וקטור יחידה $\hat{r}_{21} = \frac{\overline{r}_{21}}{\left|\overline{r}_{21}\right|}$

חוק קולון הכוח הפועל על q_2 על ידי q_1 $\overline{F}_2 = k\cdot\frac{q_1q_2}{\left|\overline{r}_{21}\right|^2}\hat{r}_{21} = k\cdot\frac{q_1q_2}{\left|\overline{r}_{21}\right|^3}\cdot\left(\overline{r}_2-\overline{r}_1\right)$

שדה חשמלי $\vec{E}\left(\vec{r}\right) = \frac{\vec{F}\left(\vec{r}\right)}{q}$, יחידות השדה $[E] = \frac{[F]}{[q]} = \begin{cases} \frac{dyne}{esu} = \frac{esu}{cm\cdot cm} & c.g.s \\ \frac{Newton}{Coulomb} = \frac{Coulomb}{m\cdot m} & SI \end{cases}$

שטף כללי $\phi = \left|\overline{V}\right|\cdot\hat{n}\cdot A$, **שטף חשמלי**, $\phi = \int_S \vec{E}\left(\vec{r}\right)\cdot d\vec{a}\left(\vec{r}\right)$

חוק גאוס השטף של השדה E דרך המשטח הסגור S, הכולא נפח τ כאשר Q היא כמות המטען נטו הנמצאת ב-S הינה $\int_S \vec{E}\cdot d\vec{a} = 4\pi\int_\tau \rho\left(\vec{r}\,'\right)d\tau' = 4\pi Q$

תוצאה מחוק גאוס במעבר דרך שכבה דקה טעונה בצפיפות משטחית, רכיב E בניצב לשכבה עובר בצורה לא רציפה ומתקיים $\Delta E = E^+ - E^- = 4\pi\cdot\sigma$

הפרש פוטנציאל חשמלי $\varphi_{21} = \varphi\left(r_2\right) - \varphi\left(r_1\right) = \frac{1}{q}\left(U\left(r_2\right) - U\left(r_1\right)\right) = -\int_{r_1}^{r_2}\vec{E}\left(r\right)\cdot d\vec{L}$, כדי לדעת פוטנציאל של נקודה לוקחים פוטנציאל באינסוף 0. הפוטנציאל היא תמיד **פונקציה רציפה**

עבודה חשמלית $W_{12} = \int_{r_1}^{r_2}\vec{F}\left(\vec{r}\right)d\vec{L}$, הכוח החשמלי הוא כוח משמר לכן אינטגרל במסלול סגור שווה ל0.

אנרגיה פוטנציאלית $U\left(\vec{r}_2\right) - U\left(\vec{r}_1\right) = -\int_{r_1}^{r_2}\vec{F}d\vec{L}$

פוטנציאל של התפלגות מטענים $\varphi\left(\vec{r}\right) = \int_\tau \frac{\rho\left(\vec{r}\,'\right)d\tau'}{\left|\vec{r}-\vec{r}\,'\right|}$, כאשר τ הוא נפח אותו רוצים לסכום.

האנרגיה האגורה בזוג מטענים נקודתיים $W = \frac{q_1q_2}{\left|\overline{r}-\overline{r}_2\right|} = U_{12}$

אנרגיה של N מטענים $U = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N} q_i\varphi\left(r_i\right)$

אנרגיה של התפלגות מטען $U = \frac{1}{2}\int \rho\left(\vec{r}\right)\varphi\left(\vec{r}\right)d\tau$

צפיפות האנרגיה האלקטרוסטטית במרחב $\frac{dU\left(\vec{r}\right)}{d\tau} = \frac{1}{8\pi}E^2$

משפט גאוס דיפרנציאלי $\phi = \int_\tau \nabla\vec{F}d\tau$, מבטא את צפיפות השטף

חוק גאוס המתמטי $\oiint_S \vec{E}d\vec{a} = \iiint_V \nabla\vec{E}dv$, לכן אם $\nabla\vec{E} = 0$ אזי אין מקורות ואם $\nabla\vec{E} \neq 0$ יש מקורות.

משפט סטוקס $\oint_C \vec{E}d\vec{L} = \iint_S \vec{\nabla}\times\vec{E}da = 0$, עבור שדה משמר הרוטור שווה לאפס.

