

תכנית רוטשילד ויצמן למצוינות בהוראת המדעים

התבוננות מיקרוסקופית על תהליך מעבר הזרם והאנרגיה במעגל DC פשוט

שמות הכותבים : מר עידו כהן

מר סורין קול

מנחים : פרופ' יובל אורג

מר יונתן מוסט

תאריך הגשה : כ"א חשון תשע"ג, 06 נובמבר 2012

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

לכל האנשים שתמכו בנו, היו לנו לאוזן קשבת, היו לנו לעזר, כווננו והדריכו .

תודה לפרופ' יובל אורג שהקדיש לנו מזמנו. שנהג בנו מנהג הכנסת אורחים ושיחות ההנחיה במשרדו היו עבורנו חוויה מאלפת . בתבונה רבה ידע להנחות אותנו מחד ולתת לנו לכוון את צעדינו מאידך, כך שהתהליך שעברנו יתנהל בקצב הטבעי והנכון ביותר . תודה למר יונתן מוסט על הערותיו המועילות. על שהיה נכון תמיד להשיב על שאלותינו ודלתו תמיד פתוחה עבורנו.

תודה לצוות הוראת המדעים על התמיכה והעצה וההכוונה. לפרופ' בת שבע אילון, לדוקטור אסתר בגנו ולדוקטור חנה ברגר.

תודה רבה לדוקטור אמנון חזן על הליווי הצמוד, על העצות הנכונות ועל היותו תמרור ומגדלור עבורנו.

תודה מיוחדת לפרופ' אורי גניאל ששיתף אותנו בידע שלו בנושא מטעני השפה והשאל לנו ברצון חומרי קריאה מספרייתו האישית שהיו לנו לעזר רב.

תודה למר יוסף סוסנו בסקי, לבורנט המעבדה במכון דוידסון, שהסכים ברצון לעזור לנו בשחזור מערכת הניסוי להדגמת מטעני השפה.

תודה לגב' פנינה נחום ולגב' מזל בית הלוי, לבורנטיות המעבדה בביה"ס התיכון האזורי בית ירח שאפשרו לנו לערוך את הניסוי להדגמת מטעני שפה והושיטו עזרה ככל שנדרש.

3	תודות.....	1.
4	מבוא.....	2.
4-13	רקע מדעי.....	3.
13	רקע פדגוגי.....	4.
13-21	שאלון פשוט ותוצאותיו.....	3.1
22-28	תיאור מעמיק בשפה פשוטה.....	3.2
29	חישובים והערכת כמויות.....	4.
29-32	מודל דרודה והמהירות הממוצעת של אלקטרון.....	4.1
33-37	בחינה מדוקדקת של "מודל הרכבת".....	4.2
38-43	הערכת זמן הטרנזיינט.....	4.3
44-46	צפיפות המטען על שפת מוליך מכופף.....	4.4
47-50	העברת האנרגיה במעגל.....	4.5
51-56	ביטויי ניסויי לנוכחות מטעני השפה.....	5.
57	עבור תלמידים.....	6.
57-58	6.1 פעילות מגשרת בין אלקטרוסטטיקה לאלקטרודינמיקה.....	
59-68	6.2 ארבע קושיות הנוגעות למעגל החשמלי הפשוט.....	
69-72	6.3 הרחבה והעמקה.....	
72-75	סיכום.....	7.
76	ביבליוגרפיה.....	8.

1. מבוא

המעגל החשמלי הפשוט, איננו פשוט כלל ועיקר. על מנת להבין באמת, את המתרחש במעגל טורי, הכולל מקור מתח אידיאלי, צרכן (עם התנגדות אוהמית) ומפסק, נדרש ידע די מעמיק באלקטרומגנטיות. במהלך הדפים הבאים, נפרוש את העקרונות הפיזיקאליים, העומדים בבסיס התהליכים, שמתרחשים במעגל חשמלי טורי. בעזרת העקרונות נסביר, באופן איכותי, את תהליכי מעבר המטען ומעברי האנרגיה במעגל ונענה על מספר שאלות פשוטות לכאורה, שתלמיד סקרן יכול להעלות בדעתו, במהלך לימוד נושא מעגלי זרם. תשובותינו יהיו איכותיות בעיקרן, מותאמות להבנה וידע של תלמידים המסיימים תיכון.

בהמשך, נביא תימוכין לתשובותינו, הן מצד התיאוריה והן מצד הניסוי. אנו נשתמש בעקרונות האלקטרומגנטיות, במצבים סימטריים ונוחים לחישוב, ונחשב תכונות פיזיקאליות כמו, **מהירות הזרם החשמלי, צפיפויות מטען, זמן התייצבות המערכת, הספק המגיע לנגד**. חישובינו ישפכו אור על התהליכים המתרחשים במעגל החשמלי ובמרחב סביבו. במקביל, נציג ניסוי איכותי, המעיד על נכונות מנגנון תנועת המטען וזרימת האנרגיה שתיארנו.

לסיום, נצרף הצעה לפעילות שנועדה לקדם הבנה איכותית, של התהליכים האמורים על ידי תלמידי י"ב, הנמצאים לקראת סוף מסלול לימודי הפיזיקה.

2. רקע מדעי

המעגל החשמלי מהווה נקודת מפגש לשלל מושגים ותכונות פיזיקאליות. זוהי מערכת בה מתקיימים יחסי גומלין של חומר ואנרגיה. מושגים כמו- מטען חשמלי, שדה חשמלי ומגנטי. אנרגיה פוטנציאלית וקינטית, מתח, זרם התנגדות. כל אילו משמשים יחדיו בסיפור המעגל.

על מנת לערוך דיון ראוי בתופעות, יש להזכיר, תחילה, שלוש פעולות מתמטיות (אופרטורים), מתחום האנליזה הוקטורית. פעולות אלו הן ה- gradient , ה- divergence וה- curl . שלושת האופרטורים הללו הם פעולות גזירה מורכבות וכל אחת מהן מבטאת תכונה חשובה של שדות במרחב, סקלריים ווקטוריים.

לפני שנתאר את האופרטורים, חשוב להתייחס לשני מושגים בסיסיים בפיזיקה ובמתמטיקה: הנגזרת והשדה. חשוב לציין, כי הם קשורים לבעיית הבדידות (discreteness) והרציפות (continuity), בעולם הפיזי. תכונות כמו טמפרטורה בנקודה מסוימת במרחב, או מהירות בנקודה מסוימת לאורך המסלול, הן תכונות שאנחנו יכולים לדמיין אך באופן מעשי, לעולם לא נוכל למדוד. מדידה נקודתית איננה אפשרית מכיוון שמכשיר המדידה שלנו איננו נקודתי, או מכיוון שהתכונה מוגדרת כהפרש בין ערכים בשתי נקודות שונות במרחב. כל תכונה פיזיקאלית נתפשת בעיני הפיזיקאי, מצד אחד כרציפה במרחב ובזמן ומצד שני, כאוסף ערכי המדידה הבדידים. לעולם לא נוכל להתייחס לשני האספקטים של התכונה הפיזיקאלית בבת אחת. קיימת דואליות ביסוד התכונה הפיזיקאלית, ממש כמו הדואליות של חלקיק- גל בתורת הקוונטים או האשליה האופטית בתמונת הנערה-זקנה והפיזיקאי בוחר על פי הנסיבות, לאיזה אספקט להתייחס.

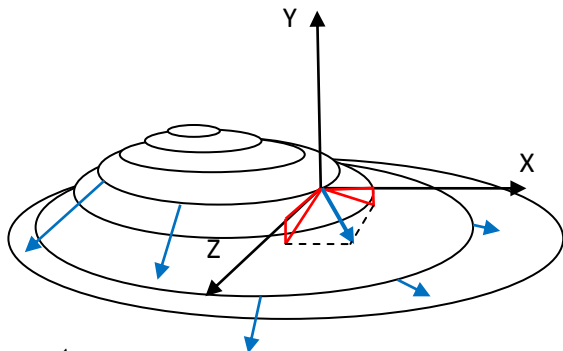
השדה, על פי הגדרה, הינו תכונה פיזיקאלית של המרחב. בתודעתנו, השדה הינו מושג רציף, בעוד שהמדידה של עוצמת השדה, קובעת ערך בדיד שלו. בדמיוננו, ניתן לציירו כתכונה נקודתית, בעוד שהמדידה של עוצמת השדה, לעולם תתייחס לתחום מסוים במרחב, קטן ככל שיהיה.

הנגזרת כמנה של הפרשים והאינטגרל כסכום שלהם, משמשים כלים מתמטיים המאפשרים "לפרוס" פונקציה רציפה לערכים בדידים "ולתפור" הפרשים בדידים לרצף. כאשר אנו "משאיפים" מקטע לאפס אנחנו "מגשרים", בין הבדיד לרציף ובין הכמות הנמדדת למעשה לתכונה שבתודעתנו. שלושת האופרטורים שנתאר עושים בדיוק את הדברים הללו לשדות.

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

אופרטור gradient $\vec{\nabla}\phi = \hat{x}\frac{\partial}{\partial x}\phi + \hat{y}\frac{\partial}{\partial y}\phi + \hat{z}\frac{\partial}{\partial z}\phi$ הוא פשוט הרחבה של הנגזרת לשלושה מימדים. במקום לצעוד צעד קטנטן לאורך ציר המשתנה אנחנו צועדים שלשה צעדים קטנטנים לאורך כל אחד מן הצירים של מערכת הקואורדינטות שלנו ומחשבים את קצב ההשתנות של שדה סקלרי בשלושת הכיוונים. הצעדים, כמובן, קטנים לאין שיעור כך שלמעשה, קצב השינוי של השדה מחושב בנקודה.

אין אפשרות לצייר שדה סקלרי בשלושה מימדים. ולכן, לצורך ההמחשה נתבונן בשדה משטחי בשלושה מימדים ונבחן את הגרדיינט לאורך שני קואורדינטות בלבד.

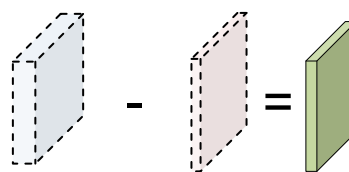
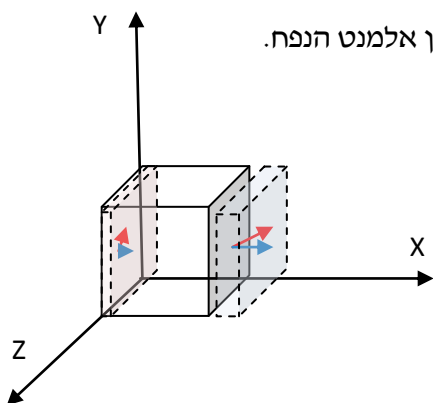


לקצב ההשתנות שלוש קואורדינטות, כלומר, הוא וקטור. וקטור זה מצביע בכיוון שלאורכו ההשתנות של השדה היא המרבית. יהיה נכון לכן לאמר כי גודלו של וקטור gradient מבטא את **מידת התלילות של השדה הסקלרי בנקודה כלשהי במרחב.**

אופרטור divergence $\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = \frac{\partial}{\partial x}A_x + \frac{\partial}{\partial y}A_y + \frac{\partial}{\partial z}A_z$, מחשב את השינוי בין רכיבי וקטור השדה הנכנסים אל תוך אלמנט נפח קטנטן לבין רכיבי השדה היוצאים החוצה ממנו. **לשם המחשה, נתייחס לאלמנט נפח בצורת קובייה קטנה המוצבת בראשית הצירים. אם נחשב את הפרש בין שטף הוקטור הנכנס לשטף היוצא דרך הפאות במישור Z-Y ונחלק אותו בנפח הקובייה ונדרוש שיהיו מידות הקובייה קטנות לאין שיעור, נקבל את הגורם הראשון באופרטור:**

$$\frac{(A_{x1}-A_{x0})S}{V} = \frac{\Delta A_x \Delta y \Delta z}{\Delta x \Delta y \Delta z} \xrightarrow{\Delta \rightarrow 0} \frac{\partial}{\partial x} A_x$$

החלוקה בנפח נותנת לנו, את **צפיפות השטף** הבוקע מדופן אלמנט הנפח.



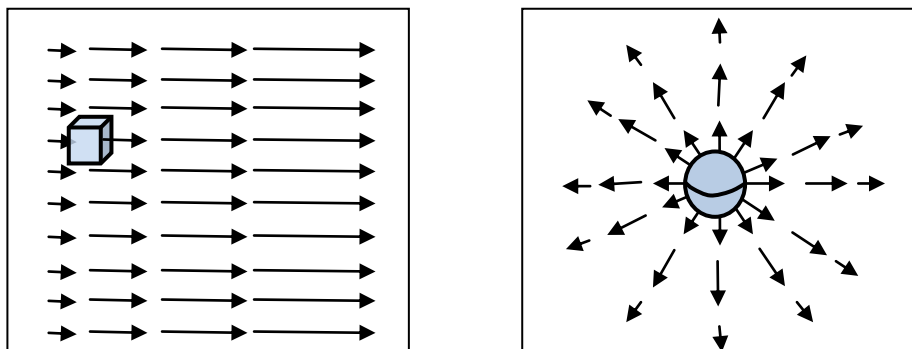
"נפח" הירוק הוא הפרש מידות השטף פנימה והחוצה מן הקובייה. הוא מבטא את מידת ההתבדרות של השדה הוקטורי ממנה.

אם נחזור על החישוב עבור כל צמדי הפאות האחרות ונצרף יחדיו את התוצאות, נקבל את צפיפות השטף הבוקע לכל הכיוונים, מנקודה. חשוב לציין כי מכיוון שבשטף מדובר הרי שהדיברגנס של שדה וקטורי הינו סקלר.

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

אפשר, לאמר, אם כן, כי ה-divergence מבטא את מידת ההתבדרות או ההתכנסות של השדה
בנקודה כלשהי במרחב.

להלן שתי דוגמאות לשדות שהדיברגנס שלהם איננו 0, האחת ברורה והשנייה קצת פחות.

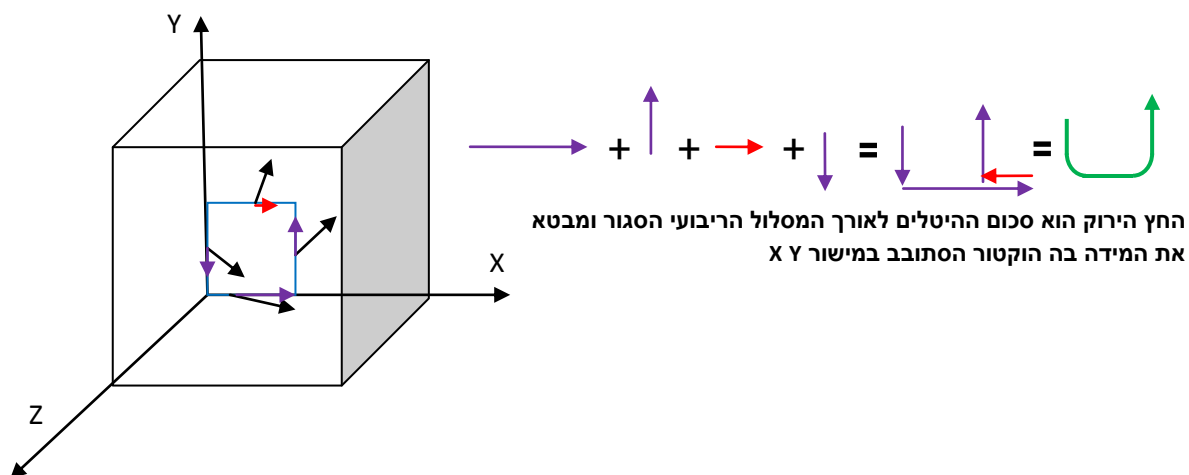


אופרטור ה-curl או ה-Rotor

$$\vec{\nabla} \times \vec{A} = \hat{x} \left(\frac{\partial}{\partial y} A_z - \frac{\partial}{\partial z} A_y \right) + \hat{y} \left(\frac{\partial}{\partial z} A_x - \frac{\partial}{\partial x} A_z \right) + \hat{z} \left(\frac{\partial}{\partial x} A_y - \frac{\partial}{\partial y} A_x \right)$$

על מנת להבין את משמעותו נבחר את אחד מרכיבי ה-curl, למשל, רכיב Z. נבחר מסלול בצורת מלבן קטן, במישור X-Y, המוצב בראשית הצירים. נחבר את כל ההיטלים של וקטור A על צלעות המלבן. לשם כך עלינו "לטייל" לאורך המלבן: לצאת מראשית הצירים וכפול את רכיב X של הוקטור בצלע X בצעדנו בכיוון החיובי, אחר לכפול את רכיב Y בצלע Y בצעדנו בכיוון החיובי ואז לחזור לאחור בכיוון X ובכיוון Y עד שנגיע לראשית שוב. חיבור כל הרכיבים הללו, באם תוצאותו חיובית, פירושו של דבר שוקטור A "הסתובב" נגד כיוון השעון במהלך טיולנו.

אם נחלק את הערך שקיבלנו לשטח המלבן נקבל את "צפיפות הסיבוב" או מידת הסיבוב למטר מרובע.



בחירת מלבן קטן לאין שיעור תיתן לנו את מידת הסיבוב במישור X-Y, סביב נקודה!

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

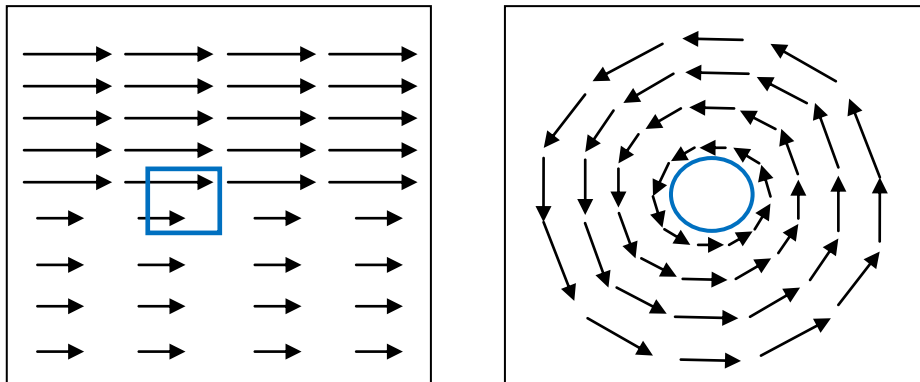
$$\frac{A_{x01}\Delta X + A_{y01}\Delta Y + A_{x10}(-\Delta X) + A_{y10}(-\Delta Y)}{\Delta X\Delta Y} = \frac{(A_{x01} - A_{x10})\Delta X + (A_{y10} - A_{y01})\Delta Y}{\Delta X\Delta Y} = \frac{\Delta Y\Delta A_y - \Delta A_x\Delta X}{\Delta X\Delta Y}$$

ההיפוך בסימן של ΔA_x נובע מן העובדה ש A_{x10} רחוק מן הראשית יותר מ A_{x01} ועקרונית, השתנה במידה רבה יותר במהלך ה"טיול".

$$= \frac{\Delta A_y}{\Delta X} - \frac{\Delta A_x}{\Delta Y} \xrightarrow{\Delta \rightarrow 0} \left(\frac{\partial}{\partial x} A_y - \frac{\partial}{\partial y} A_x \right)$$

סיבוב במישור Y-X פירושו סיבוב בכיוון Z. אם נוסף על החישוב הזה את מידת הסיבוב בכיוון X ובכיוון Y, נקבל את שלושת רכיבי הסיבוב של השדה- את מידת הסיבוב סביב נקודה ואת כיוונו. אפשר לאמר, אם כן, כי ה curl בודק את מידת הסיבוב של הוקטור סביב נקודה במרחב !

להלן שתי דוגמאות לתכונה וקטורית שה curl שלה איננו 0, האחת ברורה והשנייה קצת פחות.



לסיכום, לרשותנו 3 פעולות מורכבות. כל פעולה מבטאת תכונה מאפיינת של השדה ויוצרת שדה חדש מתוך הקיים:

- הגרדיינט, המבטא את מידת התלילות של שדה סקלרי בנקודה, יוצר מסקלר וקטור.
- הדיברגנס המבטא את מידת ההתבדרות של שדה וקטורי מנקודה, יוצר מוקטור סקלר.
- הקרל המבטא את מידת הערבול של שדה וקטורי בנקודה, יוצר וקטור מוקטור.

מצוידים בכלים הללו אנחנו יכולים לבחון את חוקי הפיזיקה ובפרט האלקטרומגנטיות בחיפוש אחר תובנות חדשות.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} = -\frac{\partial}{\partial t} \rho \quad \text{משוואת הרציפות:}$$

משוואת הרציפות מוזכרת בתכנית הלימודים של התיכון, ברפרוף המבייש את מרכזיותה בין חוקי הפיזיקה. המשוואה היא ביטוי לחוקי השימור של המטען ושל החומר. ρ יכול להיות צפיפות המטען או צפיפות המסה באלמנט נפח. יחידות המידה המתאימות הן $\left[\frac{col}{m^3} \right]$ או $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$. הינו וקטור צפיפות הזרם. הוא יכול לייצג את כמות המטען או את כמות החומר, היוצאים מבעד לדופן אלמנט הנפח. במובן זה, משמעותו היא שטף של מטען או מסה ויחידות המידה שלו הן $\left[\frac{kg}{m^2 \cdot sec} \right]$ או $\left[\frac{col}{m^2 \cdot sec} \right]$.

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

המשוואה טוענת טענה פשוטה והגיונית – עצמת השטף הבוקע מ"נקודה" במרחב שווה לשינוי בצפיפות החומר או המטען בנקודה. במלים פשוטות – אם אנחנו מוצאים כי כמות המטען או החומר בנקודה כלשהי, הולכת ופוחתת, אזי הסיבה לכך היא שכמות זו מתפזרת מן הנקודה לסביבתה.

אדם שאין לו נגיעה בפיזיקה, יכול לטעון שהמשוואה מיותרת ומציינת את המובן מאליו. כל ילד יודע שאם יהפוך את קופסת הגולות שבחדרו מעל לרצפה, מה שהיה בקופסה יתפזר לכל עבר. אבל מבט חד יותר מגלה כי המשוואה, בנוסף לביטוי המתמטי לשימור, הינה הצהרה מעמיקה מאד על טיבה של המציאות - ביקום הפיזיקאלי, היא אומרת, אי אפשר לצאת מן החדר מבלי לעבור מבעד לפתח. לא רק שכמות החומר והמטען ביקום כולו קבועים בכל רגע, שימור שכזה אפשרי גם אם ייעלמו בנקודה אחת ויופיעו בו בזמן, באורח פלא, באחרת. אבל משוואת הרציפות טוענת כי המעבר שלהם ממקום למקום יכול להיעשות אך ורק על ידי תנועה רציפה, מנקודה לנקודה, על פי חוקי התנועה המוכרים! הנה, שימוש ראוי לאופרטור הדיברגנס.

משוואות מקסוול - המשוואות המבטאות את הקשרים הבסיסיים בין המטען החשמלי והשדות החשמלי והמגנטי.

משוואות מקסוול, כמו משוואות ניוטון, הן משוואות דיפרנציאליות, המערבות את התכונות הפיזיקאליות ואת נגזרותיהן. כמו חוקי ניוטון, גם "הוראות ההפעלה" שלהן דורשות שימוש בתנאי התחלה. ברמה העקרונית, הן מאפשרות למצוא את השדה החשמלי והמגנטי עבור מערך של זרמים או פילוג מטענים במרחב. הצרה היא, שהן מורכבות הרבה יותר ממשוואות התנועה של ניוטון ופתרוןן, בד"כ, לא קל. למרות זאת, ניסוחן בשפת האופרטורים מאפשר ללמוד הרבה על חוקי האלקטרומגנטיות רק מתוך התבוננות בהן. חשוב להדגיש כי, כמו חוקי ניוטון, המשוואות מקבלות את תוקפן מתוך תצפית וניסוי ולא מפיתוח תיאורטי של חוקים בסיסיים הקודמים להם.

הגבלנו את עצמנו לניסוח המשוואות בריק. ניסוח זה יספיק לצרכינו.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{j}$$

\vec{E} ו \vec{B} הם השדות החשמלי והמגנטי, ρ ו \vec{j} הם צפיפות המטען והזרם, ϵ_0 הוא המקדם הדיאלקטרי של הריק ו c מהירות האור בריק.

שתי המשוואות הראשונות עושות שימוש בדיברגנס ולכן מתייחסות להתבדרות של השדות במרחב.

שתי המשוואות הבאות עושות שימוש ברוטור ולכן מתייחסות למידת הערבול של השדות במרחב.

המשוואה הראשונה גורסת כי שדה יתבדר מנקודה, אם יש בה מטען. או בניסוח פשוט יותר, המטען, הוא המקור ממנו נובע השדה החשמלי! זהו **חוק קולון** בשינוי אדרת.

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

המשוואה השנייה מציינת שהשדה המגנטי איננו מתבדר כלל, או, במלים אחרות, אין לו מקורות ! גם עובדה זו ידועה לכל תלמיד תיכון שסיים לימודי פיזיקה.

המשוואה השלישית היא למעשה, **חוק פרדיי** הנוגע לכא"מ המושרה. היא גורסת כי שינוי בשדה המגנטי בנקודה, יגרום להופעת שדה חשמלי. אם נקיף את הנקודה בכריכה מוליכה השדה החשמלי המתערבל, יגרום לתנועת מטען בכריכה כלומר, לכא"מ.

המשוואה הרביעית היא ניסוח מחדש **לחוק אמפר** בליווי התוספת מעוררת ההשראה של מקסוול. משוואה זו אומרת לנו ששני דברים יכולים לגרום לשדה המגנטי להתערבל סביב נקודה-תנועת מטען ושינוי בשדה החשמלי !

על פניו, משוואות מקסוול פשוטות למדי, אם בוחנים אותן במונחים של סיבה ותוצאה-שדה חשמלי נובע ישירות מקיום המטען ומופיע מסביב לנקודה כאשר משנים בה את השדה המגנטי ואילו השדה המגנטי, כנגדו אין סיבה ישירה לקיומו והוא מופיע מסביב לנקודה אם ינוע בה מטען או אם השדה החשמלי ישתנה בה. ההתבוננות הזו מטעה משהו. ננסה לראות מה מנבאות המשוואות שיקרה אם נטלטל אלקטרון הלך ושוב בין שתי נקודות סמוכות במרחב – פעולה פשוטה להפליא, לכל הדעות.

ברור כי המרחב סביב לאלקטרון מלא בקווי שדה חשמלי מתכנס (האלקטרון שלילי כידוע). תנועה של האלקטרון פירושה זרם ופירושו כי קווי שדה מגנטי יתערבלו להם סביב ציר התנועה ויגדשו גם הם את המרחב ובכך עדיין לא תם הסיפור. תנועת האלקטרון גורמת לשדה החשמלי סביבו להשתנות – להתחזק במקומות אליהן מתקרב האלקטרון ולהיחלש במקומות מהן הוא מתרחק או להפוך כיוון עם היפוך כיוון התנועה. קווי השדה החשמלי רוטטים – מצטופפים ומתפזרים בהשפעת התנועה ושינוי בשדה החשמלי יערבל שדה מגנטי מסביבו, כך אומרות המשוואות. מסביב לאזור בו מתנדנד האלקטרון יופיעו ויתערבלו קווי שדה מגנטי נוספים בכל כיוון שהוא: נגד כיוון השעון, סביב קווי השדה החשמלי המצטופפים ועם כיוון השעון, סביב קווי השדה החשמלי המתרווחים. וכל הסימפונייה הגועשת והמתערבלת הזו מתפשטת אל המרחב במהירות האור. זה מה שמספרות לנו המשוואות...הסיבות להופעת השדות פשוטות, אבל מעורבות אלו באלו, או במלים מתמטיות – המשוואות "מצומדות" וזהו מקור הסיבוך.

ולמרות זאת, בהחלט ניתן לפתור את המשוואות נומרית ואפילו אנליטית, אם עושים קירובים מתאימים או בוחנים מקרים פשוטים במיוחד.

לצורך פתרון של משוואות מקסוול אנו צריכים עוד מעט הרחבה מתמטית – אנו צריכים להכיר אופרטורים מסדר שני שזהו השם הרשמי להפעלת האופרטורים שהכרנו בזה אחר זה. מהו דיברגנס של גרדיינט ? או, מהו רוטור של דיברגנס ? ישנן 4 אפשרויות רלוונטיות מבחינתנו, ולמרבה המזל, שתיים מבין האפשרויות פשוט מתאפסות:

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \phi) = 0$$

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{A}) = 0$$

על מנת להראות את נכונות הזהויות הללו צריך פשוט לרשום הביטויים על פי ההגדרות ולבצע את פעולות הגזירה. אנחנו לא נכלול כאן את החישוב אלא נסתפק בשיקולים איכותיים:

הגרדיינט מבטא את מידת התלילות ולכן מכוון תמיד מן המקום ה"הנמוך" למקום ה"הגבוה". מידת התלילות לעולם לא תוכל להסתובב ולחזור בחזרה משום שאי אפשר לרדת ממקום נמוך, בחזרה למקום גבוה.

באופן דומה, הרוטור מבטא את מידת ההתערבלות של השדה הוקטורי, כלומר, המידה בה רכיבי השדה הוקטורי מחזיקים זה בזנבו של זה וסבים במעגל סגור, קטנטן, סביב נקודה. מעגל סגור

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

מעולם לא יפרוץ וישטוף החוצה והדיברגנס שלו חייב להתאפס. אפשרות נוספת איננה מתאפסת בהכרח והיא

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \phi) = \vec{\nabla} \cdot \left(\hat{x} \frac{\partial}{\partial x} \phi + \hat{y} \frac{\partial}{\partial y} \phi + \hat{z} \frac{\partial}{\partial z} \phi \right) = \frac{\partial^2}{\partial^2 x} \phi + \frac{\partial^2}{\partial^2 y} \phi + \frac{\partial^2}{\partial^2 z} \phi = \nabla^2 \phi$$

אפשרות זו היא פשוט הרחבה של מושג הנגזרת השנייה. ונקראת *Laplacian* או לפלאסיאן.

