כוחות:

כללי: $\vec{F}=-\nabla U(x)$

חוק קולון: $\vec{F}=\frac{q_1 q_2}{|\vec{r}_2-\vec{r}_1|^3}(\vec{r}_2-\vec{r}_1)$

כח לורנץ: $\vec{F}=\vec{E}\cdot q$ $\quad \vec{F}_{EM}=q(\vec{E}+\frac{1}{c}\vec{V}\times\vec{B})$

כח מגנטי על מוט: $\vec{F}=\frac{L}{c}\vec{I}\times\vec{B}$

" " על מוט עקום: $\vec{F}=\frac{I}{c}\vec{dl}\times\vec{B}$

כח בין שני תיילים: $\vec{F}=\frac{2I_1I_2}{rc^2}l$

כאשר נתונים λ_i ו- V_i ($\vec{V}_1,\vec{V}_2\ll c$):

$\frac{F_E}{\partial l}=\frac{2\lambda_1\lambda_2}{r}$ $\quad \frac{F_M}{\partial l}=\frac{F_E}{\partial l}\cdot\frac{V_1V_2}{c^2}$

זרמים באותו כיוון – משיכה.
זרמים בכיוונים מנוגדים – דחיה.

קיבול:

כללי: $Q=C\Delta\varphi=CV$

קבל לוחות: $C=\frac{A}{4\pi d}$ $\quad V=Ed$

$U_p=\frac{QV}{2}=\frac{Q^2}{2C}=\frac{CV^2}{2}$

קבל כדורי: $C=R$

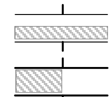
שתי קליפות $(R_1>R_2)$: $C=\frac{R_1R_2}{R_1-R_2}$

קבל גלילי $(b>a)$: $C=\frac{l}{2\ln\left(\frac{b}{a}\right)}$

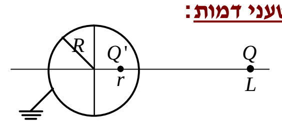
קבל עם חומר דיאלקטרי:

שקול לקבלים בטור

" לקבלים במקביל



מטענים דמות:



$Q'=\frac{-QR}{L}$ $\quad r=\frac{R^2}{L}$

שדה חשמלי:

קווי השדה:
1. מתחילים ב-(+) לכיוון ה-(-).
2. משיק לשדה הוא הכיוון בכל נק'.
3. השדה מכוון בכיוון מורד הפוטנציאל.

מטענים נקודתיים: $\vec{E}(\vec{r})=\sum_{i=1}^{n}\frac{q_i}{|\vec{r}-\vec{r}_i|^3}(\vec{r}-\vec{r}_i)$

פיזור מטען: $\vec{E}(\vec{r})=\int_{V'}\frac{\rho(\vec{r}')(\vec{r}-\vec{r}')}{|\vec{r}-\vec{r}'|^3}dV'$

חוק גאוס: $\phi=\oint_S\vec{E}\cdot\vec{da}=4\pi kQ_{in}=4\pi\int_V\rho_{(\vec{r})}dV$

חוזק מקורות: $div\vec{E}(\vec{r})=4\pi\rho(\vec{r})$

שדה אלקטרוסטטי: $\nabla\times\vec{E}=0$

קליפה כדורית: $\vec{E}(r)=\begin{cases}\frac{Q}{r^2} & r>R\\ 0 & r<R\end{cases}$

כדור מלא: $\vec{E}(r)=\begin{cases}\frac{Q}{r^2} & r>R\\ Q\frac{r}{R^3} & r<R\end{cases}$

דיסקה טעונה: $\vec{E}(r)=2\pi\sigma\left(1-\frac{z}{\sqrt{z^2+r^2}}\right)\hat{z}$

שדה של תיל: $\vec{E}(r)=\frac{2\lambda}{r}$

שדה של לוח: $\vec{E}=2\pi\sigma$

קפיצה בשדה: $\Delta\vec{E}_\perp=\vec{E}_{out}-\vec{E}_{in}=4\pi\sigma=\frac{I}{A}(\frac{1}{\sigma_2}-\frac{1}{\sigma_1})$

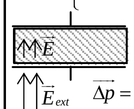
שדה בין לוחות קבל: $\vec{E}=4\pi\sigma$

שדה על שפת מוליך (בפנים 0): $\vec{E}_\perp=4\pi\sigma\hat{n}$

גליל אינסופי: $\vec{E}(r)=\begin{cases}\frac{2\pi\rho r^2}{r} & r>R\\ 2\pi\rho r & r<R\end{cases}$

שדה של טבלה: $\vec{E}(\vec{x})=\begin{cases}2\pi\sigma_{in}\frac{\vec{x}}{x} & |x|>\frac{d}{2}\\ 4\pi\rho x\hat{x} & |x|<\frac{d}{2}\end{cases}$

דיאלקטרי ופולריזציה:



קשר בין השדות:

$\vec{E}=\frac{1}{\varepsilon}\vec{E}_{ext}=\frac{1}{\varepsilon}\vec{D}$

$\vec{\Delta p}=d\Delta Q'$

$\vec{P}=\frac{\vec{\Delta p}}{\Delta v}=\chi\vec{E}=\sigma'$

מקדם דיאלקטרי: $\varepsilon=1+4\pi\chi$

$\vec{E}'=-4\pi\vec{p}$

$\vec{E}=\vec{E}_{ext}+\vec{E}'$ $\quad \nabla\cdot(\varepsilon\vec{E})=4\pi\rho_{ext}$

אנרגיה:

אנרגיה: $U=\sum_{i>j}\sum_{i=1}^{n}\frac{q_iq_j}{r_{ij}}=\frac{1}{8\pi}\int_V E^2dV=\int I^2Rdt$

קליפה כדורית: $U=\frac{Q^2}{2R}$ $\quad$ כדור מלא: $U=\frac{3Q^2}{5R}$

אנרגיה האצורה בנפח עם מטען: $U=\frac{1}{2}\int_V\rho(\vec{r})\cdot\varphi(\vec{r})dv$

משוואת פואסון: $\nabla^2\varphi=-4\pi\rho$

משוואת לפלס: $\nabla^2\varphi=0$

פוטנציאל:

אנרגיה בהבאת מטען מאינסוף לנק': $W=q\cdot V=q\cdot\varphi$

קשר בין שדה לפוטנציאל: $\vec{E}=-grad\varphi=-\nabla\varphi$

הפרש פוטנציאלים: $\varphi(r_2)-\varphi(r_1)=-\int_{r_1}^{r_2}\vec{E}\vec{dl}$

מתח בין לוחות: $V=\int d\varphi=\int-\vec{E}\vec{ds}$

של מטען נקודתי: $\varphi(\vec{r})=\frac{Q}{r}$

התפלגות דיסקרטית: $\varphi(\vec{r})=\sum_{i=1}^{n}\frac{q_i}{|\vec{r}-\vec{r}_i|}$