משוואות השדה האלקטרוסטטי בצורה דיפרנציאלית $\begin{cases}\left(\vec{\nabla}\cdot\vec{E}\right) = 4\pi\rho \\ \left(\vec{\nabla}\times\vec{E}\right) = 0\end{cases}$ **E שדה משמר לכן ניתן להגדיר**

פונקצית פוטנציאל $\vec{E} = -\vec{\nabla}\varphi$

משוואת פואסון $\nabla^2\varphi = -4\pi\rho$, **משוואת לפלס (באיזור חסר מקורות)** $\nabla^2\varphi = 0$

<u>קיבול וקבלים</u>

קיבול של מוליך $Q = C\cdot\varphi$, **כאשר C הוא הקיבול.** עבור כדור מוליך R=C

קיבול כדור מוליך $\varphi = \frac{Q}{R}$

קיבול של קבל לוחות סופיים, הפרש הפוטנציאלים $V = |\varphi_1 - \varphi_2| = Ed = \frac{4\pi d}{A} Q$ לכן

$Q = \frac{A}{4\pi d} V = CV \Rightarrow C = \frac{A}{4\pi d}$

קיבול של שתי קליפות מוליכות $C = \frac{ab}{b-a}$

קיבול של קבל גלילי $C = \frac{L}{2\ln\left(\frac{b}{a}\right)}$ כאשר $\lambda = \frac{Q}{L}$

אנרגיה של קבל $W = \int_0^Q V(q)\,dq = \int_c^q \frac{q}{c} \cdot dq = \frac{Q^2}{2C} = \frac{1}{2} CV^2$

<u>זרמים חשמליים</u>

זרם דרך משטח $I = \frac{dQ}{dt}$

צפיפות זרם $\vec{J} = \frac{I}{\vec{A}}$

עבור משטח פתוח S מתקיים $I = \int_S \vec{J}(\vec{r},t) \cdot d\vec{a}$

משוואת הרציפות בצורה אינטגרלית $\int_S \vec{J}(\vec{r},t) \cdot d\vec{a} = -\frac{d}{dt} \int_\tau \rho(\vec{r},t)\, d\tau$

משוואת הרציפות בצורה דיפרנציאלית $\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = -\frac{d\rho}{dt}$, עבור זרם סטציונרי (עומד) $\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0$

חוק אוהם $\vec{J} = \sigma \vec{E}$

התנגדות אוהמית $R = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{L}{A} = \rho \frac{L}{A}$, $V = I \cdot R$

מודל דרוד $\sigma = \sum_{j=1}^{k} n_j \frac{q_j^2 \tau_j}{m_j}$ כאשר τ הוא זמן ממוצע בין התנגשויות, m מסה, q מטען, j סוג.

הספק ליחידת נפח $\frac{dP}{d\tau} = P' = \vec{J} \cdot \vec{E} = \sigma E^2$

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

<u>חוקי קירכהוף</u>

חוק קירכהוף למתחים $\sum_i \varepsilon_i = \sum_j I_j R_j$

חוק קירכהוף לזרמים $\sum_k I_k = 0$

טעינת קבל $I(t) = \frac{\varepsilon}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$, $Q(t) = C\varepsilon\left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right)$

פריקת קבל $Q(t) = Q_0 e^{-\frac{t}{RC}}$

העבודה לטעינת קבל המבוצעת על ידי המקור $W = \int_0^\infty P(t)dt = \int_0^\infty \varepsilon I(t)dt = C\varepsilon^2$

האנרגיה האגורה בקבל טעון $U = \frac{1}{2} C\varepsilon^2$

חוק ג'אול $W_{Joule} = \int_0^\infty I^2 R dt = \frac{1}{2} C\varepsilon^2$

<u>תורת היחסות</u>

סימונים $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}} = \frac{1}{\left(1-\beta^2\right)^{1/2}}$, $\beta = \frac{V}{c}$

טרנספורמצית לונרץ $x' = \gamma(x-\beta ct) = \gamma(x-vt), \quad y' = y,\ z' = z,\ t' = \gamma(t - \frac{\beta}{c}x)$

טרנספורמצית לורנץ הפוכה $x = \gamma(x'+v't'), \quad y = y', \quad z = z', \quad t = \gamma(t' + \frac{\beta}{c}x')$

גל אור לא משתנה במערכות יחוס שונות ולכן $x^2+y^2+z^2-c^2t^2 = x'^2+y'^2+z'^2-c^2t'^2 = 0$

התקצרות אורך $L'_x = \frac{L_x}{\gamma}$, כאשר L_x הוא אורך הגוף במערכת S בכיוון ציר X. $L'_y = L_y$.

התארכות זמן $\Delta t' = \gamma \Delta t$, כאשר $\Delta t = t_2 - t_1$ במערכת S.

שני מאורעות סימולטניים במערכת S לא יהיו סימולטניים במערכת S′.