בכדי לראות שימוש בלפלאסיאן, נחזור לרגע אל תחום האלקטרומגנטיות. נבחן את משוואת מקסוול הראשונה עבור שדה חשמלי שאיננו מתערבל (שהרוטור שלו מתאפס). מתמטית, ניתן להראות כי אפשר לגזור שדה שכזה מתוך שדה סקלרי.

כלומר -

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} \phi$$

ϕ הוא ישות ידועה בחוגי האלקטרומגנטיות - הפוטנציאל החשמלי.

הצבה במשוואת מקסוול הראשונה נותנת לנו משוואה סקלרית אחת במקום שלוש וקטוריות

$$-\nabla^2 \phi = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

משוואה זו נקראת משוואת פואסון ועבור $\rho = 0$, משוואת לפלאס. בהינתן מערך מטענים חשמליים במרחב ותנאי השפה המתאימים, אפשר לפתור את המשוואה, לקבל את הפוטנציאל החשמלי ולגזור ממנו את השדה. אמנם פתרון שכזה איננו מן הקלים אבל המתמטיקאים כבר עמלו ומצאו את הפתרונות הכלליים למשוואות הללו כך שאפשר להציץ בדפי הנוסחאות אם צריך.

מה בקשר לרוטור של רוטור? גם הוא לא בהכרח מתאפס והוא בהחלט ביטוי שמיש, כפי שנראה

מיד.

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{A} = \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A}$$

כאן אין הרבה תועלת בשיקולים איכותיים על מנת להבין את התוצאה, מה גם שאופרטור הלפלאסיאן, המופיע בצד ימין, פועל על כל רכיב של הוקטור A ונותן תוצאה וקטורית ולא סקלרית כמו במשוואת לפלאס.

אפשר, אולי, להסתכל על הדברים באופן הבא - צד שמאל של הזהות "שואל": מה יכול לגרום לשדה הוקטורי שלנו להתערבלות שונה במרחב, מנקודה לנקודה? וצד ימין של הזהות משיב: שני דברים - מערך מקורות לא אחיד במרחב $(\vec{\nabla} \cdot \vec{A})$ ושדה שנוטה להשתנות בקצב גובר והולך מנקודה לנקודה $(\nabla^2 \vec{A})$. כמו שאמרנו, הניסיון לדמיין את השינויים הללו בשדה שלא לדבר על ההקשר לסיבוב, הוא קצת סר טעם.

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

הפיזיקאים יבחרו, בדרך כלל, מקרים שבהם הפעלה כפולה של אופרטור הרוטור תיתן תוצאות פשוטות. הנה דוגמה:

נתבונן בשתי משוואות מקסוול האחרונות:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} \vec{E} + \frac{\vec{J}}{c^2 \epsilon_0}$$

אפשר להפעיל את אופרטור הרוטור על אחת ולהציב בה את השנייה:

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = \vec{\nabla} \times \left(-\frac{\partial}{\partial t} \vec{B} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \times \vec{B}) = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E} - \frac{1}{c^2 \epsilon_0} \frac{\partial}{\partial t} \vec{J}$$

מצד שני על פי הזהות ובעזרת משוואת מקסוול הראשונה

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = \vec{\nabla} \left(\frac{\rho}{\epsilon_0} \right) - \nabla^2 \vec{E}$$

נשווה את שני הביטויים ה"ימניים" זה לזה ונזכור כי המשוואה שהתקבלה נכונה תמיד בריק (זיכרו שניסחנו את משוואות מקסוול מלכתחילה בתנאי ריק לשם הפשטות). הריק הוא מקום בו

אין צפיפויות מטען או זרם, ועבור $0 = \frac{1}{c^2 \epsilon_0} \frac{\partial}{\partial t} \vec{J} = \vec{\nabla} \left(\frac{\rho}{\epsilon_0} \right)$ מתקבלת משוואת גלים פשוטה:

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E}$$

אחד מפתרונותיה, למשל, הוא גל הרמוני, מישורי $\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})}$ המתקדם בכיוון \vec{k} ובמהירות $c = \frac{\omega}{|\vec{k}|}$. השתמשנו בהצגת אוילר לשם הנוחות אבל מדובר, כמובן, בחלק הממשי של הביטוי המרוכב

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})$$

טיפול דומה במשוואה השנייה יוליד משוואת גלים עבור השדה המגנטי

$$\nabla^2 \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{B}$$

עם פתרונות דומים.

משוואות מקסוול מלמדות אותנו דבר נפלא על היקום בו אנו חיים. הן מכריזות, בשפתן המתמטית כי כל מערכת של מטענים וזרמים ביקום, משדרת בריק, גלים אלקטרומגנטיים, במהירות c !!

הנה כך, שופכות המשוואות אור על מהות האור.

וקטור פוינטינג וצפיפות האנרגיה. ישנה זהות נוספת שבה נוכל לעשות שימוש והיא נוגעת לדיברגנס של מכפלת וקטורים:

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{M} \times \vec{N}) = \vec{N} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{M}) - \vec{M} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{N})$$

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

נוכל לכפול, סקלרית, את הרוטור של E ב B ואת הרוטור של B ב E . על פי משוואות מקסוול נקבל:

$$\vec{B} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = \vec{B} \cdot \left(-\frac{\partial}{\partial t} \vec{B} \right) = -\vec{B} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{\partial |\vec{B}|^2}{2 \partial t}$$

$$\vec{E} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{B}) = \vec{E} \cdot \left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} \vec{E} + \vec{j} \right) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} \frac{|\vec{E}|^2}{2} + \frac{\vec{E} \cdot \vec{j}}{c^2 \epsilon_0}$$

נפחית את המשוואות זו מזו ונקבל מצד אחד,

$$\vec{B} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{E}) - \vec{E} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{B}) = -\frac{\partial}{\partial t} \frac{|\vec{B}|^2}{2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} \frac{|\vec{E}|^2}{2} - \frac{\vec{E} \cdot \vec{j}}{c^2 \epsilon_0}$$

$$= -\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{|\vec{B}|^2}{2} + \frac{|\vec{E}|^2}{c^2 2} \right) - \frac{\vec{E} \cdot \vec{j}}{c^2 \epsilon_0}$$

ומצד שני, על פי הזהות,

$$\vec{B} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{E}) - \vec{E} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{B}) = \vec{\nabla} \cdot (\vec{E} \times \vec{B})$$

אם נשווה אגפים ונכפול את שני הצדדים ב $c^2 \epsilon_0$ נקבל

$$\vec{\nabla} \cdot (c^2 \epsilon_0 \vec{E} \times \vec{B}) = -\frac{\partial}{\partial t} \left(c^2 \epsilon_0 \frac{|\vec{B}|^2}{2} + \epsilon_0 \frac{|\vec{E}|^2}{2} \right) - \vec{E} \cdot \vec{j}$$

רחוק מן המערך של הזרמים והמטענים, במקום בו $\vec{j} = 0$ מתקבלת משוואה מוכרת !

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{s} = -\frac{\partial}{\partial t} u$$

$$u = \left(c^2 \epsilon_0 \frac{|\vec{B}|^2}{2} + \epsilon_0 \frac{|\vec{E}|^2}{2} \right) \quad \vec{s} = (c^2 \epsilon_0 \vec{E} \times \vec{B}) \quad \text{כאשר}$$

זוהי משוואת רציפות נוספת! משהו שוטף ומתבדר מכל נקודה במרחב ומידת התבדרותו שווה לקצב שינוי צפיפות! מה מצטופף לו בכל נקודה במרחב ומה בדיוק שוטף ומתבדר לו ממנה?!

כדי לברר את משמעותם של \vec{s} ו u , נבחן את יחידות המידה של הגורם שהשמטנו $\vec{E} \cdot \vec{j}$: יחידות המידה של שדה מוכפלות ביחידות המידה של צפיפות הזרם:

$$\frac{N}{col} \cdot \frac{col}{sec \cdot m^2} = \frac{N \cdot m}{sec \cdot m^3} = \frac{joule}{sec \cdot m^3} = \frac{watt}{m^3}$$

מדובר בצפיפות של הספק ופירושו ש u בעל יחידות של $\frac{joule}{m^3}$ כלומר, מבטא את צפיפות האנרגיה, החשמלית והמגנטית בנקודה. והוקטור \vec{s} ? בדומה לוקטור צפיפות הזרם במשוואת הרציפות הישנה, הוא מבטא את שטף האנרגיה האלקטרומגנטית העובר מכל נקודה במרחב

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

לשכנותיה! זאת ועוד! ניתן לראות כי שטף זה ניצב לגם לשדה החשמלי וגם לשדה המגנטי (הרי הוא פרופורציוני למכפלה וקטורית שלהם).

וקטור צפיפות שטף האנרגיה נקרא **וקטור פוינטינג** על שם המדען **John Henry Poynting** שהגה אותו. בכל מקום בו יופיעו שדה מגנטי ושדה חשמלי יחדיו במרחב, תנוע האנרגיה האלקטרומגנטית בניצב להם, בכיוון שיצביע עליו וקטור פוינטינג.

בהחלט מרגש ומעורר מחשבה לגלות כי, במציאות החומרית בה אנחנו חיים, גם המטען, גם החומר וגם האנרגיה מחושקים על ידי חוקי שימור דומים להפליא!!

3. רקע פדגוגי

במלוא הצניעות הראויה. אנו סבורים כי ניתן לראות בעבודת הגמר שבדפים הללו, לא יותר מאשר "הפנייה מורחבת" למאמרו של איאן ספטון, אוניברסיטת סידני, "הבנת חשמל ומעגלי זרם – מה שספרי הלימוד אינם מגלים לכם" (2002).

נתקלנו במאמר במהלך איסוף חומר לפרויקט בנושא הזרם החשמלי. הייתה זו טלטלה הגונה ובריאה לתודעה הפדגוגית שלנו. הטענה המרכזית במאמר היא שהשאיפה לתאר את הפיזיקה בצורה פשוטה על מנת לעשותה נגישה לקהל רחב של תלמידים, שאיפה שכזו עלולה להחטיא את המטרה- לגרום לתפישות מוטעות אצל תלמידים, במקרה הטוב או להוות תיאור שגוי לגמרי, במקרה הרע.

ספטון פורש, בראשית המאמר, 5 "חריקות" צורמות בהבנת הזרם החשמלי ותפקידו במעגל החשמלי הפשוט. 5 טענות מעוררות מחשבה המערערות על התפישה הנאיבית שהזרם הנו הגורם הישיר להעברת האנרגיה מהסוללה לנורה. אמנם, עם התקדמותנו בפרויקט הסתבר לנו כי ניתן למצוא ציודקין לתמיכה בשתי הטענות הראשונות, הנה נותרות השלוש האחרות ללא מענה והאוסף של החמש כולו משיג את המטרה ויוצר תחושת אי נוחות גדולה מן התפישה הרווחת ומדברן לחפש הסבר ראוי יותר.

אליבא דה ספטון, הזרם החשמלי, כלומר תנועת האלקטרונים במוליך, אינו יכול להוות מנגנון ישיר להעברת האנרגיה משום ש...

א. תנועת הסחיפה של האלקטרונים במורד הזרם איטית להפליא בעוד שמהירות העברת האנרגיה קרובה למהירות האור.

ב. אנרגיה מועברת גם במעגלי זרם חילופין והאלקטרונים במעגלים שכאלה אינם זורמים אלא מטלטלים הלוך ושוב- קצת מסורבל ומטריד להשתמש בשני מודלים לשני סוגים שונים של מעגלי הזרם.

ג. העברת האנרגיה איננה מחייבת מגע ישיר בין הסוללה לנורה- הרי במעגל טורי המכיל קבל או שנאי, קיים נתק ביניהן וממילא אנו חייבים להגדיר מנגנון העברה אחר.

ד. כיוון תנועת האלקטרונים במעגל הוא מן הסוללה לנורה ובחזרה ואילו כיוון תנועת האנרגיה הוא מן הסוללה לנורה בלבד! יש קושי גדול ליישב את הסתירה בין הכיוונים במסגרת המודל הרווח.

ה. האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית (כמו האנרגיה הפוטנציאלית הגרויטציונית), איננה תכונה של האלקטרונים הזורמים בלבד אלא של כל מערכת המטענים כולה! ואם אי אפשר להצביע על

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

האלקטרון שבמוליך כמקום מושבה של האנרגיה החשמלית הרי אי אפשר לאמר שהוא זה שמעביר את האנרגיה הלאה!

חמש הטענות כל כך פשוטות וכל כך מטרידות עד שאינך מבין כיצד לא עלו בדעתך קודם לכן. מדוע אנו, המורים המלמדים אלקטרומגנטיות, לא הוטרדנו מזמן בגינן? מדוע תלמיד הפיזיקה החושב, הבוחן את העובדות במסננת ההיגיון, לא הקשה עלינו במהלך שעורי החשמל? מהו המודל שאנו מציינים בו את תלמידינו, הנוגע למתרחש לאורכו של המעגל החשמלי? האם איננו חוטאים לאמת ממש, או מעודדים תלמידים להבין את המתרחש באופן שגוי?

מתוך התהיות הללו, בנינו שאלון ובו 10 שאלות הבנה וידע שיעזרו לנו לשפוך אור על המודל שתלמידים גיבשו לעצמם, בעזרתנו המורים, למתרחש במעגל החשמלי הפשוט. מדובר בשאלון פרה-פרה דיאגנוסטי, גולמי למדי (ראה נספח א') אותו העברנו לתלמידינו.

מספר התלמידים שענו על השאלון היה 13. 13 התלמידים – תלמידי יב, בוגרי פיזיקה 5 יחידות, בתום תקופת לימודיהם- לאחר שניגשו כבר לבחינת הבגרות בחשמל ומגנטיות.

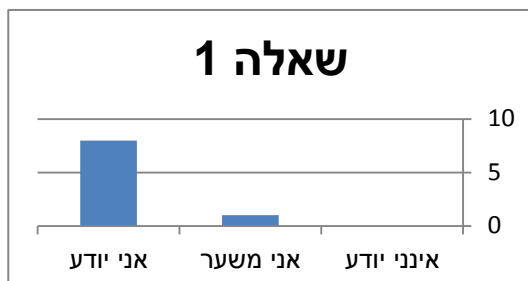
השאלות נוגעות, רובן ככולן, לקשר בין הזרם החשמלי והשדה החשמלי ודרך העברת האנרגיה במעגל. לגבי כל שאלה, התלמידים התבקשו לציין באופן גס למדי, את מידת הביטחון שיש להם בתשובה שנתנו. חקירת מידת הביטחון בתשובה, כך חשבנו, תלמד אותנו האם התשובות (בין אם שגויות ובין אם נכונות) הן פרי תמונת עולם מעורפלת או מודל מגובש וברור. בנוסף לתפקיד הדיאגנוסטי, חשבנו להשתמש לעתיד, בשאלון, כ"כלי טיפול". חלק מן השאלות לכן, נכללו במטרה ליצור אצל התלמיד ספקות לגבי המודל שיש לו למתרחש במעגל ומוטיווציה להיפגש עם מודל חדש.

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

3.1 ניתוח השאלון

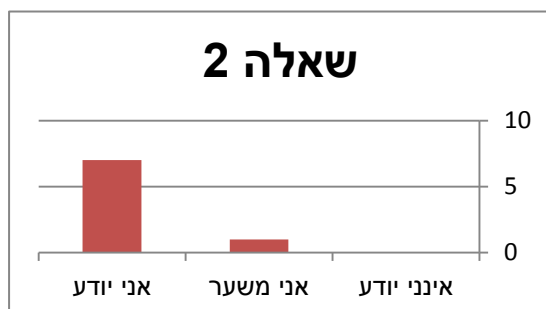
בניתוח, נתייחס תחילה לתשובות התלמידים לכל אחת מן השאלות, נסווג את התשובות ונבדוק את שכיחותן. בעזרת גרף עמודות, ננסה לבטא את רמת הביטחון שיש לתלמידים בכל תשובה וכסיכום, וננסה לצייר, בקווים כלליים, את המודל הקיים בתודעת הלומדים. בנוסף, נבקר, לאור התשובות, את השאלות שהחטיאו את מטרתן בשל ניסוח מטעה.

כיצד הגיעו האלקטרוניים למעגל?



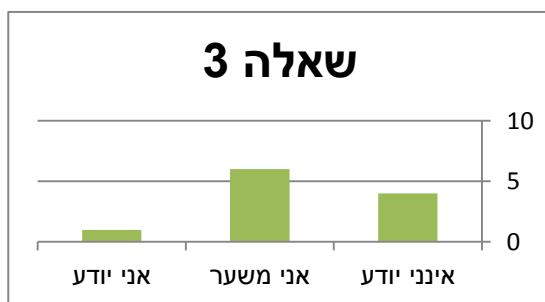
מתוך 13 התלמידים, 8 ענו נכונה, כי האלקטרוניים קיימים מלכתחילה בחומר/מעגל/אטומים. 5 ענו כי מקור האלקטרוניים בסוללה, בשני שאלונים התשובה לא חד משמעית אבל התלמידים קישרו את הפרש הפוטנציאלים עם מחסור או עודף באלקטרוניים. יש בתשובות ביטוי לשתי תפישות נאיביות נפוצות למדי בהן נתקלנו במהלך לימודינו בקורס סוגיות בפיסיקה 1- מקור המתח הוא גם מקור המטען והמוטיווציה לזרימה נובעת מ"חוסר באיזון בכמות המטענים.

מה גורם לאלקטרוניים לנוע במוליך כאשר זורם זרם?



11 תלמידים ציינו את המתח/ הפרש הפוטנציאלים כסיבה לזרימה. תלמיד אחד הזכיר את הפוטנציאל החשמלי ואילו תלמיד אחד ציין כי חוסר האיזון בין המטענים הוא הסיבה. מעניין כי אותו תלמיד השיב נכונה על השאלה הקודמת לגבי מקור האלקטרוניים. מסתבר כי אין התאמה בין התשובות לשתי השאלות מה שמעורר תהייה לגבי מידת העקביות של המודל בתודעת התלמידים.

מהי מהירות תנועת האלקטרוניים במוליך כאשר זורם בו זרם?



למעשה, לא ניתנה על ידי אף אחד מן התלמידים, תשובה נכונה לשאלה זו.

תלמיד אחד ציין כי עוצמת הזרם נותנת מושג לגבי המהירות.

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

תלמיד אחר ציין יחידת מידה למדידת זרם כביטוי למהירות

תלמיד נוסף ציין את דרך החישוב של המהירות ע"י השוואת האנרגיה הקינטית לפוטנציאלית החשמלית (eV). חישוב שכזה היה נותן לו תוצאה בסדר גודל של 500 ק"מ בשנייה.

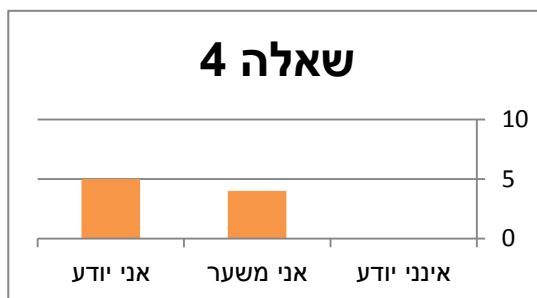
תלמיד אחד ציין ממש סדר גודל – 1 מטר לשנייה !

5 תלמידים ענו כי מהירותם קרובה/שווה/קצת פחות ממהירות האור.

4 ענו כי אינם יודעים.

אנו חשים כי יש כאן החמצה גדולה שלנו, כמורים. לפחות חלק מן התלמידים נחשפו לביטוי המתמטי הקושר את עוצמת הזרם למהירות התנועה של המטען. אין ספק כי היה צריך לצעוד עוד צעד קטן אחד ולחשב ממש את המהירות. התשובה המפתיעה הייתה משמשת מוטיווציה לדיון פיזיקאלי להפליא. יתכן שהדיון היה מעורר תלמידים לבקר את המודל שבנו לעצמם. או גורם להם להכיר בעובדה שאין להם מודל ברור ומגובש.

כאשר לוחצים על מתג החשמל בחדר הנורה נדלקת בו בזמן. מהי הסיבה לכך?



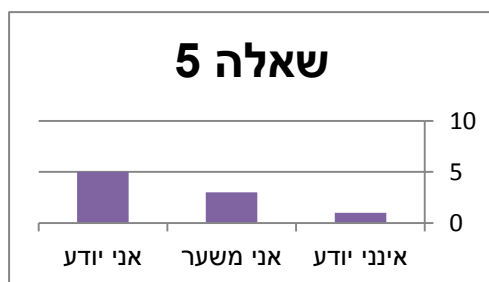
8 תלמידים תלו את העובדה שהנורה נדלקת מיד במהירות התנועה הגבוהה של האלקטרונים! מתגלה כי אצל חלק מן התלמידים אין קשר בין התשובה לשאלה זו ולשאלה הקודמת. כמו באי ההתאמה בין שאלות 1 ו 2, יתכן כי זה מלמד על מודל מעורפל ולא מגובש.

תלמיד אחד ציין כי הזרם החשמלי מאד גדול.

3 תלמידים לא הבינו את ניסוח השאלה - אין ספק שהיה עלינו להחליף את המילים "בו בזמן" במילים "מיד כאשר סוגרים את המתג..."

תלמיד נוסף ציין את העובדה כי יש אלקטרונים לכל אורך המעגל. ההקשר לשאלה לא לגמרי ברור. ייתכן שתשובתו מרמזת על מעבר אנרגיה מאלקטרון לשכנו באופן גלי, אבל אנו בספק. סביר להניח שהוא לא הבין את ניסוח השאלה כמו השלשה הקודמים.

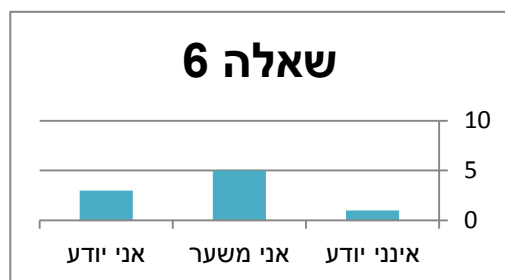
קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

כיצד עוברת האנרגיה מהסוללה למנורה ?

שאלה זו נוסחה בכוונה בצורה כללית על מנת לא לכוון את התלמידים למנגנון מסוים.

12 התלמידים ענו בניסוחים שונים, כי האלקטרונים/הזרם מעבירים את האנרגיה לנורה ! יתכן כי ההתרכזות באלקטרונים כמושא השאלות בתחילת השאלון הטתה את תשובות התלמידים. מאידך, היו ביניהם שהוסיפו תיאור שלם יותר – הסוללה מעניקה אנרגיה קינטית לאלקטרונים וזו הופכת לחום בנגד. באחת התשובות צוין במפורש הכוח החשמלי שהסוללה מפעילה, המעניק את האנרגיה.

התלמיד האחרון ציין כי האנרגיה עוברת דרך המוליך. שוב אי הבנה של השאלה. יתכן שהיה עלינו לבקש, בשאלה לתת תיאור מפורט יותר.

האם המוליכים/נגדים במעגל הסגור, נייטרלים או טעונים ?

6 תלמידים ענו במפורש שהמעגל הסגור נייטרלי !!

תלמיד אחד ציין שעל סקאלה מיקרוסקופית המוליכים/נגדים טעונים ועל סקאלה מקרוסקופית לא. כך שלמעשה ניתן לסווגו לקבוצה הקודמת.

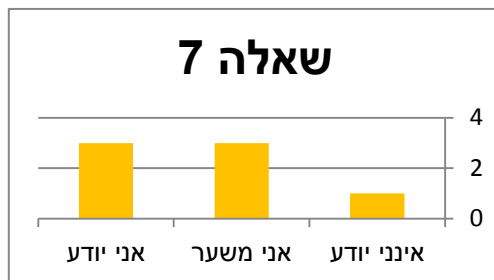
תלמיד אחד ציין שהמוליכים/נגדים "כמעט נייטרליים" קשה לנו לדעת כיצד להתייחס לתשובה ללא ריאיון עם התלמיד. יתכן שהתכוון כקודמו לסקאלה מיקרוסקופית כנגד מקרוסקופית, ויתכן שהתכוון לכמות מטען קטנה יחסית.

2 תלמידים ציינו שאינם יודעים.

3 תלמידים ציינו במפורש שהמעגל החשמלי טעון! ביניהם, אחד אף קישר את הפרש הפוטנציאלים עם נוכחות מטען. זה היה אולי המקרה הבולט ביותר בו מודל מיקרוסקופי התקשר לתכונות מקרוסקופיות. מאידך, דווקא אותו תלמיד לא ידע לקשר את המטען שציין את נוכחותו לשדה החשמלי במעגל ומסביבו כפי שנדרש בשאלה הבאה בתור.

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

הוסף לציור הנגד המחובר במעגל קווי שדה חשמלי.



5 תלמידים התייחסו לנגד כאל דיפול חשמלי וציירו קווי שדה של דיפול (חלקם ציינו קווי שדה בתוך המוליך וחלקם בחרו שלא לצייר קו שדה שכזה. אנו סבורים כי ציון סימני ה+ וה- שנועדו לייצג את הדקי הסוללה בלבד את התלמידים והטו את תשובתם. לא הייתה בעייה לתלמידים שטענו כי הנגד ניטרלי לצייר קווי שדה אלקטרוסטטי מסביבו. שוב אנו נתקלים בתמונת מודל מעורפלת ולא עקבית.

5 תלמידים ציירו קווי שדה או קו שדה המקביל לנגד. אף אחד מביניהם לא צייר את קווי השדה בתוך הנגד!! מבין 5 התלמידים הללו, אף אחד לא היה מהטוענים כי הנגד טעון. שוב, לא הייתה שום סתירה בין נוכחות קו השדה וניטרליות הנגד.

2 תלמידים ציינו שאינם יודעים את התשובה.

תלמיד אחד צייר קווי שדה מעגליים סביב הנגד. סביר להניח שהתבלבל בין שדה חשמלי ומגנטי.

מהי הסיבה לעובדה שעוצמת הזרם זהה בנקודות שונות במעגל?



4 תלמידים כתבו כי אינם יודעים את התשובה.

תלמיד אחד לא ענה על השאלה.

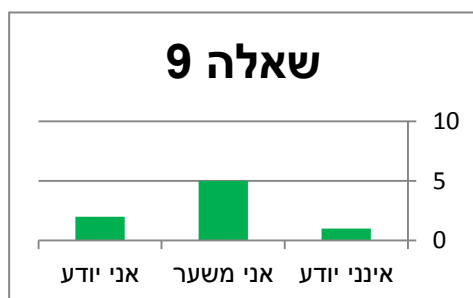
4 תלמידים ענו תשובה שהיא פשוט חזרה על העובדה המופיעה בשאלה – כי מהירות האלקטרונים זהה...כי אותו הזרם זורם... כי התיל מוליך...

2 תלמידים נוספים חמקו מתשובה וציינו שהמעגל טורי ולא מקביל. למעשה, זו תשובה לא תשובה דומה לזו של ארבעת הקודמים.

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

2 תלמידים התייחסו לשימור מטען, האחד בעקיפין והשני במפורש.

כאשר סוגרים את המתג במעגל, היכן מתחילה הזרימה ?



2 תלמידים לא ענו על השאלה – אחד מהם ציין במפורש שלא הייתה מובנת לו.

תלמיד אחד ציין שאינו יודע.

5 תלמידים ציינו כי הזרם מתחיל בסוללה ואחד אף הדגיש כי מן ההדק החיובי. שלשה מביניהם ענו כי מקורם של האלקטרונים בסוללה ומבחינה זו, היו עקביים.

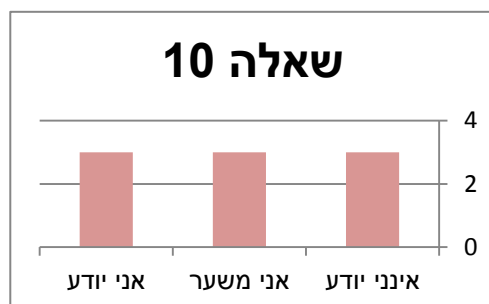
2 תלמידים ציינו כי הזרם מתחיל באיזור המתג

3 תלמידים ציינו כי הזרם מתחיל בבת אחת בכל רחבי המעגל.

למען הגילוי הנאות, חשוב לאמר כי בספרם של Chabay ו Sherwood ישנה התייחסות לשלב הטרוזניינט – עד להתייצבות הזרם ובו מתואר גל של שינויי צפיפות מטען שפה המתחיל באיזור המתג.

מאידך, חישוב של פרק הזמן עד התייצבות הזרם (כפי שנראה בפרק הבא) מלמד שגל שינויי הצפיפות מתפשט לאורך המוליכים במעגל, במהירות גבוהה, ומלווה, בשינוי בשדה האלקטרומגנטי שהוא זה שמתפשט במרחב במהירות האור. מבחינה מעשית, לכל עניין, ניתן בהחלט לטעון שהזרימה במעגל מתחילה בו זמנית בכל הנקודות.

מהי הסיבה לניצוץ הכחלחל באיזור המתג בעת לחיצה עליו?



תלמיד אחד לא ענה על השאלה.

