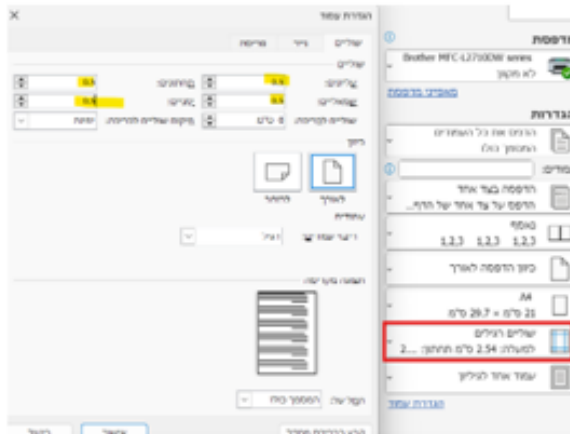


הוראות לדף הנוסחאות



הוראות הדפסה!

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

ב WORD, יש לבחור בלשונית הדפסה את חלון השולים, לבחור שולים 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!!

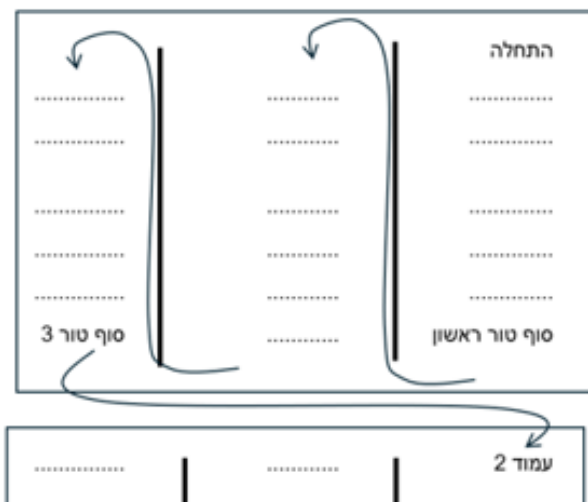
מבנה הדף:

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 ולאתר 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.

צפיפות נפחית/משטחית/אורכית:

$$\rho = \frac{M}{V}; \sigma = \frac{M}{S}; \lambda = \frac{M}{l}$$

V, S, l הם נפח, שטח ואורך הגוף.

גרדיאנט בקרטזיות:

$$\vec{\nabla} f = \frac{\partial f}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial f}{\partial y} \hat{y} + \frac{\partial f}{\partial z} \hat{z}$$

גרדיאנט בגליליות:

$$\vec{\nabla} f = \frac{\partial f}{\partial r} \hat{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial \theta} \hat{\theta} + \frac{\partial f}{\partial z} \hat{z}$$

בכדוריות (*):

$$\vec{\nabla} f = \frac{\partial f}{\partial r} \hat{r} + \frac{1}{r \sin \varphi} \frac{\partial f}{\partial \theta} \hat{\theta} + \frac{1}{r \sin \varphi} \frac{\partial f}{\partial \varphi} \hat{\varphi}$$

דיברגנט div בקרטזיות:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{F} = \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z}$$

div בגליליות:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{F} = \frac{1}{r} \frac{\partial(r F_r)}{\partial r} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial(F_\theta \sin \theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial F_z}{\partial z}$$

div בכדוריות:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{F} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 F_r)}{\partial r} + \frac{1}{r \sin \varphi} \frac{\partial(F_\varphi \sin \varphi)}{\partial \varphi} + \frac{\partial F_z}{\partial z}$$

רוטור (Rot/Curl) בקרטזיות:

$$\vec{\nabla} \times \vec{F} = \left(\frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \right) \hat{x} - \left(\frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x} \right) \hat{y} + \left(\frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right) \hat{z}$$

רוטור (Rot/Curl) בגליליות:

$$\vec{\nabla} \times \vec{F} = \left(\frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \right) \hat{x} - \left(\frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x} \right) \hat{y} + \left(\frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right) \hat{z}$$

בגליליות (*):

$$\vec{\nabla} \times \vec{F} = \left(\frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \right) \hat{x} - \left(\frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x} \right) \hat{y} + \left(\frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right) \hat{z}$$

בכדוריות (*):

$$\vec{\nabla} \times \vec{F} = \left(\frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \right) \hat{x} - \left(\frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x} \right) \hat{y} + \left(\frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right) \hat{z}$$

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x במערכות צירים צריך להתקיים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

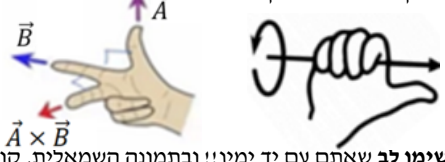
שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

וכיוון לפי כלל יד ימין



שימו לב שאתם עם יד ימין!! ובתמונה השמאלית, קודם לעשות אקדה ואחר כך לפתוח את האמה!