התפלגות רציפה: $\varphi(\vec{r})=\int_V\frac{\rho(\vec{r}')}{|\vec{r}-\vec{r}'|}dV$

בכדור מוליך: $\varphi(r)=\begin{cases}\frac{Q}{r} & r>R\\ \frac{Q}{R} & r<R\end{cases}$

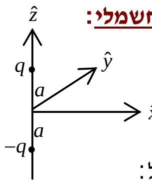
בכדור מלא: $\varphi(r)=\begin{cases}\frac{Q}{r} & r\ge R\\ \left(\frac{3Q}{2R}-\frac{Qr^2}{2R^3}\right) & r<R\end{cases}$

הפרש פוטנציאלים של תיל: $\varphi(r_2)-\varphi(r_1)=2\lambda\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)$

הפרש פוטנציאלים של לוח: $\Delta\varphi(x_{21})=2\pi\sigma(x_2-x_1)$

פוטנציאל על מוליך: $\varphi=Const$

דיפול חשמלי:



$\vec{P}=2aq\hat{z}$

$|\vec{r}|>>a$

פוטנציאל:

$\varphi(\vec{r})=\frac{\vec{p}\cdot\vec{r}}{r^3}=\frac{qa\cos\theta}{r^2}$

שדה:

$\vec{E}_r=\frac{2\vec{p}\cdot\vec{r}}{r^4}\hat{r}$ $\quad \vec{E}_\theta=\frac{\vec{p}\times\vec{r}}{r^4}\hat{\theta}$

$\vec{E}=p\left(\frac{3xz}{r^5},\frac{3yz}{r^5},\frac{3z^2-r^2}{r^5}\right)$

משוואות מקסוול:

$\nabla\cdot\vec{B}=0$ $\quad \nabla\cdot\vec{E}=4\pi\rho$

$\nabla\times\vec{E}=-\frac{1}{c}\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$

$\nabla\times\vec{B}=\frac{4\pi}{c}\vec{J}+\frac{1}{c}\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}$

בריק: $\nabla\cdot\vec{B}=\nabla\cdot\vec{E}=0$

$\nabla\times\vec{E}=-\frac{1}{c}\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$

$\nabla\times\vec{B}=\frac{1}{c}\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}$

$\begin{Bmatrix}\nabla^2E=\frac{1}{c^2}\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}\\ \nabla^2B=\frac{1}{c^2}\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}\end{Bmatrix}$

זרם העתק:

מתוך משוואת מקסוול מקבלים: $\nabla\times\vec{B}=\frac{4\pi}{c}\left(\vec{J}+\frac{1}{4\pi}\frac{d\vec{E}}{dt}\right)$

זרם העתק וצפיפות זרם ההעתק: $\vec{J}_d=\frac{1}{4\pi}\frac{d\vec{E}}{dt}=\frac{1}{4\pi\sigma}\frac{d\vec{J}}{dt}$ $\quad I_d=\frac{1}{4\pi}\frac{d\phi_E}{dt}$

שדה מגנטי שנובע מזרמים בעלי סימטריה כדורית הוא $\vec{B}=0$.
בקבל אינסופי עם דיאלקטרן (עם מוליכות σ) מתקבל $\vec{B}=0$ (בקבל סופי יש $\vec{B}$ בקצוות)

השראה אלקטרומגנטית:

שטף אלקטרומגנטי: $\Phi_{(s)}=\int_s\vec{B}\cdot\vec{da}$

כא"מ: $\varepsilon=\frac{1}{q}\oint\vec{f}\cdot\vec{ds}=IR=-\frac{1}{c}\frac{d\Phi}{dt}$

הכיוון נקבע עפ"י חוק לנץ: הזרם שהכא"ם יוצר מתנגד לשינוי בשטף המגנטי ע"י יצירת שדה בכיוון המתאים.

השראה הדדית:

$\varepsilon_{21}=-\frac{1}{c}\frac{d}{dt}(\Phi_{21})$

$\varepsilon_{21}=-M_{21}\frac{dI_1}{dt}$ $\quad M_{21}=\left|\frac{\frac{1}{c}\frac{d}{dt}(\Phi_{21})}{\frac{dI_1}{dt}}\right|=M_{12}$

השראה עצמית:

$\varepsilon_{11}=-L\frac{d}{dt}(I_1)$

של סולונואיד: $L=\frac{4\pi^2R^2n^2l}{c^2}$ $\quad$ של טורוס: $L=\frac{2N^2h}{c^2}\ln\left(\frac{b}{a}\right)$ $\quad (b>a)$

מומנט מגנטי:

$\vec{A}$ - ווקטור שטח הלולאה (עפ"י בורג ימני).

$\vec{N}=\vec{r}\times\vec{F}$

$\vec{m}\triangleq\frac{I}{c}\vec{A}$ $\quad \vec{N}=\vec{m}\times\vec{B}$

שדה של טבעת נושאת זרם על ציר $\hat{z}$:

$B_z(z)=\frac{2\pi R^2I}{c(R^2+z^2)^{3/2}}$ $\quad B_z(0)=\frac{2\pi I}{cR}$

של גזרת טבעת: $B_z(0)=\frac{\theta I}{cR}$

פוטנציאל ווקטורי "מכוייל קולון": $\vec{A}=-\frac{I}{c}\ln\left(\frac{x^2+y^2}{R^2}\right)\hat{z}$

שדה מגנטי של סולונואיד בעל n ליפופים ליח' אורך (בחוץ $\vec{B}=0$):

סופי: $B_z=\frac{2\pi n}{c}I(\cos\theta_1-\cos\theta_2)$

אינסופי: $B_z=\frac{4\pi nI}{c}$ $\quad nI=Jdr\left[\frac{I}{cm}\right]$

שדה מגנטי בתוך טורוס בעל N ליפופים (בחוץ $\vec{B}=0$):

$\vec{B}_{(r)}=\frac{2NI}{cr}\hat{\theta}$

שדה מגנטי קבוע מקיים: $\oint\vec{B}\cdot\vec{dl}=0$

שדה (במעבדה) של לוח טעון הנע במהירות βc:

$\vec{B}=2\pi\beta\sigma\hat{z}$

יריעת זרם ($\Im$ צפיפות זרם אורכית):

