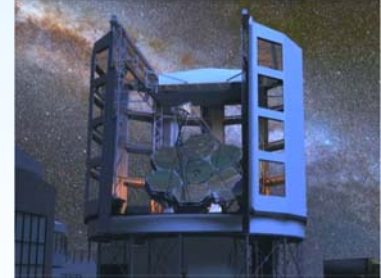
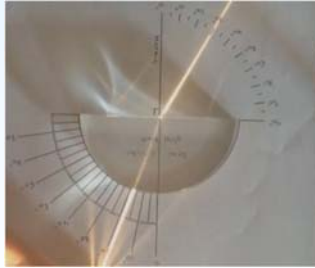
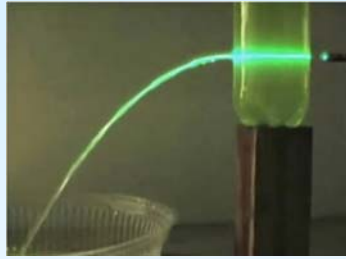
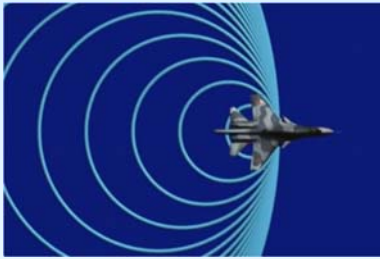




Vågrörelselära och optik



Kapitel 32 - Elektromagnetiska vågor

Vincent Hedberg - Lunds Universitet

1



Vågrörelselära och optik



Kurslitteratur: University Physics by Young & Friedman (14th edition)

Harmonisk oscillator:	Kapitel 14.1 - 14.4
Mekaniska vågor:	Kapitel 15.1 - 15.8
Ljud och hörande:	Kapitel 16.1 - 16.9
Elektromagnetiska vågor:	Kapitel 32.1 & 32.3 & 32.4
Ljusets natur:	Kapitel 33.1 - 33.4 & 33.7
Stråloptik:	Kapitel 34.1 - 34.8
Interferens:	Kapitel 35.1 - 35.5
Diffraktion:	Kapitel 36.1 - 36.5 & 36.7

Vincent Hedberg - Lunds Universitet

2



Vågrörelselära och optik



Tid	Må	31-Oct	Ti	01-Nov	On	02-Nov	To	03-Nov	Fr	04-Nov
08-10										
10-12			Våglära (A)	kap 14 kap 14		Våglära (A)	kap 14 kap 15		Våglära (A)	kap 15 kap 15
13-15			Övningar Optik&Våg (L218-19)						Övningar Optik&Våg (L218-19)	
15-17										
Tid	Må	07-Nov	Ti	08-Nov	On	09-Nov	To	10-Nov	Fr	11-Nov
08-10							Våglära (A)	kap 16 kap 32		
10-12	Våglära (A)	kap 15 kap 16	Våglära (A)	kap 16 kap 16					Våglära/Optik (A)	kap 32 kap 33
13-15			Övningar Optik&Våg (d. 13-16) (L218-19)						Övningar Optik&Våg (L218-19)	
15-17										
Tid	Må	14-Nov	Ti	15-Nov	On	16-Nov	To	17-Nov	Fr	18-Nov
08-10										
10-12	Optik (A)	kap 33 kap 34	Optik (A)	kap 34 kap 34					Optik (A)	kap 34 kap 34
13-15			Övningar Optik&Våg (L218-19)						Övningar Optik&Våg (L218-19)	
15-17										
Tid	Må	21-Nov	Ti	22-Nov	On	23-Nov	To	24-Nov	Fr	25-Nov
08-10			Optik (A)	kap 35 kap 36						
10-12	Optik (A)	kap 34 kap 35	Optik (A)	kap 36 kap 36						
13-15			Övningar Optik&Våg (L218-19)							
15-17										




Elektromagnetiska vågor Maxwells ekvationer



Del 1. Maxwells ekvationer

James Clerk Maxwell

- Unified Electric and Magnetic Theory.
- Predicted Electromagnetic Wave Propagation
- Theorized that light was an electromagnetic wave.
- Could "low-frequency" waves be generated ?



James Clerk Maxwell (1831-1879)



Elektromagnetiska vågor

Maxwells ekvationer



Maxwells ekvationer

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{\text{encl}}}{\epsilon_0} \quad (\text{Gauss's law})$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (\text{Gauss's law for magnetism})$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left(i_C + \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right)_{\text{encl}} \quad (\text{Ampere's law})$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (\text{Faraday's law})$$

\vec{E} - the electric field intensity (N/C)

Φ_E - electric flux (Nm²/C)

\vec{B} - magnetic field strength (A/m)

Φ_B - magnetic flux (T/m²)



Elektromagnetiska vågor

Maxwells ekvationer



Konsekvenserna av Maxwells ekvationer för magnetiska och elektriska fält:

1. Ett **statiskt elektriskt fält** kan existera **utan ett magnetiskt fält**.
Exempel: En kondensator med en konstant laddning utan magnetiskt fält.
2. Ett **konstant magnetiskt fält** kan existera **utan ett elektriskt fält**.
Exempel: Ledning med konstant ström har magnet fält men inte elektriskt fält
3. Finns ett **elektriskt fält som varierar med tiden** finns också **magnet fält**.
4. Finns ett **magnetiskt fält som varierar med tiden** finns också **elektriskt fält**.
5. **Magnet fält** kan genereras av permanent **magneter**, en elektrisk **ström** eller ett **elektriskt fält** som varierar med tiden.
6. Magnetiska monopoler existerar inte. Alla flödeslinjer som beskriver magnetfält är slutna.



