

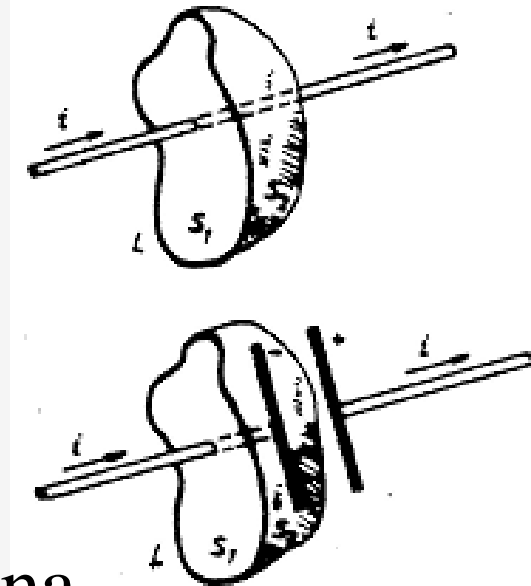
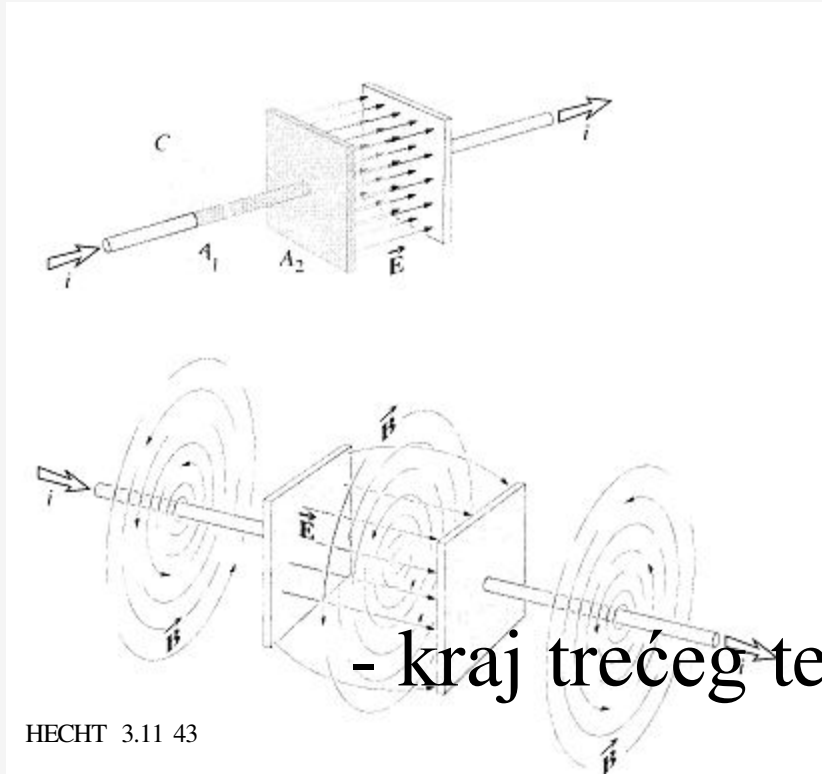
Osnovni zakoni elektrodinamike - obnavljanje iz Fizike II

⇒ Amperova teorema

$$\oint_C \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \sum_{k=1}^n i_k$$

$$\oint_C \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \iint_S \vec{j} d\vec{S}$$

⇒ Struja pomeranja - Maksvelova dopuna Amperove teoreme



- kraj trećeg termina -

Osnovni zakoni elektrodinamike - obnavljanje iz Fizike II

⇒ Amperova teorema

$$\oint_C \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \sum_{k=1}^n i_k$$

$$\oint_C \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \iint_S \vec{j} d\vec{S}$$

⇒ Struja pomeranja


uopštena Gausova teorema

$$i = \frac{dq}{dt} \quad q = \int DS \quad i = S \frac{dD}{dt} \quad D = \epsilon E$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

$$i = \epsilon S \frac{dE}{dt} = \epsilon \frac{d(ES)}{dt} = \epsilon \frac{d\Phi}{dt} = \epsilon \frac{d}{dt} \iint_S \vec{E} d\vec{S}$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$


$$\oint_C \vec{B} d\vec{l} = \mu \iint_S \left(\vec{j} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) d\vec{S}$$

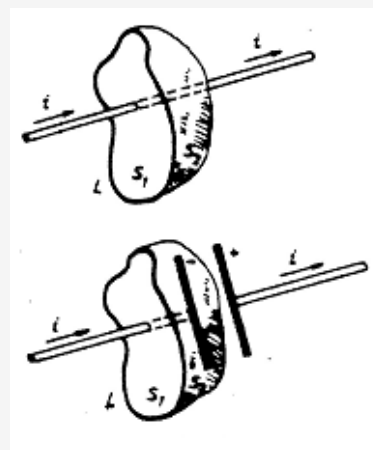
Osnovni zakoni elektrodinamike - obnavljanje iz Fizike II

⇒ Amperova teorema

$$\oint_C \vec{B} d\vec{l} = \mu \iint_S \left(\vec{j} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) d\vec{S}$$