$\Im=J\cdot\Delta$ $\quad$ Δ - רוחב היריעה

$|B_+|=|B_-|=\frac{2\pi}{c}\Im$

גורמת לקפיצה של $\frac{4\pi}{c}\Im$ ב- $B_{\parallel}$

לחץ מגנטי על יריעת זרם: $\frac{F}{da}=\frac{B^2}{8\pi}$

שדה מגנטי:

קווי שדה:
קווים סגורים.
שדה חסר מקורות $\nabla\cdot\vec{B}=0$

חוק אמפר (לזרמים עמידים בלבד):

$\oint\vec{B}\cdot\vec{dl}=\frac{4\pi}{c}\int\vec{J}\cdot\vec{da}$ $\quad \nabla\times\vec{B}=\frac{4\pi}{c}\vec{J}$

פוטנציאל ווקטורי: $\nabla\times\vec{A}=\vec{B}$

$\nabla\times(\nabla\times\vec{A})=\nabla(\nabla\cdot\vec{A})-\nabla^2\vec{A}=\frac{4\pi}{c}\vec{J}$

כאשר $\nabla\cdot\vec{A}=0$ הפוטנציאל נקרא "מכוייל קולון" ומתקיים:

$\nabla^2\vec{A}=-\frac{4\pi}{c}\vec{J}$ $\quad \vec{A}(\vec{r})=\frac{1}{c}\int\frac{\vec{J}(\vec{r})}{|\vec{r}-\vec{r}'|}dV$

חוק ביו-סבר: $\vec{dB}=\frac{I}{cr^3}\vec{dl}\times\vec{r}$

אנרגיה מגנטית: $U_M=\int_V\frac{B^2}{8\pi}dV$

תיל נושא זרם: $\vec{B}(r,\theta)=\frac{2I}{cr}\hat{\theta}$

" (הצגה קרטזית), זרם בכיוון $\hat{z}$:

$\vec{B}=\frac{2I}{c(x^2+y^2)}(-y\hat{x}+x\hat{y})$

אלקטרודינמיקה:

צפיפות זרם: $\vec{J}=\sum n_iq_i\vec{V}_i$

זרם: $I=\int_A\vec{J}\cdot\vec{da}=\frac{dQ}{dt}$

זרם בתיל: $\partial q=Anq\cdot\partial l$

$\vec{J}=nq\vec{V}=\rho\vec{V}$ $\quad \vec{\Im}=\sigma\vec{V}$

$\vec{I}=nqA\vec{V}=\lambda\vec{V}$

משוואת הרציפות (שימור מטען): $\frac{d\rho}{dt}+\nabla\vec{J}=0$

חוק אוהם: $\vec{J}=\sigma\vec{E}$

$V=IR$

במוליך גלילי: $\Delta\varphi=\left(\frac{d}{\sigma A}\right)I$

קשר בין מוליכות להתנגדות סגולית: $\sigma=\frac{1}{\rho}$

זרם בטבעת מסתובבת: $I=\frac{Q}{T}=\frac{Q\cdot\omega}{2\pi}$

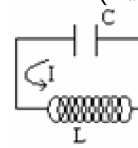
התנגדות של מוליך: $R=\rho\frac{L}{S}=\frac{1}{\sigma}\frac{L}{S}$

התנגדות: $R=\int_{r_1}^{r_2}\frac{dr}{\sigma(r)\cdot A(r)}$

R של דיאלקטרון הכלוא בין שני כדורים $(b>a)$: $\frac{1}{4\pi\sigma}\left(\frac{b-a}{ab}\right)$

מעגלי RLC:

מעגל CL (אוסצילטור הרמוני):



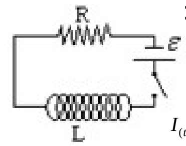
$\frac{Q}{C} = L\frac{dI}{dt} \quad I = -\frac{dQ}{dt}$

$\frac{d^2Q}{dt^2} = -\frac{1}{LC}Q$

$Q_{(t)} = Q_0\cos(\omega t + \varphi_0)$

ניתן לשלוט על ω דרך Q ו L . $\quad \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

מעגל LR (נגד–משרן):

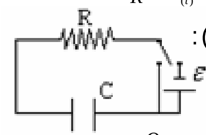


$L\frac{dI}{dt} + RI = \varepsilon$

בטעינה: $I_{(t)} = \frac{\varepsilon}{R}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$

פריקה: $\tau = \frac{L}{R} \quad I_{(t)} = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$

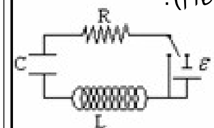
מעגל RC (נגד–קבל):



פריקה: $Q_{(t)} = Q_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$

בטעינה: $\tau = RC \quad Q_{(t)} = \varepsilon_0 \cdot C\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$

מעגל CRL (קבל-נגד-משרן):



$Q_{(t)} = Q_0 e^{-\frac{R}{2L}t}\cdot\cos(\omega_1 t + \varphi)$

$\omega_1^2 = \frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}$

אם הנגד מאוד גדול ($\omega_1^2 < 0$) קורה ריסון יתר – אין תנודות.

כללי למעגלים:

הספק חשמלי: $P = V\cdot I = I^2R = \frac{V^2}{R}$

חיבור נגדים בטור: $I = I_1 = I_2 = ...$ $\quad R = R_1 + R_2 + ...$ $\quad V = V_1 + V_2 + ...$

חיבור נגדים במקביל: $I = I_1 + I_2 + ...$ $\quad \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + ...$ $\quad V = V_1 = V_2 = ...$

שני נגדים במקביל: $R_T = \frac{R_1\cdot R_2}{R_1 + R_2}$

n נגדים זהים במקביל: $R_T = \frac{R}{n}$

חיבור קבלים בטור: $V = V_1 + V_2 +$ $\quad \frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + ...$ $\quad Q = Q_1 = Q_2 = ...$

חיבור קבלים במקביל: $V = V_1 = V_2 = ...$ $\quad C_T = C_1 + C_2 + ...$ $\quad Q = Q_1 + Q_2 + ...$

אנרגיה בקבל: $E_P = \frac{Q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2} = \frac{QU}{2}$

אנרגיה במשרן: $E_P = \frac{I^2L}{2}$

עבודה: $E = W = \int Pdt = q(\varphi_1 - \varphi_2)$

חוק העניבה: $\sum IR = \sum \varepsilon$

חיבור שני גלים בעלי תדירויות שונות:

$\psi = A\sin(k_1x - \omega_1 t) + A\sin(k_2 x - \omega_2 t)$

כאשר ניקח תדירויות קרובות יווצרו פעימות: $\psi = 2A\cos\left(\frac{\Delta k}{2}x - \frac{\Delta\omega}{2}t\right)\sin(\bar{k}x - \bar{\omega}t)$

$\Delta k << \bar{k}$ $\quad \Delta\omega << \bar{\omega}$ $\quad \lambda_p << \lambda_g$

$\lambda_p = \frac{2\pi}{\bar{k}} \quad \lambda_g = \frac{2\pi}{\Delta k}$

$V_g = \frac{\Delta\omega}{\Delta k} \quad V_p = \frac{\bar{\omega}}{\bar{k}}$

$\begin{cases} \Delta k = k_1 - k_2 \\ \Delta\omega = \omega_1 - \omega_2 \\ \bar{k} = \frac{k_1 + k_2}{2} \\ \bar{\omega} = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \end{cases}$

טרנספורמציית לורנץ:

S - מערכת המעבדה

'S - מערכת נעה יחסית ל S

$x' = \gamma(x - \beta ct) \quad x = \gamma(x' + \beta ct)$

$y' = y \quad y = y'$

$z' = z \quad z = z'$

$ct' = \gamma(ct - \beta x) \quad ct = \gamma(ct' + \beta x)$

$\beta = \frac{v}{c} \quad \gamma = (1 - \beta^2)^{-\frac{1}{2}}$

טרנספורמציה של מהירות: $V_x' = \frac{U_x - v}{1 - \frac{U_x v}{c^2}} \quad U_x = \frac{V_x' + v}{1 + \frac{V_x' v}{c^2}}$

התארכות הזמן: $\Delta t = \gamma\tau$

τ - זמן עצמי (הקצר ביותר)

התקצרות האורך: $l = \frac{l_0}{\gamma}$

l_0 - אורך עצמי (הארוך ביותר)

טרנספורמציה של כוחות: $F'_\perp = \frac{1}{\gamma}\cdot F_\perp^{\,p}$ $\quad F'_\parallel = F_\parallel^{\,p}$

p - מערכת מנוחת החלקיק

טרנספורמציה של זרמים וצפיפויות:

$\lambda = \rho A$

$$\begin{pmatrix} c\rho' \\ J_x' \\ J_y' \\ J_z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & \beta\gamma & 0 & 0 \\ -\beta\gamma & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} c\rho \\ J_x \\ J_y \\ J_z \end{pmatrix}$$

טרנספורמציית של שדות:

$\vec{E}_\parallel' = \vec{E}_\parallel$

$\vec{E}_\perp' = \gamma(\vec{E}_\perp + \vec{\beta}\times\vec{B}_\perp)$

$\vec{B}_\parallel' = \vec{B}_\parallel$

$\vec{B}_\perp' = \gamma(\vec{B}_\perp - \vec{\beta}\times\vec{E}_\perp)$

$\vec{E}_\parallel = \frac{\vec{E}\cdot\vec{\beta}}{\beta}\hat{\beta} \quad \vec{E}_\perp = \vec{E} - \vec{E}_\parallel$

$\vec{B}_\parallel = \frac{\vec{B}\cdot\vec{\beta}}{\beta}\hat{\beta} \quad \vec{B}_\perp = \vec{B} - \vec{B}_\parallel$

$\vec{E}\cdot\vec{B} = \vec{E}'\cdot\vec{B}'$

$E^2 - B^2 = E'^2 - B'^2$

מסקנות:

1. אם E=B במערכת כלשהי אז E'=B' בכל מערכת.
2. אם E ניצב ל-B במערכת אחת הוא ניצב בכל מערכת.
3. אם E>B במערכת אחת, היחס משמר בכל מערכת אחרת, ובנוסף לא ניתן למצוא מע' שבה E=0, באופן סימטרי עבור B.
4. אם קיימת מערכת בה B=0 אז בכל מערכת אחרת: $\vec{B}' = -\vec{\beta}\times\vec{E}'$.
5. אם קיימת מע' בה E=0 אז בכל מע': $\vec{E}' = \vec{\beta}\times\vec{B}'$.

שדה של מטען נע:

שינוי בשדה של מטען נק' במעבר ממערכת S (מנוחה) ל-'S (תנועה בכיוון x):

במערכת S (שדה רדיאלי, Q בראשית):

$E_x(x,y) = \frac{Qx}{(x^2+y^2)^{1.5}} \quad E_z(x,y) = \frac{Qy}{(x^2+y^2)^{1.5}}$

במערכת 'S (ב t=0 המטען בראשית):

$E'_x(x',y') = \frac{\gamma Q(x' - vt)}{\left[(\gamma(x'-vt))^2 + (y')^2\right]^{1.5}}$

$E'_y(x',y') = \frac{\gamma Q y'}{\left[(\gamma(x'-vt))^2 + (y')^2\right]^{1.5}}$

$E'(r',\theta') = \sqrt{E'^2_x + E'^2_y} = \frac{Q}{r^2}\cdot\frac{1-\beta^2}{(1-\beta^2\sin^2\theta')^{1.5}}$

במעבר למערכת בה המטען מפיץ שדה של מטען נע מתרחשים שני שינויים:

1. התחזקות הרכיבים הניצבים בפקטור γ .
2. התארכות בפקטור γ של המרחקים המקבילים לתנועה.

שדה של פי זמן (ניתן למצוא בשתי דרכים):

1. מוצאים היכן נמצא המטען בזמן t ומעתיקים לשם את הראשית.
2. לפי:

$$\vec{E}(x,z,t) = \frac{q}{\left[(x-\beta ct)^2 + z^2\right]}\cdot\frac{1-\beta^2}{\left[1 - \frac{\beta^2z^2}{(x-\beta ct)^2+z^2}\right]^{3/2}}$$

שינוי בשדה של לוחות מקבילים אופקיים: $\vec{E}'_\perp = \gamma\vec{E}_\perp$

שינוי זווית שדה בעת עצירה מיידית של מטען נע (φ_0 מחוץ לכדור, θ_0 בתוכו): $\tan\varphi_0 = \gamma\tan\theta_0$

שינוי בשדה כאשר החלקיק עוצר בזמן סופי (a - תאוצה, τ - זמן עצירה), השדה בתוך הדופן:

$E_r = \frac{Q}{(C\tau)^2}$

$E_\theta = \frac{Q\sin\theta a}{C^2R}$

חישובי שטף דרך כיפות של זוויות θ_0 ו- φ_0 :

$$\phi(\vec{E}_{radial}) = \int_0^{\theta_0}\frac{q}{r^2}\underbrace{(2\pi r^2\sin\theta d\theta)}_{ds} = 2\pi q\int_0^{\theta_0}\sin\theta d\theta$$

$$\phi(\vec{E}_{relative}) = \int_0^{\varphi_0}\frac{q(1-\beta^2)}{r^2(1-\beta^2\sin^2\varphi)^{3/2}}\underbrace{(2\pi r^2\sin\varphi d\varphi)}_{ds} = 2\pi q\left[1 - \frac{\cos\varphi_0}{\sqrt{1-\beta^2\sin^2\varphi_0}}\right]$$

גלים:

משוואת הגלים (במימד אחד ובאופן כללי):

$\frac{\partial^2\Psi}{\partial t^2} = V_p^2\frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2} \quad \nabla^2\Psi_{(\vec{r},t)} = \frac{1}{V_p^2}\frac{\partial^2\Psi}{\partial t^2}$

פתרון כללי: $\Psi_{(x,t)} = f(x - Vt) + g(x + Vt)$

A - אמפליטודה

λ - אורך גל

T - זמן מחזור

ω - תדירות זוויתית

f - תדירות

k - מספר הגל

$\frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{T} = f = \frac{V_p}{\lambda} = \frac{\omega}{\lambda k} = \frac{V_p k}{2\pi}$

$k\cdot\lambda = 2\pi$

בגלים רב מימדיים: $\omega = |\vec{k}|V_p \quad |\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}$

המרת מרחק להפרש פאזה: $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}x = kx$

מהירות פאזה במיתר (T_0 מתיחות, μ צפיפות מסה ליח' אורך): $V_{ph} = \sqrt{T_0/\mu}$

גל כדורי: $\psi(\vec{r},t) = A\frac{\cos(\vec{k}\cdot\vec{r} - \omega t)}{\vec{k}\cdot\vec{r}}$

אנרגיה קינטית בגל עומד במיתר סופי: $E_k = \int_0^L \frac{1}{2}\mu\left(\frac{dy}{dt}\right)^2 dx$

גלים רצים:

מהצורה: $\Psi_{(x,t)} = A\cos\left[k\left(x - V_pt\right)\right] \quad \Psi_{(x,t)} = f(x \pm V_pt)$

$\Psi_{(x,t)} = A\sin\left[k\left(x - V_pt\right)\right] \quad e^{\pm ix} = \cos x \pm i\sin x$

גלים הרמוניים: $\Psi_{(x,t)} = A\sin(kx - \omega t + \varphi_0)$

גלים מישוריים: $\Psi_{(\vec{r},t)} = A\sin\left(\hat{n}\cdot\vec{r} - Vt\right)$

הצגה קומפלקסית: $A\cos(kx \pm \omega t) = \text{Re}\left[Ae^{i(kx\pm wt)}\right]$

שטף אנרגיה של גל הרמוני חד מימדי מתקדם: $\langle S(x,t)\rangle = \frac{1}{2}TVk^2|A|^2 = \frac{1}{2}T\left(\frac{\omega^2}{V}\right)|A|^2$

גלים עומדים:

חיבור גל הולך עם גל חוזר נותן גל עומד:

$A\sin(kx - \omega t) + A\sin(kx + \omega t) = 2A\sin(kx)\cos(\omega t)$

מהצורה: $\Psi_{(x,t)} = X_{(x)}T_{(t)}$

$\frac{d^2X}{dx^2} = -\frac{\omega^2}{V_p^2}X$

$X_{(x)} = A\sin(kx) + B\cos(kx)$

$\frac{d^2T}{dt^2} = -\omega^2 T$

$T_{(t)} = C\cos(\omega t + \varphi)$

תנאי שפה: $\begin{cases} x = 0 \Rightarrow X = 0 \\ x = L \Rightarrow X = 0 \end{cases}$

$\begin{cases} B = 0 \\ A\sin(kL) = 0 \end{cases} \Rightarrow kL = n\pi$

$(n = 0,1,2..)$

אופן תנודה נורמלי: $\Psi(x,t) = A_n\sin(k_nx)\cdot\cos(\omega_nt)$

מתנאי שפה: $k_nL = n\pi \quad \lambda_n = \frac{2L}{n} \quad k_n = \frac{n\pi}{L}$

תדירות יסודית: $f_1 = \frac{V}{2L}$

$f_n = n\cdot f_1$

$V = \frac{\omega_n}{k_n} \quad f_n = \frac{V}{2\pi}k_n = \frac{V}{2L}n$

דיספרסיה – כאשר V_{ph} תלויה באורך הגל:

$\omega = kV_{ph}(k)$

עוצמת הגל (שטף ממוצע):

$\langle P \rangle$ - הספק ממוצע $\quad I = \frac{\langle P \rangle}{a} = \langle \rho_E \rangle \cdot V_{ph}$

$\langle \rho_E \rangle$- צפיפות אנרגיה $\quad a$ - יחידת שטח

הספק רגעי בגל העובר במיתר חד-מימדי: $P_{(x,t)} = -\frac{\partial \psi}{\partial t}\cdot\frac{\partial \psi}{\partial x}T_0$

הספק ממוצע: $\langle P \rangle = \frac{1}{T}\int_0^T P_{(x,y)}dt$

בגל הרמוני: $P_{(x,t)} = T_0\omega kA^2\cos^2(kx-\omega t+\varphi)$

$\langle P_{(x,t)} \rangle = \frac{1}{2}T_0\omega kA^2$

מיתר מתנדנד: $\rho_E = \frac{1}{2}\mu\omega^2A^2 \quad V_{ph}^{\ 2} = \frac{T_0}{\mu}$

$\omega = V_{ph}\cdot k \qquad I = \rho_E \cdot V_{ph}$

אם $\frac{1}{2}\frac{T_0\omega k}{a}$ קבוע משני $\quad I = \frac{\langle P \rangle}{a} = \frac{1}{2}\frac{T_0\omega kA^2}{a}$

צידי המעבר נגדיר גורם העברה וגורם החזרה: $\quad T = \frac{I_T}{I_T} \qquad R = \frac{I_R}{I_T}$

ומתקיים $R + T = 1$.

אי רציפות בתווך:

נדרוש ב x=0:

1. רציפות הפונקציה (אחרת המיתר יקרע).
2. רציפות הנגזרת (כדי שישאר איזון בכח).