טרנספורמצית לורנץ למהירויות

$$v'_x = \frac{dx'}{dt'} = \frac{v_x - \beta c}{1 - \frac{\beta}{c}\frac{dx}{dt}} = \frac{v_x - V}{1 - \frac{V\cdot v_x}{c^2}} \qquad v'_y = \frac{dy'}{dt'} = \frac{dy}{\gamma\left(dt - \frac{\beta}{c}dx\right)} = \frac{v_y}{\gamma\left(1 - \frac{V\cdot v_x}{c^2}\right)}$$

טרנספורמצית לורנץ ההפוכה למהירויות

$$v_x = \frac{v'_x + V}{1 + \frac{V\cdot v'_x}{c^2}} \qquad v_y = \frac{dy}{dt} = \frac{v_y}{\gamma\left(1 + \frac{V\cdot v_x}{c^2}\right)}$$

מסת הגוף $m(v) = \gamma(v)\cdot m$

תנע יחסותי $\vec{P} = \gamma(v)m\vec{v}$

אנרגיה יחסותית $U = \gamma(v)mc^2$

השינוי באנרגיה $\Delta U = \Delta m(r)\cdot c^2$

וקטור תנע אנרגיה $\left(P_x, P_y, P_z, \frac{U}{c^2}\right), \left(P'_x, P'_y, P'_z, \frac{U'}{c^2}\right)$

טרנספורמצית לורנץ לווקטור תנע אנרגיה

$$P'_x = \gamma\cdot\left(P_x - \frac{\beta}{c}V\right) \qquad P'_y = P_y \qquad P'_z = P_z \qquad U' = \gamma\cdot\left(U - \beta c P_x\right)$$

האינוריאנטה של תנע אנרגיה $U^2 - c^2P^2 = U'^2 - c^2P'^2 = (mc^2)^2$

חוקי השימור $\sum_i \vec{P}_i = \sum_j \vec{P}'_j = const \qquad \sum_i U_i = \sum_j U'_j = const$

טרנספורמצית הכוח והתנע $F_y = \frac{dP_y}{dt} = \frac{1}{\gamma}\cdot\frac{dP'_y}{dt} = \frac{1}{\gamma}F'_y \qquad F_x = F'_x \qquad \frac{dP_x}{dt} = \frac{dP'_x}{dt'}$

טרנספורמצית הרכיבים של שדה אלקטרומגנטי

$$E'_x = E_x \qquad E'_y = \gamma\left(E_y - \beta B_z\right) \qquad E'_z = \gamma\left(E_z + \beta B_y\right)$$

$$B'_x = B_x \qquad B'_y = \gamma\left(B_y + \beta E_z\right) \qquad B'_z = \gamma\left(B_z - \beta E_y\right)$$

$\mathrm{E}_{\parallel} \parallel \vec{\mathrm{V}}$	$\mathrm{E}_{\perp} \perp \vec{\mathrm{V}}$	$\mathrm{B}_{\parallel} \parallel \vec{\mathrm{V}}$	$\mathrm{B}_{\perp} \perp \vec{\mathrm{V}}$
$E'_{\parallel} = E_{\parallel}$		$B'_{\parallel} = B_{\parallel}$	
$E'_{\perp} = \gamma\left(\vec{E} + \frac{1}{c}\left[\vec{V}\times\vec{B}\right]\right)_{\perp}$		$B'_{\perp} = \gamma\left(\vec{B} - \frac{1}{c}\left[\vec{V}\times\vec{E}\right]\right)_{\perp}$	

אינווריאנטיות

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

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

שדה מגנטי

כוח לורנץ $\vec{F}=\frac{q}{c}\cdot\left[\vec{v}\times\vec{B}\right]$

שדה מגנטי הנובע מתיל מוליך ישר אינסופי $B(r)=\frac{\mu_0}{4\pi}\cdot\frac{2\cdot \mathrm{I}}{r}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0 c^2}\cdot\frac{2\cdot \mathrm{I}}{r}$

שטף השדה המגנטי דרך משטח סגור s בצורה אינטגרלית $\int\limits_{\substack{S\\ \text{סגור}}}\vec{B}\cdot d\vec{a}=0$

שטף השדה המגנטי בצורה דיפרנציאלית $\nabla\cdot\vec{B}=0$

חוק אמפר בצורה אינטגרלית $\oint\limits_{\text{מעגל}}\vec{\mathrm{B}}\cdot d\vec{L}=\frac{2\cdot \mathrm{I}}{rc}\cdot 2\pi r=\frac{4\pi}{c}\cdot \mathrm{I}$