Elektromagnetiska vågor Maxwells ekvationer



6. Magnetiska monopoler existerar inte enligt de experiment som hittills gjorts.

Enligt vissa teorier kan magnetiska monopoler existera och flera experiment runt om i världen letar efter dem. Bland annat mitt ATLAS experiment:



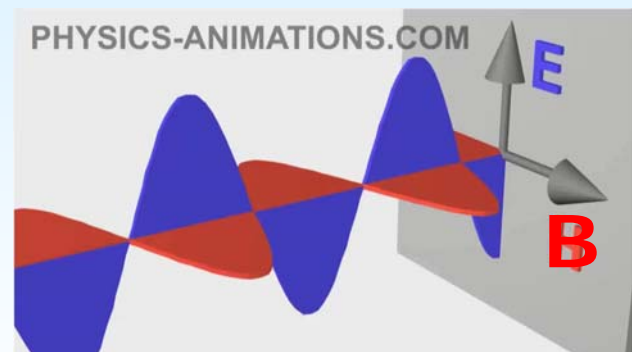
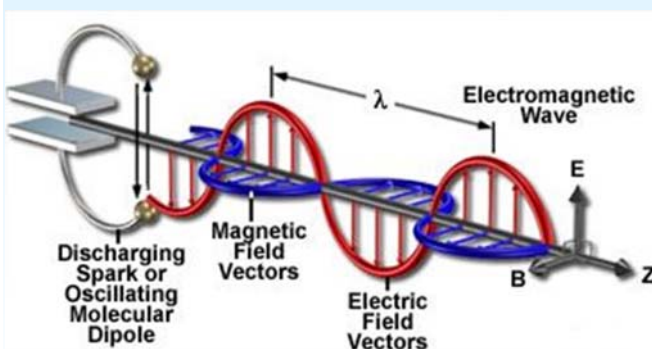
Men inget experiment har hittat monopoler !



Elektromagnetiska vågor Maxwells ekvationer



Den elektromagnetiska vågen består av ett elektriskt och ett magnetiskt fält.





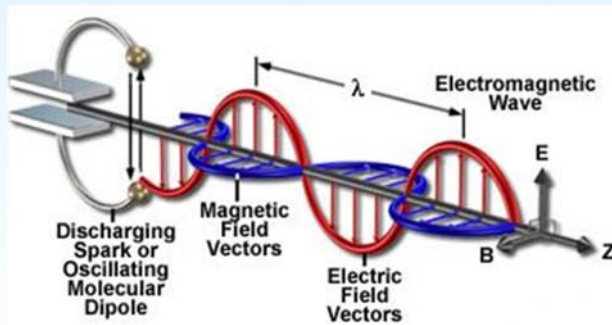
Elektromagnetiska vågor Maxwells ekvationer



Elektromagnetiska vågor skapas av **laddade partiklar** som är **i rörelse**.

En elektromagnetisk våg kan **transportera energi i vakuum** (men inte en mekanisk våg).

En elektromagnetisk våg kan skapas av en urladdningskondensator:



Fältet är starkast 90 grader mot laddningarnas rörelse och noll i samma riktning som laddningarnas rörelse.

När **laddningarna** åker upp och ner i gnistgapet skapas ett **magnetisk fält** i horisontal planet.

Det varierande magnet fältet generar ett vertikalt **elektriskt fält**.

Det magnetiska och elektriska fälten utbreder sig i rymden som en **elektromagnetisk våg**.



Elektromagnetiska vågor Maxwells ekvationer



Experiment som visar hur laddningar i rörelse skapar ett elektromagnetiskt fält.