נקבל שלושה גלים:

גל פוגע $\quad \psi_I = A_Ie^{i(\omega t - k_1x)}$

גל חוזר $\quad \psi_R = A_Re^{i(\omega t + k_1x)}$

גל עובר $\quad \psi_T = A_Te^{i(\omega t - k_2x)}$

המקדמים:

$B_T = \frac{A_T}{A_I} = \frac{2k_1}{k_1+k_2} = \frac{2V_{P2}}{V_{P1}+V_{P2}}$

$B_R = \frac{A_R}{A_I} = \frac{k_1-k_2}{k_1+k_2} = \frac{V_{P2}-V_{P1}}{V_{P1}+V_{P2}}$

אם $\frac{A_R}{A_I} = 1$ וזהו גל עומד.

כאשר גל פוגע בקיר $\mu \to \infty$, הגל החוזר הוא בהיפוך פאזה לגל המקורי (הוספת מינוס חיצוני).

קצה משוחרר רק מחזיר: $\quad \psi_R(x,t) = \psi_i(-x,t) \quad \varphi_R = \pi - \varphi_i$

קצה תפוס מחזיר והופך: $\quad \psi_R(x,t) = -\psi_i(-x,t) \quad \varphi_R = -\varphi_i$

גלים אלקטרומגנטיים:

מהצורה: $\quad \vec{E}_{(\vec{r},t)} = E_0e^{i(\vec{k}_E\cdot\vec{r}-\omega_Et)} \quad \vec{B}_{(\vec{r},t)} = B_0e^{i(\vec{k}_B\cdot\vec{r}-\omega_Bt)}$

מקיום משוואות מקסוול בריק, נקבל: $\quad \vec{k}_E = \vec{k}_B \quad \omega_E = \omega_B \quad \hat{k}\times\vec{E} = \vec{B} \quad \hat{k}\times\vec{B} = -\vec{E}$

בגלים א"מ מישוריים, הרמוניים בואקום:

1. E ו-B בעלי אותם תדירות, אורך גל (ייתכן הפרש פאזה).
2. $\omega = |\vec{k}|c$
3. E ו-B ניצבים זה לזה ולכיוון התקדמות הגל, כך שמתקיים: $\hat{k} = \hat{E}\times\hat{B}$
4. בגלל האינווריאנטים כל גל א"מ יראה כגל א"מ בכל מע' יחוס.
5. בריק גלים א"מ נעים במהירות האור.

וקטור פוינטינג: $\quad \vec{S} = \frac{c}{4\pi}\vec{E}\times\vec{B} \quad \left[\frac{Energy}{Time\cdot Surface}\right]$

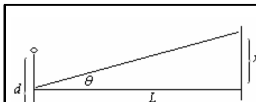
בגל א"מ מישורי: $\quad \vec{S} = \frac{c}{4\pi}EB\hat{k} = \frac{c}{4\pi}E^2\hat{k} = \frac{c}{4\pi}B^2\hat{k} \qquad I = \langle|\vec{S}|\rangle = \frac{c}{8\pi}E_0^{\ 2} = \frac{c}{8\pi}B_0^{\ 2}$

אנרגיה של גל א"מ: $\quad U = \frac{c}{8\pi}(E^2+B^2)$ $\qquad$ הספק: $\quad P = \int\vec{S}\cdot\vec{da}$

$\langle a(t)b(t)\rangle = \frac{1}{2}\mathrm{Re}(AB^*)$

$\langle\vec{E}\times\vec{B}\rangle = \frac{1}{2}\mathrm{Re}(\vec{E}\times\vec{B}^*)$

התאבכות – ניסוי יאנג:



משני סדקים עם הפרש פאזה φ:

$$I_{(\theta)} = I_0\cos^2\left(\frac{kd\sin(\theta)}{2}+\frac{\varphi}{2}\right)$$

תנאי מקסימום:

$$\frac{kd\sin(\theta)}{2}+\frac{\varphi}{2} == n\pi \qquad (n=0,1,2..)$$

תנאי מינימום:

$$\frac{kd\sin(\theta)}{2}+\frac{\varphi}{2} = (n+\frac{1}{2})\pi \qquad (n=0,1,2..)$$

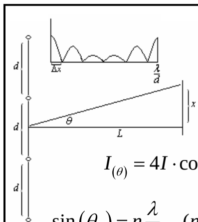
מתקיים $\theta = \sin\theta = \tan\theta$

ולכן $\Delta x = L\sin\theta$

מס' מקסימא כולל: $\quad M = \left\lfloor\frac{2d}{\lambda}\right\rfloor + 1$

מרחק בין מקסימום ה - n לבין מקסימום $n+\rho$: $\quad \Delta = \rho\frac{L\lambda}{d}$

התאבכות – N סדקים:



$$I_{(\theta)} = I\cdot\frac{\sin^2\left(N\frac{\pi}{\lambda}d\sin(\theta)\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda}d\sin(\theta)\right)}$$

עבור N=2: $\quad I_{(\theta)} = 4I\cdot\cos^2\left(\frac{\pi}{\lambda}d\sin(\theta)\right)$

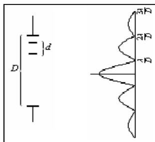
מקסימא ראשיים: $(n=1,2..)$ $\quad \sin(\theta_n) = n\frac{\lambda}{d}$

N-1 מינימא: $(K=1,2..(N-1))$ $\quad 0 < \frac{\sin(\theta_n)}{\lambda} = \frac{K}{N}$

(יש N-2 מקסימא משניים).

רוחב מקסימום ראשי: $\quad \Delta x = \frac{\lambda}{Nd}$

עקיפה:



$\Delta = kD\sin(\theta)$

$$I_{(\theta)} = I_{\max}\left(\frac{\sin^2\left(\frac{1}{2}\Delta\right)}{\left(\frac{1}{2}\Delta\right)^2}\right)$$

אפסים: $\quad D\sin(\theta) = n\lambda$

מקסימא משניים: $\quad D\sin(\theta) = (n+\frac{1}{2})\lambda$

ככל ש-D קטן יותר התמונה מתפזרת.

