1 כללי

$$k=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0},\quad K_B=\frac{\mu_0}{4\pi},\quad \varepsilon=\kappa \tag{1}$$

2 אלקטרוסטטיקה

חוק גאוס בריק

$$\oint \vec{E}\cdot d\vec{A}=4\pi k q_{\text{in}} \tag{2}$$

חוק הסירקולציה של שדה חשמלי

$$\oint \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l}=0 \tag{3}$$

כוח הפועל על מטען נקודתי בשדה חשמלי

$$\vec{F}=q\vec{E} \tag{4}$$

שדה חשמלי של מטען נקודתי

$$\vec{E}\left(\vec{r}\right)=\frac{kq_0(\vec{r}-\vec{r}_0)}{\left|\vec{r}-\vec{r}_0\right|^3} \tag{5}$$

חוק קולון

$$\vec{F}_{1\to 2}=k\frac{q_1q_2}{\left|\vec{r}_2-\vec{r}_1\right|^3}\left(\vec{r}_2-\vec{r}_1\right) \tag{6}$$

התפלגות מטען רציפה

$$dq=\rho dV=\sigma dA=\lambda dl \tag{7}$$

חוק גאוס וחוק הסירקולציה בצורה דיפרנציאלית

$$\operatorname{div}\vec{E}=4\pi k\rho \tag{8}$$

$$\operatorname{rot}\vec{E}=0 \tag{9}$$

שדה חשמלי של מערכת מטענים

$$\vec{E}\left(\vec{r}\right)=\int\frac{k\left(\vec{r}-\vec{r}\,'\right)dq\,'\left(\vec{r}\,'\right)}{\left|\vec{r}-\vec{r}\,'\right|^3}+\sum_i\frac{kq_i(\vec{r}-\vec{r}_i)}{\left|\vec{r}-\vec{r}_i\right|^3} \tag{10}$$

מומנט דיפולי חשמלי

$$\vec{p}=\sum_i q_i\vec{r}_i+\int\vec{r}dq \tag{11}$$

שדה חשמלי של דיפול במרחק גדול ממנו

$$\vec{E}=\frac{k}{r^3}\left(3\left(\hat{r}\cdot\vec{p}\right)\hat{r}-\vec{p}\right) \tag{12}$$

$$r=\left|\vec{r}-\vec{r}_0\right|,\quad \hat{r}=\frac{\vec{r}-\vec{r}_0}{\left|\vec{r}-\vec{r}_0\right|} \tag{13}$$

מומנט כוח שפועל על דיפול חשמלי בשדה חשמלי

$$\vec{\tau}=\vec{p}\times\vec{E} \tag{14}$$

פוטנציאל חשמלי

$$V=\phi\left(\vec{r}\right)-\phi\left(\vec{r}_0\right)=-\int_{\vec{r}_0}^{\vec{r}}\vec{E}\cdot d\vec{l} \tag{15}$$

$$\vec{E}=-\operatorname{grad}\phi \tag{16}$$

פוטנציאל חשמלי של מטען נקודתי בראשית (כיול באינסוף)

$$\phi\left(\vec{r}\right)=\frac{kq_0}{\left|\vec{r}-\vec{r}_0\right|} \tag{17}$$

פוטנציאל חשמלי של דיפול במרחק גדול ממנו

$$\phi\left(\vec{r}\right)=\frac{k\vec{p}\cdot\left(\vec{r}-\vec{r}_0\right)}{\left|\vec{r}-\vec{r}_0\right|^3} \tag{18}$$

פוטנציאל חשמלי של התפלגות מטען (כיול באינסוף)

$$\phi\left(\vec{r}\right)=\int\frac{kdq\,'\left(\vec{r}\,'\right)}{\left|\vec{r}-\vec{r}\,'\right|} \tag{19}$$

אנרגיה פוטנציאלית של חלקיק בשדה חשמלי חיצוני

$$U\left(\vec{r}\right)-U(\vec{r}_0)=q(\phi\left(\vec{r}\right)-\phi(\vec{r}_0)) \tag{20}$$

אנרגיה פוטנציאלית של דיפול בשדה חשמלי חיצוני

$$U\left(\vec{r}\right)=-\vec{p}\cdot\vec{E}\left(\vec{r}\right) \tag{21}$$

אנרגיה האינטראקציה של מערכת מטענים נקודתיים

$$U=\frac{1}{2}\sum_{i\neq j}\frac{kq_iq_j}{|\vec{r}_i-\vec{r}_j|}=\frac{1}{2}\sum_i q_i\phi_i \qquad (22)$$