7 תלמידים ענו כי אינם יודעים את התשובה

5 תלמידים ענו כי זו עדות לפליטת אלקטרונים או תנועת אלקטרונים או קפיצת אלקטרונים בין המגעים מישהו ציין את הביטוי – "פריקה" תלמיד אחר הדגיש כי הסיבה "פוטנציאל, גבוה המתגבר על התנגדות האוויר.

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

תלמיד אחד קישר את תנועת האלקטרונים דרך האוויר עם ערור אטומי האוויר וקישר את התופעה למה שנלמד בנושא קרינה וחומר.

אף אחד מן התלמידים לא הזכיר את מושג השדה החשמלי בהסבריו!

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

מבט כולל על תשובות התלמידים מלמד כי, להוציא את שתי השאלות הראשונות, פחות ממחצית התלמידים בטוחים בתשובות שנתנו. מה שבולט לעין הוא דווקא המושג שנעדר מההסברים - באף אחת מן התשובות לא הוזכר המושג שדה חשמלי ולו פעם אחת!!! בחלק מן המקרים תשובות התלמידים לשאלה אחת מנותקות ולעיתים סותרות את תשובותיהם לשאלה אחרת. המודל למתרחש במעגל החשמלי איננו עקבי ואינו מסודר וברור.

חלק מן התלמידים סבור כי הסוללה היא מקור המטען וכי הזרימה מתחילה בהדקי הסוללה. מעטים עדיין שבוים בגישה שחוסר האיזון בין מטען שלילי לחיובי גורמת לזרם. התפיסה הרווחת היא כי הזרם נגרם כתוצאה ממתח - הפרש פוטנציאלים שיוצרת הסוללה.

האמור לעיל, עולה בקנה אחד עם תוצאות מחקרים שבוצעו בעבר (אילון, גניאל 1990).

לגבי מנגנון העברת האנרגיה במעגל התלמידים רובם ככולם מתייחסים לאלקטרונים כנושאי האנרגיה המעבירים אותה בין המקור לנורה. חשוב לציין כי התלמידים עצמם גיבשו את התפישה הזו וכי מעולם לא נאמר בכיתה באופן ישיר, שהמטען הוא נושא האנרגיה ואולם בהחלט דובר על האנרגיה המושקעת על מנת להזרים את המטען דרך הנגד. בהחלט צוין הקשר בין התנגדות הנגד והחום המתפתח בו ובהחלט לימדנו כי הפרש הפוטנציאלים לאורך המעגל פירושו כי האנרגיה פר מטען הולכת ופוחתת. אין לנו ספק כי התלמיד החושב, מבין מן האמור כי האנרגיה החשמלית היא תכונה של האלקטרונים והיא פוחתת כתוצאה ממעבר בנגד. הוא נרמז ומבין את הרמז ומכתיר את האלקטרון כנושא האנרגיה בנוסף להיותו נושא המטען. גם המושג "כא"מ" במתכונתו החדשה - כמות אנרגיה/ מטען, מחזק את הרושם הזה ומטעה את התלמידים לחשוב שהסוללה מעניקה אנרגיה לכל אלקטרון ולא למערכת החשמלית כולה.

האמת היא שלא היינו מופתעים מתוצאות השאלון. בדרך כלל, אילו שאלות שאיננו דנים בהן בכיתה במהלך הוראת נושא החשמל ואם כן, הרי אנו מזכירים אותן, כבדרך אגב. זאת כמובן, בעיקר משום שאין "מכוונות בגרות".

בתכנית הלימודים, בין פרק האלקטרוסטטיקה לבין פרק מעגלי הזרם קיים נתק המוצא את ביטוי במרבית ספרי הלימוד של הפיזיקה התיכונית. פרק האלקטרוסטטיקה מצטייר כמו המשך ישיר של לימודי המכאניקה והוא מתבסס על הסבר לתופעות המקרוסקופיות על פי עקרונות בסיסיים - חוקי ניוטון, משפט עבודה ואנרגיה ומלווה במודל מיקרוסקופי המעמיק את רמת ההבנה. כנגדו, פרק מעגלי הזרם מבוסס על חוקיות "מדרג שני" - חוק אום, ועל הקשר העקיף בין מתח לזרם. המודלים בהם משתמשים להסבר לקוחים מתחום אחר (זרם מים) או מקרוסקופיים במהותם (הפרשי גבהים/ לחצים) (Sherwood & Chabay, 1999). לכל הידוע לנו, להוציא את תכנית הלימודים המיוחדת שנכתבה על ידי Sherwood ו Chabay, כמבוא ללימודי פיזיקה בקולג', ומוצאת ביטוייה בספרם Matter & Interactions, וחוברת "מעוף" בהוצאת מכון ויצמן, בגרסתה החדשה, הבנויה ככלי עזר לתמיכה בהוראת החשמל המסורתית, לא נעשה ניסיון לקשר ולאחד את האלקטרוסטטיקה והאלקטרודינאמיקה תחת "מטריית" עקרונות משותפת.

התוצאה המצערת היא, כי תלמידינו, עם תום לימודיהם, עדיין "סובלים" מאותן תפישות נאיביות והשקפת עולם מדעית מעורפלת כמו לפני עשרים שנים ויותר ולמעשה, הם מתקשים לתת תשובה ברורה לשאלות פשוטות הנוגעות למעגלי זרם ישר. בריא לנו, שאם אינך נדרש מפורשות על ידי תכנית הלימודים (בחנית הבגרות), להסביר את התופעות הקשורות למעגל על פי מושגים של צפיפות מטען ושדה, מן הסתם, לא תשקיע בהסברים הללו מאמץ למידה, לא כתלמיד ולא כמורה.

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

מאידיך, כל מורה לפיזיקה, שיעיין בספרם של Sherwood ו Chabay, או במאמרו של ספטון, יסכים כי יש מידה רבה של חינוך פיזיקאי "ערכי" בגישה המאמנת את התלמיד לבסס הסברים על פי מודלים מיקרוסקופיים. כל מורה לפיזיקה יחוש ודאי, כמונו, תחושת החמצה, על כי מנע מתלמידיו את החשיפה לאלגנטיות המדעית שבמודל, ליופי שב"אמת" ולכוחם של מודלים לשאת אותנו אל מקומות מהם ניתן להרחיק לראות ולהעמיק לראות.

בבסיס פרויקט הגמר שלנו, ללמודי תואר שני בתכנית רוטשילד-ויצמן, נמצא הפער שחשפנו בין תמונת המעגל החשמלי שהצטיירה בתודעתנו ובין תמונת המעגל החשמלי בראי האלקטרומגנטיות האקדמית. הפער, שערער והדריך את מנוחתנו, העניק לנו את המוטיווציה לעשות ולו מעט, על מנת לעודד הבנה מעמיקה יותר, של מורים ושל תלמידים את המתרחש ברחבי המעגל החשמלי הפשוט.

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

3.2 תיאור מעמיק בשפה פשוטה

מה קורה למטען החשמלי, לשדה האלקטרומגנטי ולאנרגיה, מרגע סגירת המפסק במעגל ועד אחרי שהזרם מתייצב ?

לו נתבקשנו לענות על "רגל אחת" הייתה תשובתנו כזו-

צפיפות המטען על מעטפת המוליכים/ נגדים משתנה בהדרגה בגודלה ובסימנה מנקודה לנקודה, במעגל הסגור, מן ההדק החיובי של הסוללה ועד להדק השלילי. מערך מיוחד זה של "**מטעני שפה**" משרה **שדה חשמלי** בתוך המוליכים /נגדים המכוון תמיד **לאורך המוליך** ועוצמתו **מוסתתת כך שתחולל זרם אחיד** ברחבי המעגל. "**מטעני השפה**" משרים **שדה חשמלי** גם **במרחב** מסביב למעגל. שדה זה מצטרף אל **השדה המגנטי** שמערבל **הזרם החשמלי**, סביב המוליכים/ נגדים במעגל. **השדה האלקטרומגנטי** שמושרה במרחב, הוא המעביר את האנרגיה אל הנגד. הוא האחראי **להמרת האנרגיה**, במעגל, **מפוטנציאלית חשמלית לחום**.

האמת ניתנת להיאמר כי ההסבר התמציתי הזה, מעבר להיותו נכון יותר מן ההסבר שאנו נותנים לתלמידינו, הרי הוא סתום ותמוה ומעורר שאלות על כל ימין ועל שמאל.

מה הם מטעני השפה הללו? כיצד נוצרים? כיצד מווסתת צפיפותם כך שתיצור שדה חשמלי מתאים לאורך המוליך? היכן בדיוק עוברת האנרגיה? במוליכים? באוויר? בריק? כיצד "יודע" השדה האלקטרומגנטי לכוון את האנרגיה אל הנגד?

להווי ידוע כי אין דרכי קיצור בפיזיקה! הסבר על רגל אחת איננו יעיל אלא רק כסיכום. נתחיל לכן, מן ההתחלה. למזלנו, יש באפשרותנו לתת תשובה איכותית מספקת לכל השאלות הללו. והתיאור המצטייר איננו נפלא מהבנתם של מורי תיכון ושל תלמידים כאחת.

לעניות דעתנו, הקושי להבנת המתרחש נעוץ בהרגל של התודעה האנושית לסדר, כרונולוגית, את רצף האירועים סביבנו, בכדי להחיל עליו את תבנית **ההיגיון של סיבה ותוצאה**. הנה, למשל, בתיאור המכאני של גוף נזרק על ידי היד מעלה מאט בהשפעת כוח הכבידה עד הגיעו לשיא הגובה מגביר מהירותו מטה, בהשפעת כוח הכבידה עד לפגיעתו בקרקע, יש סדר ברור וסיבה ברורה בכל שלב ושלב. ההסבר למתרחש בנוי טוב כל כך עד שאנו נוטים לשכוח כי כאשר עוסקים אנו ב"כוח הכבידה", מדובר במושג ארטילאי ולמעשה, רק תוצאות פעולתו הנן עובדה פיזיקאלית ודאית.

אבל מה באשר לפוטנציאל ולשדה? אין לנו ספק שהם קשורים, אבל מי קדם למי? מי מהווה סיבה ומי תוצאה? ומה באשר למטען ולשדה? באלקטרוסטטיקה התיכונית אנחנו מקפידים לנתח השפעת שדה חשמלי על מטען נקודתי אולם מה קורה כאשר השדה החשמלי משפיע על מערך של מטענים השותפים בהשראת אותו השדה...?

מצבים בהם איננו יכולים להכתיר גורם פיזיקאלי יחיד כ"אשם" במתרחש, או מצבים בהם שתי תכונות פיזיקאליות שלובות זו בזו במחול של "היזון חוזר", מצבים שכאלו מסבים לנו מבוכה ואי נחת, אבל הם "חלק מן החיים" והמפגש איתם בהחלט מעשיר את הפיזיקה שלנו.

ההתחלה היא במעגל החשמלי הפתוח: מעגל שבו בין הנגד למוליך יש נתק.

האם המוליכים והנגדים לאורך המעגל החשמלי הפתוח טעונים או ניטראלים!?

באמרנו "טעון", כוונתנו שחלקי המעגל החשמלי יפעילו כוח חשמלי על מטען בוחן שנמצא בקרבתם, כלומר השדה החשמלי במרחב סביב המעגל איננו אפס.

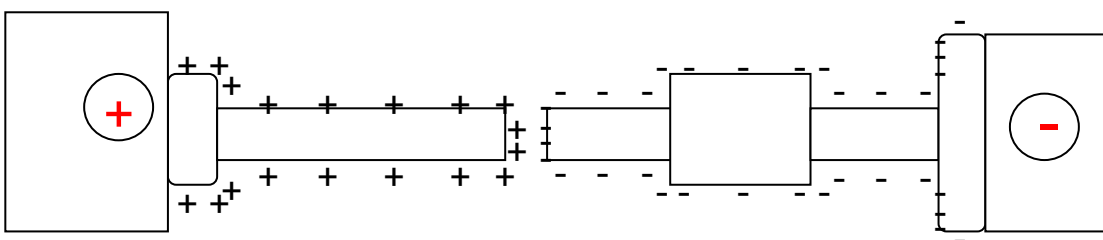
כל תלמיד פיזיקה שסיים את פרק האלקטרוסטטיקה בלימודי החשמל יכול לענות נכונה על השאלה הזו ובכל זאת התשובה מפתיעה. ובכן הנה חדשה מרעישה! המעגל החשמלי הפתוח טעון

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

במטען חשמלי !!! המגע בין המוליכים והנגדים לקוטבי הסוללה מאפשר מעבר מטען. מטענים עוברים מהדקי הסוללה אל המוליכים עד ל"השוואת הפוטנציאלים". בדיוק כמו שלמדנו.

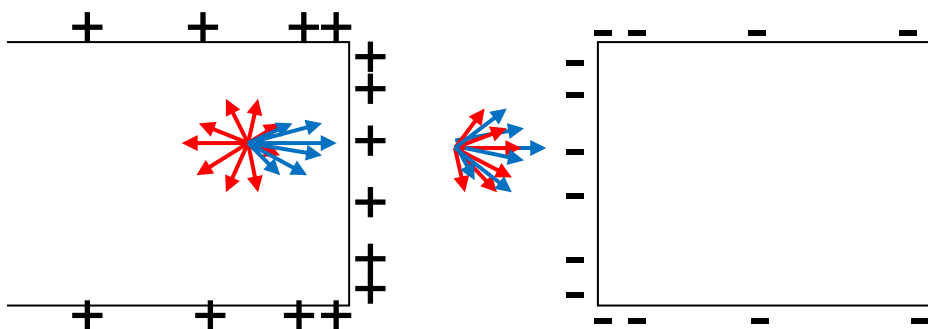
מה באשר לשדה החשמלי במעגל הפתוח? גם התשובה לשאלה זו פשוטה וידועה! המטענים נעים ומסתדרים על פני המעטפת של המוליכים/נגדים עד שהשדה בתוכם מתאפס !!! בעולם המושגים הפשטני ביותר – המטענים שווי הסימן על הדק הסוללה שלילי, דוחים זה את זה ולכן יתרחקו זה מזה ככל שיתאפשר להם כלומר, ירחיקו עד שפת המוליך וייתיצבו על פני השפה כך ששקול הכוחות על כל אלקטרון עודף יהיה אפס! יש משהו פואטי ופילוסופי בתוצאה המתקבלת- צפיפות המטען על שפת המוליך הנה פונקציה מסובכת להפליא של המקום אבל היא מולידה שדה פשוט להפליא בכל נקודה בתוך המוליך !!! אפס מאופס !!!

להלן ציור סכמטי של המעגל החשמלי במצב זה. לשם הפשטות, "פרשנו" את המעגל לאורך קו ישר. שימו לב לצפיפות המטען האחידה על פני המוליך האחד ולשינויי הצפיפות במקום בו הגיאומטריה של המוליך/נגד מסובכת יותר.



חשוב לציין, כמובן, כי השדה במוליך, כמו בכל נקודה במרחב, הוא תכונה משותפת של כל מטעני השפה! סופרפוזיציה של השדות ה"קולוניים" של כל אחד מן המטענים הנקודתיים. גם אם תרומת המטענים הקרובים משמעותית לאין ערוך ותרומת המטענים הרחוקים זניחה.

רק לשם המחשה, לפניכם תיאור סכמטי של השדה החשמלי בשתי נקודות באזור הנתק. בתוך המוליך ובין המוליכים: החיצים האדומים מציינים את השדות של המטענים החיוביים והחיצים הכחולים את השדות של המטענים השליליים.



בנקודה בין שני קצות המוליכים, באזור הנתק, השדה החשמלי בעל עוצמה גבוהה בדומה לזו הקיימת בין שני לוחות קבל הטעונים במטענים שוני סימן. בנקודה בתוך המוליך, מאזנים השדות של המטענים השליליים שמימין, את השדות של המטענים החיוביים מימין לנקודה. ("בעזרתם האדיבה" של המטענים החיוביים שמשמאל לנקודה).

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

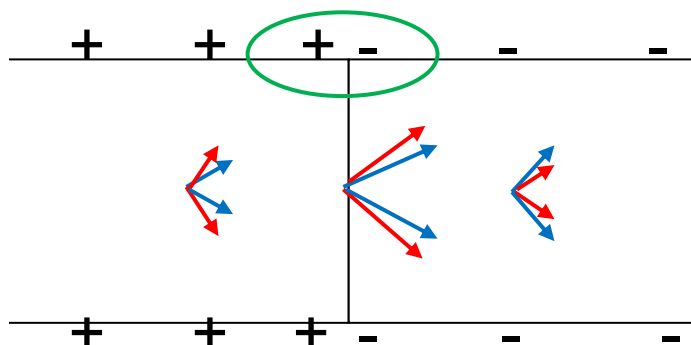
המעגל החשמלי הפתוח טעון. ומדוע לא יהיה המעגל החשמלי הסגור טעון !!

שלב המעבר ממעגל פתוח לסגור הוא שלב קצר מאוד והיינו יכולים לדלג עליו ולתאר מיד את המצב היציב שנוצר בעקבותיו אבל, עם קצת מאמץ ומעט דמיון נוכל לתאר לעצמנו את מה שקורה ולקבל תמונה שלמה יותר של הפיזיקה במעגל. זו בדיוק גדולת הגישה בספר Matter & Interactions. המודל המשמש באלקטרוסטטיקה משמש גם באלקטרודינמיקה והן מאוחדות בטבעיות לפיזיקה אחת.

הבה נסגור את המתג ונצפה במתרחש.

המטענים השליליים והחיוביים באזור המגע "מנטרלים" אילו את אילו ונותרת צפיפות המטען על המעטפת בלבד (אין ספק ששלב זה אינו עובר על מי מנוחות וודאי שכרוך בהתעצמות השדה החשמלי באזור הנתק, יינון האוויר, פרץ של מעבר אלקטרוני, ערור אטומי האוויר המיוננים ואולי אפילו ניצוץ מרשים אבל אנו נדלג על כל אילו בכדי לא לסרב את ההסבר).

שני קצות המוליכים נצמדו זה לזה אבל המצב שנוצר רחוק מלהיות מצב יציב. על מעטפת המוליכים נמצאים מטענים חיוביים ומטענים שליליים בקרבה מסוכנת! הם מפעילים כוחות משיכה אילו על אילו ויתרה מזאת – הם יכולים לנוע ! זו היא יריית הפתיחה לשלב המכונה בפיזיקה שלב המעבר או "טרנזיינט". בנקודת המגע בין המוליכים מתחילה צפיפות מטעני השפה בבת אחת להשתנות. השינוי בנקודת המגע גורר אחריו שינויים משני הכיוונים לאורך המעגל כולו.



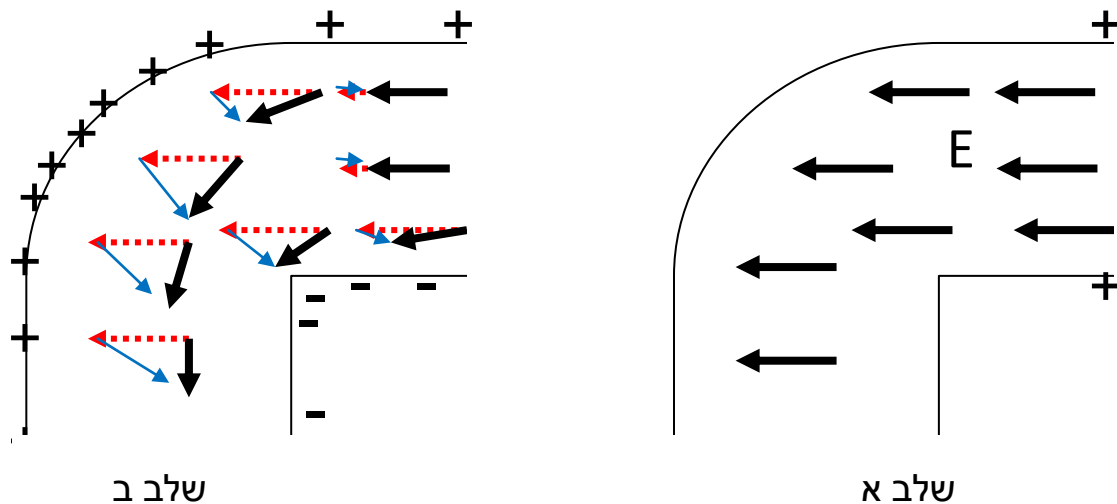
אל תטעו ! לא מדובר כאן באלקטרון שדוחף אלקטרון שדוחף אלקטרון...! אלקטרוני לא פועלים ככה! אלקטרוני משפיעים זה על זה ממרחק בעזרת שדה חשמלי! השינוי הקיצוני במערך המטענים באזור המגע מלווה בשינוי קיצוני בשדה החשמלי. שינוי זה המתפשט במהירות האור (כך דרכם של שדות אלקטרומגנטיים). מטעני שפה במקומות אחרים במעגל, "חשים" בשינוי יוצאים משווי משקלם. הם מצטרפים לחגיגה ותורמים גם הם, את תרומתם לשינוי השדה החשמלי. כך ממשיך השינוי ומתקדם עוד ועוד, הלאה והלאה. המרחב סביב התיילים המוליכים סוער – שינויים בשדה החשמלי גוררים הופעת שדה מגנטי והשינוי בשדה המגנטי גורר הופעת שדה חשמלי. זאת ועוד. מטעני השפה באזור המגע, שולחים את חיצו השדה החשמלי שלהם עד אל תוך המוליך. סופרפוזיציה של שדות המטענים החיוביים והשליליים שעל השפה, יוצרת בתוך המוליך, שדה שקול (ראו ציור). ושדה במוליך פירושו – זרם !!! והזרם, כידוע, משרה שדה מגנטי נוסף המתערבל סביב התיילים המוליכים ומצטרף להמולה הכללית.

הכל- המעגל החשמלי על נגדיו והמרחב מסביב לו "הומים" מתנודת מטען "ומסוחררים" מגודש קווי שדה ומי יודע עד אנה היו הדברים מגיעים, אלמלא חוקי התרמודינמיקה, אשר כהרף עין מרסנים את המולה ומשרים יציבות וסדר.

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

מנגנון ההיזון החוזר – השדה שדוחק מטענים לנוע משנה את מערך המטענים ומשפיע בעקיפין על עוצמתו שלו – אותו המנגנון שייצב את המטענים על שפת המוליך בפרק האלקטרוסטטיקה, הוא מייצב את תנועתם על שפת המוליך בפרק האלקטרודינמיקה. אלא שבמקום שווי משקל, שבו מערך הכוחות על האלקטרון ממוצע, מתאפס, נוצר **מצב יציב** בו מערך הכוחות על האלקטרון הממוצע קבוע בגודלו ומכוון לאורך המוליכים/נגדים במעגל. המטען על מעטפת המוליכים נע אבל צפיפות המטען נותרת קבועה ובמקום אפס שדה בתוך המוליך – נוצר בו שדה קבוע הדוחק באלקטרונים לנוע לאורך המוליך.

בתרשים הבא מודגם סכמתית תהליך התייצבות השדה לאורך המוליך במקום בו הוא מכופף.



בשלב א, השדה השקול בתוך המוליך, המכוון ימינה (מסומן בשחור), מזרים אלקטרונים משמאל לימין וגורם לצפיפות מטען חיובית, על המעטפת בצידו החיצוני של הכיפוף וצפיפות מטען שלילית בצידו הפנימי. בשלב ב', רכיב השדה של מטעני השפה באזור הכיפוף מסומן בכחול. הוא מכוון כלפי מרכז העקמומיות וגורם לשדה השקול לטהות לאורך המוליך.

שימו לב כי השדה החשמלי במוליך קבוע, אבל איננו אחיד!!! עוצמת השדה שונה בהתאם לגיאומטריה של המעגל וההתנגדות. במקומות בהם התנועה קשה, עוצמת השדה גדולה יותר והתוצאה – **עוצמת זרם קבועה** בכל נקודה, כיאה למעגל זרם ישר. יש יופי פואטי בעובדה כי גם במערך המטען הדינמי כמו בסטטי, פונקציות צפיפות מורכבת ומסובכת של מעטפת המעגל מולידה פונקציה פשוטה להפליא של זרם בכל נקודה ונקודה לאורכו.

נסכם-

שלב הטרוניזיינט הוא קצרצר- כהרף עין! מערך המטענים על מעטפת המוליכים/נגדים והשדה האלקטרומגנטי משפיעים זה על זה במנגנון של היזון חוזר. והמערכת מתייצבת במצב שווי משקל דינמי- צפיפות המטען על גבי מעטפת המוליכים/נגדים נותרת קבועה בזמן, אך משתנה במקום, מחיובית ליד הקוטב החיובי של הסוללה ועד שלילית ליד הקוטב השלילי. השדה החשמלי המושרה בסופו של התהליך, גם הוא קבוע בזמן ומשתנה על פי המקום. צפיפות המטען על מעטפת המעגל היא הגורם לכך שהשדה במוליכים/נגדים יכוון לאורכם וגודלו יותאם כך, שיניע את המטענים לאורך המעגל במהירות קבועה. הזרם הקבוע משרה שדה מגנטי קבוע סביבו, שנוסף על השדה החשמלי במרחב.

מה באשר לסיפור האנרגיה במעגל? כמה נפלא לגלות כי הוא נשזר בסיפור המטען והשדה לעלילה אחת. כדי להבין כיצד עוברת, במעגל החשמלי, האנרגיה אל הנורה או הנגד צריך ראשית לדעת מהיכן היא יוצאת. היכן נמצאת האנרגיה החשמלית? פוינטינג במאמרו משנת 1897, הראה כי

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

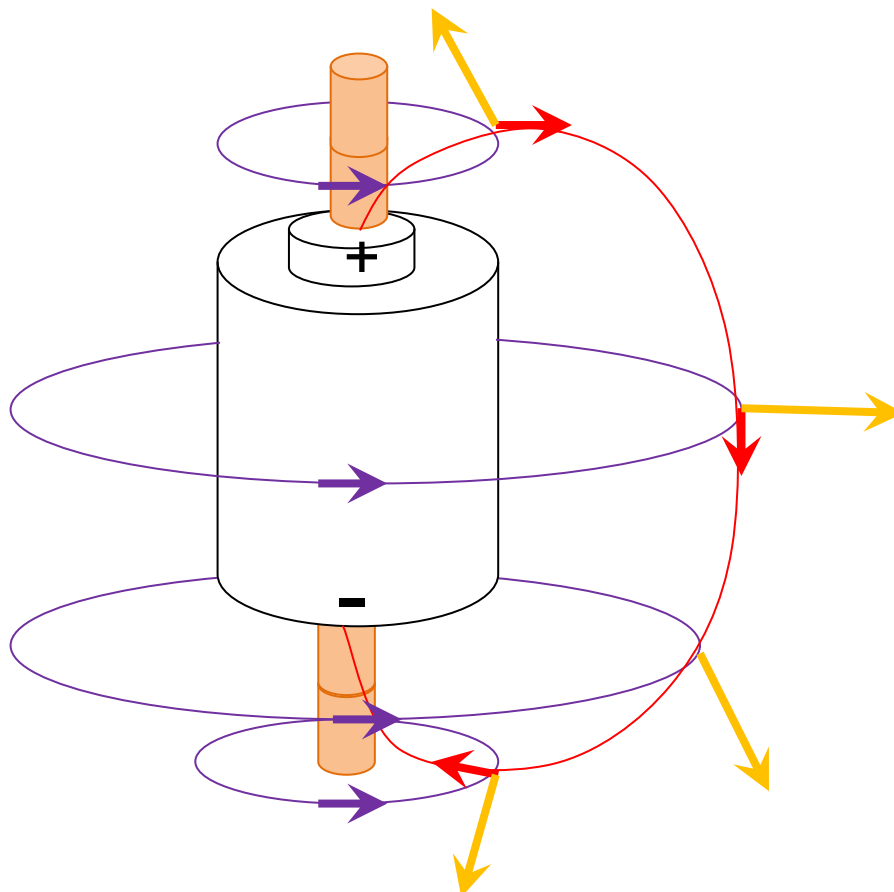
מכפלה וקטורית של השדה החשמלי במגנטי משמעה וקטור הספק (ראו חישוב בפרק המבוא הפיזיקאלי) וכי ריבוע עצמת השדות משמעו עד כדי קבוע, אנרגיה.

פוינטינג , בעזרת משוואות מקסוול, גילה לנו את סוד מיקומה של האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית. בכל נקודה במרחב בה מושרה שדה חשמלי יש אנרגיה חשמלית! האנרגיה איננה אגורה בסוללה בלבד, אלא במרחב כולו- מאגר רחב ידיים של אנרגיה עוטף את המעגל הפתוח! נכון, צפיפות האנרגיה בסוללה גדולה מאד שהרי השדה החשמלי בקרבת הקטבים בעל עצמה גבוהה אבל עקרונית שולי המאגר נמתחים עד קצוות היקום גם אם המאגר הופך "רדוד" יותר ויותר ככל שנתרחק מן הסוללה.

במעגל החשמלי הסגור, עם הצטרפות השדה המגנטי למשחק מתחילה האנרגיה החשמלית במרחב לנוע. בכל נקודה ונקודה, בה קיימים גם וקטור שדה חשמלי וגם וקטור שדה מגנטי, האנרגיה החשמלית נעה ומתקדמת בכיוון המכפלה הוקטורית שלהם. מאגר האנרגיה הרחב סביב המעגל החשמלי, שקודם רבץ לו ללא זיע כמו הכנרת ביום חמסין, בבת אחת מתחיל לנוע כולו. האנרגיה שוטפת לאורך קווי תנועה כמו זרמים תת מימיים באוקינוס או זרמי אויר המסומנים במפה הסינופטית. מאין ולאן ? את זאת קל לראות ! אין לנו אלא לבחון את השדות החשמלי והמגנטי במרחב ולבדוק את כיוון המכפלה הוקטורית שלהם-

נבחן את קוטבי הסוללה – שדה חשמלי בעל עוצמה גדולה מתבדר מן הקוטב החיובי ומתכנס אל הקוטב השלילי. מעגלים של קווי שדה מגנטי מקיפים את הקטבים בכיוון מתאים על פי "כלל יד ימין". מעקב אחרי כיווני השדות מגלה לנו עובדה מדהימה – קווי שטף האנרגיה בוקעים מהסוללה כולה מקווי השדה החשמלי והמגנטי שבתוכה והם מכוונים החוצה אל המרחב!!!