<https://www.youtube.com/watch?v=9gDF16Ge7g>

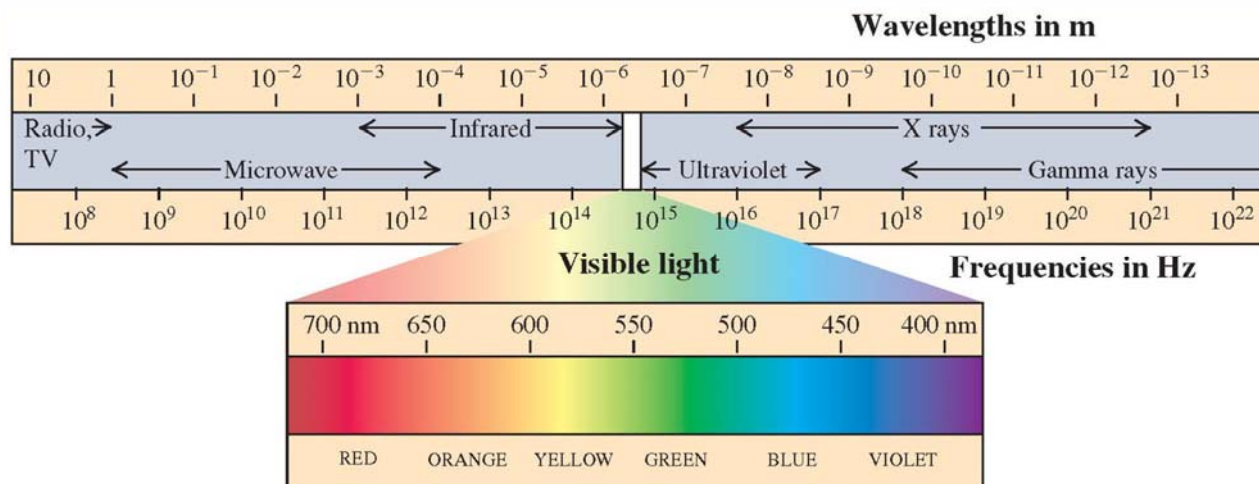


Del 2. Elektromagnetiska vågor



Det elektromagnetiska spektrumet

$$\lambda = c / f$$

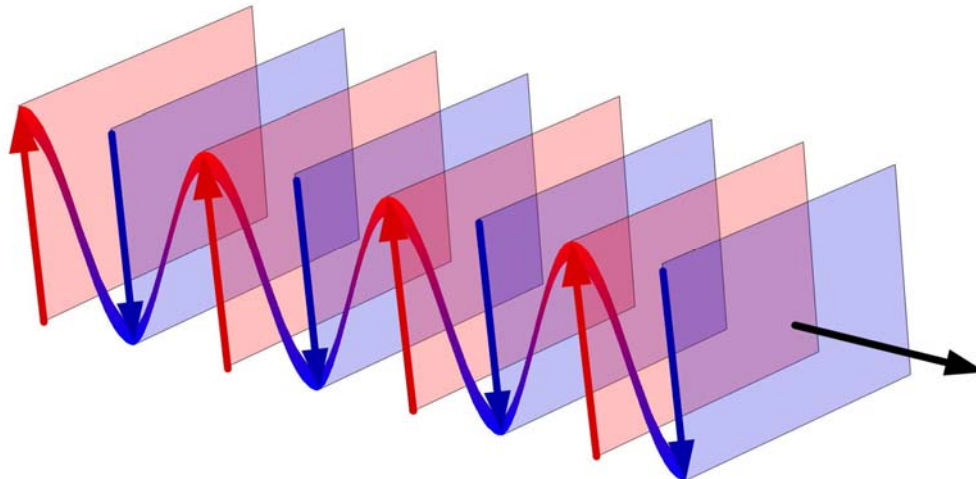




Elektromagnetiska vågor



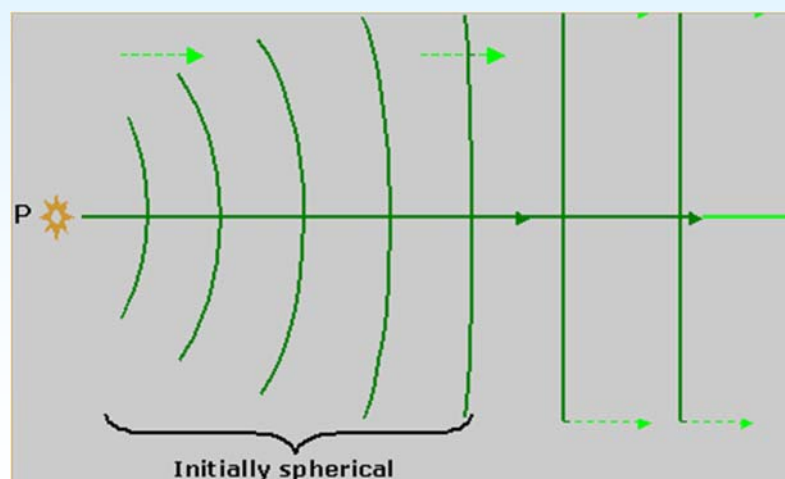
Vågfronter: ytor med konstant fas



Elektromagnetiska vågor



Vågfronter beror på avståndet till källan

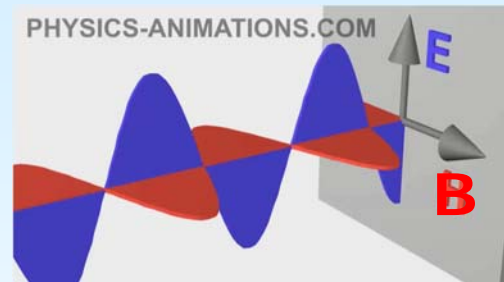




Elektromagnetiska vågor

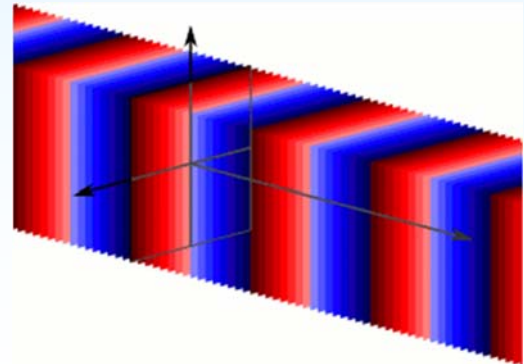


Elektromagnetiska vågor är transversella eftersom E- och B-fälten är vinkelräta mot utbredningsriktningen.