גרדיאנט בקרטזיות:

$$\vec{\nabla} f = \frac{\partial f}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial f}{\partial y} \hat{y} + \frac{\partial f}{\partial z} \hat{z}$$

בגליליות:

$$\vec{\nabla} f = \frac{\partial f}{\partial r} \hat{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial \theta} \hat{\theta} + \frac{\partial f}{\partial z} \hat{z}$$

בכדוריות (*):

$$\vec{\nabla} f = \frac{\partial f}{\partial r} \hat{r} + \frac{1}{r \sin \varphi} \frac{\partial f}{\partial \theta} \hat{\theta} + \frac{1}{r \sin \varphi} \frac{\partial f}{\partial \varphi} \hat{\varphi}$$

רוטור (Rot/Curl) בקרטזיות:

$$\vec{\nabla} \times \vec{F} = \left(\frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \right) \hat{x} - \left(\frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x} \right) \hat{y} + \left(\frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right) \hat{z}$$

בגליליות:

$$\vec{\nabla} \times \vec{F} = \left(\frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \right) \hat{x} - \left(\frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x} \right) \hat{y} + \left(\frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right) \hat{z}$$

בכדוריות (*):

$$\vec{\nabla} \times \vec{F} = \left(\frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \right) \hat{x} - \left(\frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x} \right) \hat{y} + \left(\frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right) \hat{z}$$

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x במערכות צירים צריך להתקיים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

שימו לב שהזווית φ עם ציר ה-z והזווית θ עם ציר ה-x והזווית של אופרטורים:

$$\vec{E} = \frac{kq}{r^2} \hat{r} = \frac{kq}{r^3} \vec{r}$$

$\vec{r}$ - וקטור מהמטען q אל הנקודה בה מחשבים את השדה. שימו לב שבנוסחה הזו המטען הוא זה שיוצר את השדה.

כוח 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) חישוב 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:

$$\phi = - \int \vec{E} \cdot d\vec{r} \quad \text{או} \quad \vec{E} = -\vec{\nabla} \phi$$

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:

$$W = \Delta U = q\Delta \phi$$

פוטנציאל של מטען נקודתי:

$$\phi = \frac{kq}{r}$$

מוליכים:

המטענים בתוך מוליך חופשיים לזוז.

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 (בד"כ עם חוק גאוס) או אם השדה נתון, נעשה אינטגרל לא מסוים של השדה בכל תחום ונוסיף קבוע. את הקבועים מוציאים על ידי תנאי הרציפות של הפוטנציאל וכיוול (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 הוא זוג מטענים בעלי מטען זהה וסימון הפוך הנמצאים במרחק d זה מזה.

מומנט דיפול: $\vec{p} = q\vec{d}$ כיוונו מהמטען השלילי לחיובי.

הפוטנציאל שיוצר דיפול במרחק גדול $r \gg d$:

$$\phi = \frac{k(\vec{p} \cdot \vec{r})}{r^3} = \frac{k(\vec{p} \cdot \hat{r})}{r^2}$$

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:

$$\vec{F} = (\vec{p} \cdot \vec{\nabla}) \vec{E} = -\vec{\nabla} U$$

השוויון האחרון נכון רק אם השדה משמר (שדה שנוצר ממטענים) ומומנט הדיפול אחיד (לא תלוי בקואורדינטות).

מציאת התפלגות מטען:

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

למצא צפיפות נפחית נעשה:

$$\sigma = \epsilon_0 \Delta \phi$$

כאשר $\Delta \phi$ היא הקפיצה בשדה המאונך 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:

$$U = \sum \frac{1}{2} \phi_i q_i = \int \frac{\epsilon_0}{2} E^2 dv$$

קואורדינטות גליליות: (r, θ, z)

$$\begin{aligned} x &= r \cos \theta \\ y &= r \sin \theta \\ z &= z \\ r &= \sqrt{x^2 + y^2} \\ \tan \theta &= \frac{y}{x} \end{aligned}$$

קואורדינטות כדוריות: (r, θ, φ)

$$\begin{aligned} z &= r \cos \varphi \\ x &= r \sin \varphi \cos \theta \\ y &= r \sin \varphi \sin \theta \\ r &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ \tan \theta &= \frac{y}{x} \\ \cos \varphi &= \frac{z}{r} = \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \end{aligned}$$