התבוננו בציוור הבא. קווי השדה החשמלי בוקעים מן הקוטב החיובי ומתכנסים, עקרונית, אל השלילי בדומה לשדה של דיפול. קווים אילו מצוינים באדום. קווי השדה המגנטי המסומנים בסגול, מקיפים את הסוללה והתיל במעגלים בהתאם לכיוון הזרם החשמלי. החיצים הזהובים מסמנים את כיוון התקדמות האנרגיה הא"מ, בהתאם לכלל יד ימין והמכפלה הוקטורית



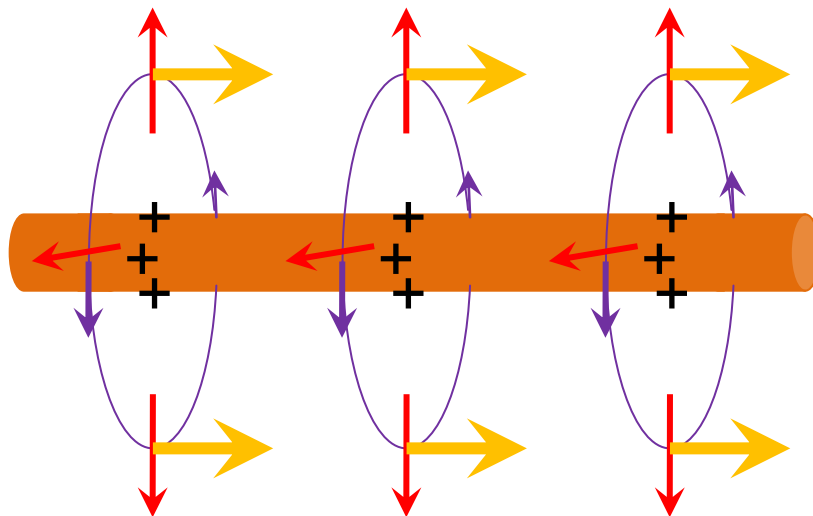
קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

מסלולי תנועת האנרגיה הא"מ מתחילים מהסוללה ומתבדרים ממנה! ולאן מכאן?

הבה נבחן את קווי השדה החשמלי והמגנטי בקרבת מוליך (אידיאלי) ונלמד מתוך המכפלה הוקטורית שלהם על מסלול האנרגיה שם.

בציור הבא מתואר מוליך אידיאלי המזרים זרם משמאל לימין. מכיוון שהוא אידיאלי צפיפות מטען השפה על פניו אחידה בקירוב. (בעבר היינו מנסחים זאת אחרת – מפל המתח על פניו אפסי).

קווי השדה החשמלי הבוקעים מן המוליך החוצה מסומנים באדום וקווי השדה המגנטי המקיפים אותו במעגל, מסומנים בסגול.

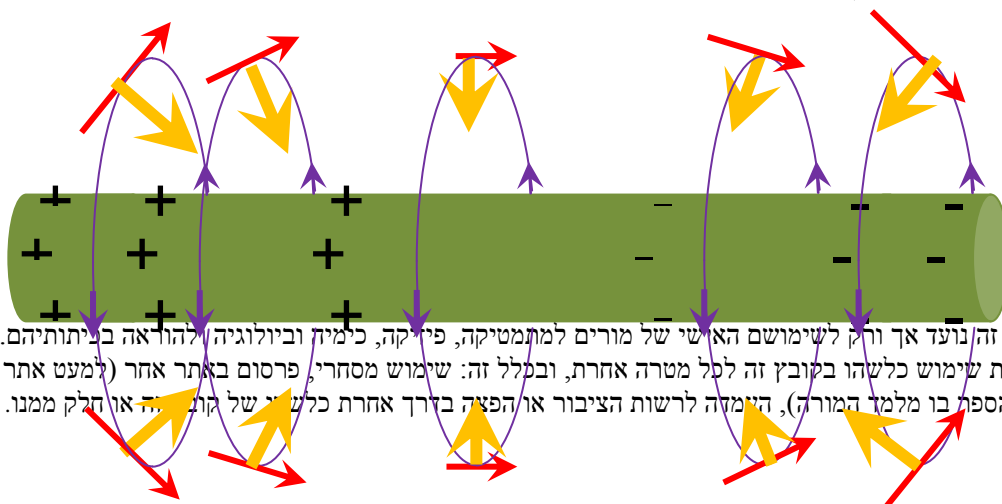


על פי כיוון המכפלה הוקטורית קווי שטף האנרגיה מצביעים משמאל לימין. מסלולי האנרגיה שיצאו מן הסוללה ממשיכים במקביל למוליכים. ככל שאנו קרובים יותר למוליך שטף האנרגיה חזק יותר וככל שנתרחק הוא נחלש אבל הכוון הכללי לאורך המוליך – משמאל לימין!

עד אנה שוטפת האנרגיה?

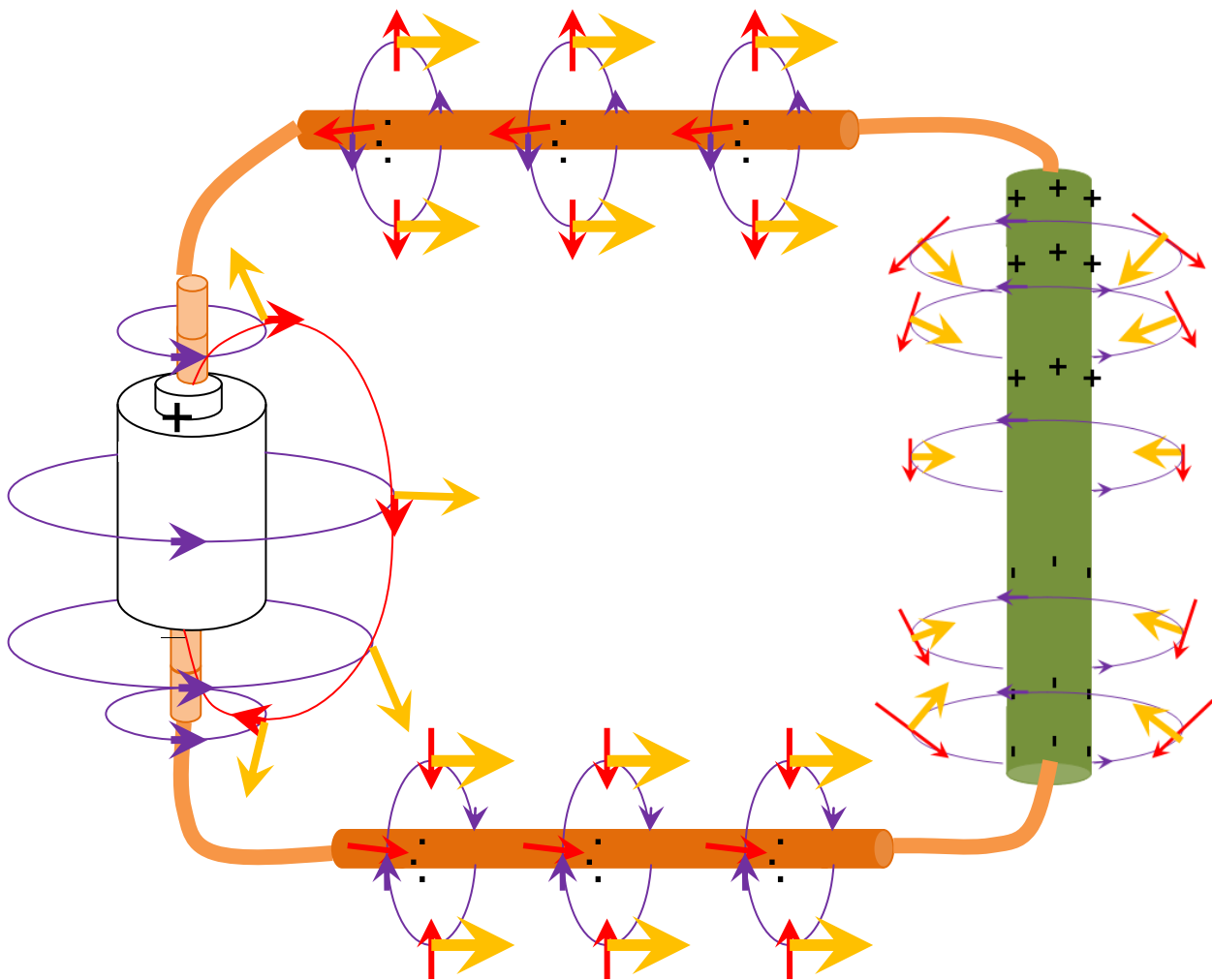
הבה נבחן את השדות בקרבת נגד ונלמד על מסלולי האנרגיה בקרבתו:

בציור הבא, שוב מסומנים קווי השדה החשמלי באדום וקווי השדה המגנטי בסגול. דרך הנגד זורם זרם משמאל לימין. שימו לב לצפיפות המטען על שפת הנגד. היא משתנה מצפיפות חיובית גבוהה משמאל, לצפיפות שלילית גבוהה מימין. בגלל הגרדיינט בצפיפות המטען לאורך הנגד, יש לשדה החשמלי רכיב לאורך הנגד וקווי השדה החשמלי מתעקלים בדומה לשדה דיפול. מה בקשר לכיוון תנועת האנרגיה? על פי המכפלה הוקטורית של השדות מסלולי האנרגיה מובילים בנטייה פנימה, אל הנגד. קצה מסלול האנרגיה החשמלית הוא בנגד – כמו שראוי להיות.



קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה ללא מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), הימשה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

שווה אולי לחבר את כל הציורים יחדיו כדי לקבל מושג מקורב למה שמתרחש



הנה מה ששלמד אותנו פוינטינג על מעבר האנרגיה במעגל החשמלי. האנרגיה שוטפת במרחב כולו. מסלולי האנרגיה בוקעים מן הסוללה לכל הכיוונים עוקבים אחר המוליכים משני הקטבים ומתכנסים אל הנגד מכל הכיוונים. צפיפות האנרגיה ושטף האנרגיה בקרבת המעגל גדולים הרבה יותר מאשר רחוק ממנו וניתן בהחלט לטעון כי מרבית האנרגיה נישאת על ידי השדה האלקטרומגנטי במרחב הקרוב למעגל אבל ישנם קווי מסלול המובילים מן הסוללה אל האינסוף

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

או מן האינסוף אל הנגד שהרי האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית נמצאת במרחב כולו ומן המרחב כולו מגיעה לנגד.

4. חישובים והערכות כמותיות

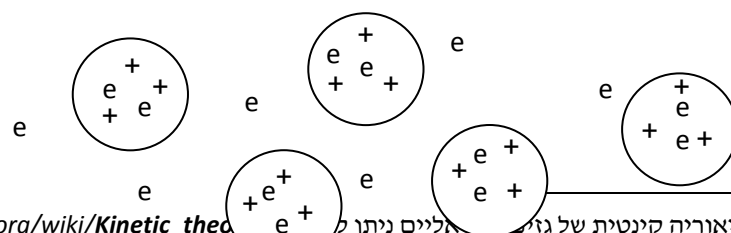
כפי שראינו, בהעדר הסבר ברור וכולל, התלמידים הנשאלים למתרחש במעגל החשמלי הסגור, מציירים לעיני רוחם, תמונה מיקרוסקופית מעורפלת ונאיבית. התפישה הנאיבית ביותר רואה בסוללה מחסן לאלקטרונים ומאגר לאנרגיה. עם סגירת המעגל, דוחפת הסוללה את האלקטרונים החוצה אל המוליכים כשם שמשאבה דוחפת מים בצינור, ומעניקה להם אנרגיה. האלקטרונים הראשונים נדחפים על ידי האחרונים ועוברים במהירות האור מן הסוללה אל המנורה, שם הם מעבירים את האנרגיה לחוט הלהט וחוזרים אל הסוללה לעמוס על כתפיהם אנרגיה נוספת. משוואות מקסוול, כאמור, מציירות תמונה שונה לחלוטין מורכבת יותר ומופלאה יותר. בחלק זה של העבודה נציג מספר חישובים שנועדו לערער את התפישה הנאיבית מחד ולתמוך בתמונת השדות ומטעני השפה מאידך.

4.1 מודל דרודה (Drude) להולכת זרם

בשנת 1897 גילה ג'י. ג'י. תומסון חלקיק נושא מטען חשמלי – האלקטרון, גילוי זה אפשר פריצת דרך בהבנה של מבנה האטום ובמקביל התפתחו תיאוריות הולכה חשמלית וחום במתכות. אחת התיאוריות שעד היום שימושית ומאפשרת תובנות חשובות להתפתחותם של מודלים פיזיקאליים היא התיאוריה של דרודה (1900) להולכת זרם חשמלי במתכת. דרודה היה מן הראשונים שציירו תמונה מיקרוסקופית של המתרחש במעגל החשמלי.

דרודה בנה את התיאוריה שלו על הצלחתה של התיאוריה הקינטית עבור גז אידיאלי¹ שחלקיקיו נעים בריק וצפיפותו נמוכה, כך שניתן להזניח את האינטראקציות בין החלקיקים. ההנחה הייתה כי כוחות הפועלים בין החלקיקים בעת התנגשות הם כוחות קצרי טווח רגועים-פועלים רק בזמן ההתנגשות.

דרודה התייחס לאלקטרונים שבמתכת כגז של חלקיקים. מבנה המתכת, כך טען, הוא כזה שמאפשר לחלק מן האלקטרונים להיות יותר חופשיים. כלומר, לבצע מהלך חופשי בין אטום לאטום או בין אטום למספר אטומים. לאטום בודד של מתכת יש אלקטרונים המחוברים חזק אליו ואינם יכולים לנוע במרחב המתכת, אבל יש אלקטרונים, שבזמן שהמתכת התגבשה התרחקו מאטום ולא נקשרו אליו בהכרח חזק. האלקטרונים החופשיים לנוע במרחב המתכת נקראים אלקטרוני הולכה (valance electrons) ראה איור.



¹ להרחבה בנושא תיאוריה קינטית של גז אטומים ניתן לקרוא <http://teacher.pas.rochester.edu/phy21/lectures/Chapter18/Chapter18.html> en.wikipedia.org/wiki/Kinetic_theory_of_gases

קובץ זה נועד אך ורק כעזר לישיבה של מורים פיזיקה, כימיה ואלמנטרית בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בכל מטרות אחרות, שימוש מסחרי באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

בהתבסס על עובדות ניסיוניות, בין היתר חוק אוס (1827), דרודה אימץ את התיאוריה הקינטית של גזים אידיאליים תוך שהוא מניח ארבע הנחות יסוד :

1. בין התנגשויות מזניחים את האינטראקציות אלקטרון-אלקטרון ואלקטרון-יון. ההזנחה הראשונה ידועה כקירוב אלקטרון עצמאי ואילו ההזנחה השנייה- קירוב אלקטרון חופשי². אופי התנועה של האלקטרון נקבע על פי משוואות התנועה של ניוטון.

2. ההתנגשויות מתרחשות בין אלקטרון ההולכה לבין היונים הכבדים ואלו לא זזים או כמעט ולא זזים ממקומם. דרודה לא נכנס לתיאור מפורט של תהליך ההתנגשות אלא מניח כי ההתנגשויות אקראיות וזמן ההתנגשות אפסי. לצורך חישוביו חשבה רק העובדה שההתנגשות גורמת לשינוי מידי במהירות האלקטרון, גודל וכיוון. האקראיות מאפשרת להניח כי המהירות הממוצעת של האלקטרונים לאחר התנגשות שווה לאפס, מכיוון שלאלקטרון סיכוי זהה לנוע לכל הכיוונים וסיכוי זהה לכל גודל של מהירות.

3. דרודה מניח כי אלקטרון יחווה התנגשות בהסתברות ליחידת זמן, הנתונה על ידי $\frac{1}{\tau}$. באשר τ הוא הזמן הממוצע בין התנגשויות, זמן רלקסציה³. מכאן, ההסתברות להתנגשות בפרק זמן dt נתונה על ידי $\frac{dt}{\tau}$. ההסתברות הכרחית לצורך חישוב התנועה הממוצעת של האלקטרונים.

4. אלקטרונים מגיעים לשיווי משקל תרמי עם הסביבה רק כתוצאה מהתנגשויות ולא מנגנונים אחרים. הנחה זו מצמצמת את הגורמים המשפיעים על האלקטרון בתנועתו לשדה החשמלי במוליך ולהתנגשויות בלבד.

תחת הנחות אלה פיתח דרודה את משוואות התנועה לאלקטרון הממוצע תחת השפעת השדה החשמלי וההתנגשויות ביונים.

אוכלוסיית האלקטרונים מחולקת לשניים – אלו שחוו התנגשות בפרק הזמן dt ואלו שלו חוו התנגשות בפרק זמן זה. ההסתברות להתנגשות היא $\frac{dt}{\tau}$ וההסתברות לא להתנגש היא $1 - \frac{dt}{\tau}$. חישוב התנע הממוצע של האלקטרון מחייב לקחת בחשבון את תרומת כל אחת מן האוכלוסיות ולכן

² קירוב אלקטרון חופשי יתברר מאוחר יותר כבעייתי. על מנת להבין את מהלך האלקטרון במתכת יש להתבונן על המבנה הגבישי של המתכת ולאמץ תיאוריות מתקדמות יותר – פונקציית בלוך ומבנה פסים.
³ יתברר כי טעויות בסדר גודל של מהלך חופשי של האלקטרון וטעויות בחישוב מוליכות חשמלית נבעו מהמודל שהוצע לחישוב עבור זמן הרלקסציה. במיוחד לא תאם המודל לטמפרטורות נמוכות.

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

$$\vec{p}(t + dt) = \frac{dt}{\tau} \vec{p}_c(t + dt) + \left(1 - \frac{dt}{\tau}\right) \vec{p}_{nc}(t + dt)$$

כאשר p_{nc} הוא תנע של אלקטרון ממוצע שלא חווה התנגשות ו p_c תנע של אלקטרון שכן חווה התנגשות.

אלקטרון שחווה התנגשות, אבד את התנע שלו לחלוטין. ולכן התנע הממוצע שלו כעבור פרק הזמן dt תלוי בעיקר במתקף החיצוני שפעל עליו. פיתוח לטור טיילור ייתן לכן

$$\vec{p}_c(t + dt) = \vec{f}(t)dt + O(dt^2).$$

אלקטרון שלא חווה התנגשות נושא עדיין את התנע שהיה לו ברגע t והתנע הממוצע שלו הוא

$$\vec{p}_{nc}(t + dt) = \vec{p}(t) + \vec{f}(t)dt + O(dt^2)$$

נציב את ביטויי התנע הללו במשוואה ונזניח גורמים קטנים מספיק, מסדר גודל של $O(dt^2)$ ונקבל

$$\vec{p}(t + dt) = \frac{dt}{\tau} \vec{f}(t)dt + \left(1 - \frac{dt}{\tau}\right) (\vec{p}(t) + \vec{f}(t)dt) = \vec{p}(t) + \vec{f}(t)dt - \frac{dt}{\tau} \vec{p}(t)$$

העברת אגף לחלוקה ב dt תתן את משוואת התנועה של ניוטון

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\vec{p}(t + dt) - \vec{p}(t)}{dt} = \vec{f}(t) - \frac{\vec{p}(t)}{\tau}$$

או

$$m_e \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{f}(t) - \frac{m_e}{\tau} \vec{v}$$

האיבר $v - \frac{m_e}{\tau}$ פירושו כי השפעת ההתנגשויות היא כשל כוח "מעקב", בדומה לחיכוך.

גורם ה"חיכוך" הזה מסביר לנו מדוע האלקטרונים לא מואצים עד למהירות אינסופית, תחת השפעת הכוח החשמלי הקבוע הפועל עליהם. דחיפת שדה החשמלי והבלימה על ידי ההתנגשויות מאזנות זו את זו והאלקטרון נע בממוצע, במהירות קבועה.

מתמטית, אם נציב $\vec{f}(t) = e\vec{E}$ כלומר כוח חשמלי קבוע נקבל

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{e\vec{E}}{m_e} - \frac{1}{\tau} \vec{v}$$

למשוואה האחרונה פתרון פשוט $\vec{v}(t) = \frac{e\vec{E}\tau}{m_e}$ ופתרון כולל $\vec{v}(t) = \vec{v}_0 e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{e\vec{E}\tau}{m_e}$

המתכנס לפתרון הפשוט עבור $t \gg \tau$ ולמהירות קבועה.

אם נכפול את המהירות הממוצעת, הקבועה של האלקטרונים במטען האלקטרון ובצפיפות האלקטרונים במוליך, נקבל את צפיפות הזרם הקבוע במעגל,

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

$$\vec{j} = en\vec{v} = \frac{ne^2\tau}{m_e}\vec{E} = \sigma\vec{E}$$

ואת חוק אום.

יפה לגלות כי המודל המיקרוסקופי של דרודה מסביר התנהגות מאקרוסקופית של המעגל החשמלי. מודל דרודה מהווה פריצת דרך במובן שהוא מצליח לשים את היסודות התיאורטיים לחוק אום הניסיוני.

אם נרצה להעריך את גודלה של מהירות הסחיפה – מהירותו של אלקטרון ממוצע, כל שעלינו לחשב הוא

$$\vec{v} = \frac{\vec{j}}{en} = \frac{I}{enA}\tilde{A}$$

כאשר A הוא שטח החתך במוליך בו זורם הזרם ו \tilde{A} וקטור יחידה לאורך המוליך.

נניח מוליך העשוי נחושת בעלת מסה מולרית של $M = 63.55 \frac{gr}{mole}$ ומסה סגולית

$\rho_m = 8.9 \frac{gr}{cm^3}$ נניח כי לכל אטום נחושת אלקטרון הולכה אחד. מספר אלקטרוני ההולכה בסמ"ק נחושת יהיה

$$n = \frac{\rho_m}{M} \cdot N_A = \frac{8.9}{63.55} \cdot 6.02 \cdot 10^{23} = 8.43 \cdot 10^{22} \frac{1}{cm^3} = 8.43 \cdot 10^{28} \frac{1}{cm^3}$$

גודל המהירות הממוצעת של האלקטרונים במוליך נחושת בקוטר של 1 מ"מ, המזרים זרם של 0.1 אמפר תהייה

$$v = \frac{0.1}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 8.43 \cdot 10^{28} \cdot (10^{-3})^2} = 7.4 \cdot 10^{-6} \frac{m}{s}$$

פירושו של דבר שלא אלקטרון הממוצע יקח פרק זמן של 10^6 שניות לעבור מרחק של 1 מטר (כלומר כ-12 ימים) !!!

אין ספק שהמודל המניח כי האלקטרונים יוצאים מן הסוללה ונושאים את האנרגיה אל הנורה, מוטעה בעליל !!!

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

4.2 בחינה מדוקדקת של "מודל הרכבת"

בשיטתנו באינטרנט במטרה ללמוד על כבל קואקסיאלי, ועל זמן העברת האות החשמלי לאורכו, הגענו לאתר רלוונטי⁴ שהתייחס לעניין התגובה המיידית של המנורה, במעגל חשמלי פשוט, לסגירת או פתיחת המפסק. מטרת האתר הייתה אמנם להסביר את ערך העכבה הרשום על הכבל, אבל חלק מן ההסבר נגע להתנהגות האלקטרוניס במעגל ולהתנהגות השדות החשמליים. אנו מזכירים את האתר משום שתיאורו נמצא בסתירה מסוימת למה שלמדנו אנו במהלך עבודת הפרויקט והוא משתמש לצורך ההסברים, **במודל שלעניות דעתנו, רוח מאד אבל איננו מדויק.**

דמו בנפשכם, כך כתוב באתר, מעגל חשמלי פשוט שהמרחק בין הסוללה למנורה הוא 300,000 ק"מ. עקרונית, ניתן לבנות מעגל שכזה והבעיה היא טכנית בעיקרה. במעגל שכזה, יהיה עיכוב של שנייה בין סגירת המפסק והידלקות המנורה. ההסבר לעיכוב, על פי הכותבים ניתן להמחשה בעזרת "מודל קרונוט הרכבת". אמנם מהירות תנועת אלקטרון בודד לאורך המעגל, נמוכה מאד, אבל נניח כי האלקטרון "מתנגש" באלקטרון סמוך ומעביר לו אנרגיה קינטית וזה מעביר את האנרגיה לאלקטרון הבא וכן הלאה. מהירות העברת "פולס" שכזה יכולה להיות גבוהה הרבה יותר ממהירות תנועתו של האלקטרון, והיא תלויה בכוחות ה"צימוד" בין האלקטרוניס. בדומה לרכבת קרונוט המחוברים זה לזה במוטות גרירה "משוחררים" מעט. משיכת הקטר בקרון הראשון גורמת למוט שמחברו לקרון השני, להיצמד אל טבעת החיבור ולהעביר את התנועה הלאה. אמנם מהירות כל קרון היא קטנה מאד אבל הזעזוע עובר עד לקצה הרכבת במהירות הבזק.

עתה, ניזקק האתר לתכונות מקרוסקופיות כדי להסביר את התנהגות הזרם. מכיוון שהנחת היסוד הייתה התנגדות אפסית של המוליכים במעגל, הקיבול השקול של שני המוליכים (אל הנורה וממנה) וההשראות העצמית של המוליכים, מסבירים את העובדה שהזרם אינו מתגבר לעוצמה אינסופית. המתח הנבנה על גבי ה"קבל" ובתוך ה"משרן" מצמצם השפעת הכא"מ של הסוללה. כמו כן, הקבל-משרן הארוך עומס על עצמו אנרגיה חשמלית מן המקור, מלוא אורכו, והופך לקו "שידור" אנרגיה.

למעשה, האתר מסביר את שידור האנרגיה לאורך הכבל הקואקסיאלי, כמתח הנבנה בין שני המוליכים המובילים אל הנורה וממנה הנטענים כקבל וכמתח הנבנה לאורך המוליכים המתנהגים כשורת משרנים, כתוצאה מהזרם הזורם לאורכם.

ההימנעות משימוש בשדות חשמלי ומגנטי לצורך ההסבר כמובילי האנרגיה לאורך התיילים בהחלט מובנת. למעשה התייחס אליהם האתר בעקיפין. ודאי ההסבר במונחים של מתח וזרם, קיבול והשראות מתנגן טוב יותר לאוזניים אמונות על מונחים טכניים. אבל מה באשר ל"מודל

⁴ http://openbookproject.net/electricCircuits/AC/AC_14.html#02351.png

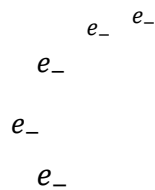
קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

הרכבת" כהסבר להתנהגות האלקטרונים וכהסבר לעניין הזמן? האם המודל הזה נכון? הוא בהחלט מסביר את ההדלקות המיידית של הנורה והוא בהחלט עולה בקנה אחד עם משוואת רציפות המטען, כי בהימתח כל מוטות החיבור נעים כל קרונות הרכבת במהירות אחידה לאורך המסילה.

ישנה נקודה אחת מטרידה בתיאור הנ"ל. מדוע נזקק האתר לשני מנגנוני העברת אנרגיה במעגל החשמלי? הרי "מודל הרכבת" יכול להסביר נפלא את העברת האנרגיה מהסוללה לנורה, על ידי האלקטרונים הנעים במעגל. הם פשוט מעבירים את האנרגיה מאחד לשני וחסל. לשם מה להשתמש במערכת קבלים – סלילים לצורך ההסבר? במלים אחרות, אם מודל ה"רכבת" מסביר להפליא את מהירות העברת אנרגיה לאורך המוליכים, אזי כל רעיון האנרגיה הנישאת על ידי השדה האלקטרומגנטי מיותר. אלא שקשה לבטל מנגנון המבוסס על חוקי פיזיקה כמו משוואות מקסוול.

הבה נבחן את מודל ה"רכבת" מעט לעומק. דרודה הזניח את האינטראקציה בין האלקטרונים לצורך בניית המודל שלו. אותו מודל שעזר לנו לפסול את האלקטרון כמוביל האנרגיה בשל מהירותו הנמוכה, אבל בואו נניח שהאלקטרונים אכן מקיימים אינטראקציה זה עם זה. ננסה להעריך את מהירות העברת הפולס לאורך שורת אלקטרונים ונבדוק האם מדובר במהירות הקרובה למהירות האור.

נדמיין לעצמנו את המעגל החשמלי כמעגל של אלקטרונים הנמצאים במרחק a זה מזה. נניח כי הסוללה מעניקה דחיפה לאלקטרון ופולס מתקדם לאורך המעגל במהירות התלויה בכוחות הצימוד בין האלקטרונים. חישוב מהירות התקדמות הפולס היא קצת בעייתית. הפתרון הוא "ליצור" גלים בתווך ולחשב את תדירות הגלים ואורכי הגל. שהרי מהירות הגל הפולס זהות.



לשם הפשטות, נניח אינטראקציה בין שכנים סמוכים בלבד.

