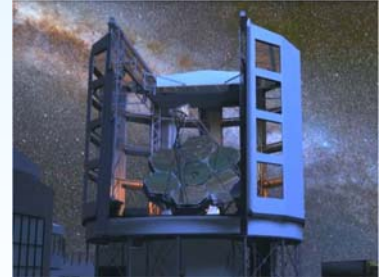
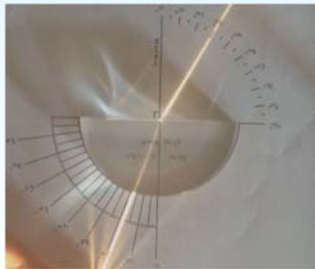
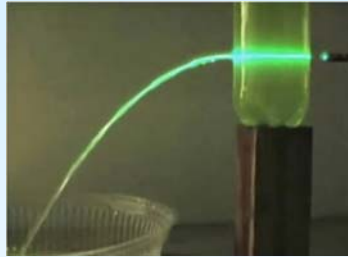
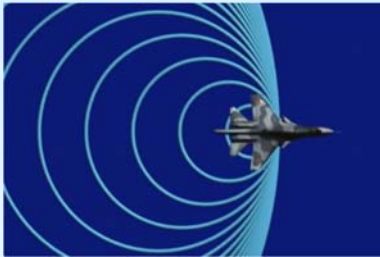




# Vågrörelselära och optik



## Kapitel 32 - Elektromagnetiska vågor

Vincent Hedberg - Lunds Universitet

1




# 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)

Vincent Hedberg - Lunds Universitet

2



# 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)

$\Phi_E$  - electric flux (Nm<sup>2</sup>/C)

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

$\Phi_B$  - magnetic flux (T/m<sup>2</sup>)



# 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:



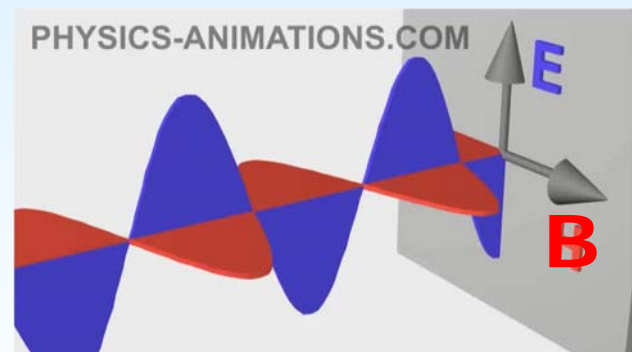
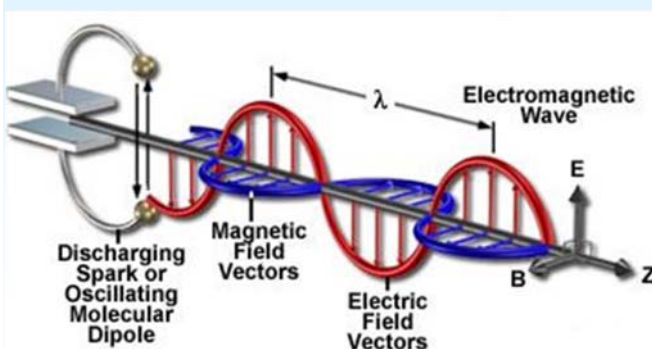
Men inget experiment har hittat monopoler !



# Elektromagnetiska vågor Maxwells ekvationer



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





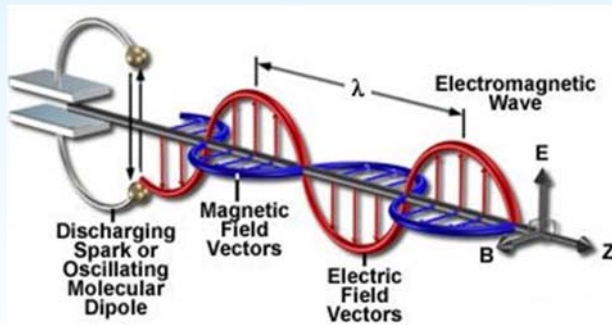
# Elektromagnetiska vågor Maxwells ekvationer