חוק אמפר בצורה דיפרנציאלית (חוק שימור אנרגיה) $\nabla\times\vec{B}=\frac{4\pi}{c}\cdot\vec{J}$

הכוח שמפעיל הזרם I1 על מטען q2 $\vec{f}_{21}=\frac{q_2}{c}\cdot\left[\left(\vec{v}_2\times\vec{B}_1\left(\vec{r}_{21}\right)\right)\right]$

הכוח שמפעיל תיל I1 על I2 $d\vec{F}_{21}=\frac{2\cdot \mathrm{I}_1\cdot \mathrm{I}_2}{c^2\cdot r_{21}}\left[d\vec{l}_2\times\left(\hat{z}\times\hat{r}_{21}\right)\right]$

אנרגיה מגנטית $d\vec{W}=\vec{F}\cdot d\vec{L}=\frac{q}{c}\cdot\left[\vec{V}\times\vec{B}\right]\cdot\vec{V}\cdot dt=0$

פוטנציאל מגנטי וקטורי $\vec{B}=\vec{\nabla}\times\vec{A}(\vec{r})$

פוטנציאל מגנטי מקיים $\vec{\nabla}\times\vec{B}=\vec{\nabla}\times\left[\vec{\nabla}\times\vec{A}\right]=\frac{4\pi}{c}\vec{J}$ $\quad\vec{\nabla}\cdot\vec{B}=\vec{\nabla}\cdot\left(\vec{\nabla}\times\vec{A}\right)\equiv 0$

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

משוואת פואסון $\nabla^2\vec{A}=-\frac{4\pi}{c}\vec{J}$ **ופתרונה** $\vec{\mathrm{A}}(\vec{r})=\frac{1}{c}\cdot\int\limits_{\tau}\frac{\vec{J}(\vec{r}')d\tau'}{\left|\vec{r}-\vec{r}'\right|}$

פוטנציאל מגנטי ללולאת זרם $\vec{\mathrm{A}}(\vec{r})=\frac{1}{c}\cdot\int\limits_{\tau}\frac{\vec{J}(\vec{r}')d\tau'}{\left|\vec{r}-\vec{r}'\right|}=\vec{\mathrm{A}}(\vec{r})=\frac{I}{c}\cdot\oint\limits_{\text{לולאה}}\frac{d\vec{l}'}{\left|\vec{r}-\vec{r}'\right|}$

חוק סטוקס $\int\limits_S\vec{B}\cdot d\vec{a}=\oint\limits_C\vec{A}\cdot d\vec{l}$

חוק ביו סאבר $\vec{\mathrm{B}}==\vec{\nabla}\times\frac{\mathrm{I}}{c}\int\frac{d\vec{l}'}{\left|\vec{r}-\vec{r}'\right|}=\frac{\mathrm{I}}{c}\oint\frac{d\vec{l}\times(\vec{r}-\vec{r}')}{\left|\vec{r}-\vec{r}'\right|^3}$, $d\mathrm{B}=\frac{\mathrm{I}\cdot d\vec{l}\times\hat{r}}{cr^2}$ כאשר $d\vec{l}$ כיוון אלמנט הנפח (כיוון תיל), $d\vec{B}$ מאונך למישור שיוצרים $d\vec{l}$ ו- $\hat{r}$.

מומנט הכוח הפועל על דיפול מגנטי $\vec{\mathrm{N}}=\vec{m}\times\vec{\mathrm{B}}$

אי רציפות בשדה המגנטי הניצב $\Delta\mathrm{B}_{\parallel}=\mathrm{B}_{\parallel}^{+}-\mathrm{B}_{\parallel}^{-}=\frac{4\pi}{c}\cdot\frac{\mathrm{I}}{a}$

צפיפות זרם משטחית $j_s=\frac{I}{a}=J\cdot b$ $\quad \mathrm{I}=J\cdot A=J\cdot ab$

צפיפות זרם משטחית הנובעת מצפיפות מטען משטחית נעה $j_s=\sigma v$

צפיפות אנרגיה מגנטית $\frac{dU_m}{d\tau}=\frac{1}{8\pi}\mathrm{B}^2$

חוק פראדיי האינטגרלי $\varepsilon = \int_C \vec{E}\cdot d\vec{s} = -\frac{1}{c}\frac{d}{dt}\int_S \vec{B}\cdot d\vec{a} = -\frac{1}{c}\frac{d\Phi}{dt}$ כאשר לולאה מוליכה C מהווה שפה של משטח פתוח S. **וכוח אלקטרו מניע** $\varepsilon = -\frac{1}{c}\frac{d\Phi}{dt}$ כאשר $\Phi = \oint \vec{B}\cdot d\vec{a}$

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

חוק לנץ – הזרם המושרה יוצר שטף מגנטי השואף לבטל את השינוי המקורי בשטף.