תוספת אנרגיה למערכת בהכנסת מטען dq בנקודה עם פוטנציאל ϕ (כיול באינסוף)

$$dU=\phi dq \qquad (23)$$

אנרגיה של התפלגות רציפה במרחב סופי

$$U_E=\frac{1}{2}\int\phi\left(\vec{r}\right)dq\left(\vec{r}\right) \qquad (24)$$

$$U_E=\frac{1}{2}\int\frac{kdq(\vec{r})dq\,'(\vec{r}\,')}{|\vec{r}-\vec{r}\,'|} \qquad (25)$$

$$U_E=\int\left(\frac{E^2}{8\pi k}\right)dV \qquad (26)$$

אנרגיה פוטנציאלית של מערכת המוליכים

$$U=\frac{1}{2}\sum_i q_i\phi_i \qquad (27)$$

מקדמי פוטנציאל-קיבול

$$\phi_i=\sum_j P_{ij}q_j,\quad P_{ij}=P_{ji} \qquad (28)$$

$$q_i=\sum_j C_{ij}\phi_j,\quad C_{ij}=C_{ji} \qquad (29)$$

קיבול של קבל

$$C=\frac{q}{V} \qquad (30)$$

אנרגיה של קבל

$$U=\frac{qV}{2}=\frac{q^2}{2C}=\frac{CV^2}{2} \qquad (31)$$

חוק גאוס עם חומר דיאלקטרי

$$\oint\varepsilon\vec{E}\cdot d\vec{A}=4\pi kq_{\text{in,free}} \qquad (32)$$

3 זרם חשמלי

זרם חשמלי - הגדרה

$$I=\left(\frac{dq}{dt}\right)_{\text{passing}} \qquad (33)$$

צפיפות זרם נפחית $\vec{J}$ וצפיפות פנים $\vec{\mathcal{J}}$

$$I=\int\vec{J}\cdot\hat{n}dA=\int\vec{\mathcal{J}}\cdot\hat{n}dl \qquad (34)$$

צפיפות הזרם הנוצרת ע"י מטען נע

$$\vec{J}=\rho\vec{v},\quad\vec{\mathcal{J}}=\sigma\vec{v} \qquad (35)$$

חוק שימור המטען

$$\oint_S\vec{J}\cdot\hat{n}dA=-\frac{dq_{\text{in}}}{dt} \qquad (36)$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\operatorname{div}\vec{J}=0 \qquad (37)$$

חוק אוהם מקומי

$$\vec{J}=\varpi\vec{E},\quad\vec{E}=\varrho\vec{J} \qquad (38)$$

התנגדות

$$R=\frac{V}{I} \qquad (39)$$

הספק אוהמי

$$d\mathcal{P}=\vec{E}\cdot\vec{J}dV=\varpi E^2dV=\frac{1}{\varrho}J^2dV \qquad (40)$$

$$\mathcal{P}=VI=I^2R=\frac{V^2}{R} \qquad (41)$$

כא"ם

$$\mathcal{E}=\frac{1}{q}\int\vec{F}_{\text{non-electrostatic}}\cdot d\vec{l} \qquad (42)$$

$$\mathcal{P}_{\mathcal{E}}=\mathcal{E}I \qquad (43)$$

$$W_{\mathcal{E}}=\mathcal{E}q_{\text{passed}} \qquad (44)$$

חוקי המעגלים

$$\sum I=0 \qquad (45)$$

$$\sum(\mathcal{E}-IR-\frac{q}{C})=0 \qquad (46)$$

4 כוח מגנטי

כוח לורנץ

$$\vec{F}=q\left(\vec{E}+\vec{v}\times\vec{B}\right) \qquad (47)$$

פרוסת זרם

$$I\,d\vec{l}=\vec{\mathcal{J}}\,dA=\vec{J}\,dV \tag{48}$$

כוח אמפר

$$\vec{F}=I\int d\vec{l}\times\vec{B} \tag{49}$$

$$\vec{F}=\int\vec{\mathcal{J}}\times\vec{B}\,dA \tag{50}$$

$$\vec{F}=\int\vec{J}\times\vec{B}\,dV \tag{51}$$

מומנט דיפולי מגנטי

$$\vec{m}=I\oint d\vec{A} \tag{52}$$

$$\vec{m}=\frac{1}{2}\int\vec{r}\times\vec{\mathcal{J}}dA \tag{53}$$

$$\vec{m}=\frac{1}{2}\int\vec{r}\times\vec{J}dV \tag{54}$$

מומנט פיתול על דיפול מגנטי בשדה מגנטי חיצוני

$$\vec{\tau}=\vec{m}\times\vec{B} \tag{55}$$

אנרגיה פוטנציאלית של דיפול מגנטי בשדה מגנטי חיצוני

$$U=-\vec{m}\cdot\vec{B} \tag{56}$$

5 חוקי שדה מגנטי (מגנטוסטטיקה)

