

הוראות לדף הנוסחאות



הוראות הדפסה:

את הדף יש להדפיס עם שוליים מותאמים
אישית ברוחב 0.5 בכל צד.

ב WORD, יש לבחור בלשונית הדפסה את
חלון השוליים, לבחור שוליים מותאמים אישית
ולשנות ל 0.5 בכל הכיוונים

עריכה:

בדף הכנסנו כמה שיותר הסברים, נוסחאות ותמונות. אם מספר העמודים חורג ממספר
העמודים המותר בבחינה ניתן לערוך את קובץ ה WORD ולהוריד הסברים מורחבים,
תמונות או נוסחאות טריוויאליות. ניתן גם כמובן להוסיף הסברים שלכם או נוסחאות.
בכל מקרה מומלץ מאוד לעבור על הדף לפני המבחן!! הוא גם סיכום של החומר.
אין להוריד את הסמל של GOOL או כל סימן מסחרי אחר!!

מבנה הדף:



הדף בנוי משלושה טורים.
ההתחלה היא בפינה הימנית העליונה.
בסוף הטור הראשון עוברים לטור השני באותו
עמוד (ולא לעמוד הבא). בסוף הטור האחרון
עוברים לטור הראשון (הימני) בעמוד הבא.
ניתן לשנות את כיוון הפריסה לרוחב, זה יוצר
מראה יותר מרווח על חשבון מספר עמודים.

כל הזכויות שמורות למני גבאי ולאטר GOOL

הדף מיועד לכל שימוש שאינו מסחרי ובפרט לשימוש מרצים, מורים, סטודנטים ותלמידים
בקורסים שונים, ניתן לערוך את הדף אך יש להשאיר סימונים של אתר גול.

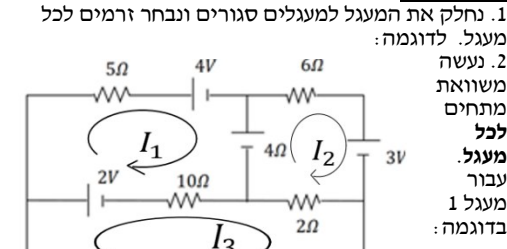
במקביל: $\frac{1}{R_T} = \sum \frac{1}{R_i}$, $I_T = \sum I_i$, $V_T = V_i$
 מד זרם (אמפרמטר) אידיאלי - מחובר בטור ובעל התנגדות זניחה.
 מד מתח (וולטמטר) אידיאלי - מחובר במקביל לרכיב הנמדד, בעל התנגדות מאוד גבוהה.
 החספס בנגד: $P = IV = I^2 R = \frac{V^2}{R}$
 $P = IV$ נכון לכל רכיב חשמלי, שני השוויונים האחרים הם לאחר שימוש בחוק אוהם ונכונים רק בנגד.
 נתק - מצב בו לא עובר זרם - חוט חתוך או התנגדות אינסופית.
 קצר - מצב בו אין התנגדות
 מקור מתח לא אידיאלי: $V = \mathcal{E} - Ir$
 V - מתח הדקים, המתח בין קצוות הסוללה או המתח שמרגיש המעגל - תלוי בזרם.
 $\mathcal{E}$ - כח"מ הסוללה, מתח פנימי שאינו משתנה.
 r - ההתנגדות הפנימית.
 חוקי קירכהוף (לפתרון מעגלים מורכבים):
 נגדיר זרם לכל חוט במעגל.
 - נרשום משוואות מתחים, סכום המתחים במסלול סגור שווה לאפס. (להוסיף משוואות עד שעוברים על כל הרכיבים במעגל).
 - נרשום משוואות זרמים, בכל צומת סך הזרם שנכנס שווה לסך הזרם שיוצא.
 - נפתור את מערכת המשוואות.

שיטת קרמר (לפתרון מערכת משוואות):
 $I_i = \frac{\Delta_i}{\Delta}$
 Δ - דטרמיננטה של מערכת המשוואות ההומוגנית (ללא הפרעות). לדוגמה, עבור מערכת המשוואות הבאה:

$$\begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix} \Delta = \begin{vmatrix} 3 & 4 & 8 \\ 2 & -5 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

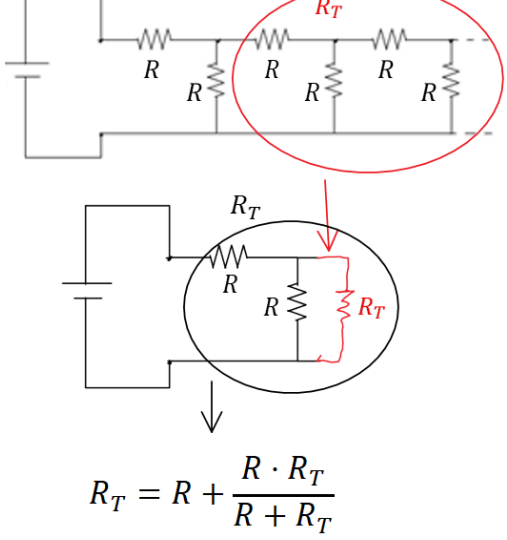
 Δ_1 - דטרמיננטה של מערכת המשוואות שהוחלפה בה העמודה ה-1 בעמודות התשובות. לדוגמה, במערכת הנ"ל:

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 3 & 5 & 8 \\ 2 & 1 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$



זרמי חוגים:
 1. נחלק את המעגל למעגלים סגורים ונבחר זרמים לכל מעגל. לדוגמה:
 2. נעשה משוואות מתחים לכל מעגל.
 3. נפתור את מערכת המשוואות מעגלים אינסופיים:
 נניח שההתנגדות השקולה של המעגל שווה להתנגדות השקולה של המעגל ללא החוליה הראשונה.
 נחליף את החוליות 2 עד אינסוף במעגל R_T
 נחשב את ההתנגדות של המעגל הסופי שהתקבל ונשווה אותה לאותו R_T

$$5I_1 + 4 + 4 + 10(I_1 - I_2) - 2 = 0$$



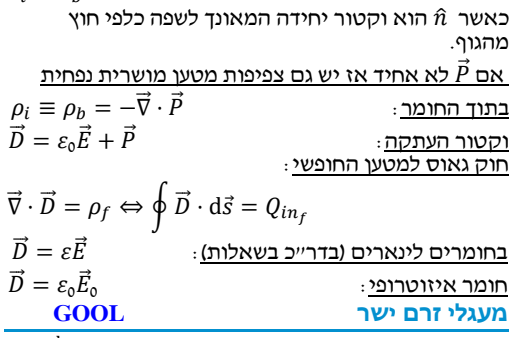
חומרים דיאלקטרים
 $C = \frac{|q|}{|V|}$ הגדרת הקיבול:
 חומר דיאלקטרי הוא חומר המאגורג שדה חשמלי. כח"מ $\Delta E_{\perp}$ הוא הקפיצה בשדה המאגורג למשטח. כח"מ $\Delta E_{\perp}$ הוא הקפיצה בשדה המאגורג למשטח.