המיקומים של האלקטרון בו נטפל ושל שני שכניו הם

$$r_{(n-1)} = a(n-1) + x_{(n-1)}, \quad r_n = an + x_n, \quad r_{(n+1)} = a(n+1) + x_{(n+1)}$$

האינטראקציה היא קולונית, כמובן. נפתח את הפוטנציאל הקולוני לטור טיילור ונזניח איברים מסדר 3, הזנחה זו מוצדקת שכן x תחום האוסצילציות של האלקטרון קטן מאוד ביחס למרחק בין האלקטרונים a . מדובר בפונקציה בת 3 משתנים ולכן הפיתוח מחייב התייחסות לנגזרות החלקיות.

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

$$\begin{aligned}
F(x, y, z) = & F(x_0, y_0, z_0) + \left(\frac{\partial F}{\partial x} \Big|_{x_0, y_0, z_0} \right) \Delta x + \left(\frac{\partial F}{\partial y} \Big|_{x_0, y_0, z_0} \right) \Delta y + \left(\frac{\partial F}{\partial z} \Big|_{x_0, y_0, z_0} \right) \Delta z \\
& + \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \Big|_{x_0, y_0, z_0} \right) (\Delta x)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \Big|_{x_0, y_0, z_0} \right) (\Delta y)^2 \right. \\
& + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 F}{\partial z^2} \Big|_{x_0, y_0, z_0} \right) (\Delta z)^2 + \left(\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} \Big|_{x_0, y_0, z_0} \right) \Delta x \Delta y \\
& \left. + \left(\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial z} \Big|_{x_0, y_0, z_0} \right) \Delta x \Delta z + \left(\frac{\partial^2 F}{\partial y \partial z} \Big|_{x_0, y_0, z_0} \right) \Delta y \Delta z \right\} + O(\Delta^3)
\end{aligned}$$

כמוכן, בהנחה כי הנגזרות המעורבות אינן תלויות בסדר הגזירה⁵.

$$U = \frac{Ke^2}{|r_n - r_{(n-1)}|} + \frac{Ke^2}{|r_{(n+1)} - r_n|} = \frac{Ke^2}{|a + x_n - x_{(n-1)}|} + \frac{Ke^2}{|a + x_{(n+1)} - x_n|}$$

$$\frac{\partial U}{\partial x_{(n-1)}} = \frac{Ke^2}{|a + x_n - x_{(n-1)}|^2} \quad \frac{\partial U}{\partial x_n} = \frac{-Ke^2}{|a + x_n - x_{(n-1)}|^2} + \frac{Ke^2}{|a + x_{(n+1)} - x_n|^2}$$

$$\frac{\partial U}{\partial x_{(n+1)}} = \frac{-Ke^2}{|a + x_{(n+1)} - x_n|^2}$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x_{(n-1)}^2} = \frac{2Ke^2}{|a + x_n - x_{(n-1)}|^3} \quad \frac{\partial^2 U}{\partial x_n^2} = \frac{2Ke^2}{|a + x_n - x_{(n-1)}|^3} + \frac{2Ke^2}{|a + x_{(n+1)} - x_n|^3}$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x_{(n+1)}^2} = \frac{2Ke^2}{|a + x_{(n+1)} - x_n|^3}$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x_{(n-1)} \partial x_n} = \frac{-2Ke^2}{|a + x_n - x_{(n-1)}|^3} \quad \frac{\partial^2 U}{\partial x_n \partial x_{(n+1)}} = \frac{-2Ke^2}{|a + x_{(n+1)} - x_n|^3}$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x_{(n+1)} \partial x_{(n-1)}} = 0$$

נפתח סביב נקודת שו"מ בה $x^s_{(n-1)} = x^s_n = x^s_{(n+1)} = 0$

⁵ הנגזרת של הכוח הקולוני היא רציפה שווה לפוטנציאל החשמלי.

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

$$\begin{aligned}
 & U(x_{(n-1)}, x_n, x_{(n+1)}) \\
 &= \frac{2Ke^2}{a} + \frac{Ke^2}{a^2} (x_{(n-1)} - x_{(n+1)}) \\
 &+ \frac{2Ke^2}{a^3} \left\{ \frac{1}{2} x_{(n-1)}^2 + \frac{1}{2} x_{(n+1)}^2 + x_n^2 - x_n(x_{(n-1)} + x_{(n+1)}) \right\} \\
 &+ O(\Delta^3)
 \end{aligned}$$

הלגראז'אן של החלקיק ה- n יהיה תלוי במהירות של החלקיק ה- n בלבד ומשוואת התנועה המתקבלת עבורו תהיה:

$$m\ddot{x}_n = \frac{-2Ke^2}{a^3} (2x_n - x_{(n-1)} - x_{(n+1)})$$

למעשה, זהו חישוב ידוע לכל מי שלמד פרק מבוא ב"מצב מוצק". חישוב תדירויות פונונים בתווך חד מימדי. הפיתוח מופיע בספרו של Ashcroft & Mermin ו"מוליד" את פונקציית התדירות עבור ה"מודים" השונים, הגלים השונים היכולים להתעורר בתווך.

Ashcroft & Mermin מציע לחפש פתרון מן הצורה

$$x_n(t) = Ae^{i(kan - \omega t)}$$

כאשר k ו- ω קבועים (מספר הגל והתדירות של אופן התנודה).

בשל מחזוריות תנאי השפה ($x_N = x_0$), שהרי סידרנו את האלקטרונים שלנו במעגל), יש ל- k ערכים בדידים.

$$Ae^{i(kaN - \omega t)} = Ae^{i(-\omega t)} \rightarrow kaN = 2\pi p \rightarrow k_p = \frac{2\pi p}{aN} \quad p = 0, 1, 2, \dots$$

אבל מספר האלקטרונים העצום מאפשר להתייחס אליו כאל משתנה רציף

הצבה במשוואת התנועה נותנת

$$-m\omega^2 Ae^{i(kan - \omega t)} = \frac{-2Ke^2}{a^3} Ae^{i(kan - \omega t)} \{2 - e^{-ika} - e^{ika}\}$$

$$\begin{aligned}
 m\omega^2 &= \frac{4Ke^2}{a^3} (1 - \cos(k_p a)) \quad \omega(k_p) = \sqrt{\frac{4Ke^2}{ma^3} (1 - \cos(k_p a))} \\
 &= \sqrt{\frac{8Ke^2}{ma^3} \sin^2\left(\frac{k_p a}{2}\right)}
 \end{aligned}$$

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

$$\omega(k_p) = \sqrt{\frac{8Ke^2}{ma^3}} \sin\left(\frac{k_p a}{2}\right)$$

עבור ערכי p כאשר $p \ll N$, $\omega(k_p)$ היא פונקציה ליניארית בקירוב. אנחנו מקבלים את התחום הנקרא "הענף האקוסטי" של אופני התנודה. מהירות הגל ומהירות חבורת גלים, במקרה כזה, היא זהה

$$\omega(k_p) = \sqrt{\frac{8Ke^2}{ma^3}} \frac{k_p a}{2} = e \sqrt{\frac{2K}{ma}} k_p$$

כעת ניתן לחשב את מהירות הגל. נציב את מטען ומסת האלקטרון ונניח כי המרחק בין האלקטרונים הוא מסדר גודל של מספר אנגסטרום, לשם פשטות נציב 1 אנגסטרום. והתוצאה:

$$v = \frac{d\omega}{dk} = e \sqrt{\frac{2K}{ma}} = 1.6 \cdot 10^{-19} \sqrt{\frac{2 \cdot 9 \cdot 10^9}{9.1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^{-10}}} \approx 2.25 \cdot 10^6 \frac{m}{s}$$

רק רגע! מסתבר כי תנודה של אלקטרונים לאורך המעגל איננה מתקדמת במהירות האור אלא במהירות קטנה הרבה יותר! במקום 300,000 ק"מ בשנייה רק 2250 ק"מ בשנייה. אם המרחק בין האלקטרונים גדול יותר הרי המהירות היתה קטנה עוד יותר. אמנם לאדם הלוחץ על מתג החשמל בחדר אין כל אפשרות להבדיל בין מיליונית השנייה ואלפית השנייה אבל למודל שלנו זהו הבדל משמעותי!

נראה לנו כי הגיע הרגע לבחור! אם "מודל הרכבת" נכון כי אז לא יתכן ששינויי הזרם לאורך המעגל מתקדמים במהירות האור! וההיפך! אפשר, עקרונית, למתוח את המעגל החשמלי שלנו למרחק 300,000 ק"מ, לסגור את המתג ולבדוק מה קורה לנו. אם היא תדלק כעבור שנייה, עלינו לזנוח את מודל הרכבת לתמיד ואם כעבור יותר מדקה... תהייה זאת יותר מהתרסה כלפי משוואות מקסוול וחישוביו של פוינטינג.

לעניות דעתנו, הכותבים באתר כמו רבים וטובים, וכמונו אנו, לפני לימוד הנושא, התפתו לבחור במודל הפשוט הברור המוחשי והמוטעה. היטיב לנסח זאת איאן ספטון במאמרו⁶: "כותבים רבים של ספרים ותוכניות לימוד אוהבים את המוטו – keep it simple. אף כי זו מטרה ראויה להערכה היא עלולה לעמוד בסתירה לתקפות המדעית. האם אתם רוצים ללמד דברים שגויים רק מכיוון שהם פשוטים?...?"

שלב הטרנזיינט, ממנו התעלמו כותבי האתר, הוא קריטי! מרגע שהמתג נסגר, האלקטרונים מתחילים לנוע בהשפעת השדה החשמלי המושרה באיזור המתג. תנועתם מחוללת שינויים בשדה המגנטי המלווים בשינויים בשדה החשמלי. כך מלמדות אותנו משוואות מקסוול – שדה מגנטי משתנה מחולל שדה חשמלי וההיפך. השינויים בשדה האלקטרומגנטי מתפשטים במרחב, מהירות האור ומוציאים את מטעני השפה בכל רחבי המעגל משווי משקלם.

השדה האלקטרומגנטי ומטעני השפה קשורים בקשר של היזון חוזר - שינוי במערך מטעני השפה המחולל שינוי בשדות המחולל שינוי במערך מטעני השפה וכן הלאה...רק מנגנון שכזה מסביר את מיידיות השינוי בנורה. זו כנראה הדרך הפחות פשוטה אך היותר נכונה לראות את פני הדברים.

⁶ Understanding Electricity and Circuits: What the text books don't tell you
Science Teachers' Workshop 2002

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

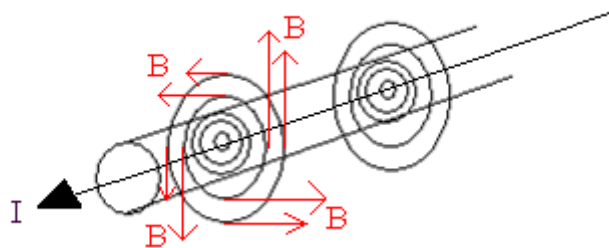
4.3 שלב הטרוניינט

בזמן שהמוליכים מחוברים כל אחד להדקי הסוללה מתאפס בכל מוליך השדה החשמלי, במצב זה אין זרימת אלקטרונים. ברגע סגירת המעגל מתרחשים מספר תהליכים במקביל, המשולבים זה בזה ומשפיעים זה על זה. ניתן לתאר זאת "תוהו ובוהו, רגעי שמתרחש במעגל אבל דווקא תוהו זה מוביל למצב של זרם קבוע. מתחילה זרימה של אלקטרונים במוליך, משתנות צפיפויות מטעני השפה על המוליך ובנוסף נוצר שטף אלקטרומגנטי משתנה⁷ במוליך ובמרחב מסביבו. שלב זה נקרא טרוניינט, שלב המעבר.

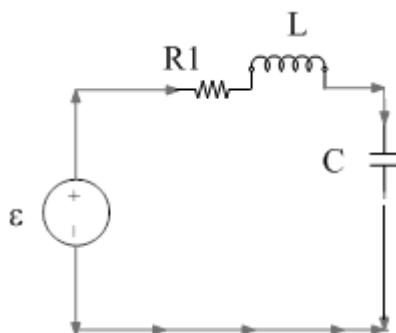
השדה האלקטרומגנטי הנוצר מתקדם במהירות האור, שטף האנרגיה מתקדם גם הוא. ברגע שאלקטרונים מתחילים את תנועתם נוצר שטף מגנטי משתנה, זה משרה שדה מגנטי כפי שמתואר בציר.

⁷ על פי חוק לנץ, שינוי בשטף המגנטי יגרום לכא"מ מושרה בקוטביות הפוכה לזו של הסוללה.

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.



על מנת להעריך את זמן ההתייבבות של מעגל זרם ישר נתייחס למעגל הבא, בנוי ממוליכי נחושת להם התנגדות סגולית $[\Omega * m] \rho = 1.68 \times 10^{-8}$, אורך כל מוליך 1 מטר, וקוטר המוליך $2 * 10^{-3}$ מטר. המעגל ששימש אותנו בחישובים מתואר בציור הבא,



כתוצאה משינויים בצפיפויות המטען ובזרם ניתן לדמות את המוליכים כרצף של משרנים נגדים וקבלים. משרנים משום שהשטף המגנטי משתנה והתוצאה היא השראה עצמית של המערכת, קבלים משום שהמוליכים נמצאים אחד בקרבתו של השני ויוצרים קיבול הדדי של המערכת. התנגדות משום שלכל מוליך יש התנגדות.

בעזרת הנוסחה $R = \rho \frac{l}{s} [\Omega]$ ניתן לחשב ולמצוא כי התנגדות המוליך שווה ל- $2 * 5.34 * 10^{-3}$ אוהם.

את ההשראה חישבנו בעזרת הנוסחה

$$\frac{l}{\pi} \mu_0 \left(L n \frac{d}{a} + 0.25 \right)$$

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

אותה מצאנו באינטרנט⁸, נוסחה זו מתאימה למבנה גיאומטרי של שני מוליכים גליליים שרדיוסם a והמרחק ביניהם d הנמצאים במקביל אחד לשני⁹. עבור המעגל שתואר מצאנו כי $L=5.17 \cdot 10^{-6}$ [H].

את קיבול המערכת חישבנו באמצעות הנוסחה

$$\frac{\pi \epsilon l}{\ln \left(\frac{d}{2a} + \sqrt{\frac{d^2}{4a^2} - 1} \right)}$$

אותה מצאנו באינטרנט¹⁰,

נוסחה זו מתאימה למבנה גיאומטרי של שני מוליכים גליליים שרדיוסם a והמרחק ביניהם d הנמצאים במקביל אחד לשני. מצאנו כי קיבול המעגל שווה ל- $C=4.47 \cdot 10^{-12}$ [F].

נבצע הערכה של זמן התייצבות כאשר למעגל אין אנו מחברים צרכן. אנו רוצים להעריך זמן התייצבות של המעגל, המכיל מוליכים בלבד.

המשוואה הבאה

$$V_R(t) + V_L(t) + V_C(t) = \epsilon(t)$$

מנחה אותנו כיצד למצוא הערכה לזמן התייצבות. בצורתה הדיפרנציאלית כאשר מקור המתח קבוע-אינו תלוי בזמן נקבל

$$L \frac{di}{dt} + i(t)R + \frac{q(t)}{C} = \epsilon$$

→

$$i(t) = \frac{dq}{dt}$$

את המשוואה הדיפרנציאלית ניתן לחלק ב-L ולקבל,

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{2R}{2L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{Lc} q(t) = \frac{\epsilon}{L}$$

נגדיר כעת גורם שימשש אותנו לקביעת זמן ההתייצבות, $\alpha = \frac{R}{2L}$ ההשראה והקיבול הם רכיבים

שיוצרים מנגנון תנודות-בתדר טבעי $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{Lc}}$. הזרם "מתנדנד" בדומה לאוסילטור הרמוני.

רכיב ההתנגדות הוא הגורם לדעיכת התנודות במערכת, ניתן לראותו בדומה לכוח חיכוך. נציב את הגדלים אותם הגדרנו ונקבל את המשוואה הדיפרנציאלית הבאה,

⁸ <http://en.wikipedia.org/wiki/Inductance>

⁹ הסבר מפורט על דרך חישוב השראה עצמית ניתן למצוא ב- The self and mutual inductance of linear conductors; by Edward B. Rosa

¹⁰ <http://en.wikipedia.org/wiki/Capacitance>

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

$$\frac{d^2q}{dt^2} + 2\alpha \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = \frac{\varepsilon}{L}$$

הפתרון הכללי של המשוואה הוא סכום של שני פתרונות, האחד פתרון למשוואה ההומוגנית $q^{(h)}$ השני פתרון פרטי $q^{(p)}$. הפתרון הכללי הוא,

$$q(t) = q^{(h)}(t) + q^{(p)}$$

נציב פתרון זה במשוואה ונקבל,

$$q^{(h)} + 2\alpha q^{(h)} + \omega_0^2 q^{(h)} + \omega_0^2 q^{(p)} = \frac{\varepsilon}{L}$$

החלק ההומוגני של הפתרון מקיים את המשוואה,

$$\frac{d^2q^{(h)}}{dt^2} + 2\alpha \frac{dq^{(h)}}{dt} + \omega_0^2 q^{(h)} = 0$$

גורם התייצבות המעגל נימצא במשוואה ההומוגנית ולכן נתמקד בפתרון למשוואה זו.

ניתן לרשום משוואה אופיינית

$$s^2 + 2\alpha s + \omega_0^2 = 0$$

הפתרון למשוואה הדיפרנציאלית ההומוגנית הוא,

$$q^{(h)}(t) = A_1 e^{s_1 t} + A_2 e^{s_2 t}$$

כאשר s_1 ו- s_2 הם פתרונות של המשוואה האופיינית,

$$s_1 = -\alpha + \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}, \quad s_2 = -\alpha - \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$$

ברור כי אופי הפתרונות נקבע על ידי s_1, s_2 תלוי ביחס שבין $\frac{\alpha}{\omega_0}$ ניתן להגדיר

$\zeta = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{c}{L}} = \frac{\alpha}{\omega_0}$ עבור המעגל שלנו $\zeta \ll 1$, שווה ל- $4.92 \cdot 10^{-6}$, מצב זה נקרא underdamped

הפתרונות למשוואה האופיינית הם מרוכבים, כלומר המערכת חווה תנודה ודועכת יחדיו. הפתרון הוא,

$$q(t) = A e^{-\alpha t} \sin(\omega_d t + \varphi)$$

ותדר התנודה הוא $\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2}$

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

הזרם במעגל נתון על ידי $\frac{dq}{dt}$,

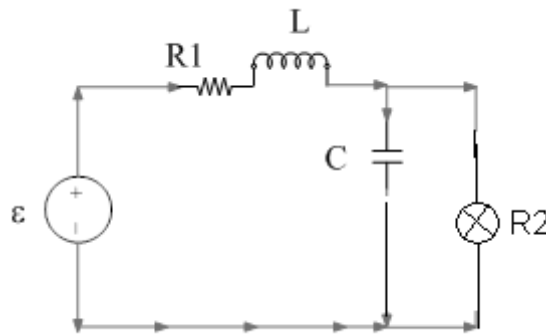
$$i(t) = Ae^{-\alpha t} (-\alpha \sin(\omega_d t + \varphi) + \omega_d \cos(\omega_d t + \varphi))$$

תנאי השפה הם כאלה שבזמן $t=0$ המטען לאורך המוליך הוא קבוע, והזרם במעגל שווה לאפס.

הפתרון הפרטי של המשוואה הוא, $q^{(p)} = \varepsilon C$, זהו גם הפתרון המתאר מצב יציב של המערכת, נשים לב כי, $q^{(p)} = \lim_{t \rightarrow \infty} q(t)$ זהו המצב בתום שלב הטרנזיינט.

פתרון זה מלמד אותנו כי גם במעגל זרם ישר הדברים דינמיים, מתברר כי צפיפויות מטעני השפה משתנות. אנחנו ניבחר התייצבות עבור $t = 5 \frac{R}{2L}$ כמקובל במעגל טעינה ופריקה של קבל. ומכאן נובע כי זמן ההתייצבות הוא בערך $4.87 \cdot 10^{-3}$ שניות. האם זמן זה הוא מספיק קצר בכדי שנוכל לענות על שאלת מידיעות הדלקת הנורה במעגל חשמלי. בפרק זמן זה עין האדם אינה יכולה להבחין בשינויים בעוצמת ההארה שתיתכן בגלל אי התייצבות הזרם במעגל.

ננסה כעת לחשב את זמן התייצבותו של מעגל זרם ישר אבל הפעם נוסיף למעגל נגד (צרכן) במקביל לקבל. המעגל כעת יראה כך,



שוב על פי כללי קירקוהוף נקבל את שתי המשוואות הבאות:

$$\varepsilon = R_1 i + L \frac{di}{dt} + V$$

$$i = C \frac{dV}{dt} + \frac{V}{R_2}$$

V הוא המתח על נגד R_2 . נציב כעת את משוואת הזרם אל תוך משוואת המתח נקבל,

$$V''[LC] + V' \left(R_1 C + \frac{L}{R_2} \right) + V \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) = \varepsilon$$

ניתן לחלק את המשוואה בגורם LC ונקבל בסופו של דבר משוואה מהצורה,

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

$$V'' + V' \left(\frac{R_1}{L} + \frac{1}{CR_2} \right) + V \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \left(\frac{1}{LC} \right) = \frac{\varepsilon}{LC}$$

$$\frac{d^2V}{dt^2} + 2\alpha \frac{dV}{dt} + \left(\omega_0^2 \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \right) V = \frac{\varepsilon}{LC}$$

$$\alpha = \left(\frac{R_1}{2L} + \frac{1}{2CR_2} \right), \quad \omega_0^2 = \frac{1}{LC}, \text{ כאשר}$$

בחרנו לחשב זמן התייצבות עבור מתח של 220 וולט ונורה שהספקה 60 וואט. חישבנו ומצאנו כי ההתנגדות שווה ל-806.667 אוהם.

הפתרון הפרטי במקרה זה הוא, $V^{(p)} = \frac{\varepsilon}{1 + \frac{R_1}{R_2}}$ נשים לב כי עבור הנתונים שלנו נקבל כי מתח

ההתייצבות הוא 219.997 וולט. הסיבה שהמתח קטן מ 220 וולט היא התנגדות המוליכים.

$$s^2 + 2\alpha s + \omega_0^2 \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) = 0, \text{ המשוואה האופיינית עבור הפתרון ההומוגני היא,}$$

$$s_1 = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2 \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right)} = -\alpha \pm \sqrt{\frac{R_1 + R_2}{R_2}} \sqrt{\zeta^2 - 1}, \text{ הפתרונות למשוואה זו הם,}$$

באשר, $\zeta = \frac{\alpha}{\omega_0} \sqrt{\frac{R_2}{R_1 + R_2}}$, במקרה שלנו $\zeta = 0.33$ ולכן אנו נמצאים בתחום הפתרון שמאפיינו הוא דעיכה יחד עם תנודות.

המתח והזרם מגיעים למקסימום "מתנדנדים" ודועכים, עד לערך קבוע. זמן התייצבות המערכת במקרה זה

הוא, $3.6 \cdot 10^{-8}$ שניות.

זמני התייצבות המערכת הם קצרים עד מאוד, עין האדם אינה יכולה להבחין בשינויים בזמנים כל כך קצרים זו הסיבה מדוע לנו נדמה כי האור נדלק מיידית. אז מה קורה בשלב הטרנזיינט מבחינת האנרגיה? האנרגיה על פי המודל של וקטור פוינטינג ראה להלן, נעה במהירות האור, אבל ההספק הנתון בנוסחה $P = iV$ מגיע לערכו היציב בתום זמן הטרנזיינט. הנורה נראית לנו דולקת מיידית ואכן האנרגיה נעה במהירות האור, אבל בשלב הטרנזיינט ההספק עדיין לא התייצב לכדי הערך הרשום על הנורה, שינויים אלה מהירים מאוד וכפי שצינו, עין האדם אינה יכולה להבחין בהם.

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

4.4 מטעני שפה

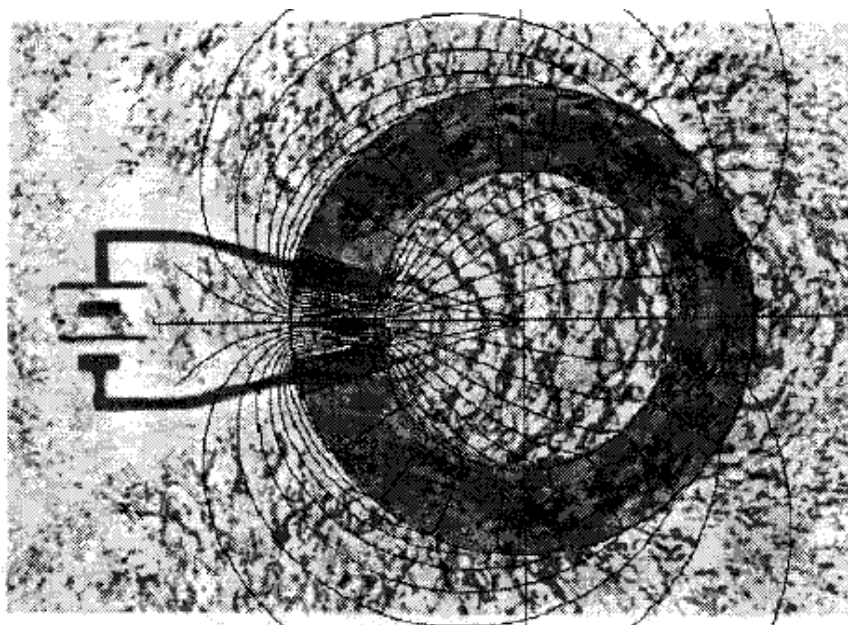
מהניסיון אנו למדים כי במעגל זרם ישר, בו יש מקור מתח ונגד, הזרם הוא קבוע לאורך כל המעגל. עבור זרם ישר ראינו כי האלקטרונים נעים במרחב המתכת. על פי מודל דרודה אנו מבינים כי אלקטרונים אלה עוברים התנגשויות עם היונים הכבדים יותר ומתפזרים לכיוונים שונים. תחת השפעת שדה חשמלי יש ל"אלקטרון הממוצע" כיוון תנועה מוגדר. מודל דרודה סיפק לנו את האפשרות לחשב מוליכות ולהבין מדוע למרות הכוח eE ניתן להגדיר מהירות ממוצעת קבועה-מהירות סחיפה. שאלה מעניינת היא כמובן, כיצד יודע האלקטרון את מסלולו. איך זה שהוא יודע לנוע לאורך ציר מוליך גם כשזה מכופף? בניסוח אחר מה מקור הכוח החשמלי שמנחה את

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

האלקטרוני? מתברר כי התשובה לכך היא מטעני השפה. מטענים אלה הם המכוונים את האלקטרוני לאורך המוליך וגם מווסתים את מהירות הסחיפה, כך שעוצמת הזרם תהיה אחידה.

כאשר מחברים מוליכים אל קטבי הסוללה מצטברים מטענים בקצה המוליך. המוליך המחובר להדק השלילי טעון שלילית והמוליך המחובר להדק החיובי טעון חיובית. ברגע סגירת המעגל החשמלי מתרחשים מספר תהליכים במקביל, כפי שתיארנו בסעיפים קודמים. אחד התהליכים הוא שינוי בצפיפות המטענים החשמליים על פני המוליך. בתהליך זה, השדה החשמלי במרחב משפיע על מטעני השפה ומשנה את היערכותם על המעטפת. ההערכות החדשה יוצרת שדה בתוך המוליך, הגורם לזרם במרחב המתכת. תנועת המטען בתוך המוליך, חוזרת ומשפיעה על מערך מטעני השפה ושינוי זה, כמובן, גורר שינוי נוסף בשדה החשמלי במרחב וחוזר חלילה. שלב הטרנזיינט, לכן, מתאפיין במערכת יחסים של היזון חוזר (משוב) בין צפיפות מטעני השפה, השדה במרחב ובמוליך ועוצמת הזרם.

בשנת 1963 ערך Jefimenko ניסוי, שבו הצליח להוכיח את קיומם של מטעני השפה במעגל זרם ישר פשוט. הוא הניח, בתוך צלחת זכוכית, המלאה בתמיסת יוד שקוף, תיל מתכת והזרים דרכו זרם במתח גבוה. על פני התמיסה, פיזר Jefimenko זרעי דשא ומכיוון שהייתה זו תמיסה מוליכה, הסתדרו הזרעים לאורך קווי השדה החשמלי מסביב לתיל. ציור קווי השדה העיד על נוכחות מטען חשמלי על פני מעטפת המוליך.

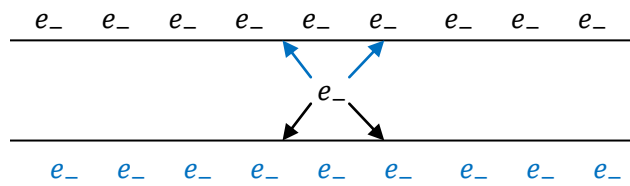


התמונה הבאה מתארת את תוצאות ניסוי זרעי הדשא של Jefimenko בטורואיד המחובר למקור מתח. בצילום נראים באופן ברור קווי השדה החשמלי לאורכם מסודרים הזרעים. הקווים שבחלק הפנימי של הטורואיד נראים ברורים יותר מאשר בחלק החיצוני, אבל בשני התחומים אפשר לראות שהקווים יוצאים מתוך שפת הטורואיד או נכנסים אליה מעידים על נוכחות של מטעני שפה. על התצלום סומנו באופן ווירטואלי קווים שווי פוטנציאל.

ננסה, כעת לדון איכותית בהתפלגות מטעני השפה ולהעריך, באומדן גס את גודלה של צפיפות המטען.