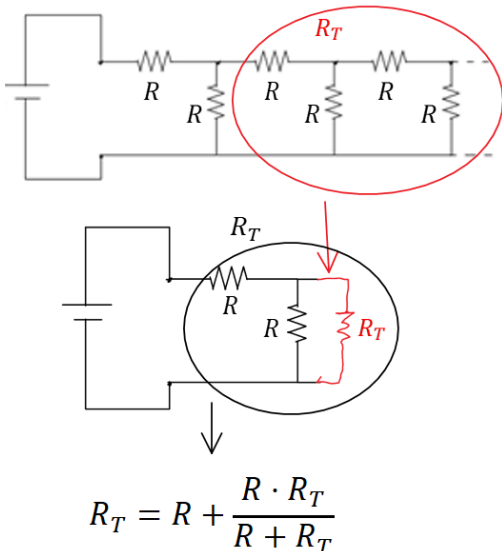
קואורדינטות כדוריות: (r, θ, φ)

$$\begin{aligned} z &= r \cos \varphi \\ x &= r \sin \varphi \cos \theta \\ y &= r \sin \varphi \sin \theta \\ r &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ \tan \theta &= \frac{y}{x} \\ \cos \varphi &= \frac{z}{r} = \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \end{aligned}$$

קואורדינטות כדוריות: (r, θ, φ)

$$\begin{aligned} z &= r \cos \varphi \\ x &= r \sin \varphi \cos \theta \\ y &= r \sin \varphi \sin \theta \\ r &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ \tan \theta &= \frac{y}{x} \\ \cos \varphi &= \frac{z}{r} = \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \end{aligned}$$

קואורדינטות כדור



GOOL

מעגלי זרם ישר

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 V_T ו- I_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: $\frac{1}{R_T} = \sum \frac{1}{R_i}$, $I_T = \sum I_i$, $V_T = V_i$
מד זרם (אמפרמטר) אידיאלי - מחובר בטור ובעל התנגדות זניחה.
מד מתח (וולטמטר) אידיאלי - מחובר במקביל לרכיב הנמדד, בעל התנגדות מאוד גבוהה.

ההספק בנגד: $P = IV = I^2 R = \frac{V^2}{R}$
 - P 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.

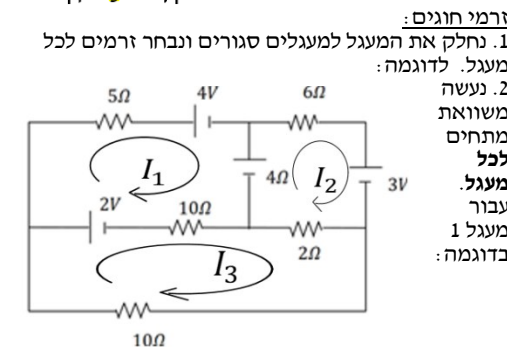
שיטת קרמר (לפתרון מערכת משוואות):
 $I_i = \frac{\Delta_i}{\Delta}$
 Δ - דטרמיננטה של מערכת המשוואות ההומוגנית (ללא הפרעות).
 Δ_i - דטרמיננטה של מערכת המשוואות הבאה:

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

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

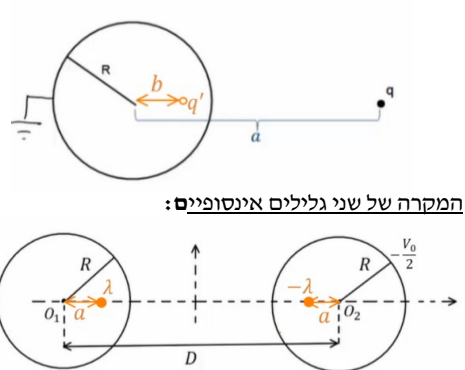
$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 3 & 5 & 8 \\ 2 & 1 & 9 \\ 4 & 3 & -7 \end{vmatrix}$$

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:



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 ב- R_T
 - נחשב את ההתנגדות של המעגל הסופי שהתקבל ונשווה אותה לאותו R_T

- 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
מטעני דמות
 שיטה למצא פוטנציאל בבעיות עם מוליכים והתפלגות מטען שאינה אחידה.
השיטה:
 - נבנה בעיה מקבילה ללא המוליך.
 - בבעיה המקבילה נשאיר את אותה התפלגות המטען שיש בתחום בו אנחנו מחפשים את הפוטנציאל.
 - בתחום הנוסף (שבו אנחנו לא מחפשים את הפוטנציאל) נוסיף מטענים כך שתנאי השפה בבעיה המקבילה יהיו זהים לתנאי השפה בבעיה המקורית.
 - לפי משפט הקיום והיחידות, הפוטנציאל בבעיה המקבילה (בתחום שאנחנו מחפשים) זהה לפוטנציאל בבעיה המקורית.
המקרה של קליפה כדורית ומטען נקודתי:
 $q' = -\frac{R}{a} q$; $b = \frac{R^2}{a}$
 - אם הקליפה נמצאת בפוטנציאל V_0
 אז נוסיף מטען $q'' = \frac{V_0 R}{k}$ במרכז הקליפה.