<u>השראות הדדית</u>

השטף דרך משטח המוגדר על ידי מעגל C2 ונובע מ-I1 $\phi_{21} = \int_{S_2} \vec{B}_1(\vec{r}_2)\cdot d\vec{a}_2$

השראות הדדית $\varepsilon_{21} = -M\frac{dI_1}{dt} = -\frac{1}{c}\frac{d\phi_{21}(t)}{dt}$ כאשר $M_{12} = M_{21} \equiv M$

<u>השראות עצמית</u>

כא"מ עצמי $\varepsilon_{11} = -\frac{1}{c}\frac{d\phi_{11}(t)}{dt} = -L_1\frac{dI_1}{dt}$ כאשר ϕ_{11} הוא השטף דרך המעגל דרך C1 , L **ההשראות העצמית.**

הכא"מ של שני מעגלים $\begin{pmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}-L_1 & -M\\ -M & -L_2\end{pmatrix}\begin{pmatrix}dI_1/dt\\ dI_2/dt\end{pmatrix}$

זרם של סליל במעגל RL $I(t) = \frac{\varepsilon}{R}\left(1-\exp\left(-\frac{R}{L}t\right)\right)$

האנרגיה האצורה בסליל $U = \frac{1}{2}LI^2$

האנרגיה האצורה בשדה מגנטי $U = \frac{1}{8\pi}\int B^2 d\tau$

<u>**משוואות מקסוול**</u>

$\int_S \vec{E}\cdot d\vec{a} = 4\pi\int_S \rho d\tau$	$\vec{\nabla}\cdot\vec{E} = 4\pi\rho$
$\oint_C \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\frac{1}{c}\int_S \frac{\partial\vec{B}}{\partial t}d\vec{a}$	$\vec{\nabla}\times\vec{E} = -\frac{1}{c}\cdot\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$
$\int_S \vec{B}\cdot d\vec{a} = 0$	$\vec{\nabla}\cdot\vec{B} = 0$
$\oint_C \vec{B}\cdot d\vec{l} = \frac{4\pi}{c}\int_S \vec{J}\cdot d\vec{a} + \frac{1}{c}\int_S \frac{\partial\vec{E}}{\partial t}\cdot d\vec{a}$	$\vec{\nabla}\times\vec{B} = \frac{4\pi}{c}\vec{J} + \frac{1}{c}\cdot\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}$

מינוח של מקסוול: **זרם ההעתק יוגדר** $\vec{J}_d = \frac{1}{4\pi}\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}$. ומכאן $\vec{\nabla}\times\vec{B} = \frac{4\pi}{c}\left(\vec{J}+\vec{J}_d\right)$

משוואת הרציפות של הזרם $\vec{\nabla}\cdot\vec{J} + \frac{\partial\rho}{\partial t} = 0$

<u>גלים אלקטרומגנטים</u>

משוואת הגלים $\frac{\partial^2\psi(z,t)}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2\psi(z,t)}{\partial t^2}$ כאשר v זוהי מהירות הפאזה $V^2 = \frac{T_0}{\rho}$

פתרונות משוואת הגלים – גל רץ $\psi(z,t) = f(z-vt) + g(z+vt)$

גל הרמוני $\psi(z,t)=A\sin\left(kz-\omega t\right)$

$$\psi(z,t)=A\sin\left(kz-\omega t\right)=A\sin\left[k\left(z-\frac{\omega}{k}t\right)\right]=f\left(z-vt\right)\Rightarrow v=\frac{\omega}{k}$$

זמן מחזור: $T\left[\sec\right]$ **תדירות**: $\nu=\frac{1}{T}$ **תדירות זוויתית**: $\omega=2\pi\nu$ **אורך הגל** $\lambda=\frac{2\pi}{k}$

תנאי הכרחי לקיומו של גל רץ: מערכת פתוחה.ו כל גל במערכת פתוחה הוא גל רץ.

גל עומד $\psi(z,t)=A(z)\cos(\omega t)$ $A(z)=\alpha\sin(kz)+\beta\cos(kz)$ $k=\frac{\omega}{v}\Rightarrow$

מספר הגל: $k_n=\frac{\pi}{L}\cdot n$, **אורך הגל**: $\lambda_n=\frac{2L}{n}$, **תדירות זוויתית** $\omega_n=v\cdot k_n$,

תדירות גל עומד $f_n=\nu_n=\frac{1}{2\pi}vk_n=\frac{v}{2L}\cdot n$, תדירות יסודית של גל עומד היא $\nu_1=\frac{v}{2L}$.

