

MEHANIČKO TITRANJE

Elastičnost materijala

$$\frac{F}{S} = E \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad \sigma = \frac{F}{S} \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \Rightarrow \sigma = E\varepsilon \quad \frac{\Delta d}{d} = -\mu \cdot \frac{\Delta l}{l}$$

$$p = -B \cdot \frac{\Delta V}{V} \quad \kappa = \frac{1}{B}$$

$$F_{el} = -k \cdot \Delta l$$

Moduli elastičnosti materijala

Youngov modul elastičnosti	$E = \sigma \frac{l}{\Delta l}$	Poissonov broj	$\mu = -\frac{d}{\Delta l} \frac{\Delta l}{l}$
Volumni modul elastičnosti	$B = \frac{E}{3(1-2\mu)}$	Stlačivost	κ
Modul torzije	$G = \frac{E}{2(1+\mu)}$	Torziona konstanta	D

Harmonički oscilator

$$\frac{d^2 s}{dt^2} + \frac{k}{m} s = 0 \quad s(t) = A \sin(\omega t - \varphi_0)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad \omega = 2\pi f$$

$$E = \frac{1}{2} k A^2$$

Matematičko njihalo

$$\frac{d^2 \vartheta}{dt^2} + \frac{g}{l} \vartheta = 0 \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Fizikalno njihalo

$$\frac{d^2 \vartheta}{dt^2} + \frac{mgL}{I} \vartheta = 0 \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgL}}$$

Torzijsko njihalo

$$\frac{d^2 \vartheta}{dt^2} + \frac{D}{I} \vartheta = 0 \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{D}}$$

$$M = D\vartheta \quad D = \frac{\pi r^4}{2 l} G$$

Jednostavno harmoničko titranje
 $\frac{d^2 s}{dt^2} + \omega_0^2 s = 0$
 T_0 - neprigušeno titranje

$$s(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi)$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$$

Prigušeno titranje
 $\frac{d^2 s}{dt^2} + 2\delta \frac{ds}{dt} + \omega_0^2 s = 0$
 T - prigušeno titranje

$$s(t) = Ae^{-\delta t} \sin(\omega_0 t + \varphi)$$

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \quad \delta = \frac{b}{2m}$$

Kritično prigušenje: $\delta^2 = \omega_0^2$
 Logaritamski dekrement:
 $\Lambda = \delta \cdot T_0$
 Faktor dobrote: $Q = \frac{\omega_0}{2\delta}$

Prisilno titranje
 $\frac{d^2 s}{dt^2} + 2\delta \frac{ds}{dt} + \omega_0^2 s = A_0 \sin \omega t$

$$s(t) = A(\omega) \sin(\omega t - \varphi)$$

$$A_0 = \frac{F_0}{m}$$

Zbrajanje dvaju različitih paralelnih harmoničkih titranja

a) jednakih frekvencija:

$$s = s_1 + s_2 = A_1 \sin(\omega t + \varphi_{01}) + A_2 \sin(\omega t + \varphi_{02})$$

b) različitih frekvencija: ($A_1 = A_2 = A$)

$$s = s_1 + s_2 = A [\sin(\omega_1 t + \varphi_{01}) + \sin(\omega_2 t + \varphi_{02})]$$

Frekvencija udara: $f_u = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2\pi} = f_1 - f_2$

Zbrajanje ortogonalnih harmoničkih titranja

$$x = A_1 \sin(\omega_1 t) \quad y = A_2 \sin(\omega_2 t + \Delta\varphi)$$

$I = \frac{\Delta E}{S \Delta t} = \frac{P}{S} = wv$	Intenzitet (gustoća) energijskog toka
--	---------------------------------------

Matematičke relacije:

$$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin \alpha \cos \beta \pm \cos \alpha \sin \beta$$

$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos \alpha \cos \beta \mp \sin \alpha \sin \beta$$

$$\cos \alpha \cdot \cos \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)]$$