המקרה של שני גלילים אינסופיים:
 $\lambda = \frac{\pi \epsilon_0 V_0}{\ln\left(\frac{D}{2R} + \sqrt{\left(\frac{D}{2R}\right)^2 - 1}\right)}$; $a = \frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - R^2}$

חומרים דיאלקטריים
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 מנוגד לשדה החיצוני.
השדה בתוך חומר דיאלקטרי ליניארי 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 ϵ - מקדם דיאלקטרי של החומר - תכונה של החומר בדרכי קבוע וידוע. $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ - $\epsilon_r > 1$
 σ_{free} - צפיפות המטען שיוצרת את השדה החיצוני:

$\sigma_{free} = \epsilon_0 \Delta E_{free \perp}$
 σ_T - צפיפות המטען הכוללת: $\sigma_T = \epsilon_0 \Delta E_{\perp}$
 σ_i - צפיפות מטען מושרית/קשורה: צפיפות מטען שנוצרת על שפת החומר הדיאלקטרי מהקיטוב של הדיפולים.
 $\sigma_i = \sigma_T - \sigma_{free}$

$\vec{P}$ - וקטור הפולריזציה. צפיפות הדיפולים ליחידת נפח.
 $\vec{P} = N \vec{p}_1$
 $\vec{p}_1$ - מומנט הדיפול של דיפול יחיד בחומר.
 N - מספר הדיפולים ביחידת נפח. יחידות של $\left[\frac{1}{m^2}\right]$
מומנט הדיפול הכולל בחומר: $\vec{p} = \int \vec{P} dV$
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 מהגוף.
אם $\vec{P}$ לא אחיד אז יש גם צפיפות מטען מושרית נפחית
בתוך החומר: $\rho_i \equiv \rho_b = -\vec{\nabla} \cdot \vec{P}$
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 ליניאריים (בדרכי בשאלות): $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$
חומר איזוטרופי: $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}_0$

חומרים דיאלקטריים

הגדרת הקיבול: $C = \frac{|q|}{|V|}$
 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: $C' = k C_0$
 k (או ϵ_r) - המקדם הדיאלקטרי של החומר.
 C_0 - הקיבול ללא החומר הדיאלקטרי.
חיבור קבלים בטור (קבלים עם מטען זהה):

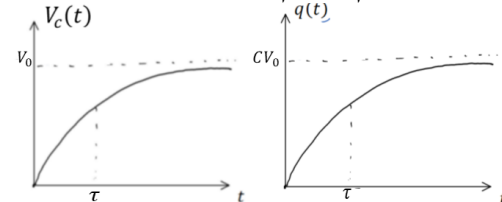
$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$
 כאשר $Q_T = Q_1 = Q_2$ ו- $V_T = V_1 + V_2$
חיבור קבלים במקביל (מתח זהה): $C_T = C_1 + C_2$
 כאשר $Q_T = Q_1 + Q_2$ ו- $V_T = V_1 = V_2$

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: $U_c = \frac{1}{2} q^2 C = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} qV$
העבודה שמבצעת הסוללה: $W_s = \Delta q V_s = -2\Delta U_c$
 Δq הוא המטען שעבר דרכה (וזה 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

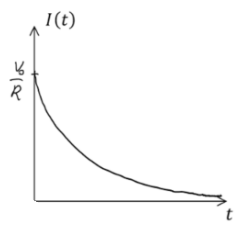
מעגל טעינה:
משוואת המתחים: $V_0 - \frac{q}{C} - IR = 0$
 $I = \frac{dq}{dt}$
המטען והמתח על הקבל כתלות בזמן (בטעינה):
 $q(t) = CV_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$; $V_c(t) = V_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$
 $\tau = RC$ הוא קבוע הזמן אופייני



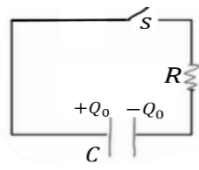
הזרם כחולות בזמן:

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

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.