למצא צפיפות משטחית:
 כח"מ $\Delta E_{\perp}$ הוא הקפיצה בשדה המאגורג למשטח. כח"מ $\Delta E_{\perp}$ הוא הקפיצה בשדה המאגורג למשטח.
 מטען נקודתי: אם יש שדה מהצורה $\vec{E} = \frac{\alpha}{r^2} \hat{r}$ (בקורדינטות כדוריות) באזור הכולל את הראשית אז יש מטען נקודתי כך ש $q = \frac{\alpha}{k}$.
 צפיפות מטען אורכית: אם יש שדה מהצורה $\vec{E} = \frac{\alpha}{r} \hat{r}$ (בקורדינטות גליליות) באזור הכולל את הראשית אז יש צפיפות מטען אורכית כך ש $\lambda = 2\pi\epsilon_0\alpha$.
 אם נתון הפוטנציאל אז קודם נמצא את השדה באמצעות $\vec{E} = -\vec{\nabla}\phi$ (הנוסחאות של הגרדיאנט בפרק וקטורים)
 אנרגיה הדרושה לבניית מערכת
 GOOL

הסכום הוא על כל המטענים כפול הפוטנציאל שהם נמצאים בו.
 בנוסחה עם האינטגרל על השדה אפשר להשתמש רק אם אין מטענים נקודתיים או התפלגות קווית
 $\mu_E = \frac{\epsilon_0}{2} E^2$ נקראת צפיפות האנרגיה החשמלית
 חומרים דיאלקטרים
 חומר דיאלקטרי הוא חומר שמכיל דיפולים. במצב רגיל כל דיפול לכיוון שונה והשדה הממוצע בחומר הוא אפס. כשמכנסים את החומר לשדה חצוני הדיפולים מתיישרים ויוצרים שדה מוגד לשדה החיצוני.
 השדה בתוך חומר דיאלקטרי לנארי ואיזוטרופי:
 $\vec{E} = \frac{\vec{E}_{free}}{\epsilon_r}$
 $\vec{E}_{free}$ הוא השדה שנוצר ממטענים חופשיים/מחוץ לחומר.
 $\vec{E}$ הוא השדה הכולל בתוך החומר (מהמטענים החופשיים והדיפולים של החומר).
 ϵ_r או k - מקדם דיאלקטרי של החומר - תכונה של החומר בדרכ"ק קבוע וידוע. $\epsilon_r > 1$ ו- $\epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon$
 σ_{free} - צפיפות המטען שיוצרת את השדה החיצוני:
 $\sigma_{free} = \epsilon_0 \Delta E_{free\perp}$
 $\sigma_T = \epsilon_0 \Delta E_{\perp}$ - צפיפות המטען הכוללת:
 $\sigma_i = \sigma_T - \sigma_{free}$ - צפיפות מטען מושרית/קשורה: צפיפות מטען שנוצרת על שפת החומר הדיאלקטרי מהקיטוב של הדיפולים.
 $\sigma_i = \sigma_T - \sigma_{free}$
 $\vec{P} = N \vec{p}_1$ - וקטור הפולריזציה. צפיפות הדיפולים ליחידת נפח:
 $\vec{P} = N \vec{p}_1$ - מומנט הדיפול של דיפול יחיד בחומר.
 N - מספר הדיפולים ביחידת נפח. יחידות של $\frac{1}{m^3}$.
 $\vec{p} = \int \vec{P} dV$ - מומנט הדיפול הכולל בחומר:
 הקשר בין $\vec{P}$ לצפיפות המושרית על השפה:
 $\sigma_i \equiv \sigma_b = \vec{P} \cdot \hat{n}$
 כאשר $\hat{n}$ הוא וקטור יחידה המאונך לשפה כלפי חוץ מהחומר.

אם $\vec{P}$ לא אחיד אז יש גם צפיפות מטען מושרית נפחית
 $\rho_i \equiv \rho_b = -\vec{\nabla} \cdot \vec{P}$ בתוך החומר:
 וקטור העתקה:
 $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$ חוק גאוס למטען החופשי:
 $\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_f \Leftrightarrow \oint \vec{D} \cdot d\vec{s} = Q_{in_f}$
 בחומרים לינארים (בדרכ"ק בשאלות):
 $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}$ חומר איזוטרופי:
 מעגלי זרם ישר
 GOOL

זרם:
 $I = \frac{dq}{dt}$ כמות המטען שעוברת (דרך שטח חתך) ביחידת זמן.
 חוק אוהם - הקשר בין המתח לזרם בנגד: $V = IR$
 חיבור נגדים בטור - נגדים עם זרם זהה: $R_T = R_1 + R_2$
 כאשר R_T התנגדות הנגד השקול.
 $V_T = V_1 + V_2$
 $I_T = I_1 = I_2$
 כאשר I_T ו- V_T הם המתח והזרם בנגד השקול.
 חיבור נגדים במקביל - נגדים עם מתח זהה:
 $\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$
 $I_T = I_1 + I_2$
 $V_T = V_1 = V_2$



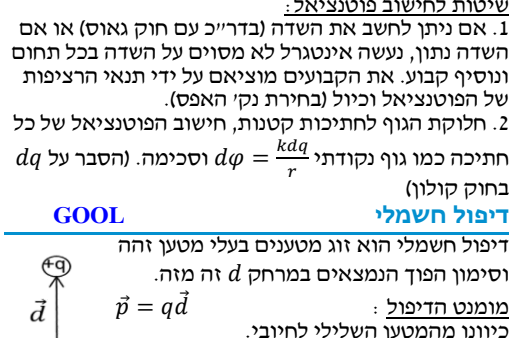
עבור יותר משני נגדים הנוסחאות ממשיכות באופן דומה:
 בטור: $R_T = \sum R_i$, $V_T = \sum V_i$, $I_T = I_i$
 במקביל: $\frac{1}{R_T} = \sum \frac{1}{R_i}$, $V_T = V_i$, $I_T = \sum I_i$
 חוק קירכהוף:
 חוק קירכהוף (לפתרון מערכת משוואות):
 נגדיר זרם לכל חוט במעגל.
 - נרשום משוואות מתחים, סכום המתחים במסלול סגור שווה לאפס. (להוסיף משוואות עד שעוברים על כל הרכיבים במעגל).
 - נרשום משוואות זרמים, בכל צומת סך הזרם שנכנס שווה לסך הזרם שיוצא.
 - נפתור את מערכת המשוואות.