גלים מישוריים במרחב $\psi(\vec{r},t)=f\left(\hat{n}\cdot\vec{r}-vt\right)$

מהירות הפאזה נתונה על ידי $v_p=\frac{\omega}{k}$. **מהירות החבורה** נתונה על ידי $v_g=\frac{\partial\omega}{\partial k}$.

גל כדורי $\psi(\vec{r},t)=\frac{f\left(\vec{r}-vt\right)}{r}$

מקסוואל בריק $\rho\equiv 0,\vec{J}\equiv 0$, $\vec{\nabla}\times\vec{B}=\frac{1}{c}\cdot\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}$ $\vec{\nabla}\cdot\vec{B}=0$ $\vec{\nabla}\times\vec{E}=-\frac{1}{c}\cdot\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$ $\vec{\nabla}\cdot\vec{E}=0$

משוואת הגלים הקלאסית $\nabla^2\vec{E}=\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2}$ $\nabla^2\vec{B}=\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\vec{B}}{\partial t^2}$

<u>גל אלקטרומגנטי הוא גל רוחבי. גם השדה החשמלי וגם השדה המגנטי ניצבים לכיוון ההתקדמות</u>

$\vec{E}_0\perp\vec{B}_0$ ומכאן $\vec{E}\perp\vec{B}\perp\hat{n}$ - $\vec{E},\vec{B},\hat{n}$ מהווים שלשה ימנית.

$\left|\hat{n}\times\vec{E}_0\right|=\left|\vec{E}_0\right|=\left|\vec{B}_0\right|$. ל- $\vec{E},\vec{B}$ אותו גודל, מתקיים: $\hat{n}\times\vec{E}=\vec{B}$.

$$\hat{n}\cdot E^2=\vec{E}\times\vec{B}$$

כמות האנרגיה האלקטרומגנטית בתיבה שנפחה $\Delta\tau=A\cdot\Delta z$: $\Delta U=\frac{1}{8\pi}\left(E_x^2(z,t)+B_y^2(z,t)\right)\cdot A\cdot\Delta z$

וקטור פויינטינג: $\vec{S}=\frac{c}{4\pi}\left[\vec{E}\times\vec{B}\right]$ - קצב שינוי אנרגיה ביחידת זמן ליחידת נפח בכיוון ההתקדמות.

עוצמת הגל I: העוצמה I היא הערך הממוצע של וקטור הפוינטינג $I=\left\langle\vec{S}\right\rangle$

ההספק המשודר הוא האינטגרל המשטחי של ווקטור פוינטינג הממוצע $\vec{P}=\vec{S}A=\iint_s Sda=IA$

גלים יקראו **קוהרנטיים** אם אין ביניהם הפרש פאזה, או שהפרש הפאזה ביניהם אינו משתנה

הגל בצורה קומפלקסית: $E^{i\alpha}=\cos\alpha+i\sin\alpha\Rightarrow$ $\vec{E}(\vec{r})=\vec{E}_0\exp\left\{i\left(\vec{k}\cdot\vec{r}-\omega t\right)\right\}$

התופעה הפיסיקלית: $\vec{E}=\mathrm{Re}\left(\vec{E}\left(\vec{r},t\right)\right)$

<u>התאבכות</u>

תנאי הכרחי להופעת התאבכות הוא שהגלים יהיו קוהרנטיים

סופרפוזיציה של שתי פונקציות גל: $\psi=\psi_1(\vec{r},t)+\psi_2(\vec{r},t)$.

העוצמה של הסופרפוזיציה $I\sim\left|\psi\right|^2=\left|\psi_1\right|^2+\left|\psi_2\right|^2+2\,\mathrm{Re}\left|\psi_1\cdot\psi_2^*\right|$

איבר התאבכות $I_{\text{int}}\sim 2\,\mathrm{Re}\left[\psi_1\cdot\psi_2^*\right]$

התאבכות בונה כאשר $\psi_1 \cdot \psi_2^*$ הינו ממשי וחיובי $I_{\text{int}} \sim +2\left|\psi_1 \cdot \psi_2^*\right|$ מקבל את הערך המקסימלי ו ψ_1, ψ_2 הינם בעלי אותה פאזה

התאבכות הורסת כאשר ψ_1, ψ_2 נוטים לבטל אחד את השני בהתאבכות, I_{int} הינו מינימלי במקרה זה הפרש הפאזה בין ψ_1 ל- ψ_2 הינו π.