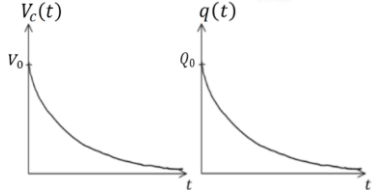
מעגל פריקה:

משוואות המתחים:

$$\frac{q}{C} - IR = 0$$
$$I = -\frac{dq}{dt}$$

המטען והמתח על הקבל כתלות בזמן (בפריקה):

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



הזרם כתלות בזמן בפריקה זהה לטעינה: $I(t) = \frac{V_0}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$
מעגלים אינסופיים בקבלים: ראו מעגלים אינסופיים במעגלי זרם ישר.

GOOL מבנה הנגד וצפיפות זרם

התלות של ההתנגדות במבנה הנגד: $R = \rho \frac{L}{S}$
 ρ - התנגדות 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. במדידה והם לא אחידים צריך לחלק את הנגד לחתיכות, לחשב התנגדות 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 ליחיד 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: $I = \lambda v$

GOOL הכוח המגנטי - חוק לורנץ

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

ניתן לחשב את הכוח בשתי דרכים.

- דרך דטרמיננטה (ראו מכפלה וקטורית בוקטורים).

- דרך 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:

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

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

GOOL הכוח המגנטי על תיל נושא זרם

הכוח הפועל על חתיכת תיל קטנה באורך dl עם זרם I

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B}$$

הנמצאת בשדה מגנטי B 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.

GOOL חוק ביו-סבר

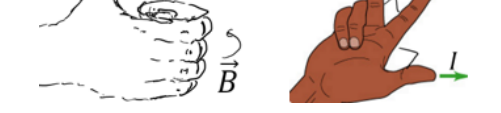
חוק ביו-סבר, השדה המגנטי שיוצרת חתיכת זרם:

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

$\vec{r}$ הוא הוקטור מהחתיכה לנקודה בה מחפשים את השדה.

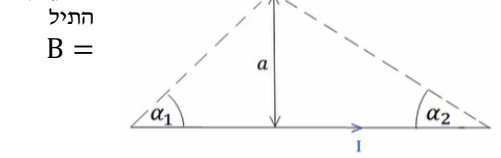
$d\vec{l}$ הוא אורך החתיכה וכיוונו בכיוון הזרם.

- חישוב הכיוון לפי כלל יד ימין:



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

במרכז התיל $B =$



$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \frac{L}{(\frac{L}{2})^2 + a^2}^{\frac{1}{2}}$$

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

כיוון השדה לפי כלל הבורג: כוח ליחידת אורך בין שני תילים מקבילים:



$$\frac{dF}{dl} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d}$$

הכוח הוא כוח משיכה אם הזרמים באותו כיוון, ודחייה אם כיוון הזרמים הפוך.

GOOL 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 המשיק 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:

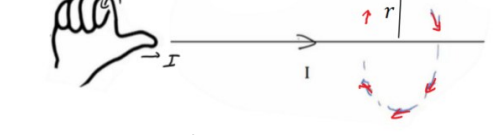
1. תיל / גליל / מעטפת גלילית אינסופיים.

2. מישור אינסופי.

3. סליל אינסופי / טורואיד.

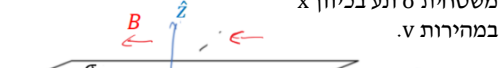
שדה של תיל אינסופי: $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$

כאשר r הוא המרחק מהתיל.



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

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



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

כאשר n הוא מספר הליפופים ליחידת אורך של הסליל.

- כיוון: לפי כלל הבורג, האצבעות בכיוון הזרם והאגודל בכיוון השדה.



טורואיד: $B = \frac{\mu_0 nI}{2\pi r}$

N - מספר הליפופים הכולל.

r - המרחק ממרכז הטורואיד.



GOOL מציאת צפיפות זרם

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- $\vec{B}_1, \vec{B}_2$

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

בוקאורדינטות גליליות ובאזור הכולל את הראשית ו- C קבוע כלשהו. נשווה לשדה של תיל אינסופי ($\frac{\mu_0 I}{2\pi r}$) ונקבל

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

GOOL חוק פאראדיי

$$\epsilon = -\frac{d\phi_B}{dt}; \phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

הכא"מ מתנהג כמו מקור מתח במעגל.

בד"כ נמצא באמצעות החוק את גודל הכא"מ ואת הכיוון נמצא לפי חוק לנץ.

חוק לנץ: הזרם נוצר בניגוד לשינוי בשטף.

האם השטף גדל או קטן?

נרצה להקטין את השטף

נרצה להגדיל את השטף

ניצור שדה מגנטי בכיוון הפוך לשדה הקיים

ניצור שדה מגנטי באותו הכיוון של השדה הקיים

נמצא את כיוון הזרם שייצור את השדה המתאים לפי כלל יד ימין

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v}$$

הספק של כוח הפועל על גוף בתנועה: כאשר $\vec{v}$ היא מהירות הגוף (שימו לב למכפלה הסקלרית)

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

כאשר α היא הזווית בין המהירות 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.