קבועים
 מסות הפרוטון, ניוטרון ואלקטרון:
 $m_n \approx m_p = 1.67 \cdot 10^{-27} kg$; $m_e = 9.1 \cdot 10^{-31} kg$
 מטען הפרוטון והאלקטרון:
 $q_p = 1.6 \cdot 10^{-19} C = e = -q_e$
 מקדם דיאלקטרי של הריק $k=1$:
 $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$; $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{N \cdot m^2}$
 חוק קולון
 GOOL

חוק קולון: הכוח החשמלי שמפעיל מטען q_1 כלשהו על מטען q_2 כלשהו:
 $\vec{F} = \frac{k q_1 q_2}{r^2} \hat{r} = \frac{k q_1 q_2}{r^3} \vec{r}$
 $\hat{r}$ - וקטור מ- q_1 אל q_2 , $|\vec{r}| = r$
 השדה החשמלי שיוצר מטען q במרחק:
 $\vec{E} = \frac{kq}{r^2} \hat{r} = \frac{kq}{r^3} \vec{r}$
 $\vec{r}$ - וקטור מהמטען q אל הנקודה בה מחשבים את השדה. שימו לב שבנוסחה הזו המטען הוא זה שיוצר את השדה.
 הכוח הפועל על מטען q הנמצא בשדה חשמלי $\vec{E}$:
 $\vec{F} = q \vec{E}$
 שימו לב שבנוסחה הזו המטען q הוא המטען שמרגיש את הכוח (המטען בעצמו גם יוצר שדה אבל זה לא רלוונטי לנוסחה הזו והמטען לא מרגיש את השדה שהוא יוצר) חישבו שדה או כוח שיוצרת התפלגות מטען רציפה: נחלק את הגוף לחתיכות קטנות, נחשב את השדה שיוצרת כל חתיכה בנקודה ונסכום על כל החתיכות. שימו לב שלסכום על כל רכיב (x, y, z) בנפרד. אלמנט המטען של חתיכה קטנה הוא:
 $dq = \lambda dl = \sigma dS = \rho dV$
 כאשר dl ו- dv הם אלמנט אורך, שטח ונפח בהתאמה. הביטוי של האלמנטים מופיע במבוא מתמטי תחת הקורדינטות המתאימות.

פוטנציאל
 GOOL
 הגדרת הפוטנציאל: $\vec{E} = -\vec{\nabla}\phi$ או $\phi = -\int \vec{E} \cdot d\vec{r}$
 אנרגיה פוטנציאלית חשמלית:
 $U = q\phi$ מתח:
 $V = \Delta\phi$ העבודה של הכוח החשמלי:
 $W = -\Delta U = -q\Delta\phi$ עבודה להזיז מטען נגד הכוח החשמלי:
 $W = q\Delta\phi$ פוטנציאל של מטען נקודתי:
 $\phi = \frac{kq}{r}$ מוליכים:
 המטענים בתוך מוליך חופשיים לזוו.
 - במצב סטטי (ללא זרם או תנועת מטען) השדה (או הכוח) בתוך המוליך מתאפס.
 - על השפה יכול להיות שדה מאונך לשפה.
 - במצב סטטי, המטען הכולל בכל נקודה בתוך המוליך הוא אפס למעט על השפה.
 - הפוטנציאל במוליך אחיד (קבוע).
 הארקה - חיבור לקרקע, מאפסת את הפוטנציאל.
 שיטות לחישוב פוטנציאל:
 1. אם ניתן לחשב את השדה (בדרכ"ק עם חוק גאוס) או אם השדה נתון, נעשה אינטגרל לא מסוים על השדה בכל תחום ונוסיף קבוע. את הקבועים מוציאים על ידי תנאי הרציפות של הפוטנציאל וכו' (בחירת נק' האפס).
 2. חלוקת הגוף לחתיכות קטנות, חישוב הפוטנציאל של כל חתיכה כמו גוף נקודתי $d\phi = \frac{k dq}{r}$ וסכימה. (הסבר על dq בחוק קולון)

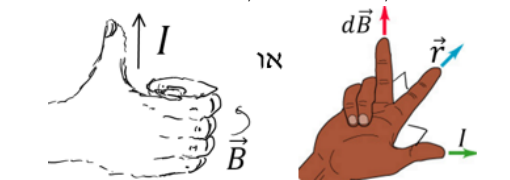
דיפול חשמלי
 GOOL
 דיפול חשמלי הוא זוג מטענים בעלי מטען זהה וסימון הפוך הנמצאים במרחק d זה מזה.
 מומנט הדיפול:
 $\vec{p} = q\vec{d}$ כיוונו מהמטען השלילי לחיובי.
 הפוטנציאל שיוצר דיפול במרחק גדול $d \ll r$:
 $\phi = \frac{k(\vec{p} \cdot \vec{r})}{r^3} = \frac{k(\vec{p} \cdot \hat{r})}{r^2}$
 השדה של דיפול במרחק גדול:
 $\vec{E} = \frac{k[3(\vec{p} \cdot \hat{r})\hat{r} - \vec{p}]}{r^3}$ מומנט דיפול של מערכת מטענים:
 $p_x = \sum x_i q_i = \int x dq$ מומנט כוח הפועל על דיפול הנמצא בשדה חשמלי חיצוני:
 $\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E}$ אנרגיה פוטנציאלית של דיפול בשדה חיצוני:
 $U = -\vec{p} \cdot \vec{E}$ כוח הפועל על דיפול הנמצא בשדה חיצוני:
 $\vec{F} = (\vec{p} \cdot \vec{\nabla}) \cdot \vec{E} = -\vec{\nabla} U$ השוויון האחרון נכון רק אם השדה משמר (שדה שנוצר ממטענים) ומומנט הדיפול אחיד (לא תלוי בקואורדינטות).
 מציאת התפלגות מטען
 GOOL
 למצא צפיפות נפחית נעשה:
 $\rho = \epsilon_0 \vec{\nabla} \cdot \vec{E}$



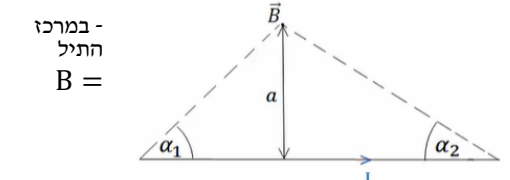
חוק קירכהוף:
 חוק קירכהוף (לפתרון מערכת משוואות):
 נגדיר זרם לכל חוט במעגל.
 - נרשום משוואות מתחים, סכום המתחים במסלול סגור שווה לאפס. (להוסיף משוואות עד שעוברים על כל הרכיבים במעגל).
 - נרשום משוואות זרמים, בכל צומת סך הזרם שנכנס שווה לסך הזרם שיוצא.
 - נפתור את מערכת המשוואות.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}}{r^2}$$