En plan våg är en våg med konstant frekvens vars vågfronter är oändliga parallella plan med konstant topp-till-topp-amplitud.

Vid en viss punkt och tid har alla E och B-vektorerna i planet samma storlek.



Fullständiga plana vågor existerar inte eftersom endast en våg med oändlig utsträckning kan vara plan. Men många vågor är approximativt plana vågor i ett lokaliserat område i rymden.



Elektromagnetiska vågor



För plana elektromagnetiska vågor kan man hitta relationer mellan storleken på det magnetiska och elektriska fältet från två av Maxwells ekvationer:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (\text{Faraday's law})$$

$$\Rightarrow E = cB$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left(i_C + \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right)_{\text{encl}} \quad (\text{Ampere's law})$$

$$\Rightarrow E = \frac{B}{\epsilon_0 \mu_0 c}$$

ϵ = Permittiviteten = Ett mediums förmåga att ha ett elektriskt fält i sig.

μ = Permeabilitet = Ett mediums förmåga att ha ett magnetiskt fält i sig.



Ljushastigheten från Maxwells ekvationer:

$$E = c B \quad \text{from Faraday's law}$$

$$E = B / (\epsilon_0 \mu_0 c) \quad \text{from Ampere's law}$$

$$\epsilon_0 \text{ is the permittivity in vacuum} = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

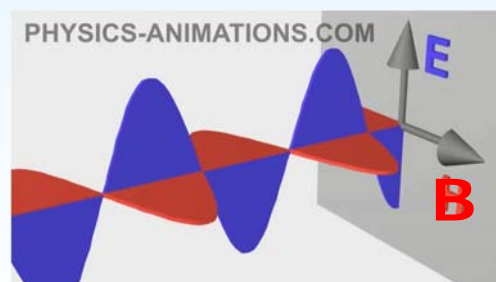
$$\mu_0 \text{ is the permeability in vacuum} = 1.26 \times 10^{-6} \text{ N/A}^2$$



$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$$



Del 3. Vågfunktionen



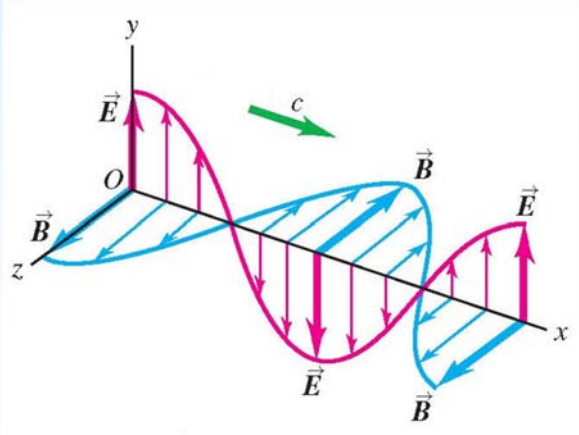


Elektromagnetiska vågor

Vågfunktionen



Den elektromagnetiska vågfunktionen
för sinusformade vågor



$$\vec{E}(x, t) = \hat{j}E_{\max} \cos(kx - \omega t)$$

$$\vec{B}(x, t) = \hat{k}B_{\max} \cos(kx - \omega t)$$

inte samma k
(det ena är en riktningsvektor och den andra vågtalet)



Elektromagnetiska vågor

Vågfunktionen



$$\vec{E}(x, t) = \hat{j}E_{\max} \cos(kx - \omega t)$$

$$\vec{B}(x, t) = \hat{k}B_{\max} \cos(kx - \omega t)$$

Amplituden: $E_{\max} = c B_{\max}$

Vågtalet: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

$$c = \lambda / T$$

$$f = 1 / T$$

Vinkelfrekvensen: $\omega = \frac{2\pi}{T}$

$$c = \lambda / T = (2\pi/k) / (2\pi/\omega) = \omega / k$$



Elektromagnetiska vågor

Faradays lag



$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (\text{Faraday's law})$$

Plan våg

$$\frac{\partial E_y(x, t)}{\partial x} = -\frac{\partial B_z(x, t)}{\partial t}$$

$$-E_{max} k \sin(kx - \omega t) = -B_{max} \omega \sin(kx - \omega t)$$

$$E_{max} = \frac{\omega}{k} B_{max} = c B_{max}$$

Vågfunktionen:

$$\vec{E}(x, t) = \hat{j} E_{max} \cos(kx - \omega t)$$

$$\vec{B}(x, t) = \hat{k} B_{max} \cos(kx - \omega t)$$



Jämför vågfunktioner



Mekaniska vågor

$$y(x, t) = A \cos(kx - \omega t)$$

Amplitud: A

Vågtalet: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

Vinkelfrekvens: $\omega = \frac{2\pi}{T}$

$$v = \lambda / T = \omega / k$$

Elektromagnetiska vågor

$$\vec{E}(x, t) = \hat{j} E_{max} \cos(kx - \omega t)$$

$$\vec{B}(x, t) = \hat{k} B_{max} \cos(kx - \omega t)$$

Amplitud: $E_{max} = c B_{max}$

Vågtalet: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

Vinkelfrekvens: $\omega = \frac{2\pi}{T}$

$$c = \lambda / T = \omega / k$$



Elektromagnetiska vågor

Vågfunktionen



I ett dielektrisk material är ljushastigheten mindre än c !