GOOL שדות משתנים בזמן זרם העתקה

ממשוואות מקסוול רואים ששדה מגנטי שמתנה 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

בדרכי 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 $\epsilon_0 \frac{dE}{dt}$ (או במקום צפיפות זרם $\epsilon_0 \frac{dE}{dt}$) שנקרא זרם העתקה (לא באמת זרם).

GOOL 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 שיוצר דיפול מגנטי במרחק הגדול בהרבה מממדיי

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

הדיפול:

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

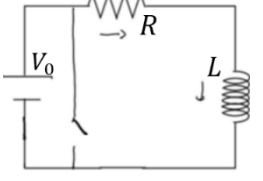
השראות ברכיב: $L = \frac{\Phi_B}{I}$
 Φ_B הוא השטף המגנטי דרך הרכיב ו- I הזרם ברכיב.
 - ההשראות היא **תכונה שתלויה רק במבנה** ולכן היא בדי"כ קבועה.
חישוב השראות לפי הגדרה:

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 : $\varepsilon = -L \dot{I}$
האנרגיה האגורה בסליל (או בכל רכיב בעל השראות): $U_L = \frac{1}{2} L I^2$

האנרגיה האגורה בשדה המגנטי: $U = \int \frac{B^2}{2\mu_0} dV$
 - 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 (משרן) במעגל: $V_L = L \dot{I}$
 הצד הגבוה הוא בנקודה שבה הזרם נכנס לסליל.

מעגלי RL טעינה:

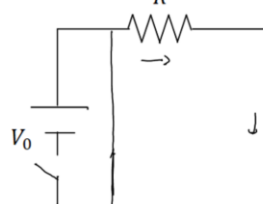


$$V_0 - IR - L \dot{I} = 0$$

$$I(t) = \frac{V_0}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

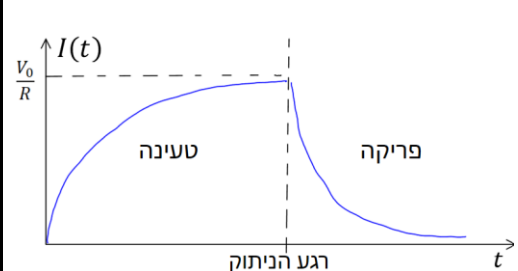
$$\tau = \frac{L}{R}$$

- סליל (או משרן) מתנהג בהתחלה כמו נתק ולאחר זמן רב כמו קצר.
פריקה:



$$-IR - L \dot{I} = 0$$

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



חיבור סלילים (משרנים) במעגל הוא כמו חיבור נגדים:
 בטור: $L_T = L_1 + L_2 + \dots$
 כאשר $V_T = V_1 = V_2 = \dots$ ו- $I_T = I_1 = I_2 = \dots$
 במקביל: $\frac{1}{L_T} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots$
 כאשר $V_T = V_1 = V_2 = \dots$ ו- $I_T = I_1 + I_2 + \dots$

השראות הדדית

השראות הדדית: $M_{1,2} = \frac{\Phi_1}{I_2}$
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 $M_{1,2}$ ולהסיק על $M_{2,1}$ (או להפך).
יחס המתחים בשנאי: $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{N_1}{N_2}$
 N הוא מספר הליפופים בכל צד.

משוואות מקסוול

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

2. $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$; $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$
 השטף מגנטי על משטח סגור תמיד אפס, אין מטען מגנטי.
 3. $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}$; $\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt}$
 מהמשוואה ניתן לקבל את חוק פאראדי $\varepsilon = -\dot{\Phi}_B$
 4. $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int \vec{j} \cdot d\vec{s} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$
חוק אמפר והתיקון של מקסוול (שנקרא גם זרם העתקה)

מעגלי זרם חילופין

מעגל LC
משוואת המעגל: $\frac{q}{C} + L \ddot{q} = 0$
 ו- $I = -\dot{q}$ (ניתן גם להגיע לאותה משוואה על הזרם)
 המשוואה היא משוואה של תנועה הרמונית פשוטה.