<u>ניסוי יאנג</u>

עוצמת הגל $I(\theta) = \left\langle \left|\vec{S}\right| \right\rangle = \frac{c}{4\pi} \cdot \left\langle \left|\vec{E}(\vec{r},t)\right|^2 \right\rangle = \frac{c}{4\pi} E_0^{\,2} \cdot 2\cos^2\left(\frac{kd\sin\theta}{2}\right) = I_0 \cos^2\left(\frac{kd\sin\theta}{2}\right)$

מהזנחות מקבלים $I(\theta) = I_0 \cos^2\left(\frac{kyd}{2R}\right)$

גורם הפאזה המרחבי: $\delta(\theta) = \frac{kd\sin\theta}{2} = \frac{2\pi}{\lambda}\frac{d\sin\theta}{2} = \frac{\pi d\sin\theta}{\lambda}$

התאבכות בונה $\frac{\pi d\sin\theta_m}{\lambda} = \pm\pi m$, כלומר עבור $\sin\theta_m = \pm\frac{\lambda}{d} m$.

התאבכות הורסת $\sin\theta_m = \pm\frac{\lambda}{d}\left(m + \frac{1}{2}\right)$.

מרחק בין מקסימות: $\frac{kd\Delta y}{2R} = \pi$ ולכן $\Delta y = \frac{2\pi R}{kd} = \frac{R\lambda}{d}$.

<u>התאבכות מ-N סדקים (מקורות קוהרנטיים)</u> {סופר יאנג} [מרחק ממש ממש קטן]

$$I(\theta) = I_0\left(\frac{\sin\left(\frac{Nkd\sin\theta}{2}\right)}{\sin\left(\frac{kd\sin\theta}{2}\right)}\right)^2 \qquad \left|\psi\right|^2 = A^2\left(\frac{\sin\left(\frac{Nkd\sin\theta}{2}\right)}{\sin\left(\frac{kd\sin\theta}{2}\right)}\right)^2 = A^2\left(\frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda}Nd\sin\theta\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda}d\sin\theta\right)}\right)^2$$

נקודות מקסימה $\sin\theta = \frac{\lambda}{d}m, \quad m = 0,1,\ldots$. **נקודת מינימה** $\sin\theta = \frac{\lambda m}{dN}, \quad m = 0,1,\ldots$.

בין כל שני מקסימה ראשיים יש N-2 מקסימה משניים. מספר המקסימות קטן כאשר d גדל

סה"כ מקסימות שנקבל הוא $M = 2\frac{d}{\lambda} + 1$.

<u>**חבורת גלים**</u>

תווך לא נפיצה תווך בו ω תלויה ליניארית ב- k, נכנה תווך לא נפיצה בשם **תווך לא דיספרסיבי**.

מהירות החבורה $v_g = \frac{\partial\omega}{\partial k}$. **מהירות הפאזה** $v_p = \frac{\omega}{k}$.

בריק מתקיים: $v_{group} = v_{phase} = c$.

מתקיים $\Delta k\Delta x \ge 2\pi, \Delta\omega\Delta T \ge 2\pi$, כאשר $\Delta\omega$ רוחב ספקטראלי של החברה, Δt רוחב זמני של חבורת גלים, Δk רוחב תחום ווקטורי הגל, Δx רוחב מרחבי של החבורה, n מקדם השבירה של החומר.

<u>**עקרון הויגנס**</u> מציע התייחסות לסדקים כאל מקורות אור נקודתיים של גלים בעלי אמפליטודה זהה (אותו ω ואותו k). חישוב הגל הנעקף מתבצע על ידי סופרפוזיציה של כל המקורות הנקודתיים.

<u>גדלים ויחידות</u>

ב CGS k=1, **ב MKS** $k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 10^{-7}C$ $\qquad c = 3\cdot10^8 m \qquad \varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi} \qquad 1columb = 3\cdot10^9 esu$

$$e = -4.8\cdot10^{-10}esu \approx 1.6\cdot10^{-19}coulomb \qquad 1Farad = \frac{3\cdot10^{19}esu}{\frac{1}{300}statvolt} = 9\cdot10^{12}cm$$

$$1Amper = \frac{coulomb}{\sec} = 3\cdot10^9\frac{esu}{\sec} \qquad \left[J\right] = \frac{esu}{\sec\cdot cm^2} = \frac{Amp}{m^2} \qquad \left[P'\right] = \frac{erg}{\sec\cdot cm^3} = \frac{Watt}{m^3}$$