Elektromagnetiska vågor i materia:

$$\begin{aligned} c &\rightarrow v \\ \mu_0 &\rightarrow \mu \\ \epsilon_0 &\rightarrow \epsilon \end{aligned}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}}$$

Dielektrisk konstant

$$K = \epsilon / \epsilon_0$$

Relative permeabilitet

$$K_m = \mu / \mu_0$$



Elektromagnetiska vågor

Vågfunktionen



Elektromagnetiska vågor i vakuum

$$E = c B \quad \text{from Faraday's law}$$

$$E = B / (\epsilon_0 \mu_0 c) \quad \text{from Ampere's law}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

Elektromagnetiska vågor i materia

$$E = v B \quad \text{from Faraday's law}$$

$$E = B / (\epsilon \mu v) \quad \text{from Ampere's law}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}}$$

Permabilitet

Permittivitet

$$\frac{c}{v} = n = \frac{\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}}{\frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}}} = \sqrt{K K_m} \cong \sqrt{K}$$



$$v = \frac{c}{\sqrt{K K_m}}$$

Brytnings index

Dielektrisk konstant

Relativ permeabilitet

$$K = \epsilon / \epsilon_0$$

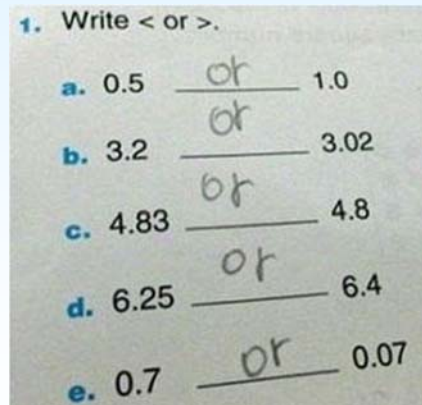
$$K_m = \mu / \mu_0$$



Elektromagnetiska vågor problem



Del 4. Problem lösning

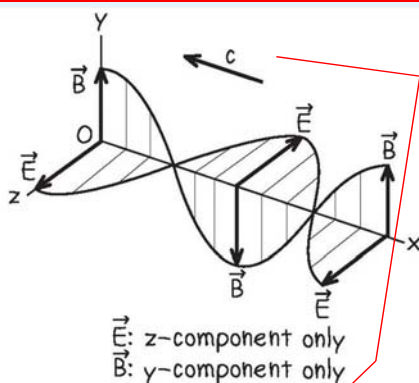


Elektromagnetiska vågor problem



En laser skickar ut en sinus formad elektromagnetisk våg i den negativ x-riktningen med våglängden $10.6 \mu\text{m}$.
E-fältet är i z-riktningen och $E_{\text{max}} = 1.5 \text{ MV/m}$.

Vad blir vågfunktionen för laser strålen ?



$$\vec{E}(x, t) = \hat{k}E_{\text{max}}\cos(kx + \omega t)$$

$$\vec{B}(x, t) = \hat{j}B_{\text{max}}\cos(kx + \omega t)$$

$$E_{\text{max}} = c B_{\text{max}}$$

$$k = 2\pi/\lambda$$

$$c = \omega/k$$

$$B_{\text{max}} = \frac{E_{\text{max}}}{c} = \frac{1.5 \times 10^6 \text{ V/m}}{3.0 \times 10^8 \text{ m/s}} = 5.0 \times 10^{-3} \text{ T}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi \text{ rad}}{10.6 \times 10^{-6} \text{ m}} = 5.93 \times 10^5 \text{ rad/m}$$

$$\omega = ck = (3.00 \times 10^8 \text{ m/s})(5.93 \times 10^5 \text{ rad/m}) = 1.78 \times 10^{14} \text{ rad/s}$$

$$\vec{E}(x, t) = \hat{k}(1.5 \times 10^6 \text{ V/m}) \times \cos[(5.93 \times 10^5 \text{ rad/m})x + (1.78 \times 10^{14} \text{ rad/s})t]$$

$$\vec{B}(x, t) = \hat{j}(5.0 \times 10^{-3} \text{ T}) \times \cos[(5.93 \times 10^5 \text{ rad/m})x + (1.78 \times 10^{14} \text{ rad/s})t]$$



Elektromagnetiska vågor problem



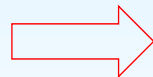
Gult ljus med $f = 5.09 \times 10^{14}$ Hz går från vakuum in i en diamant.

Vad är våglängden i vakuum ?

Vad är våglängden och våghastigheten i diamanten om $K = 5.84$ & $K_m = 1.00$

Vakuum:

$$v = c = \lambda / T = \lambda f$$



$$\lambda_{\text{vacuum}} = \frac{c}{f} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{5.09 \times 10^{14} \text{ Hz}} = 5.89 \times 10^{-7} \text{ m} = 589 \text{ nm}$$

Diamant:

$$v = \frac{c}{\sqrt{KK_m}}$$



$$v_{\text{diamond}} = \frac{c}{\sqrt{KK_m}} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{\sqrt{(5.84)(1.00)}} = 1.24 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$\lambda_{\text{diamond}} = \frac{v_{\text{diamond}}}{f} = \frac{1.24 \times 10^8 \text{ m/s}}{5.09 \times 10^{14} \text{ Hz}} = 2.44 \times 10^{-7} \text{ m} = 244 \text{ nm}$$



Elektromagnetiska vågor problem



Radiovågor med 90.0 MHz går från vakuum in i isolerande ferrit.