חוק ביו סבר לפילוג זרם

$$\vec{B}\left(\vec{r}\right)=K_BI\int\frac{d\vec{l}\times\left(\vec{r}-\vec{r}'\right)}{\left|\vec{r}-\vec{r}'\right|^3} \tag{57}$$

$$\vec{B}\left(\vec{r}\right)=K_B\int\frac{\vec{\mathcal{J}}(\vec{r}\,')\times\left(\vec{r}-\vec{r}'\right)dA}{\left|\vec{r}-\vec{r}'\right|^3} \tag{58}$$

$$\vec{B}\left(\vec{r}\right)=K_B\int\frac{\vec{J}(\vec{r}\,')\times\left(\vec{r}-\vec{r}'\right)dV}{\left|\vec{r}-\vec{r}'\right|^3} \tag{59}$$

חוק אמפר (מגנטוסטטיקה)

$$\oint_{\partial S}\vec{B}\cdot\mathrm{d}\vec{l}=4\pi K_BI_{\text{across}} \tag{60}$$

$$\operatorname{rot}\vec{B}=4\pi K_B\vec{J} \tag{61}$$

חוק גאוס מגנטי

$$\oint\vec{B}\cdot\hat{n}dA=0 \tag{62}$$

$$\operatorname{div}\vec{B}=0 \tag{63}$$

חוק אמפר בנוכחות חומר מגנטי

$$\oint_{\partial S}\frac{\vec{B}}{\mu}\cdot d\vec{l}=4\pi K_BI_{\text{across,ext}} \tag{64}$$

$$\operatorname{rot}\left(\frac{\vec{B}}{\mu}\right)=4\pi K_B\vec{J}_{ext} \tag{65}$$

6 כא״ם מושרה והשראה אלקטרומגטית

שדה חשמלי מושרה במוליך נע בשדה מגנטי

$$\vec{E}=-\vec{v}_{\text{conductor}}\times\vec{B} \tag{66}$$

כא"מ תנועתי

$$\mathcal{E}=\oint_C\left(\vec{v}_{\text{wire}}\times\vec{B}\right)\cdot d\vec{l}, \tag{67}$$

חוק השראה אלקטרומגנטית

$$\oint_{\partial S}\vec{E}\cdot d\vec{l}=-\frac{\partial}{\partial t}\int_S\vec{B}\cdot\hat{n}dA \tag{68}$$

$$\operatorname{rot}\vec{E}=-\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \tag{69}$$

כא״ם מושרה במעגל לינארי (חוק פראדיי-לנץ)

$$\mathcal{E}=-\frac{d\Phi_B}{dt},\quad\Phi_B=\int\vec{B}\cdot\hat{n}dA \tag{70}$$

השראות עצמית

$$\Phi_L=LI \tag{71}$$

$$\mathcal{E}_L=-L\frac{dI}{dt} \tag{72}$$

$$U_L=\frac{1}{2}LI^2 \tag{73}$$

השראות הדדתי

$$\Phi_i=\sum_jL_{ij}I_j,\quad L_{ij}=L_{ji} \tag{74}$$

אנרגיה של מערכת משרנים

$$U = \frac{1}{2}\sum_{ij} L_{ij} I_i I_j$$

אנרגיה של שדה מגנטי

$$U_B = \int \frac{B^2}{8\pi K_B} dV \tag{75}$$

7 תנאיי קפיצה לשדות

$$\hat{n}_{1\to2}\cdot\left(\vec{E}_2-\vec{E}_1\right)=4\pi k\sigma_{tot} \tag{76}$$

$$\hat{n}_{1\to2}\cdot\left(\varepsilon_2\vec{E}_2-\varepsilon_1\vec{E}_1\right)=4\pi k\sigma_{free} \tag{77}$$

$$\hat{n}_{1\to2}\times\left(\vec{E}_2-\vec{E}_1\right)=0 \tag{78}$$

$$\hat{n}_{1\to2}\cdot\left(\vec{B}_2-\vec{B}_1\right)=0 \tag{79}$$

$$\hat{n}_{1\to2}\times\left(\vec{B}_2-\vec{B}_1\right)=4\pi k\vec{\mathcal{J}}_{tot} \tag{80}$$

$$\hat{n}_{1\to2}\times\left(\frac{\vec{B}_2}{\mu_2}-\frac{\vec{B}_1}{\mu_1}\right)=4\pi k\vec{\mathcal{J}}_{free} \tag{81}$$