פיתרון: $q(t) = A \cos(\omega t + \phi)$; $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$
האנרגיה האגורה במעגל: $E = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} + \frac{1}{2} L I^2$ (האנרגיה הכוללת נשמרת)

מעגל RLC
משוואת המעגל: $L \ddot{q} + R \dot{q} + \frac{1}{C} q = 0$
 (ניתן גם להגיע לאותה משוואה על הזרם)
 המשוואה היא משוואה של תנועה הרמונית מרוסנת. נגדיר $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$
 ו- $\Gamma = \frac{R}{2L}$

הפתרון מתחלק לשלושה מקרים:
מקרה 1 - ריסון חזק: $\Gamma > \omega_0$
 $q(t) = A e^{-\lambda_1 t} + B e^{-\lambda_2 t}$
 $\lambda_{1,2} = \Gamma \pm \sqrt{\Gamma^2 - \omega_0^2}$

מקרה 2 - ריסון קריטי: $\Gamma = \omega_0$
 $q(t) = A e^{-\omega_0 t} + B t e^{-\omega_0 t}$
 בריסון קריטי קצב הדעיכה הוא הגבוה ביותר משלושת המקרים.

מקרה 3 - ריסון חלש: $\Gamma < \omega_0$
 $q(t) = A e^{-\Gamma t} \cos(\tilde{\omega} t + \phi)$
 $\tilde{\omega} = \sqrt{\omega_0^2 - \Gamma^2}$

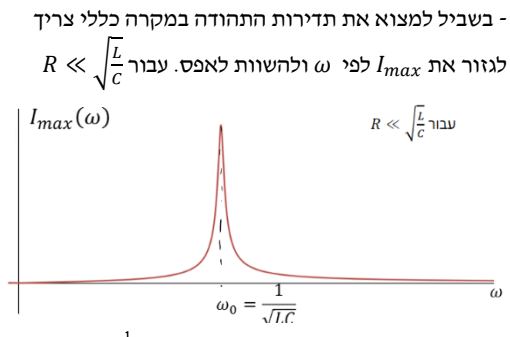
בכל המקרים האנרגיה של המעגל (שאגורה בסליל ובקבל) דועכת בקצב כפול: $E \propto e^{-2\Gamma t}$
 (בריסון חזק קבוע הדעיכה הוא λ במקום Γ)

מעגלים עם מקור מתח חילופין:
משוואת המעגל: $\ddot{I} + \frac{R}{L} \dot{I} + \frac{1}{LC} I = -\omega V_0 \sin(\omega t)$
 ו- $I = \dot{q}$ (ניתן גם להגיע למשוואה דומה עבור המטען)

המשוואה היא משוואה של תנועה הרמונית מאולצת.
פיתרון המשוואה:
 פתרון הומוגני הוא פתרון מעגל RLC והוא דועך בזמן.
 הפתרון הפרטי נקרא הפתרון של המצב העמיד (לאחר זמן רב) בדי"כ מתייחסים רק אליו.

התודה: מצב שבו $I_{max}(\omega)$ מקסימאלי.
 - שימו לב, I_{max} הוא אמפליטודה הזרם במעגל עם מקור בעל תדירות ω מסוימת. תהודה מדברת על איזה תדירות צריך שתהיה למקור כך שהאמפליטודה הזו תהיה הכי גבוהה שאפשר.
התודה: $I_{max}(\omega) = \frac{V_0}{\sqrt{\left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2 + R^2}}$
tan phi: $\tan \phi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$

תהודה: מצב שבו $I_{max}(\omega)$ מקסימאלי.
 - שימו לב, I_{max} הוא אמפליטודה הזרם במעגל עם מקור בעל תדירות ω מסוימת. תהודה מדברת על איזה תדירות צריך שתהיה למקור כך שהאמפליטודה הזו תהיה הכי גבוהה שאפשר.



מקבלים אמפליטודה מקסימאלית כאשר $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$
פתרון עם מספרים מורכבים:
 אם כל המשתנים הם פונקציות מהצורה $A \cos(\omega t + \phi)$ והמשוואות שלנו לינאריות. אז יותר נוח לעבוד עם מספרים מורכבים. כך ש:
 $I(t) = I_0 \cos(\omega t + \phi) = \text{Re}\{\tilde{I}(t)\}$
 $\tilde{I}(t) = I_0 e^{i(\omega t + \phi)}$

(בדרי"כ לא רושמים את הגל) בעבודה עם מספרים מורכבים אפשר להוריד את התלות בזמן
פאזור: תיאור של המספר המורכב באמצעות וקטור במערכת דו מימדית. הפאזור מסתובב בזמן אבל בדרי"כ מסתכלים רק על הפאזור ב- $t=0$

עכבה Impedance: $Z = \frac{\tilde{V}}{\tilde{I}}$
 תכונה שתלויה רק במבנה (קבועה כל עוד המבנה קבוע).
הפאזה של העכבה היא הפאזה של המתח ביחס לזרם ברכיב: $\phi_z = \phi_v - \phi_I$
הגודל של העכבה: $|Z| = \frac{V_{max}}{I_{max}}$