נוסחאות נוספות:

$V(r) = \omega r$

$E_{total} = \frac{1}{2}mv^2 + U_p(x) \qquad E_k = \frac{1}{2}kx^2 \quad E_h = mgh$

$x(t) = x_0 + v_0t + \frac{at^2}{2} \qquad a_r = \omega^2r = \frac{v^2}{r}$

$v(t) = v_0 + at$

$v_t^{\ 2} = v_0^{\ 2} + 2a\Delta x$

$\hat{r} = \hat{x}\cos\theta + \hat{y}\sin\theta$

$\hat{\theta} = \hat{x}\sin\theta + \hat{y}\cos\theta$

$\sum\vec{F} = 0 \qquad \vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$

$\vec{F} = m\vec{a}$

$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$

הספק מכני: $\quad P = \frac{dU_p}{dt} = FV$

הספק של סוללה: $\quad P = I\varepsilon$

הספק של נגד: $\quad P = I^2R$

אנרגיה שנכנסת למערכת בגלל סוללה – סה"כ המטען שעבר דרכה כפול המתח:

$U_{in} = \varepsilon Q$

כוח בין שני לוחות טעונים ליחידת שטח:

$\frac{dF}{dA} = \frac{1}{8\pi}(E^2_{\ out} - E^2_{\ in})$

לחץ מגנטי על יריעת זרם:

$\frac{dF}{dA} = \frac{1}{8\pi}(B_{z\ out}^{\ 2} - B_{z\ in}^{\ 2})$

תוספות והערות:

חוק פאראדיי – כא"מ: $\quad \varepsilon = \oint_c\vec{E}\cdot\vec{dl} = -\frac{1}{c}\frac{d}{dt}\left(\overbrace{\int_s\vec{B}\cdot\vec{ds}}^{\phi}\right) = -\frac{1}{c}\frac{d\phi}{dt}$

זרמי העתקה - מבצעים אינטגרל על משוואת מקסוול האחרונה, תוך שימוש במשפט סטוקס:

$$\oint_c\vec{B}\vec{dl} = \int_s(\vec{\nabla}\times\vec{B})\cdot\vec{ds} = \underbrace{\frac{4\pi}{c}\int_s\vec{J}\cdot\vec{ds}}_{real\ currents} + \underbrace{\frac{1}{c}\frac{d}{dt}\int_s\vec{E}\cdot\vec{ds}}_{displacement\ currents}$$

נגדיר: $\quad \vec{J}_d = \frac{1}{4\pi}\frac{d\vec{E}}{dt}$ $\qquad$ ונקבל: $\quad \oint_c\vec{B}\vec{dl} = \frac{4\pi}{c}\int_s(\vec{J}+\vec{J}_d)\cdot\vec{ds}$

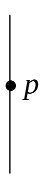
אנרגיה על מסך: כדי לחשב את האנרגיה החוצה מסך מסויים (או כל מעטפת), עלינו לעשות אינטגרציה על הגודל:

$$U = (\vec{S}\cdot\vec{da})dt$$

פוטנציאל של דיסקה: $\quad \varphi(0,y,0) = 2\pi\sigma[(a^2+y^2)^{1/2} + (y^2)^{1/2}]$

פוטנציאל של טבעת במרכז: $\quad \varphi = \frac{2\pi\lambda R}{(R^2+y^2)^{1/2}}$

שדה עבור נק' על המשטח:



$$\vec{E}_p = \frac{\vec{E}_{out} - \vec{E}_{in}}{2}$$

בדיסקה מסתובבת: $\quad dI = \frac{dq}{T}$

השאלה עם שתי הטיפות: $\quad R_{new} = \frac{R}{\sqrt[3]{2}}$

תנע יחסותי: $\quad \vec{P} = \gamma m\vec{V}$

גל עומד במיתר עם קצה חופשי (יוצר 90 מעלות עם הטבעת): $\quad \psi'_x(L,t) = 0$

קירובים: $\quad \left(1+\frac{x}{a}\right)^n = 1 + n\left(\frac{x}{a}\right)$

$\left(\frac{x}{a}\right)^2 \to 0$

דעיכה של מטען:

$$Q(r,t) = Q_0e^{-4\pi\sigma t}$$

$\sin(-\alpha) = -\sin\alpha$	$\tan(2\alpha) = 2\tan\alpha/(1-\tan^2\alpha)$
$\cos(-\alpha) = \cos\alpha$	$\sin(3\alpha) = 3\sin\alpha - 4\sin^3\alpha$
$\tan(-\alpha) = -\tan\alpha$	$\cos(3\alpha) = 4\cos^3\alpha - 3\cos\alpha$
$\sin(90-\alpha) = \cos\alpha$	$\sin\alpha + \sin\beta = 2\sin(a/2+\beta/2)\cos(a/2-\beta/2)$
$\cos(90-\alpha) = \sin\alpha$	$\sin\alpha - \sin\beta = 2\sin(a/2-\beta/2)\cos(a/2+\beta/2)$
$\tan(90-\alpha) = \cot\alpha$	$\cos\alpha + \cos\beta = 2\cos(a/2+\beta/2)\cos(a/2-\beta/2)$
$\cot(90-\alpha) = \tan\alpha$	$\cos\alpha - \cos\beta = -2\sin(a/2+\beta/2)\sin(a/2-\beta/2)$
$\sin(180-\alpha) = \sin\alpha$	$\sin\alpha\cos\beta = 1/2\left(\sin(a+\beta)+\sin(\alpha-\beta)\right)$
$\cos(180-\alpha) = -\cos\alpha$	$\sin\alpha\sin\beta = 1/2\left(\cos(a-\beta)-\cos(\alpha+\beta)\right)$
$\tan(180-\alpha) = -\tan\alpha$	$\cos\alpha\cos\beta = 1/2\left(\cos(a+\beta)+\cos(\alpha-\beta)\right)$
$\tan\alpha = \sin\alpha/\cos\alpha$	$\sin(\alpha+\beta) = \sin\alpha\cos\beta + \cos\alpha\sin\beta$
$\tan\alpha\cdot\cot\alpha = 1$	$\sin(\alpha-\beta) = \sin\alpha\cos\beta - \cos\alpha\sin\beta$
$\sin^2\alpha + \cos^2\alpha = 1$	$\cos(\alpha+\beta) = \cos\alpha\cos\beta - \sin\alpha\sin\beta$
$1+\tan^2\alpha = 1/\cos^2\alpha$	$\cos(\alpha-\beta) = \cos\alpha\cos\beta + \sin\alpha\sin\beta$
$1+\cot^2\alpha = 1/\sin^2\alpha$	$\tan(\alpha+\beta) = (\tan\alpha+\tan\beta)/(1-\tan\alpha\tan\beta)$
$\sin(2\alpha) = 2\sin\alpha\cos\alpha$	$\tan(\alpha-\beta) = (\tan\alpha-\tan\beta)/(1+\tan\alpha\tan\beta)$
$\cos(2\alpha) = \cos^2\alpha - \sin^2\alpha$	$\tan(\alpha+\beta) - \tan\alpha - \tan\beta = \tan(\alpha+\beta)\tan\alpha\tan\beta$
$\cos(2\alpha) = 2\cos^2\alpha - 1$	$\arcsin\alpha + \arccos\alpha = \pi/2$
$\cos(2\alpha) = 1 - 2\sin^2\alpha$	