8 משוואות מקסוול

משוואות מקסוול בצורה אינטגרלית

$$\oint_{\partial V}\vec{E}\cdot\hat{n}dA=4\pi k q_{\text{in }V} \tag{82}$$

$$\oint\vec{B}\cdot\hat{n}dA=0 \tag{83}$$

$$\oint_{\partial S}\vec{E}\cdot d\vec{l}=-\int_S\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}\cdot\hat{n}dA \tag{84}$$

$$\oint_{\partial S}\vec{B}\cdot d\vec{l}=4\pi K_B I_{across} + \frac{K_B}{k}\int_S\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}\cdot\hat{n}dA \tag{85}$$

משוואות מקסוול בצורה דיפרנציאלית

$$\operatorname{div}\vec{E}=4\pi k\rho \tag{86}$$

$$\operatorname{div}\vec{B}=0 \tag{87}$$

$$\operatorname{rot}\vec{E}=-\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \tag{88}$$

$$\operatorname{rot}\vec{B}=4\pi K_B\vec{J}+\frac{K_B}{k}\frac{\partial\vec{E}}{\partial t} \tag{89}$$

9 כלים מתמטיים

קואורדינטות כדוריות

$$\begin{aligned}
&0\le r<\infty,\quad 0\le\theta\le\pi,\quad 0\le\varphi<2\pi\\
&x=r\sin\theta\cos\varphi,\quad y=r\sin\theta\sin\varphi,\\
&\quad z=r\cos\theta\\
&\vec{r}=(r\sin\theta\cos\varphi,r\sin\theta\sin\varphi,r\cos\theta)\\
&\hat{r}=(\sin\theta\cos\varphi,\sin\theta\sin\varphi,\cos\theta)\\
&\hat{\theta}=(\cos\theta\cos\varphi,\cos\theta\sin\varphi,-\sin\theta)\\
&\hat{\varphi}=(-\sin\varphi,\cos\varphi,0)\\
&d\vec{l}=dr\,\hat{r}+rd\theta\,\hat{\theta}+r\sin\theta d\varphi\,\hat{\varphi}\\
&d\vec{A}=r^2\sin\theta d\varphi d\theta\,\hat{r}+rdrd\theta\,\hat{\varphi}\\
&\ +r\sin\theta drd\varphi\,\hat{\theta}\\
&dV=r^2\sin\theta\,drd\theta d\varphi\\
&\hat{r}\times\hat{\theta}=\hat{\varphi}
\end{aligned}$$

קואורדינטות גליליות

$$\begin{aligned}
&0\le r_\perp<\infty,\quad 0\le\varphi<2\pi,\quad -\infty<z<\infty\\
&x=r_\perp\cos\varphi,\quad y=r_\perp\sin\varphi\\
&\hat{r}_\perp=(\cos\varphi,\sin\varphi,0)\\
&\hat{\varphi}=(-\sin\varphi,\cos\varphi,0)\\
&\hat{z}=(0,0,1)\\
&d\vec{l}=dr_\perp\,\hat{r}_\perp+r_\perp d\varphi\,\hat{\varphi}+dz\,\hat{z}\\
&d\vec{A}=r_\perp\,d\varphi dz\,\hat{r}_\perp+dr_\perp dz\,\hat{\varphi}\\
&+r_\perp\,dr_\perp d\varphi\,\hat{z}\\
&dV=r_\perp\,dr_\perp dzd\varphi\\
&\hat{r}_\perp\times\hat{\varphi}=\hat{z}
\end{aligned}$$