Vad är våglängden i vakuum ?

Vad är våglängden och våghastigheten i ferrit om $K = 10.0$ & $K_m = 1000$

$$v = c = \lambda / T = \lambda f$$

$$\lambda_{\text{vacuum}} = \frac{c}{f} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{90.0 \times 10^6 \text{ Hz}} = 3.33 \text{ m}$$

$$v_{\text{ferrite}} = \frac{c}{\sqrt{KK_m}} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{\sqrt{(10.0)(1000)}} = 3.00 \times 10^6 \text{ m/s}$$

$$\lambda_{\text{ferrite}} = \frac{v_{\text{ferrite}}}{f} = \frac{3.00 \times 10^6 \text{ m/s}}{90.0 \times 10^6 \text{ Hz}} = 3.33 \times 10^{-2} \text{ m} = 3.33 \text{ cm}$$



Del 5. Effekt och intensitet



Blå Laser

Effekt = 1 W



Repetition: Mekaniska vågor: Effekt



Vågens effekt (P): Den momentana hastigheten med vilken energi transporteras av vågen. (P = energi per tidsenhet)

Unit: W or J/s

Våg intensitet (I): Medeleffekten som passerar en yta vinkelrät mot vågens riktning. (I = effekt per ytenhet).

Unit: W/m²

$$I = P_{av} / \text{Area}$$

Allmänt för effekt:

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v} \quad (\text{instantaneous rate at which force } \vec{F} \text{ does work on a particle})$$

Vågens effekt (P):

$$P(x, t) = F_y(x, t)v_y(x, t)$$

om y är den enda riktningen där hastigheten inte är noll



Elektromagnetiska vågor

Effekt och intensitet



Energitäthet (u):

Energi per volymenhet p.g.a. ett elektriskt och magnetiskt fält

Enhet: J/m^3

Effekt (P):

Den momentana hastighet med vilken energi överförs längs en våg.

Enhet: W or J/s

Poynting vektorn (\vec{S}):

Energi som överförs per tidsenhet per ytenhet = Effekt per ytenhet.

Enhet: W/m^2

Intensitet (I):

Genomsnittlig effekt per ytenhet genom en yta som är vinkelrät mot vågriktning = medelvärde av S

Enhet: W/m^2



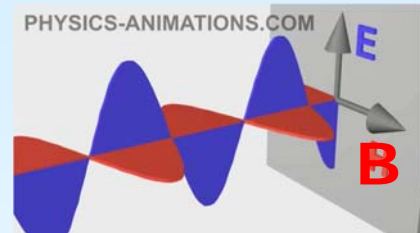
Elektromagnetiska vågor

Effekt och intensitet



Energitäthet
(energi per volymenhet)
från elektromagnetiskt fält:

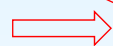
$$u = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2$$



$$\begin{aligned} E &= c B && \text{from Faraday's law} \\ E &= B / (\epsilon_0 \mu_0 c) && \text{from Ampere's law} \end{aligned}$$

+

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$



$$B^2 = \epsilon_0 \mu_0 E^2$$

$$u = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0} (\sqrt{\epsilon_0 \mu_0} E)^2 = \epsilon_0 E^2$$

Energi E-fält

Energi B-fält

där

$$E(x, t) = E_{\max} \cos(kx - \omega t)$$

Sammanfattning: De elektriska och magnetiska fälten bär på samma mängd energi. Energitätheten varierar med position och tid.



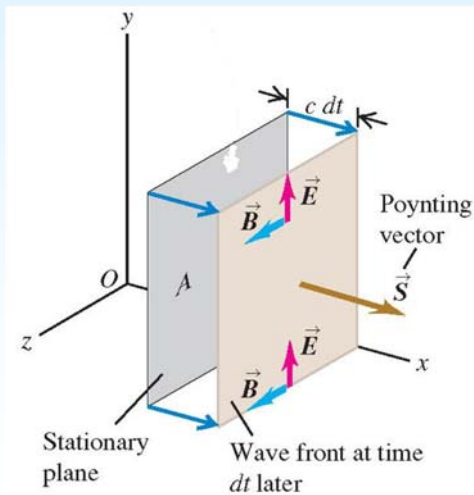
Elektromagnetiska vågor

Effekt och intensitet



Energi överföring = energi som överförs per tidsenhet per ytenhet.