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=9gDF1l6Ge7g>

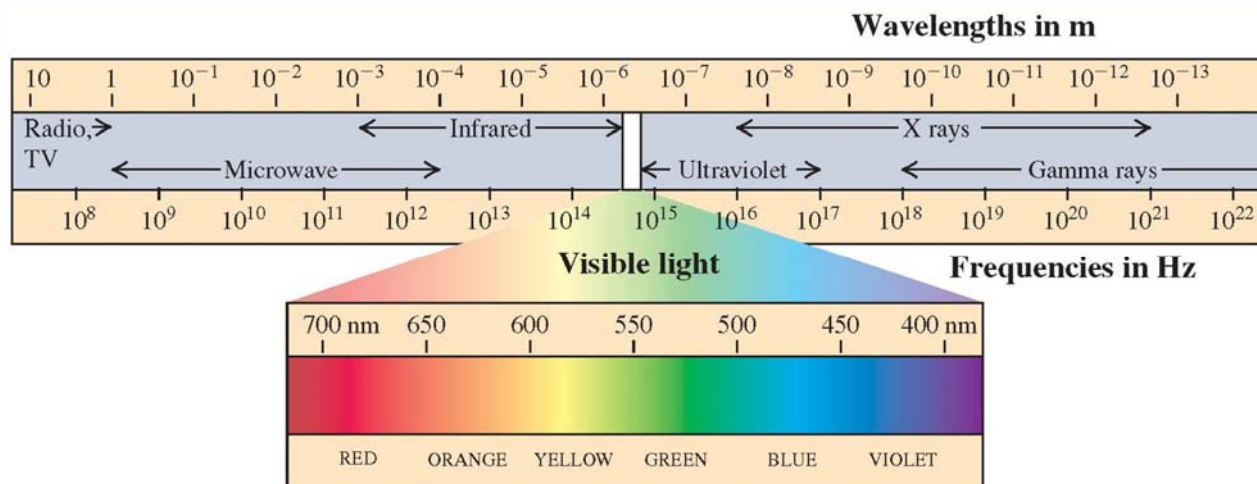


## Del 2. Elektromagnetiska vågor



## Det elektromagnetiska spektrumet

$$\lambda = c / f$$

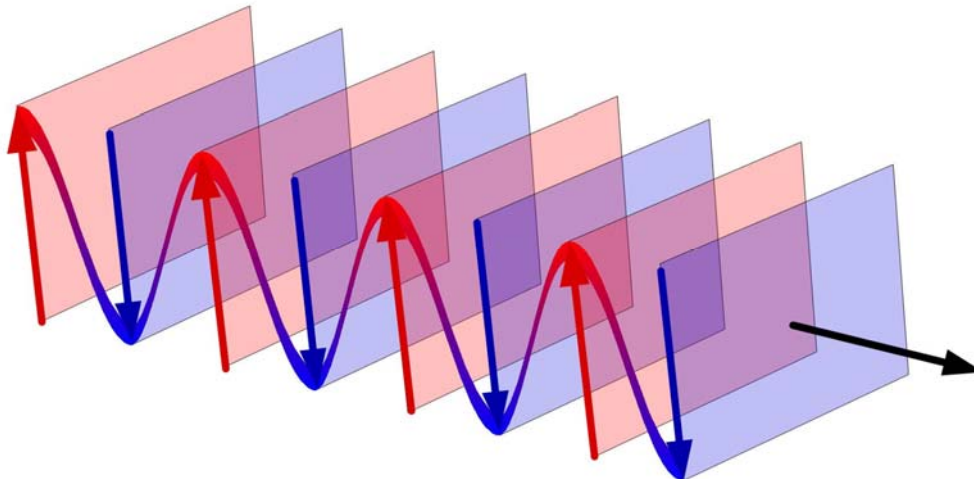




# Elektromagnetiska vågor



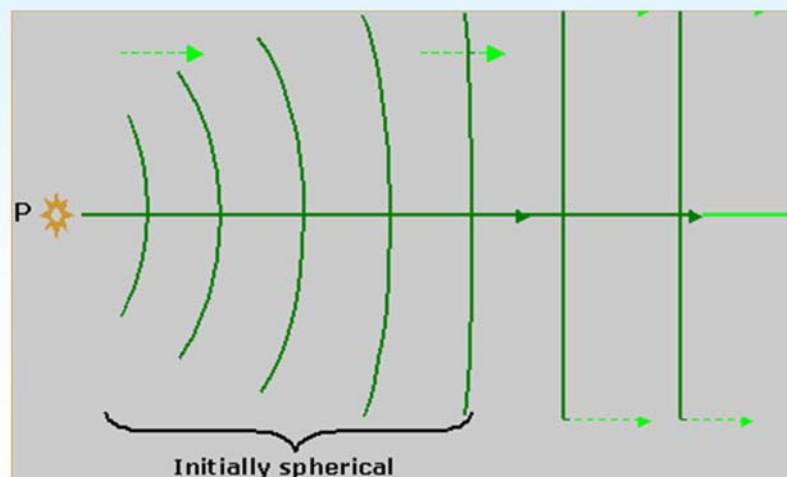
Vågfronter: ytor med konstant fas



# Elektromagnetiska vågor



Vågfronter beror på avståndet till källan





# Elektromagnetiska vågor

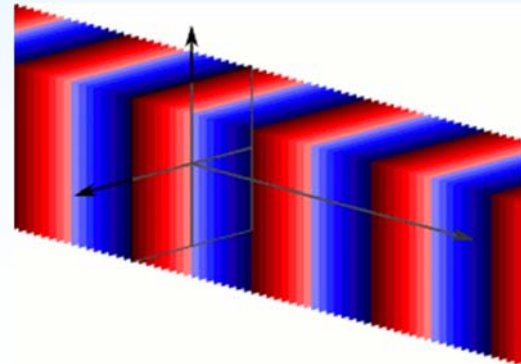
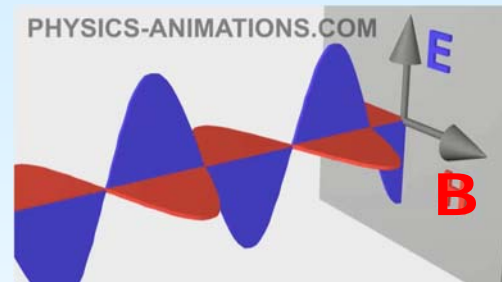


Elektromagnetiska vågor är transversella eftersom E- och B-fälten är vinkelräta mot utbredningsriktningen.

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:

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

$$\Rightarrow E = cB$$

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

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