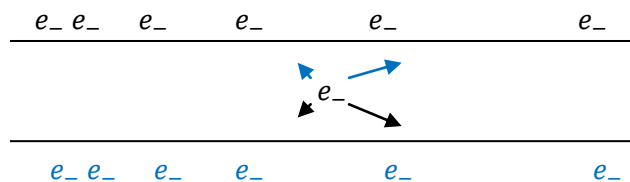
נדמה מוליך ישר בעל חתך מעגלי דרכו זרם זרם. צפיפות מטעני השפה לאורך המוליך לא יכולה להיות אחידה. לו הייתה אחידה, אלקטרוני הנמצא בתוך המוליך לא היה "מתחיל לנוע" לאורכו, כי הכוחות הקולוניים הפועלים עליו, היו מבטלים זה את זה.

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.



מה לגבי תנועת האלקטרון לרוחב המוליך ? כל עוד שקול הכוחות הקולוניים איננו אפס, האלקטרון ינוע כלפי שפת המוליך וצפיפות מטעני השפה תשתנה. תהליך זה יתרחש עד להשגת שוויון לרוחב החתך, כלומר עד שהכוחות הפועלים על האלקטרון בכיוון מאונך לציר המוליך יבטלו זה את זה.

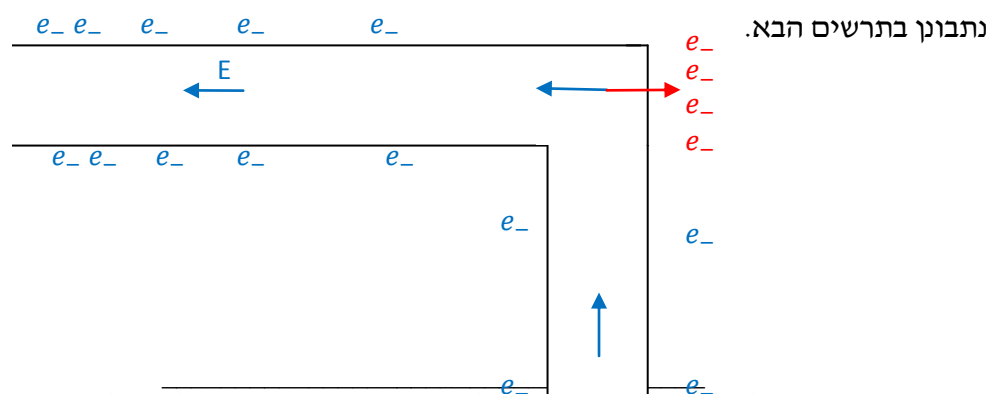
במצב יציב, אם כן, לשדה החשמלי של מטעני השפה, בתוך המוליך יש רק רכיב לאורך ציר המוליך



במאמר משנת 1984 הראה Walz כי עבור מוליך ישר בעל חתך מעגלי, שהזרם הזורם בו קבוע, גראדיינט צפיפות מטעני השפה חייב להיות קבוע גם כן (דרישה זו מתבקשת מאליה, מטעמי סימטריה, כמובן). כל עוד גראדיינט צפיפות מטעני השפה איננו אחיד, השדה לאורך המוליך לא אחיד, מהירות הזרימה במוליך ועל המעטפת שלו לא אחידה וצפיפות מטעני השפה מוסיפה להשתנות. תהליך זה, של היזון חוזר, מחייב אם כן, התייצבות במצב של גראדיינט צפיפות אחידה.

ROSSER בשנת 1970 כלל במאמרו הערכה לסדר הגודל של צפיפות מטעני השפה ואנחנו נעקוב אחרי מערכת השיקולים שלו. אם נכופף את המוליך הישר ב 90° , צפיפות מטעני השפה תשתנה ובתהליך ההיזון החוזר תתייצב במצב חדש. גראדיינט מטעני השפה במצב זה לא יכול להיות אחיד. בחלקו החיצוני של הכיפוף חייבים להצטבר אלקטרונים, כך שהשדה החשמלי יטה לאורך הכיפוף.

ננסה כעת להעריך באופן מקורב, את צפיפות המטען הנדרשת, בחלק החיצוני של הכיפוף, על מנת להטות את השדה במוליך ב 90° .



נתבונן בתרשים הבא. קובץ זה נועד אך ורק לשימושם ה לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה ל הספר בו מלמד המורה), הענ זורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית יציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

מטעני השפה על גבי החלק הישר האופקי של המוליך, המסומנים בכחול, משרים שדה שאת גודלו נוכל להעריך. נניח כי מדובר במוליך נחושת בקוטר של 2 מ"מ, ובעל מוליכות סגולית של $\rho = 5.7 \cdot 10^7 (\Omega m)^{-1}$. נניח כי עצמת הזרם במוליך היא 0.2 אמפר. צפיפות הזרם במוליך תהיה $j = \frac{I}{\pi a^2} = \frac{0.2}{\pi \cdot 0.002^2} \approx 16000 \left[\frac{amp}{m^2} \right]$. עוצמת השדה החשמלי, על פי חוק אום, תהיה $E = \frac{j}{\rho} = \frac{1.6 \cdot 10^4}{5.7 \cdot 10^7} = 2.8 \cdot 10^{-4} \frac{N}{Col}$. שדה זה מצוין בתרשים על ידי חץ כחול המצביע שמאלה. המטענים המסומנים באדום, בחלקו החיצוני של הכיפוף משרים בסמוך להם, שדה שווה בגודלו ומנוגד בכיוונו לשדה "הכחול", מכיוון שהרכיב האופקי של השדה השקול באזור הכיפוף, חייב להתאפס. סמוך מאד לשפת המוליך המכופף נתייחס אל דופן המוליך כאל לוח אינסופי.

שדה חשמלי שמשרה לוח אינסופי הטעון בצפיפות אחידה הוא

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

כלומר צפיפות המטען בחלק החיצוני של הכיפוף היא בסדר גודל של

$$\sigma = \epsilon_0 E = 2.8 \cdot 10^{-4} \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \approx 2.5 \cdot 10^{-15} \left[\frac{col}{m^2} \right]$$

כדי לקבל תחושה ברורה יותר של סדר הגודל הזה, נבדוק כמה אלקטרונים מצטופפים על פני מטר מרובע

$$\frac{2.5 \cdot 10^{-15}}{1.6 \cdot 10^{-19}} \approx 15000$$

מסתבר כי מדובר ב-15000 אלקטרונים למטר מרובע. כלומר, 0.015 אלקטרון למילימטר מרובע. אמנם הבאנו כאן הערכה גסה מאוד של סדר הגודל אבל מסתבר כי צפיפויות מטעני השפה בהם אנו עוסקים קטנות להפליא. אין תמה איפה, כי על מנת לצפות בתופעת מטעני השפה, עלינו לבחון מעגל חשמלי בו המתח מסדר גודל של 5KV וההתנגדויות מסדר גודל של 100MΩ.

4.5 הספק – העברת האנרגיה מן הסוללה לנגד

עד כה הבנו כי מנגנון הולכת האלקטרונים כרוך במטעני שפה, חישובים של מהירות ההולכה הולידו מסקנה חד משמעית, האלקטרון אינו נושא האנרגיה. השאלה שעולה כעת היא מי נושא את האנרגיה וכיצד זו עוברת לנגד? ברוב ספרי הלימוד אין התייחסות למודל שיסביר את מעבר האנרגיה במעגל חשמלי. בהעדר הסבר כזה התלמיד ינסה למלא את החסר ולרוב הוא עושה זאת תוך שימוש לא מדויק ואפילו לא נכון, במושגים שמופיעים בפרק העוסק במעגלי זרם ישר.

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

בהגדרת הכא"מ נאמר כי כל אלקטרון העובר דרך מקור המתח מקבל אנרגיה. בנוסף לעיתים קרובות אנחנו מסרטטים את כיוון הזרם מהדק אחד של מקור המתח להדק השני מבלי להיכנס לפרטים. התלמיד בהמשך מקבל את נוסחאות ההספק של מעגל חשמלי עבור זרם ישר ומבחינתו התמונה שקיבל היא מלאה. אך ברגע שנישאל כיצד יתכן שהאור במנורה נידלק מידיית עם סגירת המעגל, נגלה כי אנו מובילים את התלמיד לסתירה קוגניטיבית. אחת התפיסות השגויות הנובעת מהחלל הריק שנוצר בהסבר מנגנון העברת האנרגיה היא, שהאלקטרונים נעים מהסוללה דרך המוליכים ומעבירים אנרגיה מן הסוללה לנגד. במשפט זה יש שלוש עובדות לא נכונות- האחת, שהאנרגיה נמצאת רק בסוללה, השנייה, שהאלקטרונים הם הנושאים את האנרגיה, והשלישית, שהם נעים כמעט במהירות האור. נראה כי שלושת ה"עובדות" הללו אינן נכונות.

בסעיף הקודם, חישבנו את מהירות סחיפת האלקטרונים (drift velocity) וחישבנו את מהירות הגל בענן האלקטרונים במהלך הזרימה ומצאנו כי מהירות אלו קטנות בהרבה סדרי גודל ממהירות האור. ברגע סגירת המעגל, האור נורה נדלק מיידית. לא יתכן שהאלקטרון הוא נושא האנרגיה אם מעבר האנרגיה מהיר כל כך.

תלמיד יכול לטעון כי אלקטרון ההולכה הנמצאים בקרבת הנורה הם אלה שמעבירים אליה את האנרגיה ולכן המהירות הנמוכה שלהם לא משנה. אבל אם זהו המצב, הרי שהאנרגיה איננה אגורה בסוללה בלבד אלא נמצאת כבר מלכתחילה, בקרבת הנורה.

ניתן גם לשלול את הרעיון, כי המטענים הם נושאי האנרגיה, דרך הדוגמה הבאה: נחשוב על מעגל השראה, המורכב משני מעגלים שאינם מחוברים זה לזה. במעגל האחד סוללה ובאחר נורה. בכל מעגל יש סליל וכריכות שני הסלילים נמצאות בסמוך זו לזו(שנאי). מתוך ניסיון אנו יודעים כי מיד עם סגירת המעגל האחד, תדלק הנורה במעגל השני, הנה מקרה בו האנרגיה לא עוברת במוליך אלא במרחב בין הסלילים. דוגמה נוספת היא מעגל זרם חילופין, שם האלקטרונים נעים מצד לצד ועל פי מודל דרודה, התנועה הממוצעת שלהם היא אפס. במקרה כזה אי אפשר לאמר שהאלקטרונים נעים מהסוללה לנורה אבל אנרגיה בהחלט עוברת. אפשר היה להגיד כי לכל סוג מעגל, מנגנון העברת אנרגיה שונה אבל אין ספק שעדיף מנגנון אחד המתאים לכל המעגלים.

נסכם- מהירות האלקטרונים במוליך קטנה לאין שיעור ממהירות האור. הם אינם נושאים את האנרגיה במעגל השראה או זרם חילופין ולכן הדעת נותנת כי אינם נושאים את האנרגיה במעגלי זרם ישר. מי אם כן, נושא את האנרגיה מן הסוללה אל הנורה?

נחזור שוב לרעיון של פוינטיג אותו פרסם בשנת 1883. פוינטיג הגדיר ווקטור, שנסמנו P , באופן הבא:

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H}$$

הוא פשוט כפל וקטורית את השדה החשמלי בשדה המגנטי. יחידות המדידה של שדה חשמלי הן וולט למטר, יחידות מדידה של שדה מגנטי הן אמפר למטר, מכאן נובע כי יחידות המדידה של הוקטור P הן וולט*אמפר/מטר רבוע כלומר וואט למטר רבוע.

וקטור פוינטיג, לכן, הינו וקטור המתאר את עוצמת צפיפות שטף האנרגיה, ואת כיוון זרימת האנרגיה בנקודה כלשהי במרחב. השדה האלקטרומגנטי מוביל את האנרגיה במרחב. אין הוא זקוק לתווך לשם כך. מספיקה נוכחות שדה חשמלי ביחד עם שדה מגנטי. הם אינם חייבים אפילו להשתנות! רק להיות נוכחים ולהצביע בכיוונים שונים זה מזה. והרי שדות חשמליים ומגנטיים מושרים סביב כל אחד מסוגי המעגלים שמנינו- מעגלי השראה, חילופין וזרם ישר! פוינטיג פתר את החידה.

כאשר מדברים על שטף, בפיזיקה, נוה לדמיין אלמנט נפח קטנטן dV בעל מעטפת ds . נחזור על חישובו של פוינטיג ונמצא את כמות האנרגיה האלקטרומגנטית היוצאת מאלמנט נפח זה דרך המעטפת. כזכור, הדיברגנס מבטא את השטף של וקטור הבוקע מתוך אלמנט נפח.

$$\nabla \cdot \vec{P} = \nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H})$$

בחרנו, הפעם, להתייחס לשדה המגנטי בצורתו הכללית ביותר (וקטור ההעתק המגנטי) ולא להגביל עצמנו לריק בלבד.

$$\nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) = (\nabla \times \vec{E}) \cdot \vec{H} - (\nabla \times \vec{H}) \cdot \vec{E}$$

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

משוואות מקסוול מלמדות אותנו כי

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

כאשר \vec{J} הוא וקטור צפיפות הזרם בחומר. הצבה של משוואות מקסוול בביטוי מעליהם נותנת

$$\nabla \cdot \vec{P} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \cdot \vec{H} - \left(\vec{J} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \cdot \vec{E} = -\mu \frac{1}{2} \frac{\partial (\vec{H} \cdot \vec{H})}{\partial t} - \varepsilon \frac{1}{2} \frac{\partial (\vec{E} \cdot \vec{E})}{\partial t} - (\vec{J} \cdot \vec{E})$$

$$\nabla \cdot \vec{P} = -\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} (\mu H^2 + \varepsilon E^2) - (\vec{J} \cdot \vec{E})$$

לביטויים μH^2 ו εE^2 יחידות מידה של אנרגיה ליחידת נפח ואנו מכנים אותם צפיפות האנרגיה החשמלית וצפיפות האנרגיה המגנטית. הביטוי $\vec{J} \cdot \vec{E}$ בעל יחידות מידה של הספק ליחידת נפח, מייצג את עבודת השדה החשמלי על המטען. עבור אלמנט נפח בנגד, זהו גורם הדיסיפציה המבטא את ההספק שהפך לחום. עבור אלמנט נפח בסוללה הוא מבטא את ההספק שהשקיעה הסוללה במטען.

המשמעות הפיזיקאלית של המשוואה אליה הגיע פוינטינג. היא זו- האנרגיה עוזבת את אלמנט הנפח באחד משני האופנים- נשאת על ידי השדה האלקטרומגנטי או זורמת החוצה כחום. זו משוואת הרציפות עבור אנרגיה אלקטרומגנטית.

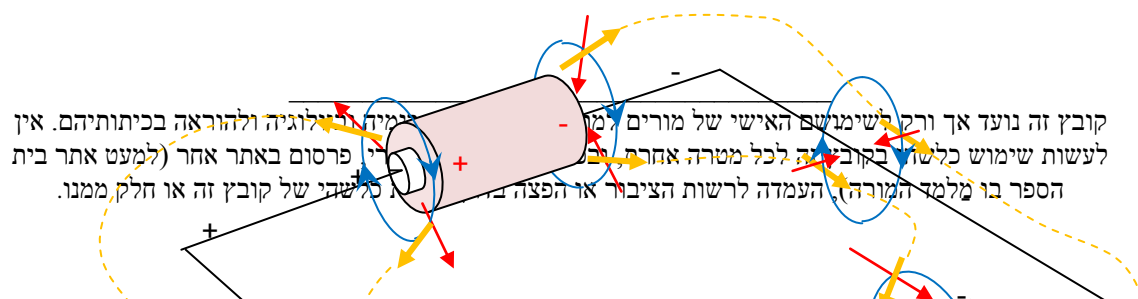
ברור כי וקטור פוינטינג הבוקע מתוך אלמנט נפח אחד, בוקע אל תוך אלמנט שכן. סימני הגורמים במשוואה מתהפכים וצפיפות האנרגיה החשמלית הקטנה באלמנט הראשון שווה לתוספת האנרגיה באלמנט השני. הנה כך עוברת האנרגיה מנקודה לנקודה במרחב.

מה באשר למיקומה של האנרגיה החשמלית? האם היא נמצאת בסוללה בלבד? פוינטינג בחישוביו משיב לנו גם על זאת. בכל מקום במרחב בו קיים שדה חשמלי ישנה צפיפות אנרגיה חשמלית הפרופורציונית לריבוע עוצמת השדה! האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית היא תכונה של המרחב כולו! היא אגורה בכל מקום בו קיים שדה חשמלי. נכון שבקרבת המטען עוצמת השדה גדולה ופירושו כי צפיפות האנרגיה גבוהה ובמובן הזה, מרבית האנרגיה הפוטנציאלית נמצאת בקרבת הסוללה והמוליכים/ במעגל, אבל היקום כולו הוא מאגר לאנרגיה חשמלית.

מהו, אם כן, תפקיד הסוללה במעגל? האומרים כי תפקידה של הסוללה ליצור מתח חשמלי לאורך המעגל אינם טועים. אלא שאנחנו מחפשים הסבר היורד עד לפרטים המיקרוסקופיים. תפקיד הסוללה בראיה החדשה, הוא ליזום ולשמר את הגרדיינט בצפיפות מטעני השפה לאורך המוליכים/נגדים.

מטעני השפה עושים את כל היתר. משרים שדה במרחב ופורשים את מאגר האנרגיה החשמלית במרחב. משרים שדה חשמלי לאורך המוליכים וגורמים לזרם במעגל. הזרם משרה שדה מגנטי במרחב ויחד עם השדה החשמלי גורמים לאנרגיה האלקטרומגנטית לנוע במסלולים שמתווה וקטור פוינטינג.

נביא כעת דוגמא למעגל חשמלי פשוט המתאר סוללה מוליכים אידיאליים ונגד.

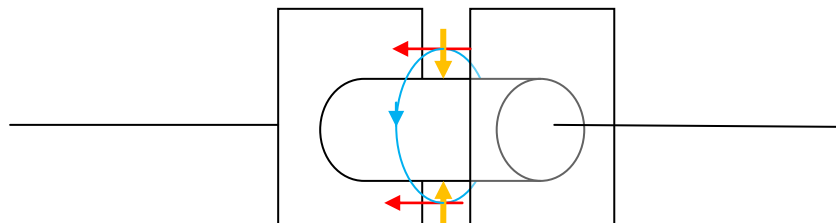


החיצים האדומים מייצגים את השדה החשמלי, הכחולים את השדה המגנטי והכתומים את וקטור פוינטינג המאונך להם על פי כללי המכפלה הוקטורית. חשוב לשים לב כי האנרגיה יוצאת גם מאזור הקוטב השלילי וגם מאזור הקוטב החיובי ומתקדמת אל הנגד משני הצדדים. עוד חשוב להדגיש כי בציר מופיעים שני מסלולי אנרגיה בלבד העוברים בקרבת המוליכים. מרבית האנרגיה אמנם עוברת בקרבת המוליכים כי עוצמת השדות שם היא הגדולה ביותר אבל, עקרונית, ישנם מסלולי אנרגיה המובילים מן הסוללה אל האינסוף ומשם בחזרה אל הנגד.

אם נבחן את השדה החשמלי בקרבת שפת הנגד נראה כי יש לו רכיב מאונך לשפה עקב נוכחות המטען ורכיב מקביל לשפה, בשל גרדיינט בצפיפות המטען. המכפלה הוקטורית של הרכיב המקביל בשדה המגנטי יוצרת רכיב של וקטור פוינטינג ניצב לשפה שכיוונו אל תוך הנגד. השדה האלקטרומגנטי מוביל את האנרגיה עד אל תוך הנגד שם תהליך הדיסיפציה הופך אותה לחום.

נחשב את הספק האנרגיה האלקטרומגנטית המגיע לנגד.

על מנת לפשט את חישובנו נניח כי המוליכים המחוברים לנגד בשני קצותיו, מתרחבים בנקודות המגע לכדי לוחות גדולים המקבילים זה לזה.



צפיפות המטען על הלוחות גדולה ביחס לצפיפות המטען על שפת הנגד וניתן להתייחס לשדה בתוך הנגד ולרכיב השדה הסמוך לשפתו כאל שדה בין לוחות קבל.

$$E_z = \frac{V}{d} = \frac{Ri}{d}$$

כאשר d הוא אורך הנגד (והמרחק בין הלוחות).

השדה המגנטי שמשרה הזרם i סביב הנגד נתון על ידי.

$$B = \frac{\mu i}{2\pi r}$$

עוצמת שטף האנרגיה במרחב הנגד מתוארת על ידי,

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H} = \frac{1}{\mu} \vec{E} \times \vec{B} = -\frac{1}{\mu} E_z B \sin 90^\circ \hat{r} = -\frac{1}{\mu} \frac{Ri}{d} \frac{\mu i}{2\pi r} \hat{r} = -\frac{Ri^2}{2\pi dr} \hat{r}$$

נניח כי הנגד גלילי ושטח המעטפת שלו הוא $S = 2\pi rd$

מכיוון שהשדה מעבר ללוחות הקבל אפסי (גם משום הקירוב לקבל לוחות וגם משום שהמוליכים אידיאליים) האנרגיה נכנסת אל הנגד מבעד למעטפת בלבד. מכפלה של וקטור פוינטינג במעטפת תיתן ביטוי לכמות האנרגיה שנושא השדה הא"מ אל הנגד.

$$\frac{dw}{dt} = \vec{P} \cdot 2\pi dr \hat{r} = -\frac{Ri^2}{2\pi dr} 2\pi dr = -Ri^2$$

והרי זו נוסחה מוכרת לכל תלמיד תיכון שלמד חשמל ומגנטיות. שטף האנרגיה פונה מבחוץ אל פנים הנגד וזו הסיבה לסימן השלילי.

נדמה כי זה המקום לקצת התרגשות, כפי שפיינמן תאר באחת מהרצאותיו, "האינטואיציה אומרת לנו כי האלקטרונים מקבלים את האנרגיה שלהם כתוצאה מן הדחיפה שהם נדחפים לאורך התיל ופירושו שהאנרגיה אמורה לזרום במורד (או במעלה) ולאורך התיל. אבל התיאוריה אומרת לנו שהאלקטרונים נדחפים למעשה על ידי שדה חשמלי שמקורו במטענים רחוקים והאלקטרונים מקבלים את האנרגיה שלהם, ליצירת חום מן השדות הללו. האנרגיה זורמת, איכשהו, מן המטענים הרחוקים אל המרחב הפתוח וממנו אל תוך התיל..."

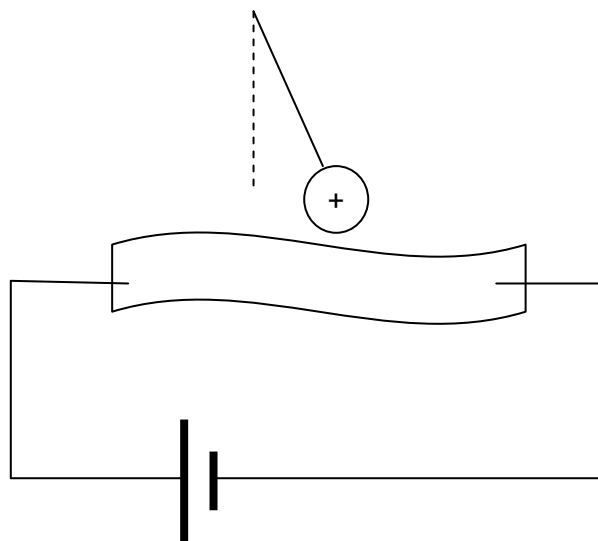
גם אם הדברים לא נוחים לנו כל כך, מתחזקת התחושה כי זהו ההסבר המיקרוסקופי שיכול לענות על כל אחת מהטענות שהובאו בתחילת פרק זה.

5 ביטוי ניסיוני לקיומם של מטעני שפה

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

אחד הנושאים ה"חמים" שהאקדמיה של הוראת המדעים עסקה בו בשנות התשעים הוא הוראה משמעותית של נושא החשמל. בעקבות ההתקדמות באיתור ואבחון תפישות נאיביות במכאניקה אך טבעי היה לנסות ליישם את הגישה הדיאגנוסטית להוראת החשמל והמגנטיות¹¹. במחלקה להוראת המדעים במכון ויצמן נכתבו מספר מאמרים הדנים בתפישות נאיביות של תלמידים בנוגע למעגלי זרם, נכתב ונערך שאלון דיאגנוסטי בנושא מעגלי זרם (Bat-Sheva Eylon and Uri Ganiel 1990) יצא לאור ספר הלימוד "פרקי חשמל ומגנטיות" וראתה אור, חוברת עבודה נלווית. החוברת כללה אוסף שאלות ופעילויות באלקטרוסטטיקה שנועד לעבות ולתמוך בכרך אי של ספר לימוד העוסק באלקטרוסטטיקה ובמעגלי זרם.

חשוב לציין, כי ספר הלימוד "פרקי חשמל ומגנטיות", מתייחס לשדה המניע את המטענים במוליכי המעגל החשמלי ומתאר את מטעני השפה כמקורות השדה הזה. הספר מתאר ניסוי לאישור קיומו של שדה חשמלי סמוך לשפת המוליך שכיוונו מקביל לשפה. יש אפילו אזכור לעובדה שיש לשדה הזה רכיב נוסף הניצב לשפה. כחלק מן הפעילויות הרלוונטיות לנושא, בחוברת הפעילויות, ישנה הצעה לניסוי איכותי להדגמת הרכיב המקביל! ההצעה מתארת מודל דו מימדי, למעגל חשמלי, ובו רצועת נייר מוליך גזורה, מחוברת למקור מתח ומשמשת כנגד (הנייר המוליך הינו בעל התנגדות גבוהה יחסית וכאשר מניחים עליו גילי נחושת ומחברים אותם לספק מתח רגיל-וולטים ספורים, ניתן למדוד הפרשי פוטנציאלים בין נקודות שונות על גבי הנייר. ניתן להשתמש במערכת להדגמת משטחים/קווים שווים פוטנציאל במרחב סביב מוליכים טעונים זהו השימוש הנפוץ יותר בנייר). כדור גרפיט קטן תלוי על חוט מבודד ומוצב מעל לרצועת הנייר קרוב לפניו. טוענים את הכדור על ידי מוט PVC משופשף והחוט עליו הוא תלוי מקבל הטיה בכיוון מקביל לרצועה.



זו הדגמה מצוינת לקיום שדה חשמלי בסמוך לפני המוליך ולעובדה שלשדה רכיב המכוון לאורך המוליך ואחראי לזרם. ניתן בהחלט לטעון כי קיומו של שדה חשמלי סטטי מעיד על קיומם של המקורות שלו, כלומר צפיפות מטען חשמלי הפרושה על פני רצועת הנייר.

פרופ' גניאל ומר צבי גלר, שהיו בצוות הפיתוח של ספר הלימוד, הגו ניסוי נוסף, בעל אופי כמותי יותר. כוונתם הייתה להדגים קיומם של מטעני השפה במעגל חשמלי ממש, כלומר מעגל המורכב

¹¹ R.Cohen , B.Eylon and U.Ganiel / Am. J. Physics 51 (5) May 1983

Esther Bagno and Bat-Sheva Eylon
Am. J. Phys. 65 (8), August 1997

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

מנגדים רגילים. הרעיון היה פשוט - למדוד את המטענים על שפת המוליך בעזרת קולונמטר. ולהוכיח ישירות את הקשר בין הפרש הפוטנציאלים על פני הנגדים וצפיפות המטען על השפה.

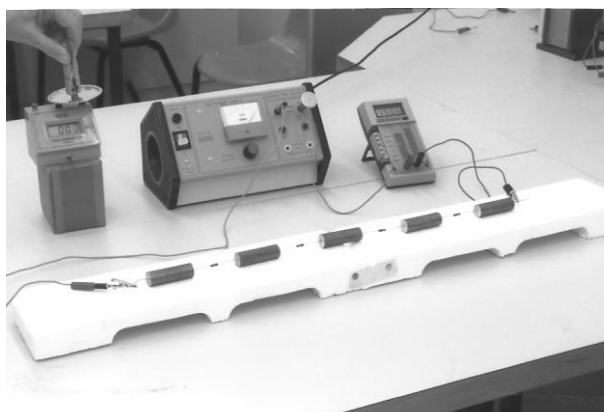
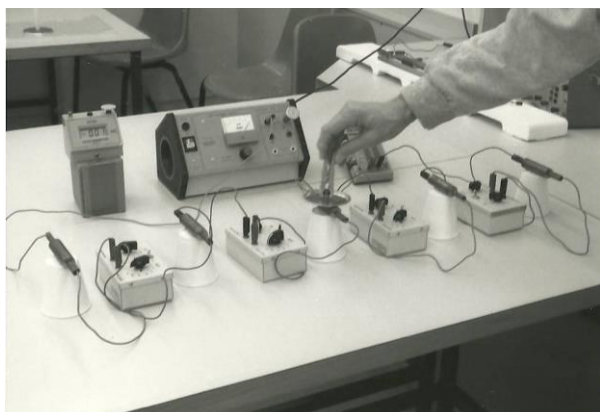
הרעיון פשוט אמנם, אבל עדיין צריך היה לגשש אחר הדרך הנכונה להוציאו לפועל.

ראשית, כפי שהראינו בחלקה החישובי של עבודה זו, צפיפות מטעני השפה, נמוכה להפליא. במעגל חשמלי המורכב ממקור בעל כ"מ של וולטים ספורים ואפילו עשרות ומאות וולטים, צפיפות המטען נמוכה מסף הרגישות של קולונמטרים רגילים.