MEHANIČKI VALOVI

$$\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = 0$$

$$s(x, t) = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right), \quad s(x, t) = A \sin(\omega t - kx)$$

$$v = \lambda \cdot f, \quad v = \frac{\omega}{k}, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} x = k \cdot x$$

Širenje valova u sredstvu bez apsorpcije:

Ravni val: $s(x, t) = A \sin(\omega t - kx + \varphi_0)$

Sferni val: $s(r, t) = \frac{A}{r} \sin(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \varphi_0)$

Rub: čvrst – čvrst: $\lambda_n = \frac{2L}{n}$

Kundtova cijev

$$f_s = \frac{v_s}{\lambda_s} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{frekvencija u štapu}$$

$$v_p = f \lambda_p = \sqrt{\kappa \frac{p}{\rho}} \quad \text{brzina u plinu}$$

Energija mehaničkih valova

Ukupna energija čestice koja harmonički titra:

$$E = E_k + E_p = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2$$

$\Delta E = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 n \Delta V$	n – broj čestica u jedinici volumena
$w = \frac{\Delta E}{\Delta V}$	Gustoća energije
$w = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2$	
$P = \frac{w S v \Delta t}{\Delta t} = w S v$	Snaga
$P = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2 S v$	
$I = \frac{\Delta E}{S \Delta t} = \frac{P}{S} = w v$	Intenzitet (gustoća) energijskog toka

Širenje valova u sredstvu sa apsorpcijom:

Ravni val: $s(x, t) = A e^{-\alpha x} \sin(\omega t - kx + \varphi_0)$

Sferni val: $s(r, t) = \frac{A}{r} e^{-\alpha r} \sin(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \varphi_0)$

Transverzalni valovi na žici: $\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} - \frac{\mu}{F} \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = 0,$

Brzina širenja vala: $v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$

Refleksija i transmisija valova:

$$A_r = \frac{v_2 - v_1}{v_1 + v_2} A_u, \quad A_t = \frac{2v_2}{v_1 + v_2} A_u$$

Longitudinalni valovi (Valovi zvuka)

$$\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} - \frac{\rho}{E} \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} - \frac{\rho}{B} \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = 0$$

u čvrstom tijelu	u tekućini	u plinovima
$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$	$v = \sqrt{\frac{1}{\kappa \rho}}$	$v = \sqrt{\frac{\kappa p}{\rho}} = \sqrt{\kappa \frac{RT}{M}}$

Brzina zvuka u zraku u ovisnosti o temperaturi:

$$v = 332 \text{ m/s} \sqrt{1 + \frac{t}{273.15 \text{ K}}}$$

Stojni valovi na napetoj žici

Uvjet za nastajanje stojnih valova:

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Transverzalni stojni valovi na napetoj žici

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = n \frac{v}{2L}, \quad f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

osnovna frekvencija: $f_0 = \frac{v}{2L}$

Stojni longitudinalni valovi

Matematički oblik stojnog vala u štapu:

$$s(x, t) = 2A \cos(kx) \sin(\omega t)$$

Razina jakost zvuka: $L = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$

$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ - jakost zvuka na pragu čujnosti

Dopplerov efekt: $f_D = f_I \frac{v - \vec{r}_o \cdot \vec{v}_D}{v - \vec{r}_o \cdot \vec{v}_I}$

v – brzina zvuka, v_D - brzina detektora, v_I - brzina izvora

ELEKTROSTATIKA

Tok električnog polja kroz površinu S : $\Phi = \varepsilon ES = DS$

Vektor električnog pomaka: $\vec{D} = \varepsilon \vec{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E}$

Gaussov zakon za elektrostatsko polje: $\oiint_s \vec{D} \cdot d\vec{S} = Q$

Prva Maxwellova jednačnja:

$$\oiint_s \vec{D} \cdot d\vec{S} = \iiint_V \rho dV, \quad \text{div } \vec{D} = \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$$

Coulombov zakon: $\vec{F} = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi \varepsilon r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r}$