$\vec{r}$ הוא הוקטור מהחתיכה לנקודה בה מחפשים את השדה.
 $d\vec{l}$ הוא אורך החתיכה וכיוונו בכיוון הזרם.
 חישוב הכיוון לפי כלל יד ימין:



השדה של תיל סופי: $B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2)$



שדה של טבעת לאורך ציר הסימטריה: $B = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{R^2}{(R^2 + z^2)^{3/2}}$



חוק אמפר

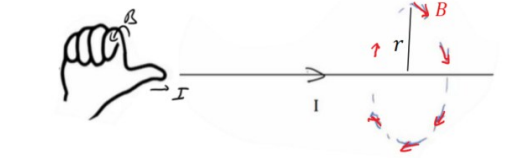
חוק אמפר: $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{in}$; $I_{in} = \int \vec{J} \cdot d\vec{s}$

כאשר האינטגרל הוא על הרכיב המשיך של B לאורך מסלול סגור. בדרכי נבחר מקרים בהם B אחיד לאורך המסלול והאינטגרל יהיה B כפול אורך המסלול. הזרם הוא סך הזרם שעובר דרך השטח הסגור במסלול. המקרים הנפוצים של חוק אמפר:

1. תיל / גליל / מעטפת גלילית אינסופיים.
2. מישור אינסופי.
3. סליל אינסופי / טורואיד.

שדה של תיל אינסופי: $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$

כאשר r הוא המרחק מהתיל.



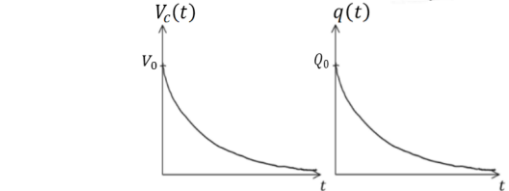
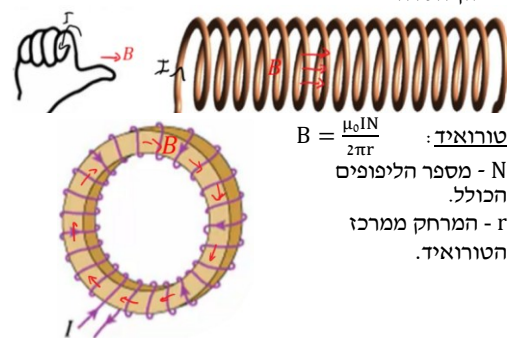
כאשר הזרם בכיוון $\hat{z}$ השדה בכיוון $\hat{\phi}$

שדה של מישור אינסופי: $\vec{B} = \frac{\mu_0 \sigma v}{2} \begin{cases} -\hat{y}, & z > 0 \\ \hat{y}, & z < 0 \end{cases}$

עבור מישור דק הטעון בצפיפות משטחית σ ונע בכיוון $\hat{x}$ במהירות v.

שדה של סליל אינסופי/סולנואיד: $B = \mu_0 n I$

כאשר n הוא מספר הליפופים ליחידת אורך של הסליל. כיוון: לפי כלל הבורג, האצבעות בכיוון הזרם והאגודל בכיוון השדה.



הזרם כתלות בזמן בפריקה זהה לטעינה: $I(t) = \frac{V_0}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$

מבנה הנגד וצפיפות זרם

התלות של ההתנגדות במבנה הנגד: $R = \rho \frac{L}{S}$

ρ - ההתנגדות סגולית, תלויה בחומר (לא להתבלבל עם צפיפות מטען נפחית).
 L - אורך הנגד, הדרך שהמטענים עושים בנגד.
 S (או A) - שטח החתך, משטח שמאונך לכיוון הזרם. הערה: **שטח החתך וההתנגדות הסגולית צריכים להיות אחידים לאורך הנגד.** במידה והם לא אחידים צריך לחלק את הנגד לחתיכות, לחשב ההתנגדות של כל חתיכה ולסכום לפי סוג החיבור (במקביל/בטור)

מוליכות (לא לבלבל עם צפיפות מטען משטחית): $\sigma = \frac{1}{\rho}$

צפיפות הזרם ליחידת שטח: $I = \int \vec{J} \cdot d\vec{s}$

כאשר האינטגרל הוא על שטח החתך, שטח שמאונך ל- $\vec{J}$.

אם $\vec{J}$ אחידה אז: $I = JS$

חוק אוהם הדיפרנציאלי: $\vec{J} = \sigma \vec{E}$

כאשר σ היא המוליכות ו- E השדה החשמלי.

חישוב צפיפות זרם עבור צפיפות מטען נפחית בתנועה:

$\vec{J} = \rho \vec{v}$

כאשר ρ היא צפיפות נושאי המטען ליחידת נפח ו- $\vec{v}$ היא מהירות נושאי המטען. במוליך, $\rho = nq$ כאשר n הוא מספר נושאי המטען ליח נפח ו-q הוא המטען של נושא מטען יחיד, בד"כ אלקטרון. מהירות המטענים נקראת מהירות הסחיפה $\vec{v}_{drift}$.

צפיפות הזרם ליחידת אורך: $I = \int \vec{k} \cdot d\vec{l}$

כאשר האינטגרל הוא על אורך שמאונך ל- $\vec{k}$

אם $\vec{k}$ אחידה אז: $I = kL$

חישוב צפיפות זרם עבור צפיפות מטען משטחית בתנועה: $\vec{k} = \sigma \vec{v}$

עבור צפיפות מטען ליחידת אורך λ בתנועה נקבל: $I = \lambda v$

הכוח המגנטי - חוק לורנץ

חוק לורנץ - הכוח המגנטי: $\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$

ניתן לחשב את הכוח בשתי דרכים.
 דרך 1: דטרמיננטה (ראו מכפלה וקטורית בוקטורים).
 דרך 2: גודל וכיוון בנפרד, הגודל הוא: $F_B = qvB \sin \alpha$
 כאשר α היא הזווית בין המהירות לשדה. וכיוון לפי כלל יד ימין:

שימו לב שאתם עם יד ימין!
 כיוון הכוח הוא עבור מטען חיובי (עבור מטען שלילי הכוח בכיוון הפוך).
 לא להפוך את הסדר של האצבע והאמה (עדיף לעשות קודם אקדח).

תנועה בשדה אחיד: מטען q בעל מסה m הנע במהירות v בשדה מגנטי אחיד (המאונך למהירות) עושה תנועה מעגלית, רדיוס המעגל הוא:

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

אם v לא מאונך למהירות אז התנועה תהיה בורגית כאשר המעגל יהיה מסביב לשדה, רדיוס המעגל יהיה:

$R = \frac{mv \sin \alpha}{qB}$

$v \cos \alpha$ היא מהירות ההתקדמות לאורך ציר השדה. עבודת הכוח המגנטי: תמיד מתאפסת (כי הוא מאונך לתנועה).