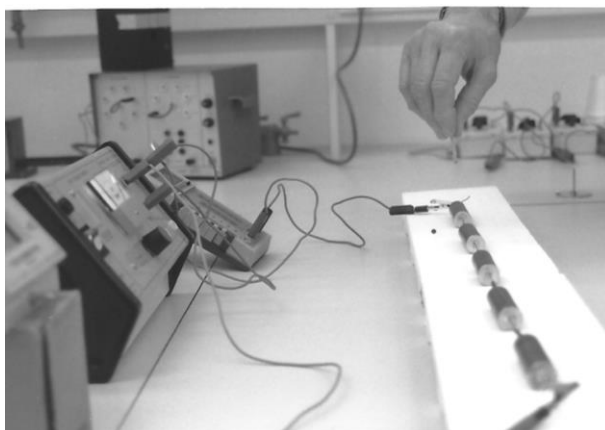
גניאל וגלר השתמשו בשני ספקי מתח גבוה מחוברים בטור !!! מקור המתח במעגל שלהם היה בסדר גודל של 10kV !!! ואולם לא רק מקור המתח חשוב. בכדי שצפיפות המטען תהיה גדולה מספיק, עוצמת השדה החשמלי במוליכים צריכה להיות ענקית ! פירושו שינוי גדול בפוטנציאל על פני פסיעה קטנה לאורך המעגל. במלים אחרות, היה עליהם להשתמש בנגדים בעלי התנגדות גבוהה מאד (100 מגה-אום). סדר הגודל של הזרם במעגל הוא 10 מיקרו-אמפר. עוד שני פרטים חשובים שיש לשים אליהם לב - הנגדים שאת המטען על שפתם רוצים למדוד צריכים להיות מבודדים מן הסביבה. למעשה, יש להרחיק אותם מן הקרקע משום שהשדות החשמליים הגדולים במעגל משרים מטענים בעצמים שבקרבת הנגדים ומטען מושרה בסביבת הנגד מנטרל השפעת המטענים שעל פניו.

כמו כן, המטען נוטה להצטבר בנקודות החיבור בין המוליכים לנגדים. בכדי להשיג צפיפויות מטען גבוהות יותר השתמשו גניאל וגלר במוליכים בעלי מעטפת גדולה - כלומר גלילים עבים של נחושת (בקוטר של 1.5-2 ס"מ) שחיברו בין הנגדים במעגל.

להלן שלוש תמונות ממערכת הניסוי המקורי.



התמונות נלקחו מאוספו האישי של פרופ' אורי גניאל



קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

התבוננות בתמונות מלמדת :

מעריך הנגדים בודד על ידי משטח קלקר או על ידי הגבהה בעזרת כוסות קלקר חד פעמיות.

לספק המתח מחובר תיל אל הקוטב החיובי. יתכן כי זהו תיל המחבר את ספק המתח לספק אחר, או לחילופין מאריק את ספק המתח. חיבור שני ספקי מתח גבוה במקביל הוא עניין לא פשוט ומחייב הארקה של שני הספקים אחרת המתח הגבוה עלול לגרום לפריצה בתוך הספקים.

נראה כי במהלך הניסוי נערכה מדידה כמותית ע"י העברת מטען מן הגלילים המוליכים אל הקולונמטר ובנוסף בדיקה איכותית של השפעת מטעני השפה על כדור גרפיט התלוי על חוט.

החלטנו לשחזר את ניסוי גניאל- גלר, לפחות בחלקו האיכותי, להסריט את הביצוע ולהעלותו לYOUTUBE במטרה לעשותו נגיש למורים לצורכי הדגמת התופעה.

השחזור

בספרם של Chabey & Sherwood Matter & interactions, מופיע תיאור של הניסוי המוצע. ניסוי שכזה אפשרי לביצוע במעבדת ביה"ס.

בתור ניסוי ראשוני, חיברנו ספק מתח בודד (6 kV) למערך של 4 נגדים בני 1 מגה אום. הנגדים חוברו זה לזה בתקעי בננה. המערך כולו הונח על משטח קלקר. התוצאה הייתה רחוקה מלספק. מגע של ראש הקולונמטר בתיילים המחברים את הנגדים לא הוליד שום קריאה !

בשלב שני, נעזרנו בצוות המעבדה של מכון דוידסון. הצגנו בפני הלבורנטים את תמונות הניסוי שהושאלו לנו על ידי פרופ' גניאל. בעצה אחת עם הצוות, החלטנו לתלות את מערך הנגדים באוויר, במרחק ניכר מן השולחן ובאופן שכזה לנטרל השפעת מטענים מושרים בסביבת המעגל. כמו כן, השתמשנו הפעם ב4 נגדים בני 100 מגה אום, שחוברו בגלילי נחושת עבים זה לזה, בדומה למערכת הניסוי המקורי.

הפעם שמחנו לגלות כי גליל נייר אלומיניום קטן, התלוי על חוט נמשך אל הגלילים בקצוות ונרתע מהם, בדיוק כפי שנרשם בתיאור הניסוי. בסמוך לגלילים שבין הנגדים הייתה תגובת "מטוטלת האלומיניום" קטנה הרבה יותר אם בכלל. קריאת הקולונמטר, כנגד זה, הייתה מאכזבת למדי. אמנם בצד המחובר להדק החיובי של הספק הייתה קריאה חיובית ובצד השלילי, קריאה שלילית אבל המידה הייתה 0.01 מיקרוקולון, למעשה סדר הגודל של רזולוציית המכשיר.

העברנו את מיקום המערכת למעבדת ביה"ס. החלטנו להשתמש בספק מתח גבוה בודד ולנסות לשפר את התוצאות על ידי שיפור מערך הנגדים/מוליכים. לאחר כמה התנסויות לא מוצלחות, עלה בדעתנו כי גלילי הנחושת רחוקים מידי מן הנגדים והמטען מצטבר על התיל הדק המחבר אותם לנגד. קיצרנו את התילים במידה ניכרת והשגנו תוצאות טובות הרבה יותר.

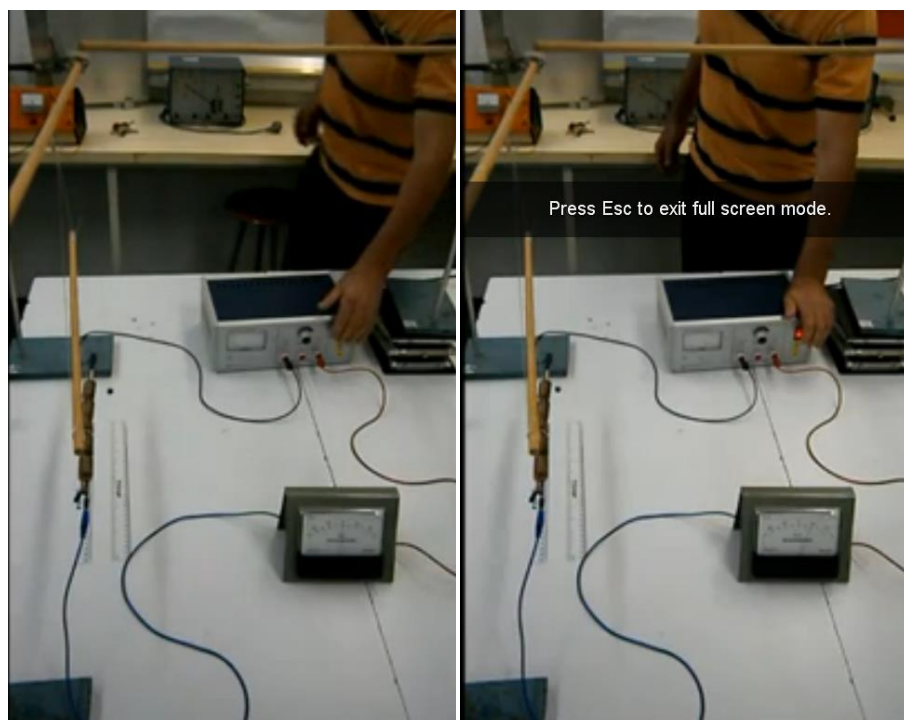
קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

להלן תמונות של מערכת הניסוי במעבדת ביה"ס :



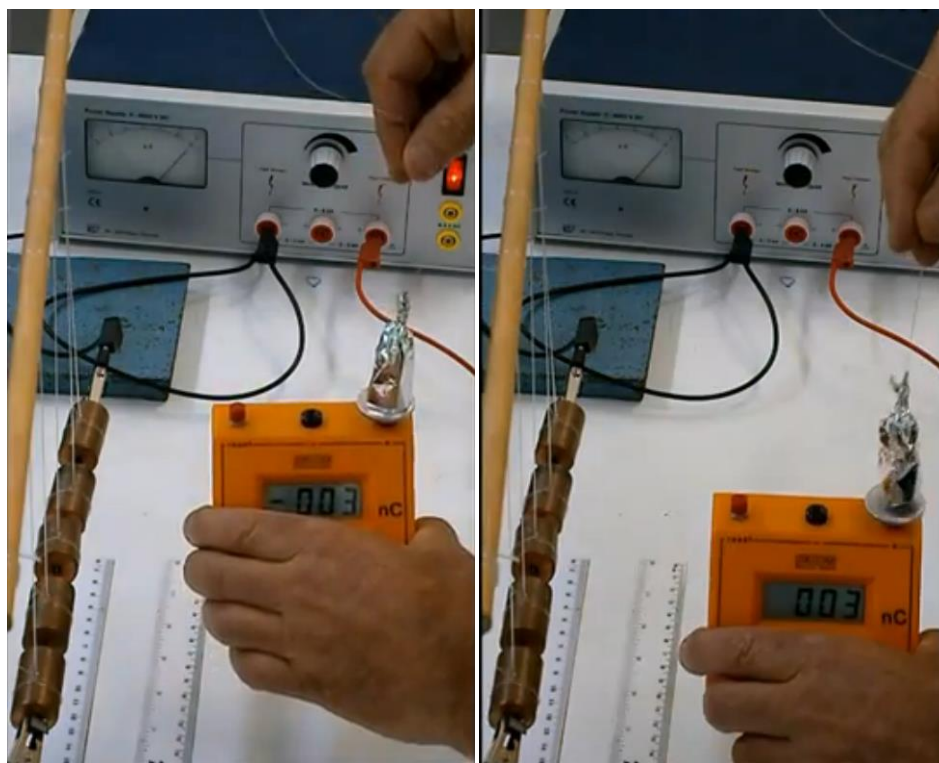
תלינו בעזרת חוט ניילון, את שורת הגלילים והנגדים שביניהם, על מקל עץ הנתמך על ידי שני מעמדים. מרחק הגלילים מן השולחן היה כ-20 ס"מ.

השתמשנו בכדור גרפיט קטן, מערכת האלקטרוסטטיקה, על מנת להדגים את השפעת השדה החשמלי של הגלילים כשהמעגל סגור. הכדור נמשך לגליל ונרתע ממנו. עוצמת ה"תגובה" ירדה מן הגליל הראשון לשני ומן השני לשלישי, ליד הגליל הרביעי לא הגיב הכדור כלל וליד הגליל האחרון שוב נמשך ונרתע כצפוי.



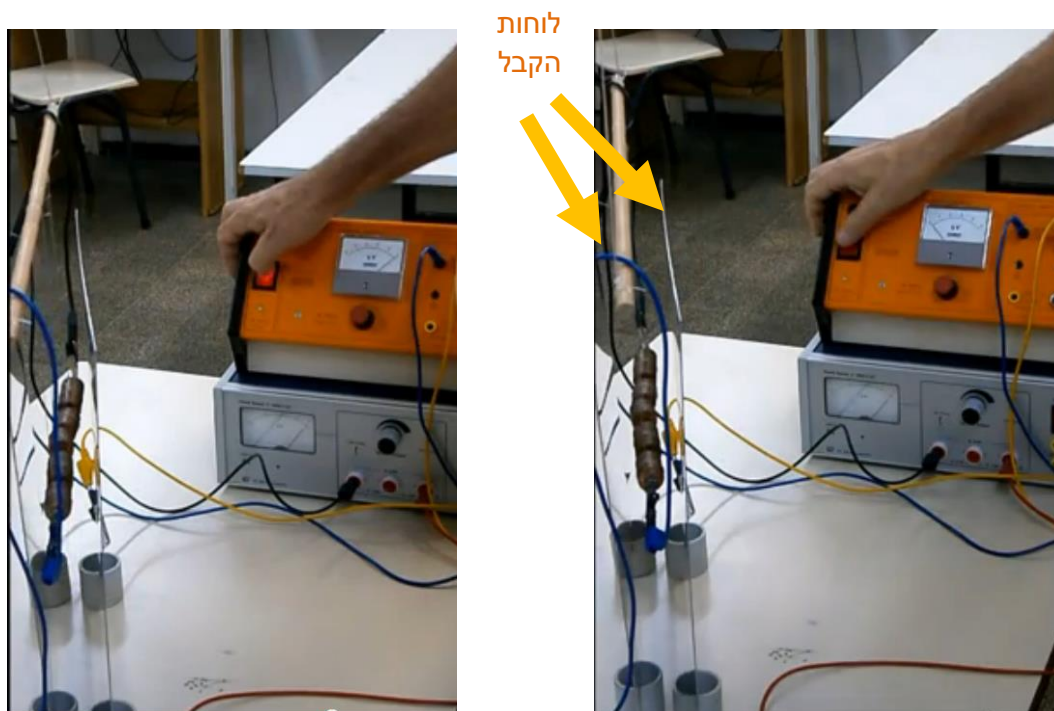
בשלב שני, מדדנו בעזרת קולונמטר את המטען על פיסת אלומיניום קטנה שהבאנו במגע עם הגלילים. כמות המטען שמדדנו ירדה מן הגליל הראשון לשלישי. ברביעי לא נמדד מטען כלל ואילו מגע בגליל החמישי הניב מטען שלילי.

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.



לאחר נגיעה בגליל המחובר לקוטב הימני. לאחר נגיעה בגליל המחובר לקוטב השלילי.
שימו לב לסימן השלילי בקריאת הקולונמטר משמאל.

לקינוח, תלינו את מערך הנגדים/ גלילים בין שני לוחות אלומיניום גדולים שחוברו לספק מתח גבוה אחר (קבל לוחות). השדה המושרה בין לוחות הקבל הפעיל כוחות מנוגדים על שני צידי שורת הגלילים מכיוון שהצדדים "טעונים" במטענים מנוגדים! סגירת המעגל גרמה לשדה הקבל להפעיל מומנט סיבוב על מערך הנגדים ולהטות אותו.



קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

שימו לב להטיית שורת הגלילים ברגע סגירת המעגל (הצילום משמאל).

לטוענים לגבי תקיפות הניסוי, האומרים שלא נוכחות מטען הראינו, אלא רק הפרש פוטנציאלים בין הנגדים לכדור הגרפיט, בלבד, וכי הבדלים בקיבול בין הגלילים לקולונומטר הם שגרמו לו להטען ולא מטעני שפה, לטוענים כך נשיב – מטען, שדה, הפרש פוטנציאלים וקיבול קשורים הדוקות זה בזה. המשיכה והרתיעה של כדור הגרפיט מעידים על קיומו של שדה חשמלי. מכיוון שמדובר במעגל זרם ישר, השדה החשמלי איננו שדה העתק אלא שדה אלקטרוסטטי ולכן מחויב המציאות כי ינבע ממקורות, כלומר ממטען. מכיוון שכדור הגרפיט היה נייטרלי עם סגירת המעגל, הרי שמקורות השדה נמצאים על שפת המוליכים. זאת ועוד - מדדנו מטען שלילי בצד האחד של מערך הגלילים ומטען חיובי בצידו האחר, ראינו מומנט סיבוב פועל על המערך המעיד על מטענים מנוגדים בשני קצותיו. נוכחות "מטעני השפה" אינה מוטלת בספק.

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

6.1 פעילות מגשרת בין אלקטרוסטטיקה לאלקטרודינמיקה

חשוב להקדים ולאמר כי **בספר לימוד החשמל והמגנטיות שיצא בהוצאת מכון ויצמן**, ישנה התייחסות כוללת ומקיפה לנושא הפרויקט, מחישוב מהירות הסחיפה של האלקטרונים דרך תיאור מטעני השפה עבור לקשר המתמטי בין השדות החשמלי והמגנטי לצפיפות האנרגיה ועד ליחידות המידה של וקטור פוינטינג, אלא שהתמונה השלימה פרושה על פני שני כרכי ספר הלימוד, מרביתה מופיע בקטעי ההרחבה והעמקה ובפרקים שירדו, למעשה מתכנית הלימודים לבגרות.

תרומתנו הצנועה היא בעצם ההעלאה המחודשת של הנושאים, בהתייחסות הממוקדת אליהם ובאופי ההתייחסות - פעילות עצמית של התלמידים.

עוד חשוב לנו לציין, כי כוונתנו המקורית הייתה לעצב פעילויות מתוקשבות באינטרנט ולאפשר גישה לקהל רחב של מורים ותלמידים. קשיים טכניים ומחסור בזמן היו בעוכרינו.

ברם הפעילות מיועדת לתלמידי פיזיקה בכיתה יב' ומטרתה, להדק את הקשר בין פרק האלקטרוסטטיקה לפרק מעגלי הזרם. היא מתוכננת עבור תלמידים שסיימו את לימודי החשמל והמגנטיות, מכיוון שבחלקה, מצריכה היכרות עם מושג השדה המגנטי ועם מושג המכפלה הוקטורית, אולם ניתן בהחלט, להשתמש רק בחלק מן המשימות ובמקום אחר ברצף ההוראה. למשל, ניתן להשתמש בשתי המשימות הראשונות, הנוגעות למהירות התנועה של האלקטרונים ולנוכחות מטעני השפה בתחילת לימוד פרק מעגלי הזרם או בסופו.

הפעילות נפתחת בשאלון קצר שנועד להציף תפישות נאיביות הנוגעות לזרם החשמלי במעגל. השתמשנו בשאלון אליו התייחסנו במבוא הפדגוגי בעבודה. בחרנו מתוכו 4 שאלות רלוונטיות והן נועדו להיות מעוררות ומערערות ליצור סקרנות ורקע להמשך הפעילות.

השאלות מנוסחות כ**שאלות פתוחות** במכוון. מומלץ לתת לכל תלמיד לענות בנפרד, על כל השאלות ואח"כ, במסגרת מליאה, לאסוף ולרשום על הלוח את התשובות השונות שעלו. אין הכוונה לנהל דיון, אלא לקבל תמונה ומודעות להלכי המחשבה בכיתה.

בהמשך, מציבים לפני התלמיד ארבע המשימות הבאות, כל אחת מהן נועדה לענות על שאלה מן השאלות המקדימות.

משימה ראשונה היא חישוב מודרך של המהירות הממוצעת של האלקטרונים במעגל החשמלי. בתום הפעילות חשוב להסב את תשומת לב התלמידים להבדל המושגי בין המהירות הממוצעת למהירותו של אלקטרון בודד, כמו גם להבדל העצום בין הערכים שלהן.

משימה שנייה היא פעילות אינטראקטיבית מול סדרת סרטונים, המתעדת ניסוי להדגמת מטעני שפה במעגל חשמלי. התלמידים נשאלים שאלת "מה יקרה אם..." ואמורים לשער, בכל שלב, את התנהגות המערכת. מומלץ, כמובן, לעמת את תשובת התלמידים אילו עם אילו, על מנת ליצור שיח פיזיקלי, בין עם בעבודה בזוגות ובין עם בדיון במליאה. בתום הדיון התלמידים חוזרים אל המחשב, צופים בסרטון המאפשר להם לראות אם טעו או צדקו בהשערתם. עליהם לארגן מחדש את המידע שצברו על המטען והמעגל החשמלי ולעבור לשאלה הבאה. סדרת השאלות מובילה את התלמידים צעד אחר צעד, עד לתיאור הכולל של מערך מטעני השפה לאורך המעגל. בתום הפעילות, חשוב להסב את תשומת לב התלמידים לעובדה שמטען על שפת המוליכים נמצא בתנועה וזורם כל הזמן, וכי רק צפיפויות המטען הן הנותרות קבועות.

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

משימה שלישית היא בחלקה, עבודה על פי שגרה שהכרנו במהלך קורס סוגיות בהוראת הפיזיקה במהלך הלימודים בתכנית רוטשילד-ויצמן. אמנם לקחנו חירות לשנות מעט את אופי השגרה אבל הרעיון והשלד נותרו בעינם. השגרה נקראת – "נוסחה ומשמעותה" והתלמידים נקראים לבחון את משמעותם של גדלים פיזיקאליים על פי יחידות המידה שלהם.

בתחילה עליהם לחלץ את יחידות המקדם הדיאלקטרי והפרמביליות המגנטית של הריק. אחר כך עליהם לברר את משמעות הביטויים $\epsilon_0 |E|^2$ ו $\frac{|B|^2}{\mu_0}$. לבסוף מוצגת לפנייהם המשוואה של פוינטינג והם נקראים לברר, בעזרת השגרה את משמעות המכפלה הוקטורית של השדה החשמלי במגנטי.

משימה זו היא בפירוש משימה **לא קלה**. חשוב להדגיש כי התלמידים **אינם נקראים** לפתח מתמטית את נוסחת פוינטינג, אלא לדון באופי של מכפלת השדות (בהנחה כי מכפלה וקטורית מוכרת להם מפרק המגנטיות) ובמשמעות הפיזיקלית שלה (משחק ביחידות מידה הוא מיומנות חשובה ורצויה לכל תלמיד פיזיקה). עקרונית, המשימה היא בפירוש בהישג ידם של תלמידי יב שסיימו 5 יחידות לימוד בפיזיקה. מאידך, אין ספק כי תלמידים רבים יזדקקו לתיווכו של המורה במהלך המשימה, בעיקר אם אינם אמונים על משחק ביחידות מידה. אפשר לדרג את המשימה. המורה יכול להדגים לתלמידים כיצד לחלץ את יחידות המידה של המקדם הדיאלקטרי ולתת להם להתנסות במציאת יחידות מידה של הפרמביליות ובדיקת המשמעות של התכונות הבאות בתור. במידה ומסגרת הזמן מספיקה, אפשר לעמת גם הפעם, את תשובות התלמידים זו עם זו לצורך הערכת עמיתים.

חשוב לסכם ולהדגיש כי וקטור פוינטינג מתאר את צפיפות שטף של אנרגיה, בדומה לצפיפות שטף האור המגיע ממנורה, או לצפיפות שטף השדה חשמלי (חוק גאוס) או לצפיפות שטף השדה המגנטי (חוק פרדיי) בהם נתקלו התלמידים בעבר.

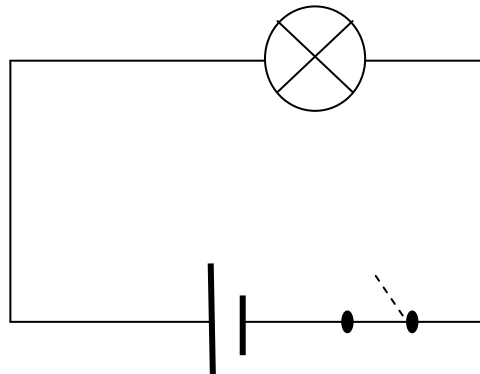
משימה רביעית היא שוב, חישוב מודרך. הפעם של הספק האנרגיה שנושא השדה האלקטרומגנטי אל הנגד. גם משימה זו אינה קלה, אבל התלמידים אמורים להכיר את נוסחת השדה בין לוחות קבל, את נוסחת השדה המגנטי סביב תיל ארוך ואת חוק אום וביטויי ההספק במעגל זרם ישר. כל אלו כלים המצויים באמתחתם וכל שנותר הוא רק להנחותם להשתמש בהם נכונה.

חשוב לסכם כל משימה וחשוב לסכם את הפעילות כולה. אפשר לחזור אל שאלון הפתיחה ולבקש מן התלמידים לענות עליו פעם שנייה. מעניין יהיה להשוות את התשובות לשאלון לפני הפעילות ולאחריה...

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

6.2 ארבע קושיות הנוגעות למעגל החשמלי הפשוט

לפניכם תרשים של מעגל חשמלי פשוט, הכולל סוללה, נורה, תיילי חיבור מוליכים ומפסק.



א. מהי, להערכתכם, המהירות הממוצעת של האלקטרונים במעגל החשמלי הסגור? (סדר גודל).

ב. האם, לדעתכם, המוליכים/נגדים במעגל חשמלי הם ניטראליים או טעונים?

ג. היכן נמצאת האנרגיה הפוטנציאלית החשמלית כשהמעגל פתוח?

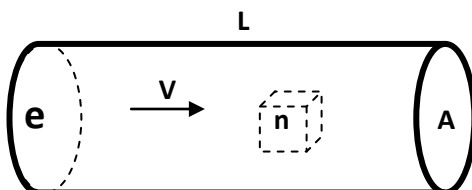
ד. מה מוביל את האנרגיה החשמלית אל המנורה ?

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

6.2.1 מהי מהירות הזרם החשמלי ? חישוב המהירות הממוצעת של אלקטרונים במעגל

לפניכם ציור קטע מוליך דרכו עובר זרם אורך המוליך L ושטח החתך של המוליך A .

החץ המופיע בתרשים מציין את V , מהירותם הממוצעת של האלקטרונים במוליך, המכונה גם מהירות הסחיפה. בחישוב הבא, ננסה להעריך את גודלה של המהירות הזו.



בתוך המוליך מסומנת במקווקוו, קובייה המציינת יחידת נפח אחת. האות n מציינת את מספר האלקטרונים המצטופפים ביחידת נפח אחת.

א. רשמו ביטוי מתמטי המתאר את מספר האלקטרונים במוליך כולו.

צמוד לדופן השמאלית של המוליך מסומן באות e אלקטרון בודד.

ב. רשמו, בעזרת המימדים של המוליך ומהירותו הממוצעת של אלקטרון במוליך, ביטוי עבור פרק הזמן Δt שייקח לאלקטרון המסומן, לעבור את המוליך מקצה לקצה.

ג. היעזרו בסעיפים א' ו ב' ורשמו ביטוי עבור כמות המטען ΔQ שחלפה מבעד לדופן הימנית של המוליך בפרק זמן Δt

ד. היעזרו בסעיפים ב' ו- ג' ורשמו ביטוי לעצמת הזרם במוליך בעזרת מהירות התנועה הממוצעת של האלקטרונים, מטען האלקטרון, צפיפות האלקטרונים ושטח החתך.

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

נשתמש בביטוי שפיתחנו להעריך את מהירות התנועה הממוצעת של האלקטרונים במוליך נושא זרם. נניח כי המוליך שמצויר בראש הדף עשוי נחושת. נניח כי עצמת הזרם במוליך היא 1 אמפר. וכי הוא בעל חתך עגול שקוטרו 1 מ"מ.

עוד נניח כי כל אטום נחושת תורם אלקטרון אחד לציבור האלקטרונים הזורמים במוליך.

כלומר, מספר האלקטרונים הנעים במוליך שווה למספר אטומי הנחושת במוליך.

ה. חפשו ומצאו בעזרת האינטרנט ורשמו את ערכי צפיפות והמסה המולרית של הנחושת.

ו. חשבו, על פי תשובתכם בסעיף ה', את צפיפות אלקטרוני ההולכה הזורמים בנחושת.

ז. הציבו את הערכים המתאימים בביטוי עבור עצמת הזרם שפיתחתם בסעיף ד', וחשבו את המהירות הממוצעת של האלקטרונים במוליך הנחושת.

ח. ידעו כי נורת החשמל נדלקת מיד עם הסגר המתג במעגל. האם, לאור חישוביכם, האלקטרונים הם המובילים את האנרגיה החשמלית אל הנורה? הסבירו.

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

מה יקרה אם

מה יקרה לדעתכם, לכדור הגרפיט כאשר נציב אותו לצד הנגד הראשון בשורה ונסגור את המעגל?



הקליקו וצפו אם צדקתם

- א. כדור הגרפיט לא יזוז ממקומו
- ב. כדור הגרפיט ימשך לנגד
- ג. כדור הגרפיט ידחה מן הנגד
- ד. כדור הגרפיט ימשך לנגד ואחר ידחה ממנו

– נשנה את התנאים

נציב את כדור הגרפיט לצד נגד במרכז שורת הנגדים ונסגור את המעגל. מה לדעתכם יקרה עכשיו ?



הקליקו וצפו אם צדקתם

- א. כדור הגרפיט לא יזוז ממקומו
- ב. כדור הגרפיט ימשך לנגד
- ג. כדור הגרפיט ידחה מן הנגד
- ד. כדור הגרפיט ימשך לנגד ואחר ידחה ממנו

מה לגבי הנגד האחרון בשורה ?

מה יקרה, לדעתכם, כשנציב את כדור הגרפיט לצידו ונסגור מעגל?



הקליקו וצפו אם צדקתם

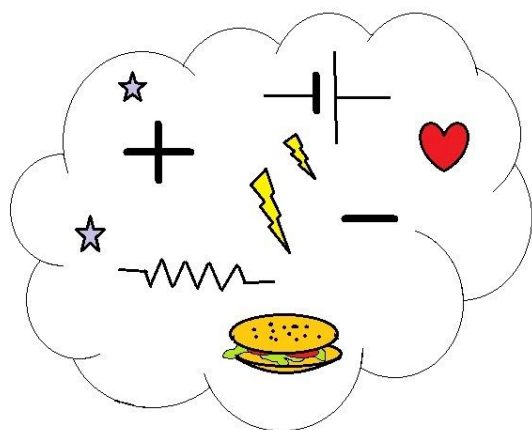
- א. כדור הגרפיט לא יזוז ממקומו
- ב. כדור הגרפיט ימשך לנגד
- ג. כדור הגרפיט ידחה מן הנגד
- ד. כדור הגרפיט ימשך לנגד ואחר ידחה ממנו

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

זהו הזמן לעצור לרגע ולארגן את המחשבות .