הרכיב	העכבה של הרכיב Z	הפאזה של המתח ביחס לזרם ברכיב
נגד	R	המתח והזרם בנגד הם באותה הפאזה
סליל	$i\omega L$	בסליל המתח מקדים את הזרם ב $\frac{\pi}{2}$
קבל	$\frac{1}{i\omega C}$	בקבל המתח מפגר אחרי הזרם ב $\frac{\pi}{2}$

ניתן לחבר עכבות בדיוק כמו חיבור של נגדים ולקבל את העכבה הכוללת של המעגל: $\tilde{V}_s = Z_T \tilde{I}_s$
 $\tilde{V}_s$ ו- $\tilde{I}_s$ הם הזרם והמתח של המקור (בייצוג המורכב).
ערכי RMS (ממוצע של ריבוע הגודל בזמן): $I_{RMS} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$; $V_{RMS} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}}$

הספק רגעי: $P(t) = V(t)I(t)$
 לשם לב שההספק הרגעי הוא לא גודל לינארי ולכן אי אפשר לחשב אותו באמצעות הייצוג המורכב של המתח והזרם.

הספק ממוצע: $\bar{P} = \frac{V_{max} I_{max}}{2} \cos \phi = V_{RMS} I_{RMS} \cos \phi$
 כאשר ϕ היא הפאזה של המתח ביחס לזרם.
 $\cos \phi$ הוא מקדם/גורם ההספק. מצביע על ניצול האנרגיה במעגל.

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 $\frac{1}{c^2} = \mu_0 \varepsilon_0$
 - למשוואות מגיעים ממשוואות מקסוול.
 - המשוואה מתקיימת עבור כל רכיב בנפרד:

$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d^2 \vec{E}}{dt^2} \Rightarrow \vec{\nabla}^2 E_x = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d^2 E_x}{dt^2}$; $\vec{\nabla}^2 E_y = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d^2 E_y}{dt^2}$; כנל $\vec{\nabla}^2 E_z = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d^2 E_z}{dt^2}$
 - תזכורת לאפליסאן: $\vec{\nabla}^2 E_i = \frac{\partial^2 E_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_i}{\partial z^2}$
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.
 $\vec{k} \cdot \vec{r} = k_x x + k_y y + k_z z$

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

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:

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

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:

$E = |\vec{p}|c = h\nu$

ν היא התדירות ו- $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 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: $(p_x, p_y, p_z, \frac{E}{c})$

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

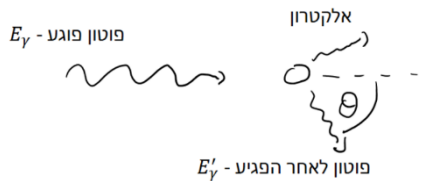
$p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - (\frac{E}{c})^2 = \text{const}$

- 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.



פוטון לאחר הפגיעה: E'_γ

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

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 .

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

$\vec{a}_{||}, \vec{a}_{\perp}$ הרכיב המאונך והמקביל של התאוצה למהירות

גודל הרכיב המקביל של התאוצה:

$a_{||} = \dot{v}$

טרנספורמציה של הכוחות:

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

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

טרנספורמציה הפוכה:

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

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

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 .

איך למצוא שדה מגנטי מחשמלי ולהפך:

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

צורת הגל במרחב:

- השדה החשמלי תמיד מאונך לשדה המגנטי ושניהם תמיד מאונכים לכיוון התקדמות הגל.

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

$\omega = c|k|$

יחס הדיספרסיה:

היחס מתקבל מהצבה של הפתרון במשוואת 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- $\vec{k}$

יחסות פרטית

GOOL

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) שעוברת טרנספורמציה.

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

γ_0 תמיד גדולה מ-1

טרנספורמציות לורנץ למיקום והזמן:

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

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

טרנספורמציה הפוכה:

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

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

- 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: שינוי האורך ממערכת המנוחה

$$l = \frac{l_0}{\gamma_0}$$

(העצמית) למערכת נעה

התארכות הזמן: שינוי הזמן ממערכת המנוחה (העצמית)

$\Delta t = \gamma_0 \tau$ (למערכת נעה)

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 היחסותי:

$$T = \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} \tau$$

זמן המחזור של הגל:

$$\lambda = \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} \lambda'$$

אורך הגל:

$$f = \sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}} f'$$

תדירות הגל:

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

τ, f', λ' - הזמן, התדירות ואורך הגל במערכת העצמית

טרנספורמציות לורנץ למהירויות:

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

אברציה - שינוי זווית המהירות:

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