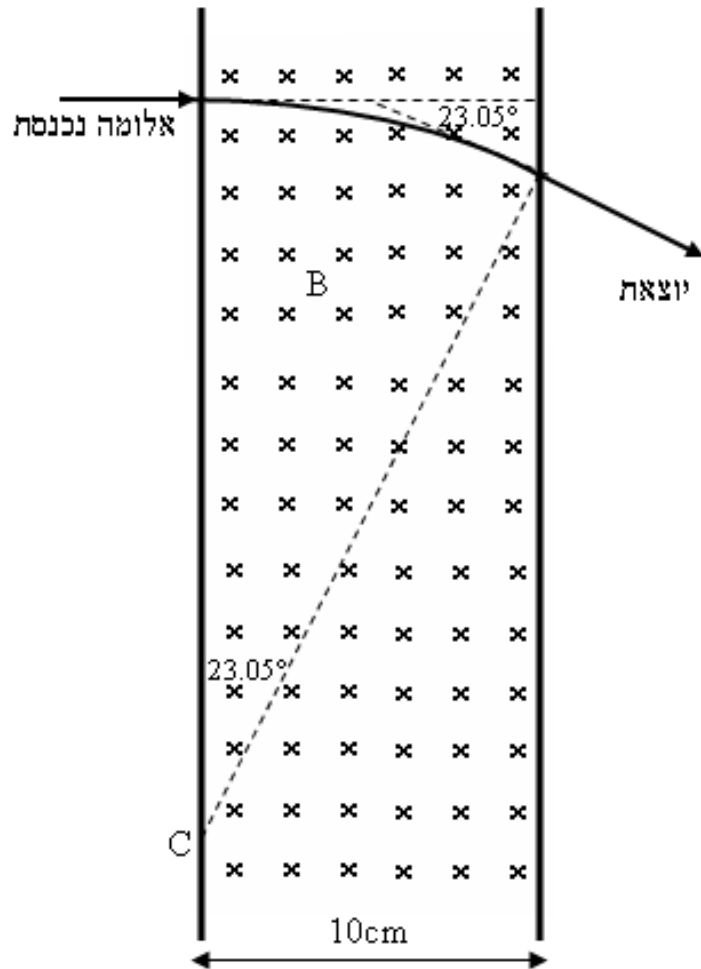
ב- (2) חשב את עוצמת השדה המגנטי B.

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

$$B = \frac{m \cdot v}{q \cdot R} = \frac{9.1 \cdot 10^{-31} \cdot 1.5 \cdot 10^7}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 0.1} = 8.53 \cdot 10^{-4} T$$

ג- (1) האם השדה החשמלי מבצע עבודה על האלקטרונים? נמק.  
◀ לא מתבצעת עבודה כי הכוח החשמלי ניצב לכיוון התנועה.

ג- (2) האם השדה המגנטי מבצע עבודה על האלקטרונים? נמק.  
◀ לא מתבצעת עבודה כי הכוח המגנטי ניצב לכיוון התנועה.



אלומת חלקיקים בעלי אנרגיה של  $2\text{MeV}$  ( $3.2 \times 10^{-13}\text{J}$ ) נכנסת לשדה מגנטי אחיד ברוחב  $10\text{ cm}$ , שעוצמתו  $0.8\text{ T}$  וכיוונו לתוך הדף. האלומה נעה לאורך קשת של מעגל שמרכזו C, ויוצאת מהשדה כשהיא מוטה בזווית של  $23.05^\circ$  ביחס לכיוונה המקורי (ראה תרשים).

- א-** (1) האם האנרגיה הקינטית של חלקיק באלומה משתנה בעקבות מעברו דרך השדה המגנטי? נמק  
(2) האם התנע של חלקיק באלומה משתנה בעקבות מעברו דרך השדה המגנטי? נמק.