$$\frac{1}{1+x} = 1 - x + x^2 - x^3 + x^4 + \dots$$

$$\frac{1}{1-x} = \sum_{n=0}^{\infty} x^n = 1 + x + x^2 + x^3 + x^4 + \dots$$

$$\frac{x}{1-x} = \sum_{n=1}^{\infty} x^n = x + x^2 + x^3 + x^4 + \dots$$

$$\sin x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \cdot x^{2n+1}}{(2\cdot n+1)!} = x - \frac{x^3}{6} + \frac{x^5}{120}$$

$$\cos x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \cdot x^{2n}}{(2\cdot n)!} = 1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24}$$

$$\ln(1-x) = -\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n}$$

$$e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}$$

משפט גאוס:

$$\int_V div\vec{F}dV = \oint_A \vec{F}\vec{da}$$

משפט סטוקס:

$$\int_S \left(\vec{\nabla}\times\vec{F}\right)dS = \oint_A \vec{F}\vec{da}$$

אורך קשת: $dl = rd\theta$

אלמנטי שטח ונפח:

נפח כדור: $r^2\sin(\theta)drd\theta d\varphi$

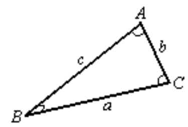
שטח כדור: $R^2\sin(\theta)d\theta d\varphi$

נפח גליל: $rdrd\varphi dl$

אלמנט שטח של דיסקה: $rd\theta dr$

משפט הסינוסים:

$$\frac{a}{\sin A} = \frac{b}{\sin B} = \frac{c}{\sin C}$$



משפט הקוסינוסים:

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab\cos(C)$$

$\sin' x = \cos x$	$\arcsin' x = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$	$arc\cot'(x) = \frac{-1}{1+x^2}$	$(e^x)' = e^x$
$\cos' x = -\sin x$	$\arccos' x = \frac{-1}{\sqrt{1-x^2}}$	$\tan'(x) = \frac{1}{\cos^2 x}$	$(\ln x)' = \frac{1}{x}$
$\sinh' x = \cosh x$	$\arctan'(x) = \frac{1}{1+x^2}$	$\cot'(x) = \frac{-1}{\sin^2 x}$	$(a^x)' = a^x \ln a$
$\cosh' x = \sinh x$			$(\log_a^x)' = \frac{1}{x\ln a}$

כדוריות	גליליות	קרטזיות	
$\nabla f = \frac{\partial f}{\partial r}\hat{r} + \frac{1}{r}\frac{\partial f}{\partial\theta}\hat{\theta} + \frac{1}{r\sin(\theta)}\frac{\partial f}{\partial\varphi}\hat{\varphi}$	$\nabla f = \frac{\partial f}{\partial r}\hat{r} + \frac{\partial f}{\partial\theta}\hat{\theta} + \frac{\partial f}{\partial z}\hat{Z}$	$\nabla f = \frac{\partial f}{\partial x}\hat{X} + \frac{\partial f}{\partial y}\hat{Y} + \frac{\partial f}{\partial z}\hat{Z}$	גרדיאנט
$\nabla\cdot f = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}(r^2\cdot f_r) + \frac{1}{r\sin(\theta)}\frac{\partial}{\partial\theta}(\sin(\theta)f_\theta) + \frac{1}{r\sin(\theta)}\frac{\partial f_\varphi}{\partial\varphi}$	$\nabla\cdot f = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\cdot f_r) + \frac{1}{r}\frac{\partial f_\theta}{\partial\theta} + \frac{\partial f_z}{\partial z}$	$\nabla\cdot f = \frac{\partial f_x}{\partial x} + \frac{\partial f_y}{\partial y} + \frac{\partial f_z}{\partial z}$	דיברגנץ
$\nabla\times f = \frac{1}{r\sin(\theta)}\left(\frac{\partial}{\partial\theta}(\sin(\theta)f_\varphi - \frac{\partial f_\theta}{\partial\varphi}\right)\hat{r} + \left(\frac{1}{r\sin(\theta)}\frac{\partial f_r}{\partial\varphi} - \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rf_\varphi)\right)\hat{\theta} + \frac{1}{r}\left(\frac{\partial}{\partial r}(r\cdot f_\theta - \frac{\partial f_r}{\partial\theta}\right)\hat{\varphi}$	$\nabla\times f = \left(\frac{1}{r}\frac{\partial f_z}{\partial\theta} - \frac{\partial f_\theta}{\partial z}\right)\hat{r} + \left(\frac{\partial f_r}{\partial z} - \frac{\partial f_z}{\partial r}\right)\hat{\theta} + \frac{1}{r}\left(\frac{\partial}{\partial r}(r\cdot f_\theta - \frac{\partial f_r}{\partial\theta}\right)\hat{Z}$	$\nabla\times f = \left(\frac{\partial f_z}{\partial y} - \frac{\partial f_y}{\partial z}\right)\hat{X} + -\left(\frac{\partial f_x}{\partial z} - \frac{\partial f_z}{\partial x}\right)\hat{Y} + \left(\frac{\partial f_y}{\partial x} - \frac{\partial f_x}{\partial y}\right)\hat{Z}$	רוטור
$\nabla^2 f = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial f}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2\sin(\theta)}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin(\theta)\frac{\partial f}{\partial\theta}\right) + \frac{1}{r^2\sin^2(\theta)}\frac{\partial^2 f}{\partial\varphi^2}$	$\nabla^2 f = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial f}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 f}{\partial\theta^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$	$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$	לפלסיאן

זרם I	צפיפות זרם J	קיבול C	הספק P	פוטנציאל חשמלי φ, כא"מ ε	עבודה W אנרגיה U	מטען Q	שדה E חשמלי	מרחק x	כוח F
$\frac{esu}{\sec}$	$\frac{esu}{\sec cm^2}$	סנטימטר	$\frac{erg}{\sec}$	statvolt	erg	esu	$\frac{dyne}{esu}$	סנטימטר	dyne
מטען אלקטרון	מהירות האור C	הקבוע k	תדירות f	מס' גל k	מקדם השראות M	שטף מגנטי Φ	שדה B מגנטי	התנגדות R	מוליכות σ
$4.8\times10^{-10}esu$	$3*10^{10}\frac{cm}{\sec}$	1	הרץ	$\frac{1}{cm}$	$\frac{\sec^2}{cm}$	$\frac{Gauss}{cm^2}$	$Gauss = \frac{dyne}{esu}$	$\frac{\sec}{cm}$	$\frac{1}{\sec}$