S = Effekt per ytenhet = Energi överföring = Energyflöde



$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B} \quad (\text{Poynting vector in vacuum})$$

Sinusformade vågor:

$$\begin{aligned} \vec{S}(x, t) &= \frac{1}{\mu_0} \vec{E}(x, t) \times \vec{B}(x, t) \\ &= \frac{1}{\mu_0} [\hat{j} E_{\max} \cos(kx - \omega t)] \times [\hat{k} B_{\max} \cos(kx - \omega t)] \end{aligned}$$

$$S_x(x, t) = \frac{E_{\max} B_{\max}}{\mu_0} \cos^2(kx - \omega t)$$

Amplituden = maximal energi överföring



Elektromagnetiska vågor

Effekt och intensitet



Intensitet = medelvärdet av S

$$S_x(x, t) = \frac{E_{\max} B_{\max}}{\mu_0} \cos^2(kx - \omega t)$$

medelvärdet av $\cos^2(x) = 1/2$

$$E = c B$$

$$I = S_{\text{av}} = \frac{E_{\max} B_{\max}}{2\mu_0} = \frac{E_{\max}^2}{2\mu_0 c}$$

Elektromagnetiska vågor i materia:

$$\mu_0 \rightarrow \mu$$

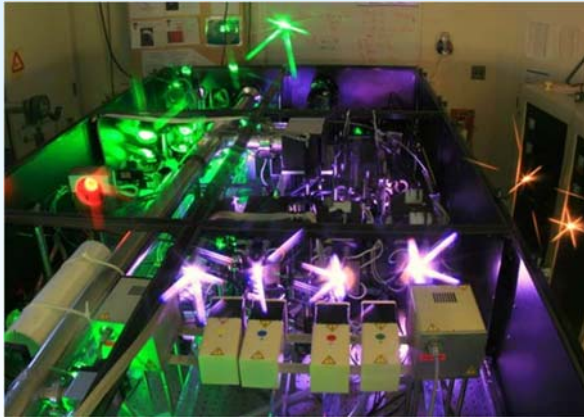
$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \longrightarrow v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}}$$



Elektromagnetiska vågor Effekt och intensitet



The Hercules Petawatt Laser



Effekt = 300 TW = 3×10^{14} W

Intensitet = 2×10^{22} W/cm²

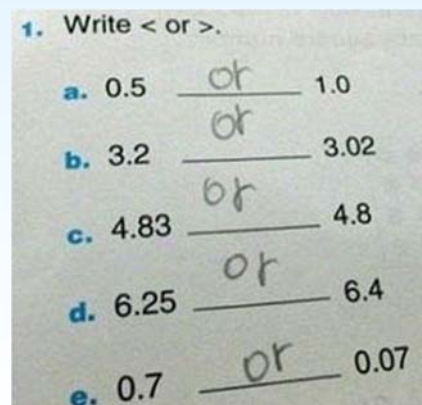
För att få samma intensitet från sol ljus behöver man fokusera alla solstrålar som träffar jorden på ett sandkorn.....



Elektromagnetiska vågor problem



Del 5. Problem lösning





Elektromagnetiska vågor problem



En sinusformad elektromagnetisk våg har $E_{\max} = 100 \text{ V/m}$.

Vad är B_{\max} ?

Vad är den maximala energitätheten ?

Givet:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$$

$$B = \frac{E}{c} = \frac{100 \text{ V/m}}{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}} = 3.33 \times 10^{-7} \text{ T}$$

$$u = \epsilon_0 E^2 = (8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2)(100 \text{ N/C})^2 \\ = 8.85 \times 10^{-8} \text{ N/m}^2 = 8.85 \times 10^{-8} \text{ J/m}^3$$



Elektromagnetiska vågor problem



En sinusformad elektromagnetisk våg har $E_{\max} = 100 \text{ V/m}$.

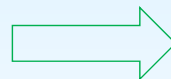
Vad blir vågens intensitet ?

Givet:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$$

$$S_x(x, t) = \frac{E_{\max} B_{\max}}{\mu_0} \cos^2(kx - \omega t)$$



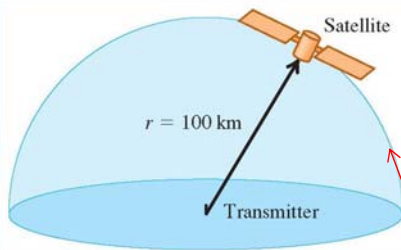
$$I = S_{\text{av}} = \frac{E_{\max} B_{\max}}{2\mu_0}$$

$$B = \frac{E}{c} = \frac{100 \text{ V/m}}{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}} = 3.33 \times 10^{-7} \text{ T}$$

$$I = S_{\text{av}} = \frac{E_{\max} B_{\max}}{2\mu_0} = \frac{(100 \text{ V/m})(3.33 \times 10^{-7} \text{ T})}{2 \times 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}} = 13.2 \text{ W/m}^2$$



Elektromagnetiska vågor problem



En radiostation skickar ut en sinusvåg med medeleffekten 50 kW.

Vad blir amplituden på vågen om den detekteras av en satellit på 100 km avstånd ?

Arean:

$$A = 2\pi R^2 = 2\pi(1.00 \times 10^5 \text{ m})^2 = 6.28 \times 10^{10} \text{ m}^2$$

I från metod 1:

$$I = \frac{P}{A} = \frac{P}{2\pi R^2} = \frac{5.00 \times 10^4 \text{ W}}{6.28 \times 10^{10} \text{ m}^2} = 7.96 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2$$

I från metod 2:

$$I = S_{\text{av}} = \frac{E_{\text{max}} B_{\text{max}}}{2\mu_0} = \frac{E_{\text{max}}^2}{2\mu_0 c} = 7.96 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2$$

Amplituden för E:

$$\begin{aligned} E_{\text{max}} &= \sqrt{2\mu_0 c S_{\text{av}}} \\ &= \sqrt{2(4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A})(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})(7.96 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2)} \\ &= 2.45 \times 10^{-2} \text{ V/m} \end{aligned}$$