הכוח המגנטי על תיל נושא זרם

הכוח הפועל על חתיכת תיל קטנה באורך dl עם זרם I הנמצאת בשדה מגנטי B הוא: $d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B}$

אם התיל ישר בשדה אחיד אז גודל הכוח הוא:

$F = BIL \sin \alpha$

את כיוון הכוח יש למצא לפי כלל יד ימין כמו בחוק לורנץ על מטען בודד כאשר כיוון הזרם (או כיוון ה-dl) מחליף את המהירות.

הכוח על לולאה סגורה בשדה אחיד מתאפס.
 הכוח על תיל בשדה אחיד אינו תלוי בצורת התיל, הכוח יהיה זהה לכוח הפועל על תיל ישר המתחיל ומסתיים באותם נקודות.

חוק ביו-סבר

חוק ביו-סבר, השדה המגנטי שיוצרת חתיכת זרם:

הקיבול היא תכונה קבועה ותלויה רק במבנה הגיאומטרי של הגוף (ולא במתח או במטען על הרכיב).

קיבול של קבל לוחות: $C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$

A - שטח כל לוח. d - מרחק בין הלוחות, $d \ll \sqrt{A}$.

שדה בתוך קבל לוחות: $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{V}{d}$

σ - צפיפות המטען ליחידת שטח בכל לוח.
 V - המתח בין הלוחות. d - מרחק בין הלוחות.

קיבול של קבל גלילי: $C = \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln \frac{b}{a}}$

a ו-b - רדיוס הגליל הפנימי והחיצוני בהתאמה.
 L - אורך הגלילים, $a, b \ll L$

הקיבול של קבל המלא בחומר דיאלקטרי אחיד: $C' = kC_0$

k (או ϵ_r) - המקדם הדיאלקטרי של החומר.
 C_0 - הקיבול ללא החומר הדיאלקטרי.
 חיבור קבלים בטור (קבלים עם מטען זהה):

$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$

כאשר $Q_T = Q_1 = Q_2$ ו- $V_T = V_1 + V_2$

חיבור קבלים במקביל (מתח זהה): $C_T = C_1 + C_2$

כאשר $Q_T = Q_1 + Q_2$ ו- $V_T = V_1 = V_2$

שיטה 1 לחישוב קיבול - לפי הגדרה:

- א. נניח שיש מטען Q על לוחות הקבל.
- ב. נחשב את השדה בין הלוחות.
- ג. נחשב את המתח בין הלוחות.
- ד. נציב בנוסחה (בדרכי Q יצטמצם)

שיטה 2 לחישוב קיבול - פירוק הקבל לקבלים חלקיים:

- א. נפרק את הקבל לקבלים שמחוברים בטור או במקביל.
- ב. נחשב את הקיבול של כל אחד.
- ג. נחבר חזרה באמצעות הנוסחאות

אנרגיה האגורה בקבל: $U_c = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} qV$

העבודה שמבצעת הסוללה: $W_s = \Delta q V_s = -\Delta U_c$

Δq הוא המטען שעבר דרכה (זוה המטען שקיבל הקבל)

הכוח הפועל על חומר דיאלקטרי בקבל: $F = \left| \frac{dU_c}{dx} \right|$

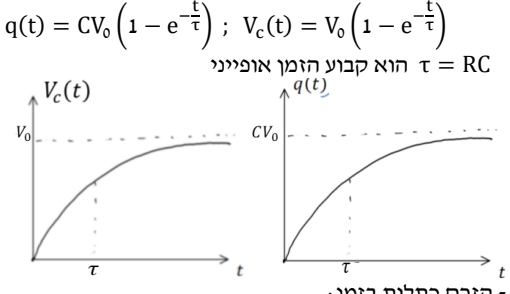
הכוח תמיד מושך את החומר פנימה.

פריקה וטעינה של קבל

מעגל טעינה: משוואת המתחים: $V_0 - \frac{q}{C} - IR = 0$

$I = \frac{dq}{dt}$

המטען והמתח על הקבל כתלות בזמן (בטעינה):



הזרם כתלות בזמן: $I(t) = \frac{V_0}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$

בהתחלה (t=0) הקבל מתנהג כמו קצר, המתח והמטען על הקבל הם אפס והזרם הוא $\frac{V_0}{R}$

לאחר זמן רב ($t > 5\tau$) הקבל מתנהג כמו נתק, המטען והמתח קבועים והזרם מתאפס.

מעגל פריקה: משוואת המתחים: $\frac{q}{C} - IR = 0$

$I = -\frac{dq}{dt}$

המטען והמתח על הקבל כתלות בזמן (בפריקה):

$q(t) = Q_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$; $V_c(t) = V_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$; $Q_0 = CV_0$



מציאת צפיפות זרם משדה מגנטי נתון

מציאת צפיפות זרם משטחית $\vec{J}$ משדה מגנטי נתון (חוק

אמפר הדיפרנציאלי): $\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$

מציאת צפיפות זרם קווית $\vec{K}$ משדה מגנטי נתון (כאשר יש

אי רציפות בשדה): $\hat{n}_{1 \rightarrow 2} \times \Delta \vec{B} = \mu_0 \vec{K}$

כאשר $\hat{n}_{1 \rightarrow 2}$ הוא וקטור יחידה בכיוון הקפיצה מתחום 1

לתחום 2 ו- $\Delta \vec{B} = \vec{B}_2 - \vec{B}_1$

בשילוב למצא זרם של תיל נחפש שדה מהצורה $\vec{B} = \frac{C}{r} \hat{\theta}$

בקואורדינטות גליליות ובאזור הכולל את הראשית ו- C

קבוע כלשהו. נשווה לשדה של תיל אינסופי $(\frac{\mu_0 I}{2\pi r})$ ונקבל

$$I = \frac{C 2\pi}{\mu_0}$$

חוק פאראדיי

חוק פאראדיי: $\varepsilon = -\frac{d\phi_B}{dt}$; $\phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{s}$

הכא"מ מתנהג כמו מקור מתח במעגל.

בד"כ נמצא באמצעות החוק את גודל הכא"מ ואת הכיוון

החוק לנ"ל: הזרם נוצר בניגוד לשינוי בשטף.



הספק של כוח הפועל על גוף בתנועה: $P = \vec{F} \cdot \vec{v}$

כאשר $\vec{v}$ היא מהירות הגוף (שימו לב למכפלה הסקלרית)

כא"מ הנוצר במוט הנע בשדה מגנטי: $\varepsilon = BLv \sin \alpha$

כאשר v היא מהירות המוט, L האורך שלו ו- α היא

הזווית בין המהירות לשדה.