$\epsilon$  = Permittiviteten = Ett mediums förmåga att ha ett elektriskt fält i sig.

$\mu$  = Permeabilitet = Ett mediums förmåga att ha ett magnetiskt fält i sig.



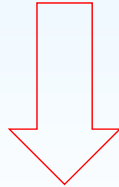
## Ljushastigheten från Maxwells ekvationer:

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

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

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

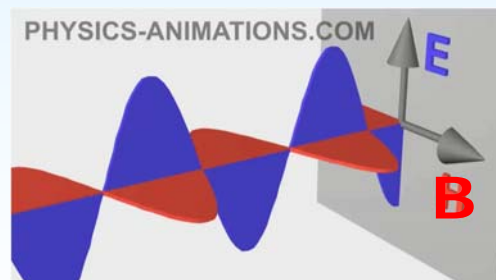
$$\mu_0 \text{ is the permeability in vacuum} = 1.26 \times 10^{-6} \text{ N/A}^2$$



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



## Del 3. Vågfunktionen





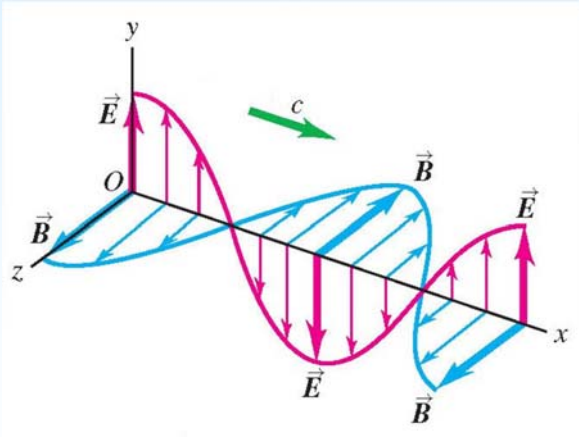


# Elektromagnetiska vågor

## 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



Uppgift: Visa att  $E_{\max} = c B_{\max}$

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

Plan våg

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

Vågfunktionen:

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

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

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

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



## 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

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

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

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

Permittivitet

Permeabilitet

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



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

Brytnings index

Dielektrisk konstant

Relativ permeabilitet

$$K = \epsilon / \epsilon_0$$

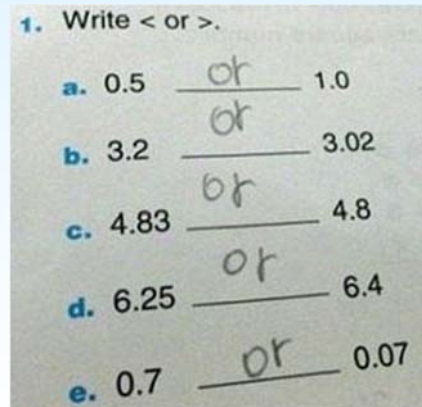
$$K_m = \mu / \mu_0$$



# Elektromagnetiska vågor problem



## Del 4. Problem lösning

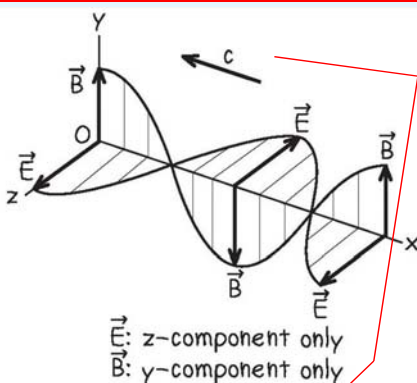


# Elektromagnetiska vågor problem



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 ?



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

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

$$c = \omega/k$$

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

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

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

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

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



# Elektromagnetiska vågor problem



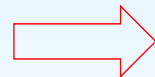
Gult ljus med  $f = 5.09 \times 10^{14}$  Hz går från vakuum in i en diamant.

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  $K = 10.0$  &  $K_m = 1000$

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

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

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

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

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



# 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)

Enhet: W eller J/s

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

Enhet: W/m<sup>2</sup>

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

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:  $W$  eller  $J/s$

### 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 = medelvärdet av  $S$

Enhet:  $W/m^2$



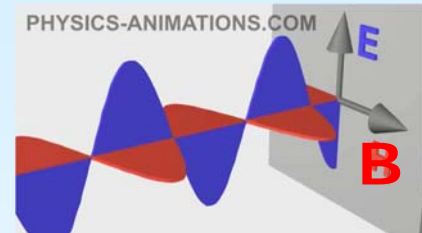
# Elektromagnetiska vågor

## Effekt och intensitet



Energitäthet  
(energi per volymenhet)  
från elektromagnetiskt fält:

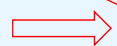
$$u = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2$$



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

+

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



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

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

Energi E-fält

Energi B-fält

där

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

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



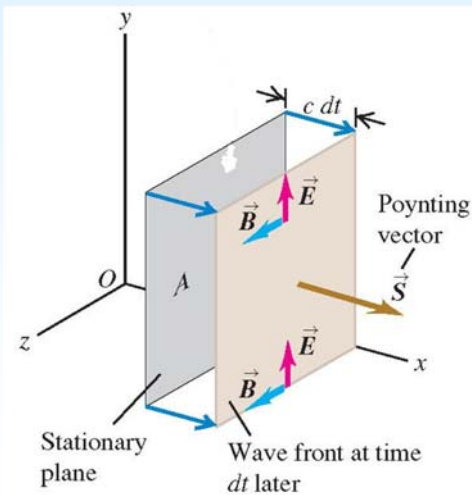
# Elektromagnetiska vågor

## Effekt och intensitet



Energi överföring = energi som överförs per tidsenhet per ytenhet.

$S$  = Effekt per ytenhet = Energi överföring = Energiflöde



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

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:

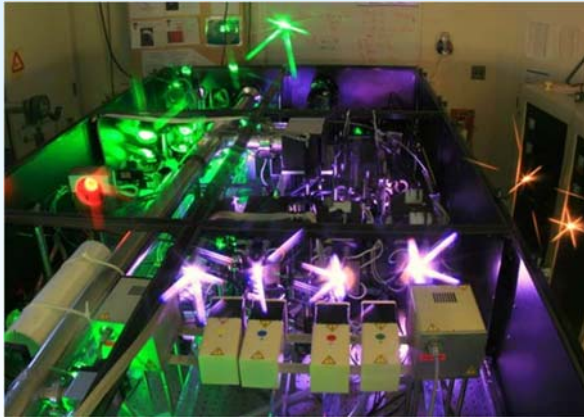
$$\mu_0 \rightarrow \mu$$

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





## The Hercules Petawatt Laser



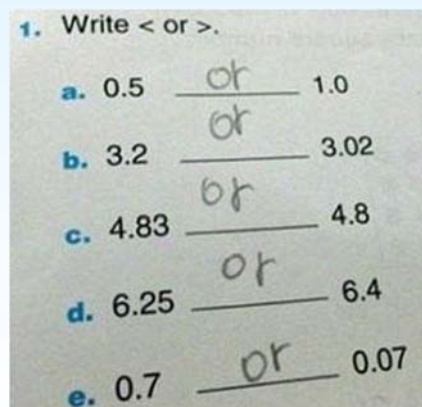
Effekt = 300 TW =  $3 \times 10^{14}$  W