$$[B]=1[\text{Tesla}]=10^4[\text{Gauss}] \qquad [B]=\frac{[\mathrm{I}]}{[r][c]}=\frac{\frac{\text{esu}}{\text{sec}}}{\frac{\text{cm}\cdot\text{cm}}{\text{sec}}}=\frac{\text{esu}}{\text{cm}^2}=\text{Gauss}$$

$$[S]=\frac{erg}{cm^2\cdot\sec} \qquad [j_s]=\frac{esu}{\sec\cdot cm}=\frac{Amp}{m}$$

$$[M]=[L]=\frac{[\varepsilon]}{\left[\frac{dI}{dt}\right]}=\frac{esu/m}{esu/\sec^2}=\frac{\sec^2}{cm}=\frac{volt}{Amp}\cdot\sec=1\cdot Henry$$

$$\frac{1/300[statvolt]}{3\cdot10^9\left[esu/\sec^2\right]}=\frac{1}{9\cdot10^{11}}\cdot\frac{\sec^2}{cm}$$

תוצאות סופיות

שדה של תיל דק אינסופי $\vec{E}(r)=\frac{2\lambda}{r}$ **והפוטנציאל** $\varphi(r_2)-\varphi(r_1)=2\lambda\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)$

שדה של משטח אינסופי $\vec{E}(\vec{z})=\begin{cases}2\pi\sigma(+\hat{z}) & z>0\\ 2\pi\sigma(-\hat{z}) & z<0\end{cases}$ **, והפוטנציאל** $\varphi(r_2)-\varphi(r_1)=-2\pi\sigma(z_2-z_1)$

שדה של קבל לוחות $E=\begin{cases}0 & z<0\\ 4\pi\sigma(+\hat{z}) & 0<z<L\\ 0 & L<z\end{cases}$ **והפוטנציאל** $\varphi(z)=\begin{cases}0 & z<0\\ -4\pi\sigma z & 0\le z<L\\ -4\pi\sigma L & z\ge L\end{cases}$

שדה קליפה כדורית $\vec{E}(\vec{r})=\begin{cases}0 & r<R\\ \frac{Q}{r^2}\hat{r} & r>R\end{cases}$ **והפוטנציאל הוא** $\varphi(r)=\begin{cases}\frac{Q}{R} & r<R\\ \frac{Q}{r} & r>R\end{cases}$

השדה של כדור ברדיוס R הטעון בצורה אחידה במטען Q $\vec{E}(\vec{r})=\begin{cases}\frac{Q}{R^3}\cdot r\hat{r} & r<R\\ \frac{Q}{r^2}\hat{r} & r>R\end{cases}$ **וצפיפות המטען במקרה זה** $\rho=\frac{Q}{\frac{4\pi R^3}{3}}$ **והפוטנציאל שלו** $\varphi(r)=\begin{cases}-\frac{Q}{2R^3}r^2+\frac{3Q}{2R} & r<R\\ \frac{Q}{r} & r\ge R\end{cases}$

הפוטנציאל החשמלי ממטען q $\varphi(\vec{r})=\frac{q}{|\vec{r}-\vec{r}\,'|}$

השדה החשמלי של מטען נקודתי הנע במהירות יחסותית קבועה $E'=\frac{Q}{r'^2}\cdot\frac{1-\beta^2}{\left(1-\beta^2\sin^2\theta'\right)^{3/2}}$

שדה מגנטי שנוצר מטבעת זרם $\mathrm{B}_z(z)=\frac{\mathrm{I}}{c}\cdot\frac{2\pi\mathrm{R}^2}{\left(\mathrm{R}^2+z^2\right)^{3/2}}$

מומנט דיפול מגנטי של טבעת זרם $\vec{m}=\frac{\mathrm{I}}{c}\cdot\vec{S}$, כאשר S הוא שטח הלולאה.

שדה מגנטי הנוצר על ידי סליל ישר נושא זרם I סולונואיד(סליל רגיל) $B_z=\frac{4\pi In}{c}$ כאשר $n:\frac{\text{כריכות}}{cm}$

שדה מגנטי הנוצר על ידי סליל בצורת טורוס (ביגלה בעל חתך מלבני) $\vec{B}(r)=\frac{2NI}{rc}\hat{\theta}$ כאשר N מספר הכריכות.

שטח מעטפת כדור $4\pi R^2$ **, נפח כדור** $\frac{4\pi}{3}R^3$ **. בחיבור שתי קליפות טעונות,** $\begin{cases}q_1+q_2=Q\\ \frac{q_1}{R_1}=\frac{q_2}{R_2}\end{cases}$