כיוון הכא"מ הוא בכיוון של הכוח המגנטי הפועל על מטען

חיובי בתוך המוט.

שדות משתנים בזמן חרם העתקה

ממשוואות מקסוול רואים ששדה מגנטי שמשתנה בזמן

יוצר שדה חשמלי ולהפך.

אם נתון שדה מגנטי משתנה בזמן וצריך לחשב את השדה

החשמלי אז: נשתמש במשוואה השלישית של מקסוול כמו

חוק פאראדיי ובמקום הכא"מ נחשב את האינטגרל כאשר

בד"כ יש סימטריה גלילית והאינטגרל הופך ל- $E 2\pi r$

אם נתון שדה חשמלי משתנה בזמן וצריך לחשב את השדה

המגנטי אז: נשתמש במשוואה הרביעית כמו חוק אמפר

רק שבמקום זרם יש $\int \varepsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} \cdot d\vec{s}$ (או במקום צפיפות זרם

$\varepsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt}$) שנקרא זרם העתקה (לא באמת זרם).

מומנט דיפול מגנטי

דיפול מגנטי הוא לולאת זרם סגורה.

מומנט הדיפול המגנטי $\vec{\mu}$ לפעמים מסומן ב- $(\vec{m})$: $\vec{\mu} = I \vec{A}$

I - הזרם בלולאה. $\vec{A}$ - השטח הסגור על-ידי הלולאה.

כיוונו במאונך למשטח ובהתאם לכלל יד ימין של הזרם.

השדה שיוצא דיפול מגנטי במרחק הגדול בהרבה מממדי

הדיפול: $\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi r^3} [3(\vec{\mu} \cdot \hat{r})\hat{r} - \vec{\mu}]$

מומנט כוח שפועל על דיפול מגנטי הנמצא בשדה מגנטי

חיצוני: $\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$

האנרגיה הפוטנציאלית של דיפול מגנטי בשדה מגנטי

חיצוני: $U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$

השראות ברכיב

השראות ברכיב: $L = \frac{\Phi_B}{I}$

Φ_B הוא השטף המגנטי דרך הרכיב ו- I הזרם ברכיב.

ההשראות היא תכונה שתלויה רק במבנה ולכן היא בד"כ

קבועה.

חישוב השראות לפי הגדרה:

1. נניח שזרם זרם I ברכיב.

2. נחשב את השדה המגנטי הנוצר מהזרם בתוך הרכיב.

3. נחשב את השטף המגנטי ברכיב.

4. נציב בנוסחה של ההשראות והזרם יצטמצם.

השראות של סליל: $L = \frac{\mu_0 \pi a^2 N^2}{l}$

N מספר הליפופים הכולל, l אורך הסליל ו- a רדיוס טבעת

כא"מ ברכיב עם השראות L: $\varepsilon = -L \frac{dI}{dt}$

האנרגיה האגורה בסליל (או בכל רכיב בעל השראות):

$$U_L = \frac{1}{2} LI^2$$

האנרגיה האגורה בשדה המגנטי:

את האינטגרל עושים על כל המרחב.

זו אותה האנרגיה שמחשבים באמצעות ההשראות (פשוט

צורת חישוב אחרת).

ניתן לחשב השראות דרך השוואה של שתי הנוסחאות

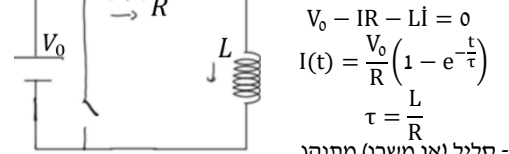
האחרונות של האנרגיה (תניחו זרם והוא יצטמצם בסוף).

המתח על סליל (משטר) במעגל:

הצד הגבוה הוא בנקודה שבה נכנס הזרם לסליל.

מעגלי RL

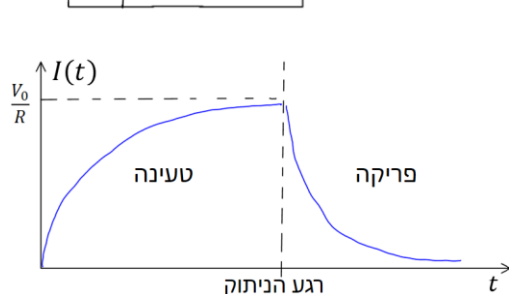
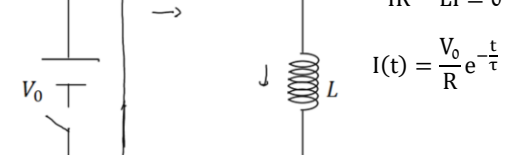
טעינה:



סליל (או משטר) מתנהג

בהתחלה כמו נטק ולאחר זמן רב כמו קצר.

פריקה:



חיבור סלילים (משרנים) במעגל הוא כמו חיבור נגדים:

בטור: $L_T = L_1 + L_2 + \dots$

כאשר $I_T = I_1 = I_2 = \dots$ ו- $V_T = V_1 + V_2 + \dots$

במקביל: $\frac{1}{L_T} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots$

כאשר $I_T = I_1 + I_2 + \dots$ ו- $V_T = V_1 = V_2 = \dots$

השראות הדדית

השראות הדדית: $M_{1,2} = \frac{\Phi_{1,2}}{I_2}$

חישוב השראות הדדית:

1. נניח שזרם זרם I_2 ברכיב 2.

2. נחשב את השדה המגנטי הנוצר מהזרם ברכיב 1.

3. נחשב את השטף המגנטי ברכיב 1.

4. נציב בנוסחה של ההשראות ו- I_2 יצטמצם.

השראות הדדית תמיד סימטרית $M_{1,2} = M_{2,1} = M$

ולכן ניתן תמיד לחשב $M_{1,2}$ להסיק על $M_{2,1}$ (או להפך).

יחס המתחים בשנאי: $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{N_2}{N_1}$

N הוא מספר הליפופים בכל צד.

משוואות מקסוול

הצורה הדיפרנציאלית: הצורה האינטגרלית:

1. חוק גאוס: $\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{\varepsilon_0} \int \rho dV$; $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$

2. $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$; $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$

השטף מגנטי על משטח סגור תמיד אפס, אין מטען מגנטי.

3. $\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \int \frac{d\vec{B}}{dt} \cdot d\vec{s}$; $\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{d\vec{B}}{dt}$

מהמשוואה ניתן לקבל את חוק פאראדיי $\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt}$

4. $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int \vec{J} \cdot d\vec{s} + \mu_0 \int \varepsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} \cdot d\vec{s}$

חוק אמפר והתיקון של מקסוול (שנקרא גם זרם העתקה)

גלים אלקטרומגנטיים

משוואות הגלים בריק ($\rho = J = 0$):

$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{d^2 \vec{E}}{dt^2}$; $\vec{\nabla}^2 \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{d^2 \vec{B}}{dt^2}$

c היא מהירות האור כאשר $\frac{1}{\mu_0 \varepsilon_0} = c^2$

למשוואות מגיעים ממשוואות מקסוול.