Intensitet =  $2 \times 10^{22}$  W/cm<sup>2</sup>

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



## 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:**

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

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

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

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

$$u(x, t) = \epsilon_0 E^2 = \epsilon_0 E_{\max}^2 \cos^2(kx - \omega t)$$

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



# Elektromagnetiska vågor problem



En sinusformad elektromagnetisk våg har  $E_{\max} = 100 \text{ V/m}$  och  $B_{\max} = 3.33 \times 10^{-7} \text{ T}$ .

Vad blir vågens intensitet ?

**Givet:**

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

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

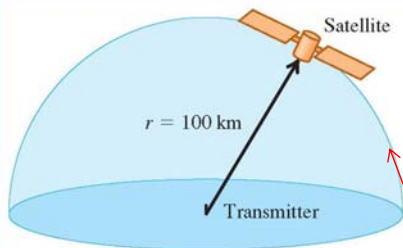
$$S_x(x, t) = \frac{E_{\max} B_{\max}}{\mu_0} \cos^2(kx - \omega t)$$

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

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



# 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 ?

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

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

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

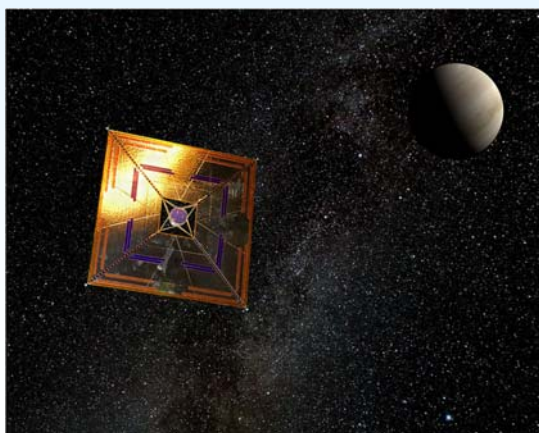
Amplituden för B:  $B_{\text{max}} = \frac{E_{\text{max}}}{c} = 8.17 \times 10^{-11} \text{ T}$



# 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 absorberas eller reflekteras så överförs rörelsemängden till materialets yta.

Överföringen av rörelsemängden skapar en kraft på ytan.

**Strålningstryck ( $p_{\text{rad}}$ ) = 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 ?



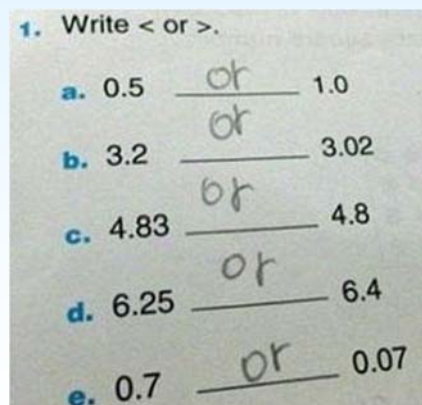
[https://www.youtube.com/watch?v=r7NEI\\_C9Yh0](https://www.youtube.com/watch?v=r7NEI_C9Yh0)



# Elektromagnetiska vågor problem



## Del 7. Problem lösning



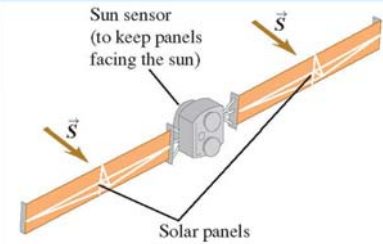


# Elektromagnetiska vågor problem



En satellit har  $4.0 \text{ m}^2$  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:

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

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

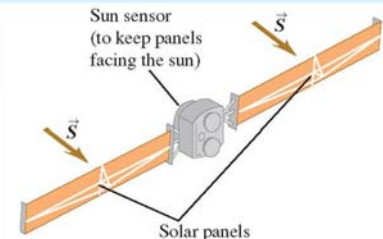


# Elektromagnetiska vågor problem



En satellit har  $4.0 \text{ m}^2$  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:

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