רשמו הסבר כולל של המתרחש לאורך שורת הנגדים , במעגל החשמלי, לאחר סגירת המפסק. אל תסתפקו בהצהרות כלליות !! נמקו תשובתיכם על פי התצפיות !!!

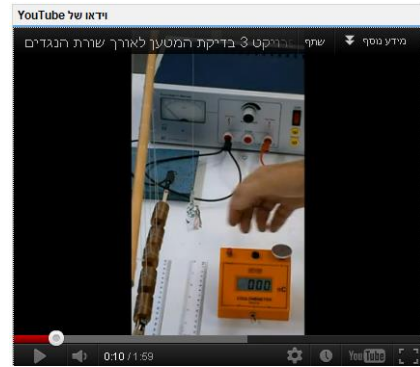
האם המעגל חשמלי טעון או ניטראלי ?!



הגיע הרגע לערוך חקירה מסודרת .

צפו בסרטון הבא המשחזר את המדידות שנערכו בניסוי המקורי .

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

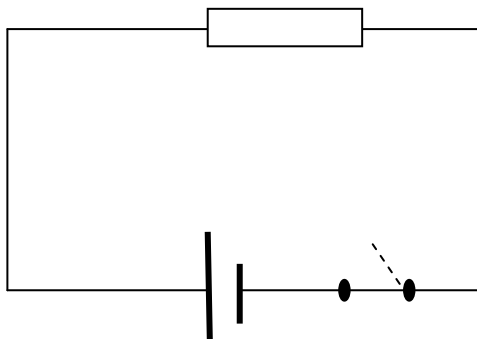


האם תוצאות המדידה תומכות בהסבר למתרחש במעגל אותו רשמתי בשלב הקודם ?
 אם כן, הסבירו כיצד !
 אם לא, רשמו הסבר חדש לאורך.

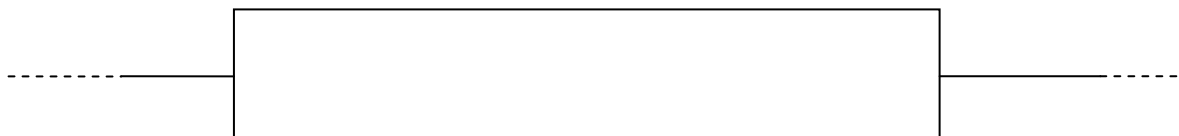
קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

6.2.3 מיהו נושא האנרגיה !?

לפניכם תרשים מעגל חשמלי פשוט, המכיל סוללה ונגד (חוט להט של מנורה).



לאור הידע שרכשנו, נבחן את הנגד לאורכו, בצורה מעמיקה יותר. נתרכז ב**חתיך אורך** של הנגד:



- א. לרשותכם 8 סימני + ו 8 סימני -, ועליכם להוסיף אותם לתרשים החתיך של הנגד, כך **שימחישו** נכונה את מערך צפיפות המטען על שפת הנגד.
- ב. כעת, משתמונת המטען לאורך הנגד ברורה, הוסיפו לציור 5 **קווי שדה חשמלי** שימחישו את מצב השדה החשמלי במרחב סביב הנגד ובתוכו. אל תשכחו לציין חיצו כיוון !
- ג. אל קווי השדה החשמלי, הוסיפו סימון של **השדה המגנטי** המקיף את הנגד. הקפידו לשמור על כלל יד ימין !

זהו. כעת הכל מוכן לפתרון חידת האנרגיה במעגל.

התבוננו בביטוי לאנרגיה הפוטנציאלית החשמלית של מערכת בת שני מטענים נקודתיים זהים.

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{r}$$

- א. השתמשו בנוסחה ובטאו את יחידת מידה ל ϵ_0 , בעזרת יחידות המידה של התכונות האחרות המופיעות בה.

- ב. כעת, התבוננו בביטוי הבא: $u_E = \epsilon_0 |E|^2$. הוא שדה חשמלי.

בעזרת משחק יחידות המידה, הצבה פיתוח וצימצום, מצאו את יחידות המידה של u_E .

איזו תכונה מבטא u_E ? תכונה של מי ?

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

אם הבנתם את הפרינציפ, תוכלו לחזור על התהליך עבור ביטוי נוסף:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2r}$$

ג. השתמשו בנוסחה ורשמו, יחידת מידה ל μ_0 , המורכבת מיחידות המידה של התכונות האחרות המופיעות בה.

ד. עתה, התבוננו בביטוי הבא: $u_B = \frac{|B|^2}{\mu_0}$. B הוא שדה מגנטי.

בעזרת משחק יחידות המידה – הצבה פיתוח וצימצום, הראו כי u_B ו u_E אותן יחידות מידה.

איזו תכונה מבטא u_B ? תכונה של מי?

ה. בכל מערכת, חשמלית או מגנטית, אגורה אנרגיה פוטנציאלית! חזרו והתבוננו בתרשים הנגד שבתחילת המשימה. מה מלמד אותנו "משחק היחידות" שבסעיפים הקודמים? היכן, מצויה האנרגיה? האם בסוללה בלבד?

ו. וכעת לגולת הכותרת. מה דעתכם על הביטוי הבא? את הביטוי פיתח ג'ון הנרי פוינטינג בשנת 1884 והוא נקרא על שמו- וקטור פוינטינג.

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

מדובר במכפלה של שני וקטורים מוכרים. יחידות המידה אינן "מתרשמות" מן המכפלה הוקטורית ומבחינתן זו היא מכפלה רגילה.

התוכלו להראות כי יחידות המידה של \vec{S} הם $\left[\frac{\text{watt}}{(\text{meter})^2} \right]$?

איזו תכונה מבטא \vec{S} ? מהי לדעתכם, המשמעות הפיזיקאלית שלו?

ז. חזרו לתרשים הנגד שבתחילת הדף וסמנו, את הוקטור \vec{S} בנקודות שונות סביב הנגד. היזהרו להקפיד על כלל יד ימין!

שימו לב שניתן לחבר את הוקטורים לקווי שטף, בדומה לקווי שדה חשמלי. עשו זאת ובדקו לאן מוליכים הקווים? איזה מין שטף הוא זה?

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

מי, אם כן, לפי פוינטינג, מוביל את האנרגיה אל הנגד ?

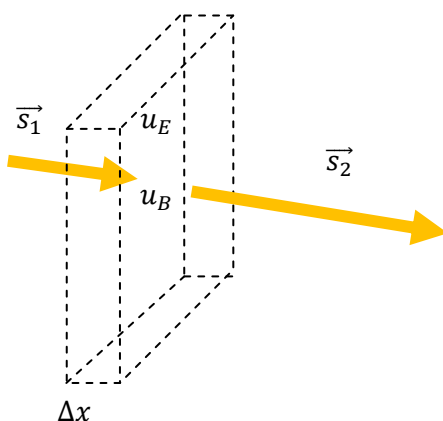
6.3 הרחבה והעמקה

בשנת 1864 פיתח ג'ון הנרי פוינטינג מתוך משוואות הא"מ של מקסוול את הנוסחה הבאה (לשם הפשטות, נבחן את הנוסחה בכיוון X בלבד ועל כן יופיעו בה רכיבי השדות B_z ו E_y , אבל חשוב לזכור כי מדובר בביטוי וקטורי):

$$\frac{\Delta \left(\frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B} \right)}{\Delta x} = - \frac{\Delta \left(\epsilon_0 |E_y|^2 + \frac{|B_z|^2}{\mu_0} \right)}{\Delta t}$$

1. הראו כי יחידות המידה בשני האגפים זהות.

הציור הבא מתאר את וקטור פוינטינג באזור קטנטן במרחב, בו קיימים שדות חשמלי ומגנטי. האזור מסומן בקו מקווקו.

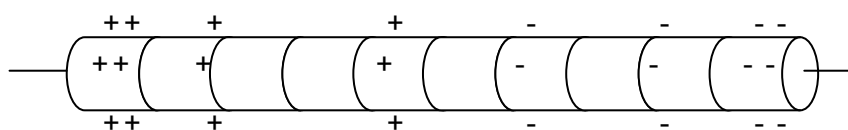


2. מה לפי נוסחת פוינטינג, קורה ל- u_B ו ל- u_E בתוך האזור המסומן ומדוע וקטור פוינטינג הנכנס לתוך האזור, קטן מזה הבוקע ממנו?

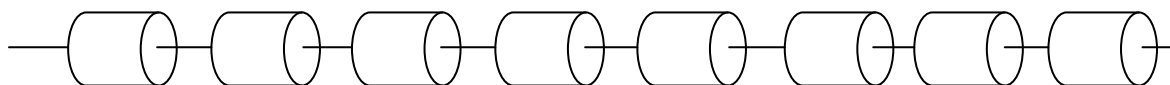
6.3.1 חישוב מקורב שממחיש ...

דרכם של פיזיקאים להניח הנחות יסוד, לקרב קירובים, לשחק ביחידות מידה ולערוך חישובים. הכל במטרה לתמוך במודלים שהגו. הבה ננהג מנהג של פיזיקאים.

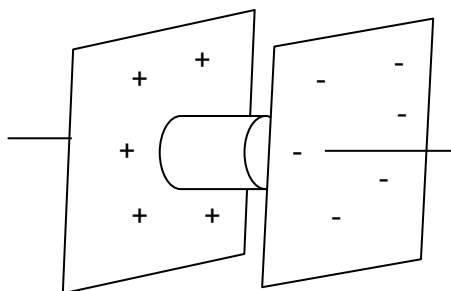
נניח כי יש בידינו נגד ארוך ואחיד להפליא. ואנו מחברים אותו במעגל ומזרימי דרכו זרם. על פי מה שלמדנו, לאורך מעטפת הנגד מתייצבת צפיפות מטען המשתנה במידה קבועה מצפיפות חיובית בצידו האחד לצפיפות שלילית בצידו האחר.



אלא שגם מערכת פשוטה שכזו מסובכת לטיפול תיאורטי. על כן, נחליף אותה במערכת מקורבת המתנהגת כמוה. במקום נגד ארוך ואחיד, נבחר שרשרת של נגדים קטנטנים המחוברים זה לזה במוליכים אידיאליים. צפיפות המטען לאורך המערכת משתנה ב"קפיצות" אבל אם נבחר נגדים קטנים מספיק, אפשר לומר שהשינוי בקירוב הדרגתי...



עתה נבחן את הנגד האמצעי מבין הנגדים. מצידו האחד צפיפות מטען חיובית ומצידו האחר שלילית. נרחיב את קצות המוליכים המחוברים משני הצדדים לנגד עד שידמו לשני לוחות של קבל. הנגד שלנו קטנטן ולכן ניתן יהיה להזניח את מטעני השפה לאורכו ולהניח כי המטען, רובו ככולו, נמצא על "לוחות הקבל" משני צדדיו.



נניח כי נתונים לנו מידות הנגד - קוטרו R ואורכו d .

נניח כי נתונה עצמת הזרם I הזורם בנגד והמתח בין שני קצותיו V

1. סמנו בתרשים הנגד האמצעי את קווי השדה החשמלי בקרבת הנגד. אל תשכחו לסמן את כיוון השדה.

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

בטאו בעזרת הנתונים, את עוצמת השדה החשמלי.

$$E =$$

2. סמנו בתרשים אחד מקווי השדה המגנטי הסמוכים לפני הנגד (אל תשכחו לסמן את כיוון השדה).

בטאו, בעזרת הנתונים, את עוצמת השדה המגנטי קרוב למעטפת הנגד.

$$B =$$

3. סמנו בתרשים את וקטור פוינטינג, בשתיים או שלוש נקודות הסמוכות לפני הנגד. הישמרו לדייק בכיוון...

בעזרת סעיפים 1 ו 2, רשמו ביטוי לעוצמתו של וקטור פוינטינג.

$$s = \left| \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \times \mathbf{B} \right| =$$

4. וקטור פוינטינג מבטא את שטף האנרגיה הפוגע ביחידת שטח, במשך שנייה.

מה נקבל אם נכפול אותו בשטח המעטפת של הנגד?

ערכו את החישוב. מהי התוצאה שקיבלתם? מהיכן היא מוכרת לכם?

מהי המסקנה מן החישוב המקורב שלכם?



סיכום : עידו

במבט לאחור, נוכל להגדיר את הכתוב בדפים אלה, כמסע אל תוך התפיסות הנאיביות שלנו והחוצה מהן...תחילתה של העבודה במאמרו של איאן ספטון שהתגלגל לדינו. ספטון הטריד את מנוחתנו כששאל, מספר שאלות פשוטות שמעולם לא נתנו דעתנו לשאל. בהמשך שילב יחדיו את המטען, השדות והאנרגיה לתמונה אחת קסומה, בה ארוגות יחד כל התשובות לשאלותיו. מאמרו דרבן אותנו לבחון כיצד אנחנו כמורים מתמודדים עם השאלות ותשובותיהן ואבן הבוחן למצבנו היה כמובן הידע שהנחלנו לתלמידינו.

השאלון שהעברנו בין תלמידינו כלל 10 שאלות פשוטות הנוגעות לתהליכי מעבר הזרם והמטען במעגל חשמלי פשוט. הוא היה גולמי, ארוך וטעון שיפורים בעריכה ובניסוח. על השאלון ענו תלמידי יב', במסלול של 5 יחידות, שסיימו את לימודי החשמל והמגנטיות ואף היו מעבר לבחינת הבגרות בחשמל. התשובות שקיבלנו מהתלמידים, אינן מהוות מדגם מייצג, או מידע תקף, המאפשר להסיק ממנו מסקנות רחבות. אבל הן בהחלט מפנות זרקור אל נקודה עיוורת במערך הידע המדעי שלנו. התחזק אצלנו הרושם כי התמונה שהצטיירה אצל התלמידים בנוגע לתופעות החשמליות המלוות את המעגל החשמלי, מעורפלת וחסרה. הם אינם בוחנים את המעגל במושגים של מטען ושדה אלא במושגים "מאקרוסקופיים" כמו זרם ושדה. ניתן לאתר אצל התלמידים את הנתק בין פרק האלקטרוסטטיקה ופרק מעגלי הזרם עליו דיברו CHABEY ו-SHERWOOD בספרם MATTER AND INTERACTIONS ושהיה נושא למחקרים בהוראת המדעים בשנות ה-90 של המאה (Eilon & Bagno, 1997).

התשובות הציגו תפישה שגויה בנוגע למנגנון העברת האנרגיה במעגל החשמלי ואין תמה. תשובות התלמידים רק שיקפו את בורותנו אנו. הן דרבנו אותנו לערוך מחדש את הידע שלנו במעגלי זרם ולשלב אותו עם מה שלמדנו במסגרת תכנית רוטשילד ויצמן, הן בתחום הפיזיקה והן בתחום הפדגוגיה.

בתחום הפיזיקה הרגשנו כי אנחנו חייבים להתחיל מסקירה של ידע בסיסי באלקטרומגנטיות אותו רכשנו במהלך הלימודים בתכנית. השתדלנו להשתמש בשפתנו אנו, מתוך הבנה שהניסוח המילולי יעזור בארגון מחדש של הידע שלנו. המשכנו בסדרה של חישובים שנועדה לערער מודלים שגויים להעברת אנרגיה במעגל. חישוב המהירות הממוצעת של הזרם החשמלי הוא חישוב "קלאסי" המופיע במקומות רבים בספרות כולל גם בספר הלימוד לבגרות פרקי חשמל ומגנטיות בהוצאת מכון ויצמן. החישוב מעמיד בסתירה את עובדת מעבר האנרגיה לנורה, במהירות האור עם הדעה הרווחת כי האלקטרונים מובילים את האנרגיה לנורה בתנועתם. כנגד זה, ניצלנו את הידע שרכשנו במהלך לימודינו, בקורס המבוא ל"חומר מעובה", כדי לחשב את מהירות העברת האנרגיה בין חלקיקים, זאת על מנת לשלול את האפשרות שהאלקטרונים מעבירים את האנרגיה מאחד לשני כתנודה בתווך.

שילת המודלים המיקרוסקופיים השגויים סללה את הדרך לתיאור הנכון יותר של שדה אלקטרומגנטי הנושא את האנרגיה. "מקורו" של השדה במטען הנע בתוך המוליכים במעגל ובצפיפות המטען המתאיבת על מעטפת המוליכים. ככל שהתקדמנו יותר בכתיבת העבודה, התבררה לנו יותר מעורבותם של מטעני השפה בתהליכים המתרחשים במעגל. הסתבר כי הם מכוונים את השדה החשמלי לאורך המוליך ואחראים לאחידות עוצמת הזרם בנקודות השונות

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

במעגל. כמו כן, הם המשרים את השדה החשמלי במרחב ובעצם, מנווטים את שטף האנרגיה הפוטנציאלית במרחב, במסלולים המובילים משני קוטבי הסוללה אל הנורה.

לאור חשיבותם של מטעני השפה ראינו לנכון להדגים את קיומם ולהעריך (אם כי הערכה גסה) את גודלם. בחרנו לשחזר ניסוי שערכו בעבר פרופ' אורי גניאל ומר צבי גלר. בניסוי הראנו כיצד נגד שזורם דרכו זרם משפיע ממרחק על כדור גרפיט התלוי על חוט. בנוסף, דגמנו, בעזרת קולון-מטר, את המטען לאורך הנגד והראינו כי צפיפות המטען משתנה לאורכו מחיובית לשלילית.

הצפנו, אם כן, את התפיסות הנאיביות שלנו. דנו בהם דיון פיזיקאי ופדגוגי. ערכנו חישוב תיאורטי ששלל אותן, הערכנו בחישוב מקורב סדרי גודל רלוואנטיים והצגנו בניסוי עדויות התומכות בתיאוריה.

כל שנותר לנו הוא להעביר ככל הניתן, את הידע שרחשנו לתלמידים ולכל דורש. בנינו פעילות המורכבת מ 5 דפי עבודה, שנועדה להנחות תלמידים במסלול אותו עברנו אנו. מן השאלות התמימות דרך העדות לקיום מטעני השפה ועד לתיאור הכולל של המתרחש במעגל – שדה ומטען ואנרגיה- ברגע סגירת המפסק. על מנת להימנע מפיתוחים מתמטיים מעל רמת תלמידי התיכון, העדפנו לבחון את המשוואה של פוינטינג על פי יחידות המידה בלבד. לעניות דעתנו, תלמיד פיזיקה ברמה של 5 יחידות, בסיום לימודיו, מכיר את המושגים הנדרשים – שדה מגנטי, שדה חשמלי, ומכפלה וקטורית כמו גם את יחידות המידה המתאימות ומסוגל, עקרונית, לעמוד בחמש המשימות שכתבנו.

לצערנו, לא הספקנו עדיין, לנסות את הפעילות על תלמידי בפועל. סביר להניח כי לאחר התנסות כזו, נחכים לראות האם דרגת הקושי וההיקף מתאימים או לא ונוכל לערוך שינויים בהתאם. ברם, אין ספק כי בכתיבת הפעילות השלמנו את מסלולו המעגלי של מסענו, אל תוך התפיסות הנאיביות שלנו ובחזרה.

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

סיכום : סורין

ביום שבו נתבקשנו לבחור נושא לעבודת הגמר שלנו, החלטנו כי העבודה תעסוק בנושא חשמל. אני חושב שהסיבה העיקרית לכך הייתה מן הטעם, שאני מלמד רק בכתות יב' ורצינו כי העבודה תיגע בנושא שאנחנו מלמדים.

בשנה שבה עבודת הגמר הייתה צריכה להיכתב למדנו שני קורסים, שלדעתנו נגעו לנושא שלנו- חשמל. קורס אחד היה מבוא למצב מוצק והקורס השני אלקטרומגנטיות. בקורס במצב מוצק נחשפנו למודל הפסים, שמתאר מוליכים. כמו כן, נחשפנו לפונקציית בלוך וחישובי מהירות התקדמות גל. בקורס אלקטרומגנטיות, חזרנו על משוואות מקסוול ודנו בהבדלים שבין חומר לריק ובהבדל שבין מבודד למוליך. ברקע הדהדה שאלה של אחד המרצים בנוגע לזרם קבוע. כיצד יתכן הדבר, שכן בתוך המוליך מושרה שדה קולוני ואלקטרוני ההולכה אמורים להימצא בתאוצה. לא מן הנמנע כי בהשפעת הקורסים בחרנו לדון במודלים של הולכת זרם חשמלי.

בשיחה ראשונה עם המנחים פרופ' יובל אורג והדוקטורנט מר יונתן מוסט, דיברנו על הרעיון שלנו לעבודה המנחה המליץ לנו על ספר קריאה, שוחחנו גם על הרעיון להציג את מודל הפסים והעלנו כמדומני, שאלות בנושא הולכת זרם במעגל פשוט.

קראנו על מודל דרודה, ניסינו להבין את הנחותיו ומה המשמעות שלהן ובדרך החלו לצוץ שאלות כמו מיידיות הדלקות הנורה ברגע סגירת המפסק. כיצד זה יתכן לאור חישוב מהירות הסחיפה הנמוכה על פי דרודה? שאלה בסיסית אחרת נגעה במודל להעברת האנרגיה. מי מעביר את האנרגיה החשמלית ובאיזה אופן? בשיחה משותפת בינינו התעוררו שאלות נוספות כמו, כיצד יודע האלקטרון לעבור בפיתולי המוליך? מהו מקורו של השדה החשמלי שמתווה את מסלול האלקטרון? עלו גם שאלות הקשורות למשוואת הרציפות. מדוע הזרם קבוע במעגל?

גילינו כי משהו בסיסי חסר בתמונה שציינו בעיני רוחנו. מסתבר כי המודל שאימצנו לעצמנו הוא "מודל הרכבת", האלקטרוני נעים במוליך בזה אחר זה כקרונוט רכבת ונושאים את האנרגיה מן הסוללה לנורה. חיפשנו מאמרים שנגעו לשאלות שהעלנו וגילינו כי התאור המלא של המתרחש במעגל שונה באופן מהותי ממה שדימינו. בשלב זה שמנו לב לנתק הקיים בין פרק האלקטרוסטטיקה אותו אנו מלמדים לבין הפרק במעגלי זרם. למרות העובדה שמדובר בשתי תופעות מעולם החשמל אנו משתמשים בכל פרק במושגים שונים. בפרק מעגלי זרם אנו עוברים למושגים של זרם והפרש פוטנציאלים, אין אנו משתמשים או קושרים למושגים שדה חשמלי או כוחות חשמליים הפועלים על המטענים. התעורר בנו החשש, לבושתנו, שהעובדה שאנו לא מקשרים בין הפרקים מוביל לתמונה שגויה אצל התלמיד בנוגע להעברת הזרם והולכת האנרגיה במעגל חשמלי.

בשלב זה כבר היה לנו ברור כי העבודה לא תעסוק במודל הפסים או בכל מודל הקשור למבנה המוליך. הבנו כי העבודה תתמקד בפער בין האלקטרוסטטיקה לאלקטרודינמיקה. החלטנו לדון מודל העברת האנרגיה ובתפקידם של האלקטרוני במודל זה. במהלך קריאת מאמרים ובשיחה עם אחראי עבודות הגמר דר' אמנון חזן הבנו כי התוצר שלנו יכלול פרק פדגוגי, שבו ננסה לגשר על הפערים בין האלקטרוסטטיקה ומעגלי הזרם הפשוט. במהלך החיפושים אחר פעילויות

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

לתלמידים נתקלנו במאמרו של ספטון, מאמר זה אני חושב הכה בשנינו כרעם ביום בהיר. ספטון יוצא מתוך שלילה של רעיונות אל המודל הנכון. לראשונה נחשפנו דרכו למושג מטעני שפה.

חזרנו למנחים שלנו הצגנו את נושא מטעני השפה ואת וקטור פוינטינג, משוואת הרציפות של האנרגיה. בדיון משותף עם המנחים בנינו אט אט את ההבנה שלנו לגבי חשיבותם של מטעני השפה. הבנו כי האנרגיה נישאת בשדה האלקטרו מגנטי שבמרחב.

בפגישת יעוץ עם צוות הוראת המדעים פרופ' בת שבע איילון, דר' אסתר בגנו ודר' חנה ברגר, קיבלנו הפניה למאמרים העוסקים בניתוח דיאגנוסטי של תפיסות מוטעות או נאיביות בנוגע למעגלי זרם חשמלי, כמו גם למאמרים המטפלים בקשר שבין אלקטרוסטטיקה לאלקטרודינמיקה. בנוסף, הציעו לנו לפנות לפרופ' אורי גניאל שבזמנו ערך ניסוי יחד עם מר צבי גלר להדגמת קיומם של מטעני שפה. עלה בדעתנו לשחזר את הניסוי, להסריט אותו ולהעלותו לאיטרנט לשימוש כלל המורים. החלטנו כי יהיה זה יעיל ליצור פעילות לתלמידים מבוססת על הסרטון, על מנת לעזור להם לקבל את התמונה הנכונה למודל העברת הזרם ולחשיבותם של מטעני השפה.

בשלב זה העבודה כבר קיבלה את גבולות המסגרת שלה וידענו כי היא תכלול רקע מדעי והצגת מודלים להולכת זרם ופרק נוסף שיכלול פעילות מגשרת בין אלקטרוסטטיקה לאלקטרודינמיקה לתלמידים. היה מעניין מאוד עבורי לקרוא את המאמרים ולגלות עד כמה נצמדתי יתר על המידה לכתוב בספר הלימוד. לבושותי לא התעוררו אצלי השאלות המרכזיות בהן דנו בעבודה זו, ולצדדי גם לא אצל תלמידי.

עבודה זו תרמה לי קודם כל כמורה. היום אני יודע שיש לנקוט משנה זהירות לחקור ולדרוש את האמת המדעית כפי שספטון מתאר זאת. הפשטות יש לה מקום, אך עד גבול מסוים, היא לא יכולה להחליף אמת מדעית. נכון, התלמידים הצליחו בבגרות גם ללא ידיעת המודלים השונים, אבל השאלה היותר חשובה לדעתי היא, מהם הערכים שספגו בשיעורי הפיזיקה? חתירה אחר האמת, יושרה, חשיבה ביקורתית. עבודה זו הצמיחה אותי מקצועית וגם תלמידי לעתיד יצאו נזכרים מכך. התהליך שחווינו בעבודה ניתן לתיאור כהתפתחות ספירלית, מהלא מדויק אל הנכון מדעית, מתוך דיון וקריאה של מאמרים. זהו דגם שאפשר לאמץ גם בהוראה.

נסכם כך, מודל העברת האנרגיה במעגל זרם והתהליכים המתרחשים במעגל מרגע סגירת המפסק ועד להתייצבות, כל אלה אינם פשוטים כלל ועיקר. למרות זאת הם ההסבר הנכון המספק תשובות לכל השאלות שהעלנו בעבודה. ניסינו ליצור כאן רצף הגיוני של פרקים שימחישו כיצד בסופו של דבר התקבל מודל מטעני השפה ווקטור פוינטינג כמודל הנכון.

אני רואה בעבודה זו תהליך של צמיחה הן במישור המדעי והן במישור הפדגוגי. ובנוסף חוויה של עבודה בצוות שלימדה אותי על התועלת שבשיתוף פעולה עם עמיתים. שיתוף הפעולה עם חבר ללימודים לימד אותי כי אין כל אפשרות לעסוק לא במדע ולא בפדגוגיה ללא שיתוף עמיתים. אמנם לקח הרבה זמן עד שהגענו להחלטה מהן גבולות העבודה ואחר כך כיצד יראה התוצר הסופי אבל אני חושב ששיתוף הפעולה בינינו היה מוצלח ולראייה התוצר המובא כאן לפניכם.

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

קובץ זה נועד אך ורק לשימוש האישי של מורים למתמטיקה, פיזיקה, כימיה וביולוגיה ולהוראה בכיתותיהם. אין לעשות שימוש כלשהו בקובץ זה לכל מטרה אחרת, ובכלל זה: שימוש מסחרי, פרסום באתר אחר (למעט אתר בית הספר בו מלמד המורה), העמדה לרשות הציבור או הפצה בדרך אחרת כלשהי של קובץ זה או חלק ממנו.

ביבליוגרפיה**ספרים**

- 1) Ashcroft & Mermin /Solid state physics
- 2) William Taussing Scott / The physics of Electricity and Magnetism
- 3) Sherwood & Chabay / Matter & Interactions

מאמרים

- 1) Ian M.Sefton / Understanding electricity and circuits: What the text books don't tell you , science Teachers workshop 2002
- 2) Bruce A.Sherwood & Rute W.Chabay / A unified treatment of electrostatics and circuits
- 3) Herman Hartel / Voltage- a Basic term in electricity
- 4) Herman Hartel / Constant electric current and the distribution of surface charges , Institute for Research on Learning, Report No. IRL87-000; 1987
- 5) W.G.V.Rosser / Magnitudes of surface charge distributions associated with electric current flow, American journal of physics vol. 38 no.2 Feb 1970
- 6) W.G.V.Rosser / What makes an electric current "flow", American journal of physics vol. 31 no.11 Nov 1963
- 7) Igal Galili & Elisabetta Goihbarg / Energy transfer in electric circuits: A qualitative account , Am. J. Physics 73 (2) Feb 2005
- 8) Esther Bagno and Bat-Sheva Eylon / Am. J. Phys. 65 (8) August 1997
- 9) R.Cohen , B.Eylon and U.Ganiel / Am. J. Physics 51 (5) May 1983
- 10) Edward B. Rosa / the self and mutual inductances of linear conductors
- 11) חנה ברגר, דגנית סרוקר / מאלקטרוסטטיקה לזרמים, תהודה כרך 19, חוברת מס' 2