אינטגרלים שימושיים

$$\begin{aligned}
&\int\frac{x\mathrm{d}x}{\sqrt{a^2+x^2}}=\sqrt{a^2+x^2}+C\\
&\int\frac{\mathrm{d}x}{\sqrt{a^2+x^2}}=\ln\left|x+\sqrt{a^2+x^2}\right|+C\\
&\int\frac{x\,\mathrm{d}x}{(a^2+x^2)^{3/2}}=-\frac{1}{\sqrt{a^2+x^2}}+C\\
&\int\frac{\mathrm{d}x}{(a^2+x^2)^{3/2}}=\frac{x}{a^2\sqrt{a^2+x^2}}+C\\
&\int\frac{\mathrm{d}x}{a^2+x^2}=\frac{1}{a}\arctan\frac{x}{a}+C\\
&\int\frac{\mathrm{d}x}{x}=\ln|x|+C
\end{aligned}$$

10 גרדינט, דיוורגנט, רוטור

קואורדינטות קרטזיות

$$\operatorname{grad} U = \left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)\hat{x} + \left(\frac{\partial U}{\partial y}\right)\hat{y} + \left(\frac{\partial U}{\partial z}\right)\hat{z}$$

$$\vec{A} = A_x\hat{x} + A_y\hat{y} + A_z\hat{z}$$

$$\operatorname{div} \vec{A} = \left(\frac{\partial A_x}{\partial x}\right) + \left(\frac{\partial A_y}{\partial y}\right) + \left(\frac{\partial A_z}{\partial z}\right)$$

$$\operatorname{rot} \vec{A} = \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z}\right)\hat{x}$$

$$+ \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x}\right)\hat{y} + \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y}\right)\hat{z}$$

קואורדינטות כדוריות

$$\operatorname{grad} U = \left(\frac{\partial U}{\partial r}\right)\hat{r} + \frac{1}{r}\left(\frac{\partial U}{\partial \theta}\right)\hat{\theta} + \frac{1}{r\sin\theta}\left(\frac{\partial U}{\partial \varphi}\right)\hat{\varphi},$$

$$\vec{A} = A_r\hat{r} + A_\theta\hat{\theta} + A_\varphi\hat{\varphi}$$

$$\operatorname{div} \vec{A} = \frac{1}{r^2}\frac{\partial(r^2 A_r)}{\partial r} + \frac{1}{r\sin\theta}\frac{\partial(\sin\theta A_\theta)}{\partial \theta} + \frac{1}{r\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\varphi}A_\varphi$$

$$\operatorname{rot} \vec{A} = \frac{1}{r\sin\theta}\left[\frac{\partial(\sin\theta A_\varphi)}{\partial\theta} - \frac{\partial A_\theta}{\partial\varphi}\right]\hat{r}$$

$$+ \frac{1}{r\sin\theta}\left[\frac{\partial A_r}{\partial\varphi} - \frac{\partial(r\sin\theta A_\varphi)}{\partial r}\right]\hat{\theta} + \frac{1}{r}\left[\frac{\partial(rA_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial A_r}{\partial\theta}\right]\hat{\varphi}$$

קואורדינטות גליליות

$$\operatorname{grad} U = \left(\frac{\partial U}{\partial r}\right)\hat{r}_\perp + \frac{1}{r_\perp}\left(\frac{\partial U}{\partial \varphi}\right)\hat{\varphi} + \left(\frac{\partial U}{\partial z}\right)\hat{z}$$

$$\vec{A} = A_{r_\perp}\hat{r}_\perp + A_\varphi\hat{\varphi} + A_z\hat{z}$$

$$\operatorname{div} \vec{A} = \frac{1}{r_\perp}\frac{\partial(r_\perp A_{r_\perp})}{\partial r_\perp} + \frac{1}{r_\perp}\frac{\partial A_\varphi}{\partial\varphi} + \frac{\partial A_z}{\partial z}$$

$$\operatorname{rot} \vec{A} = \left[\frac{1}{r_\perp}\frac{\partial A_z}{\partial\varphi} - \frac{\partial A_\varphi}{\partial z}\right]\hat{r}_\perp$$

$$+ \left[\frac{\partial A_{r_\perp}}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial r_\perp}\right]\hat{\varphi} + \frac{1}{r_\perp}\left[\frac{\partial(r_\perp A_\varphi)}{\partial r_\perp} - \frac{\partial A_{r_\perp}}{\partial\varphi}\right]\hat{z}$$

וקטורים

$$\vec{A}\times(\vec{B}\times\vec{C}) = \vec{B}(\vec{A}\cdot\vec{C}) - \vec{C}(\vec{A}\cdot\vec{B})$$

$$\vec{A}\cdot(\vec{B}\times\vec{C}) = \vec{B}\cdot(\vec{C}\times\vec{A}) = \vec{C}\cdot(\vec{A}\times\vec{B})$$