- ב-** נתון כי מטען כל חלקיק באלומה זהה למטען האלקטרון.  
(1) חשב את רדיוס המסלול המעגלי של חלקיק באלומה.  
(2) חשב את מסת החלקיק.  
(3) חשב את זמן התנועה של החלקיק בשדה המגנטי.

א- (1) האם האנרגיה הקינטית של חלקיק באלומה משתנה בעקבות מעברו דרך השדה המגנטי? נמק

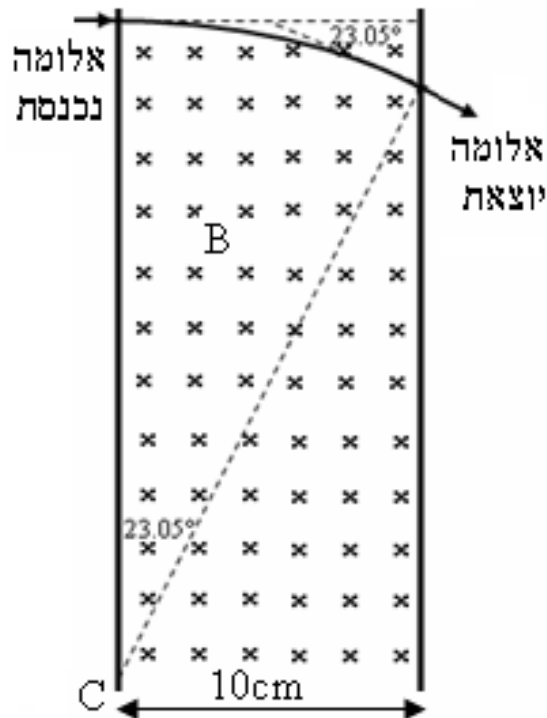
▶ האנרגיה הקינטית לא משתנה מכיוון שלכוח המגנטי הפועל על חלקיק באלומה אין רכיב בכיוון המהירות ולכן המהירות אינה משנה את גודלה.

(2) האם התנע של חלקיק באלומה משתנה בעקבות מעברו דרך השדה המגנטי? נמק.

▶ התנע הקווי של החלקיק כן משתנה, מכיוון שכיוון המהירות משתנה  $\vec{p} = m\vec{v}$

ב- נתון כי מטען כל חלקיק באלומה זהה למטען האלקטרון.

(1) חשב את רדיוס המסלול המעגלי של חלקיק באלומה (בהנחה שבקירוב טוב אורך הקשת הוא 10 ס"מ).



◀ על פי השרטוט:

$$\sin 23.05 = \frac{10}{R} \Rightarrow R = 25.5 \text{ cm}$$

(2) חשב את מסת החלקיק.

◀ על-פי החוק השני של ניוטון:

$$\Sigma F = ma_R$$

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

$$E_K = \frac{mv^2}{2} \Rightarrow E_K = \frac{m \cdot \left( \frac{B \cdot q \cdot R}{m} \right)^2}{2}$$

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

$$m = \frac{(0.8)^2 \cdot (1.6 \cdot 10^{-19})^2 \cdot 0.255^2}{2 \cdot 3.2 \cdot 10^{-13}} = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

(3) חשב את זמן התנועה של החלקיק בשדה המגנטי.

◀ נציב בביטוי ל- $v$  כפי שמצאנו בסעיף הקודם:

$$v = \frac{B \cdot q \cdot R}{m} = \frac{0.8 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 0.255}{1.66 \cdot 10^{-27}} = 1.96 \cdot 10^7 \frac{m}{sec}$$

◀ אורך הקשת  $S$ :

$$S = 2\pi R \cdot \frac{23.05^\circ}{360^\circ} = 2\pi \cdot 0.255 \cdot \frac{23.05^\circ}{360^\circ} = 0.1026m$$

$$t = \frac{S}{v} = \frac{0.1026}{1.96 \cdot 10^7} = 5.25 \cdot 10^{-9} sec$$