Jakost električnog polja u nekoj točki prostora:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q'}$$

Jakost električnog polja točkastog naboja na udaljenosti r :

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi \varepsilon} \cdot \frac{Q}{r^2} \hat{r} = \frac{1}{4\pi \varepsilon} \cdot \frac{Q}{r^3} \vec{r}, \quad \vec{r} = r \cdot \hat{r}$$

(Za točkasti naboj iznos jakosti el. polja: $E = \frac{1}{4\pi \varepsilon} \cdot \frac{Q}{r^2}$)

Rad električne sile pri pomicanju naboja Q' iz točke A u točku

$$B: W_{AB} = Q' \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s} = E_{pB} - E_{pA} = Q'(\varphi_A - \varphi_B) = Q' \cdot U_{AB}$$

Potencijalna energija dvaju točkastih naboja Q i Q' :

$$E_p = \frac{1}{4\pi \varepsilon} \cdot \frac{QQ'}{r}$$

Električni potencijal točkastog naboja Q :

$$\varphi = \frac{1}{4\pi \varepsilon} \cdot \frac{Q}{r} \quad \left(\varphi = \frac{W}{Q} \right)$$

Kada el. polje ovisi samo o udaljenosti r , jakost el. polja i el. potencijal povezani su relacijom:

$$E(r) = -\frac{d\varphi}{dr}, \quad E(r) = -\text{grad } \varphi = -\vec{\nabla} \varphi$$

Gradijent skalara definiran je kao:

$$\text{grad } A = \vec{\nabla} \cdot A = \frac{\partial A}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial A}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial A}{\partial z} \vec{k}$$

Divergencija vektora definirana je kao:

$$\text{div } \vec{A} = \vec{\nabla} \cdot \vec{A} = \left(\frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k} \right) \cdot (A_x \vec{i} + A_y \vec{j} + A_z \vec{k})$$

Električni dipol: $\vec{p} = Q\vec{l}$, gdje je l udaljenost između dva naboja (suprotnih predznaka)

Potencijalna energija el. dipola: $E_p = -\vec{p} \cdot \vec{E}$

Električni kapacitet vodiča: $C = \frac{Q}{\varphi}$

$\lambda = \frac{Q}{l}$ - linijska gustoća naboja

$\sigma = \frac{Q}{S}$ - plošna gustoća naboja

$\rho = \frac{Q}{V}$ - volumna gustoća naboja

Električni kapacitet kondenzatora: $C = \frac{Q}{U}$

Kapacitet pločastog kondenzatora: $C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d}$

Energija električnog polja: $E_e = \frac{1}{2} \varepsilon E^2 V$, $V = Sd$

Gustoća energije električnog polja:

$$w_e = \frac{E_e}{V} = \frac{1}{2} \varepsilon E_0^2 = \frac{1}{2} ED$$

ELEKTROMAGNETIZAM

Tok magnetskog polja kroz površinu S :

$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{S} = BS \cdot \cos \vartheta$$

Gaussov zakon za magnetsko polje: $\oiint_s \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$

Druga Maxwellova jednačnja:

$$\oiint_s \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0, \quad \text{div } \vec{B} = \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

Magnetska indukcija i jakost magnetskog polja:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$$

Biot – Savartov zakon: $d\vec{B} = \frac{\mu}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot (d\vec{l} \times \vec{r})}{r^3}$

Magnetska indukcija ravnog vodiča: $B = \frac{\mu I}{2\pi a}$

Magnetska indukcija unutar zavojnice: $B = \mu \frac{NI}{l}$

Lorentzova sila

Gibanje električki nabijene čestice:

a) u stalnom magnetskom polju $\vec{F} = Q(\vec{v} \times \vec{B})$

b) u stalnom električnom polju $\vec{F} = Q\vec{E}$

Vodič kojim teče struja u magnetskom polju: $\vec{F} = I(\vec{l} \times \vec{B})$