המשוואה מתקיימת עבור כל רכיב בנפרד:

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d^2 \vec{E}}{dt^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \vec{\nabla}^2 E_x = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d^2 E_x}{dt^2}; \vec{\nabla}^2 E_y = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d^2 E_y}{dt^2}; \text{ כנל } z$$

תזכורת ללאפליסון: $\vec{\nabla}^2 E_i = \frac{\partial^2 E_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_i}{\partial z^2}$

פתרון המשוואה עבור רכיב כלשהו של $\vec{E}$ או של $\vec{B}$:

$$E_i(\vec{r}, t) = A_i \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)$$

$\vec{k} = (k_x, k_y, k_z)$ הוא וקטור הגל, כיוונו הוא כיוון

התקדמות הגל.

$$\vec{k} \cdot \vec{r} = k_x x + k_y y + k_z z$$

ω היא התדירות הזוויתית

כאשר f היא התדירות בהרץ ו- T הוא זמן המחזור.

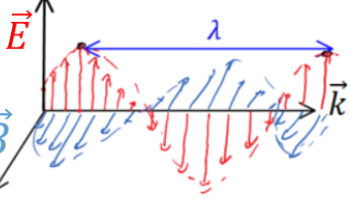
הקוסינוס בפתרון זהה לכל הרכיבים של השדה החשמלי

והמגנטי, ההבדל בין הרכיבים הוא רק במקדם A_i .

איד למצא שדה מגנטי מחשמלי ולהפך:

$$\vec{B} = \frac{1}{c} \vec{k} \times \vec{E}; \vec{E} = c \vec{B} \times \vec{k}$$

צורת הגל במרחב:



השדה החשמלי תמיד מאונך לשדה המגנטי ושניהם תמיד

מאונכים לכיוון התקדמות הגל.

λ הוא אורך הגל (המרחק בין שיא לשיא): $|k| = \frac{2\pi}{\lambda}$

יחס הדיספרסיה: $\omega = c|k|$

היחס מתקבל מהצבה של הפתרון במשוואות הגלים.

פתרון נוסף (עם פלוס): $E_i(\vec{r}, t) = A_i \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} + \omega t)$

במקרה הזה הגל מתקדם בכיוון הפוך ל- $\vec{k}$

וקטור פוינטינג והאנרגיה האגורה בשדות

אנרגיה אלקטרו מגנטית האגורה בשדות:

$$U = \int \left(\frac{\varepsilon_0 \vec{E}^2}{2} + \frac{\vec{B}^2}{2\mu_0} \right) dv$$

צפיפות האנרגיה (אנרגיה ליח"נ נפח): $u_{em} = \frac{\varepsilon_0 \vec{E}^2}{2} + \frac{\vec{B}^2}{2\mu_0}$

וקטור פוינטינג: $\vec{s} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$

שטף האנרגיה ליחידת שטח וליחידת זמן.

הקשר בין האנרגיה לוקטור פוינטינג בריק:

$$\oint \vec{s} \cdot d\vec{s} = - \frac{dU}{dt}$$

בצד שמאל עושים אינטגרל של הוקטור פוינטינג על

משטח סגור (שטף) ובצד ימין גוזרים בזמן את האנרגיה

האגורה בשדות בנפח הכלוא במשטח.

הקשר הדיפרנציאלי בריק: $\vec{\nabla} \cdot \vec{s} = - \frac{du_{em}}{dt}$

תנע ואנרגיה יחסותיים: $\vec{p} = \gamma m \vec{v}$; $E = \gamma mc^2$

- הגודל γ קשור עכשיו למהירות הגוף עבורו נרצה לחשב

את התנע ולא למעבר בין מערכות אינרציאליות שונות.

נוסחאות נוספות:

$$E^2 = |p|^2 c^2 + m^2 c^4; |p| = \sqrt{\gamma^2 - 1} \cdot mc$$

אנרגיית מנוחה: $E_0 = mc^2$

אנרגיה קינטית: $E_k = E - E_0 = mc^2(\gamma - 1)$

עבור חלקיקים מסוימים מסת המנוחה היא אפס (פוטון,

ניוטרינו) והאנרגיה הקינטית היא: $E = |p|c = \hbar \nu$

ν היא התדירות ו- $\hbar = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ קבוע פלאנק

טרנספורמציה של התנע והאנרגיה:

$$E' = \gamma_0 (E - v_0 p_x); p'_x = \gamma_0 (p_x - v_0 E/c^2)$$

$p'_y = p_y$; $p'_z = p_z$

וקטור תנע אנרגיה:

"גודל הוקטור" (מינוס באנרגיה) זהה בכל מערכות היחוס:

$$p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - \left(\frac{E}{c}\right)^2 = \text{const}$$

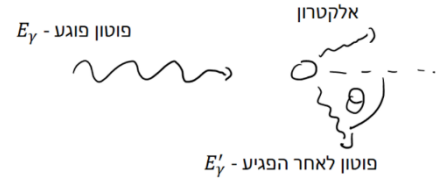
- הנוסחה נכונה גם עבור מערכת עם יותר מגוף אחד כאשר

התנע והאנרגיה הם התנע והאנרגיה של כל המערכת.

- עבור גוף יחיד הקבוע הוא: $m^2 c^2$

פיזור קומפטון:

פוטון הפוגע באטום הנמצא במנוחה, לאחר הפגיעה נפלט אלקטרון וכיוון התנועה של הפוטון משתנה.



$$\frac{1}{E'_\gamma} - \frac{1}{E_\gamma} = \frac{1}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)$$

E_γ - אנרגיית הפוטון לפני הפגיעה
 E'_γ - אנרגיית הפוטון אחרי הפגיעה
 m_e - מסת אלקטרון

θ - זווית התנועה של הפוטון ביחס לכיוון הפגיעה.
 יחידת האלקטרון וולט: $1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$
 המרת מסת הגופים לאנרגיה:

$$m_e | \approx 8.19 \times 10^{-14} \text{ J} (\approx 511 \text{ keV})$$

$$m_p | \approx 1.50 \times 10^{-10} \text{ J} (\approx 938 \text{ MeV})$$

$$m_{\text{Uranium}} \approx 3.55 \times 10^{-8} \text{ J} (\approx 225 \text{ GeV})$$

- ניתן גם לרשום את היחידות של התנע של גופים כ- $\frac{E}{c}$
 כלומר הכמות (המספר) זהה רק ביחידות נחלק ב c.