Amplituden för B:

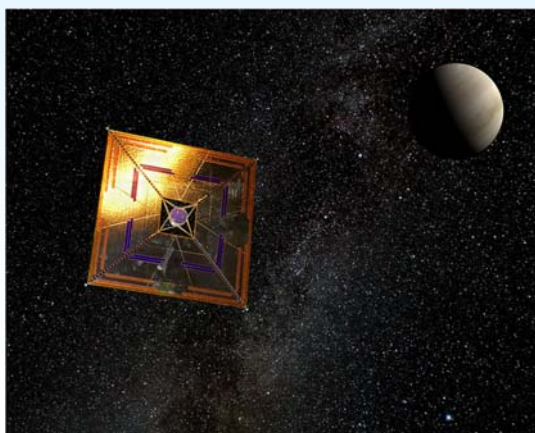
$$B_{\text{max}} = \frac{E_{\text{max}}}{c} = 8.17 \times 10^{-11} \text{ T}$$



Elektromagnetiska vågor rörelsemängd och krafter



Del 6. Rörelsemängd och krafter



IKAROS

Satellit med 20 m
stort solsegel
(tjocklek 0.0075 mm)



Elektromagnetiska vågor rörelsemängd och krafter



Kinematik

Impuls:
$$\vec{J} = \int_{t_1}^{t_2} \Sigma \vec{F} dt$$

Impuls-rörelsemängds teoremet:
$$\vec{J} = \vec{p}_2 - \vec{p}_1$$

Impulsen = Ändringen av rörelsemängden



Elektromagnetiska vågor rörelsemängd och krafter



Elektromagnetiska vågor har en rörelsemängd ($p = E/c$).

Om en våg absorberad eller reflekterad så överförs rörelsemängden till materialets yta.

Överföringen av rörelsemängden skapar en kraft på ytan.

Strålningstryck (p_{rad}) = Kraft per ytenhet ($p_{\text{rad}} = F/A$).

$$p_{\text{rad}} = \frac{S_{\text{av}}}{c} = \frac{I}{c} \quad (\text{radiation pressure, wave totally absorbed})$$

$$p_{\text{rad}} = \frac{2S_{\text{av}}}{c} = \frac{2I}{c} \quad (\text{radiation pressure, wave totally reflected})$$



Elektromagnetiska vågor rörelsemängd och krafter



Crooke's radiometer

Strålningstryck eller en termisk effekt ?



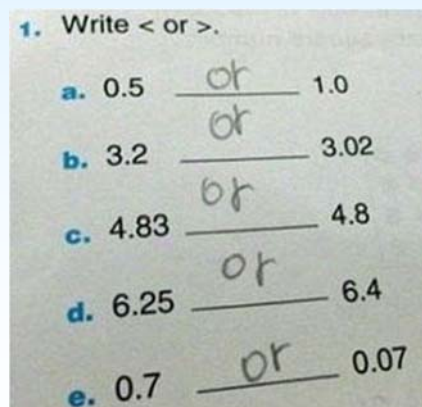
https://www.youtube.com/watch?v=r7NEI_C9Yh0



Elektromagnetiska vågor problem



Del 7. Problem lösning



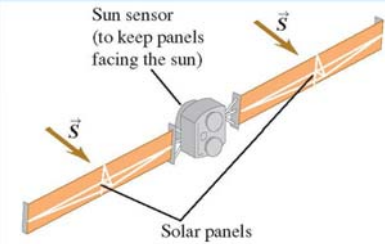


Elektromagnetiska vågor problem



En satellit har 4.0 m^2 stora solpaneler som träffas av sol ljus med intensiteten $1.4 \times 10^3 \text{ W/m}^2$.

Om allt ljus absorberas hur stor blir
genomsnittseffekten ?



Intensitet = effekt per ytenhet:

$$I = P_{\text{av}} / A_{\text{area}}$$

$$P = IA = (1.4 \times 10^3 \text{ W/m}^2)(4.0 \text{ m}^2) \\ = 5.6 \times 10^3 \text{ W} = 5.6 \text{ kW}$$

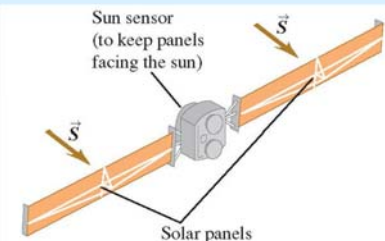


Elektromagnetiska vågor problem



En satellit har 4.0 m^2 stora solpaneler som träffas av sol ljus med intensiteten $1.4 \times 10^3 \text{ W/m}^2$.

Om allt ljus absorberas hur stor blir kraften på sol
panelerna ?



$$p_{\text{rad}} = \frac{S_{\text{av}}}{c} = \frac{I}{c} \quad (\text{radiation pressure, wave totally absorbed})$$

$$p_{\text{rad}} = 1.4 \times 10^3 / 3.0 \times 10^8 = 4.7 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$$

Tryck = Kraft per ytenhet:

$$F = p_{\text{rad}}A = (4.7 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2)(4.0 \text{ m}^2) = 1.9 \times 10^{-5} \text{ N}$$