Jakost električne struje: $I = \frac{Q}{\Delta t}$

Faradjev zakon elektromagnetske indukcije:

$$\varepsilon_{ind} = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

Treća Maxwellova jednadžba:

$$\oint_K \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad , \quad \text{rot } \vec{E} = \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Ampereov zakon: $\oint_K \vec{H} \cdot d\vec{s} = \sum_i I_i = \iint_S \vec{j} \cdot d\vec{S}$

Četvrta Maxwellova jednadžba:

$$\oint_K \vec{H} \cdot d\vec{s} = \iint_S \vec{j} \cdot d\vec{S} + \frac{d}{dt} \iint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} \quad , \quad \text{rot } \vec{H} = \vec{j} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

Provodna struja: $I_{pr} = \iint_S \vec{j} \cdot d\vec{S}$

Zakon očuvanja naboja: $\iint_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = -\frac{d}{dt} \iiint_V \rho \cdot dV$

Simetrija električnog i magnetskog polja:

Faradayev zakon indukcije	Ampereov zakon
$\oint_K \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$	$\oint_K \vec{H} \cdot d\vec{s} = \frac{d}{dt} \iint_S \vec{D} \cdot d\vec{S}$

Pregled Maxwellovih jednadžbi:

Integralni oblik	Diferencijalni oblik
$\iiint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \iiint_V \rho dV$	$\text{div } \vec{D} = \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$
$\iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$	$\text{div } \vec{B} = \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$
$\oint_K \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$	$\text{rot } \vec{E} = \vec{\nabla} \times \vec{B} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
$\oint_K \vec{H} \cdot d\vec{s} = \iint_S \vec{j} \cdot d\vec{S} + \frac{d}{dt} \iint_S \vec{D} \cdot d\vec{S}$	$\text{rot } \vec{H} = \vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$

Maxwellove jednadžbe u vakuumu:

Integralni oblik	Diferencijalni oblik
$\iiint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = 0$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$
$\iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$	$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$
$\oint_K \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$
$\oint_K \vec{B} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{c^2} \frac{d}{dt} \iint_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$

Energija magnetskog polja: $E_m = \mu \frac{N^2 SI^2}{2l} = \frac{\mu}{2} VH^2$

Gustoća energije magnetskog polja:

$$w_m = \frac{E_m}{V} = \frac{1}{2} \mu H^2 = \frac{1}{2\mu} B_0^2$$

Elektromagnetski valovi

Valne jednadžbe: $\nabla^2 \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad \nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$

Brzina širenja EM valova u sredstvu: $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$

Indeks loma sredstva: $n = \frac{c}{v}$

Jednadžba elektromagnetskog vala

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \sin \omega \left(t - \frac{\vec{r} \cdot \vec{u}}{v} \right) = \vec{E}_0 \sin (\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})$$

$$\vec{B} = \vec{B}_0 \sin \omega \left(t - \frac{\vec{r} \cdot \vec{u}}{v} \right) = \vec{B}_0 \sin (\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}) \quad , \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Valno otpor (valna impedancija sredstva): $R_0 = \frac{E_0}{H_0} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$

Veza između amplituda E_0 i B_0 : $E_0 = v \cdot B_0$

Ukupna gustoća energije EM- polja:

$$w = w_e + w_m = \frac{1}{2} \epsilon E_y^2 + \frac{1}{2\mu} B_z^2$$

Gustoća toka energije (intenziteta), tj. snaga po jediničnoj površini (srednja vrijednost iznosa Poyntingovog vektora):

$$\langle \mathcal{P} \rangle = \vec{\mathcal{P}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} E_0^2 = \frac{1}{2} E_0 H_0$$

GEOMETRIJSKA OPTIKA

Zakon loma (Snelliusov zakon): $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$

Jednadžba konjugacije za sferno zrcalo i za tanku leću:

$$j = \frac{1}{f} \text{ [Dpt]} \quad , \quad \frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

Linearno povećanje sfernog zrcala i tanke leće:

$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{b}{a}$$

FIZIKALNA OPTIKA

Youngov pokus: $\frac{a \cdot y}{d} = k \cdot \lambda$, $k=1,2,3,\dots$

a - udaljenost između pukotina, d - udaljenost pukotina od zastora, y - udaljenost k -te pruge od središnje pruge

Fraunhoferov ogib (Difrakcija)

Jedna pukotina:
$$I(\alpha) = I_0 \frac{\sin^2\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \alpha\right)}{\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \alpha\right)^2}$$

Uvjet za minimum: $d \sin \alpha_k = k \lambda$	Uvjet za pokrajni maksimum: $d \sin \alpha = \frac{2k+1}{2} \lambda$, $k = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$
--	--

Dvije pukotine:

$$I_D(\alpha) = I_0 \left[\frac{\sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \alpha\right)}{\frac{\pi d}{\lambda} \sin \alpha} \right]^2 \left[\frac{\sin\left(\frac{2\pi D}{\lambda} \sin \alpha\right)}{\sin\left(\frac{\pi D}{\lambda} \sin \alpha\right)} \right]^2$$

d - širina pukotine, D - razmak između pukotina

Uvjet za minimum: $d \sin \alpha_k = (2k \pm 1) \frac{\lambda}{2}$	Uvjet za maksimum: $d \sin \alpha_k = k \lambda$
---	---

Ogib na optičkoj rešetki:

$$I(\alpha) = I_0 \left[\frac{\sin\left(\frac{\pi b}{\lambda} \sin \alpha\right)}{\frac{\pi b}{\lambda} \sin \alpha} \right]^2 \left[\frac{\sin\left(\frac{2\pi N d}{\lambda} \sin \alpha\right)}{\sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \alpha\right)} \right]^2$$

d - udaljenost između pukotina, N - broj pukotina

Uvjet za minimum: $d \sin \alpha_k = \left(k \pm \frac{m}{N}\right) \frac{\lambda}{2}$, $k = 0, 1, 2, 3, \dots$, $m = 1, 2, 3, \dots, (N-1)$	Uvjet za maksimum: $d \sin \alpha_k = k \lambda$
--	---

Moć razlučivanja rešetke: $\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{1}{kN}$

Kutna disperzija svjetlosti: $\frac{d\alpha}{d\lambda} = \frac{k}{d \cos \alpha}$

Polarizacija svjetlosti

Polarizacija svjetlosti refleksijom:

$$\operatorname{tg} \theta_B = n \quad \text{Brewsterov zakon}$$

Polarizacija svjetlosti pomoću selektivne apsorpcije:

$$I_\varphi = I(0) \cdot \cos^2 \varphi \quad \text{Malusov zakon}$$

FOTOMETRIJA

Svjetlosni tok	Φ_v
Intenzitet svjetlosti	$I_v(\hat{r}) = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} \text{ [cd]}$
Luminacija (sjaj)	$L_v(\hat{r}) = \frac{dI_v(\theta, \varphi)}{dS \cos \theta} \text{ [nit]}$
Osvjetljenje (iluminacija)	$E_v(\hat{r}) = \frac{d\Phi_v}{dS} \text{ [lx]}$
Svjetljenje (svjetlosna ekscitancija)	$M_v = \pi \cdot L_v$

Srednja jakost svjetlosti: $I_s = \frac{\Phi_v}{4\pi}$

Lambertov zakon: $E = \frac{I}{r^2} \cos \theta$

KVANTNA PRIRODA SVJETLOSTI

Stefan – Boltzmannov zakon

$$I = \int_0^\infty f(\lambda, T) d\lambda, \quad I = \sigma T^4$$

Fotoelektrični efekt:

$$h \cdot f_g = W_i, \quad h \cdot f = W_i + E_k, \quad E_k = e \cdot U_z$$

Konstante:

$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$
$e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
$m_e = 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
$m_p = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$
$\sigma = 6.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4)$
$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$