יחסות פרטית

תיאור של מאורעות מנקודת המבט של צופים הנמצאים במערכות ייחוס שונות (אינרציאליות).

עקרונות יסוד בתורת היחסות:

- חוקי הפיזיקה זהים בכל המערכות האינרציאליות.
- האור אינו צריך תווך בשביל לעבור בו.
- מהירות האור קבועה וזהה בכל מערכות הייחוס.
- אף גוף אינו יכול לנוע יותר מהר ממהירות האור.
- בוואקום. מכאן, מדידת הזמן שונה בין מערכות הייחוס.
- הזמן הופך לקואורדינטה רביעית (ביחד עם: x, y, z) ששוכרת טרנספורמציה.

פקטור גאמה: $\gamma_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_0}{c}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$; $\beta = \frac{v_0}{c}$

γ_0 תמיד גדולה מ 1

טרנספורמציה לורנץ למיקום והזמן:

$$x' = \gamma_0 (x - v_0 t); y' = y; z' = z$$

$$t' = \gamma_0 \left(t - \frac{v_0 x}{c^2} \right); \beta = \frac{v_0}{c}; \gamma_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_0}{c}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

טרנספורמציה הפוכה:

$$x = \gamma_0 (x' + v_0 t'); y = y; z = z$$

$$t = \gamma_0 \left(t' + \frac{v_0 x'}{c^2} \right)$$

- הצירים של המערכות **חייבים** להיות מקבילים.
 - בזמן $t = t' = 0$ **חייבים** שהראשיות מתלכדות.

המערכת העצמית:

מערכת בה המאורע הנצפה נמצא במנוחה.

- **זמן עצמי** τ מוגדר להיות הפרש הזמנים בין שני מאורעות כפי שהוא נמדד במערכת העצמית שלהם.

- **אורך עצמי** l_0 האורך של גוף כפי שנמדד במערכת בו הגוף נמצא במנוחה.

התכווצות האורך:

(העצמית) למערכת נעה $l = \frac{l_0}{\gamma_0}$
 התארכות הזמן: שינוי הזמן ממערכת המנוחה (העצמית) למערכת נעה $\Delta t = \gamma_0 \tau$

שינוי זווית במדידת אורך: $\tan \theta = \gamma_0 \tan \theta'$
 θ' - זווית ביחס לציר ה x (ציר התנועה) במערכת העצמית
 θ - זווית ביחס לציר ה x (ציר התנועה) במערכת אחרת.

אפקט דופלר היחסות:

זמן המחזור של הגל: $T = \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} \tau$
 אורך הגל: $\lambda = \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} \lambda'$
 תדירות הגל: $f = \sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}} f'$

τ, f', λ' - הזמן, התדירות ואורך הגל במערכת העצמית
 טרנספורמציה לורנץ למהירויות:

$$v'_x = \frac{v_x - v_0}{1 - \frac{v_0 v_x}{c^2}}$$

$$v'_y = \frac{v_y}{\gamma_0 \left(1 - \frac{v_0 v_x}{c^2} \right)}; v'_z = \frac{v_z}{\gamma_0 \left(1 - \frac{v_0 v_x}{c^2} \right)}$$

אברציה - שינוי זווית המהירות:

$$\tan \theta' = \frac{\sin \theta}{\gamma_0 \left(\cos \theta - \frac{v_0}{c} \right)}$$

שימו לב שפה השינוי הוא בזווית של וקטור המהירות (כיוון התנועה) ולא שינוי זווית של הגוף כמו למעלה.

כוחות ביחסות פרטית: $\Sigma \vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m\gamma^3 \vec{a}_{||} + m\gamma \vec{a}_{\perp}$
 הרכיב המאונך והמקביל של התאוצה למהירות

גודל הרכיב המקביל של התאוצה: $a_{||} = \dot{v}$
 טרנספורמציה של הכוחות:

$$F'_x = F_x - \frac{v_0 (F_y v_y + F_z v_z)}{c^2 - v_0 v_x}$$

$$F'_y = \frac{F_y}{\gamma_0 \left(1 - \frac{v_0 v_x}{c^2} \right)}; F'_z = \frac{F_z}{\gamma_0 \left(1 - \frac{v_0 v_x}{c^2} \right)}$$

טרנספורמציה הפוכה:

$$F_x = F'_x + \frac{v_0 (F'_y v'_y + F'_z v'_z)}{c^2 + v_0 v'_x}$$

$$F_y = \frac{F'_y}{\gamma_0 \left(1 + \frac{v_0 v'_x}{c^2} \right)}; F_z = \frac{F'_z}{\gamma_0 \left(1 + \frac{v_0 v'_x}{c^2} \right)}$$

טרנספורמציה יחסותית (לורנץ) לשדות

טרנספורמציה של השדות עבור צופה הנע במהירות $\vec{v}$

ביחס למעבדה: $\vec{E}'_{||} = \vec{E}_{||}; \vec{E}'_{\perp} = \gamma (\vec{E}_{\perp} + \vec{v} \times \vec{B}_{\perp})$
 $\vec{B}'_{||} = \vec{B}_{||}; \vec{B}'_{\perp} = \gamma \left(\vec{B}_{\perp} - \frac{1}{c^2} \vec{v} \times \vec{E}_{\perp} \right); \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$

$\vec{E}$ ו $\vec{B}$ - הם השדות במערכת המעבדה ו- $\vec{E}', \vec{B}'$ הם השדות במערכת הנעה.

הטרנס' ההפוכה: $\vec{E}'_{||} = \vec{E}_{||}; \vec{E}'_{\perp} = \gamma (\vec{E}_{\perp} - \vec{v} \times \vec{B}_{\perp})$
 $\vec{B}'_{||} = \vec{B}_{||}; \vec{B}'_{\perp} = \gamma \left(\vec{B}_{\perp} + \frac{1}{c^2} \vec{v} \times \vec{E}_{\perp} \right)$

טרנספורמציה של צפיפויות המטען:

$\lambda = \gamma \lambda_0; \sigma = \gamma \sigma_0; \rho = \gamma \rho_0$
 כאשר $\lambda_0, \sigma_0, \rho_0$ הן צפיפות אורכית, משטחית ונפחית במערכת העצמית של הגוף.

- הסיבה לטרנספורמציה היא שסך המטען זהה בשתי המערכות אבל האורך משתנה.
 נוסחאות לצפיפויות הזרם:

$\vec{J} = \gamma \rho_0 \vec{v}; \vec{K} = \gamma \sigma_0 \vec{v}; I = \gamma \lambda_0 v$
 כאשר $\lambda_0, \sigma_0, \rho_0$ הן צפיפות אורכית, משטחית ונפחית במערכת העצמית של הגוף.