⇒ ukupna jačina struje, tj. zbir kondukcijske struje i struje pomeranja je isti u svim delovima zatvorenog kola

- komentar -



Maksvelove jednačine za vakuum

$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$$

$$\oint_l \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \epsilon_0 \iint_S \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$$

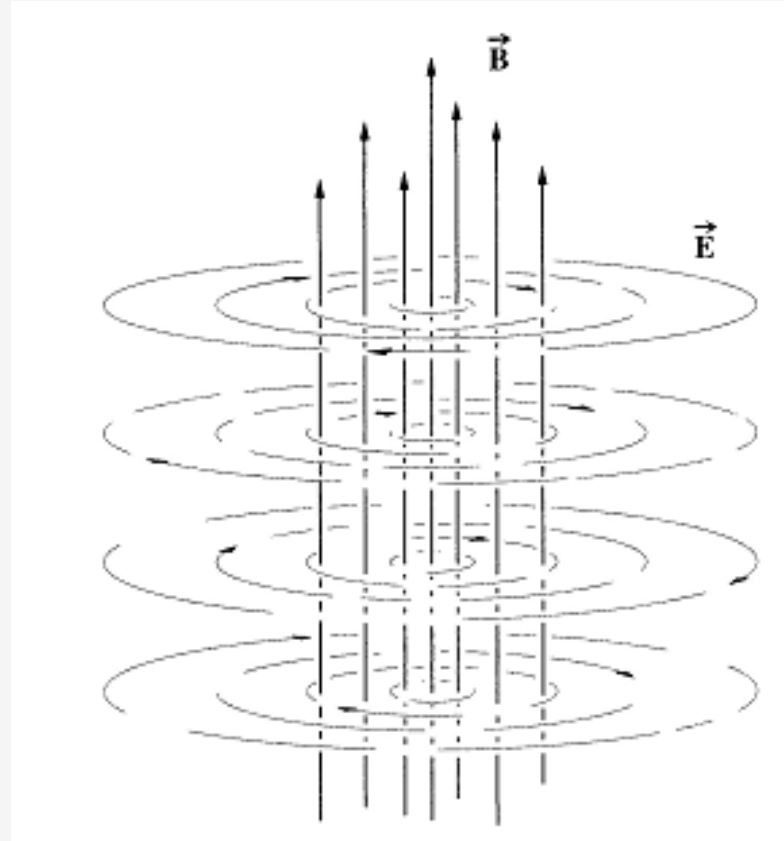
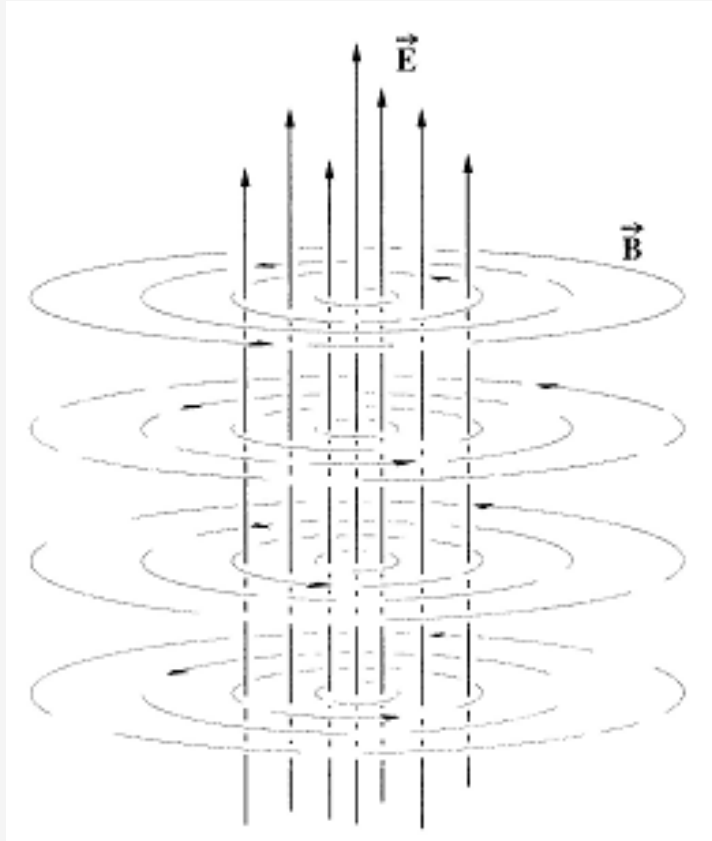
$$\oiint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

$$\oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = 0$$

Prve dve su simetrične

“ $\vec{E} \longleftrightarrow \vec{B}$ ”

- komentar -



HECHT

Maksvelove jednačine za vakuum
u diferencijalnom obliku

$$\frac{\partial \vec{E}_z}{\partial y} - \frac{\partial \vec{E}_y}{\partial z} = -\frac{\partial \vec{B}_x}{\partial t} \quad (i)$$

$$* \quad \frac{\partial \vec{E}_x}{\partial z} - \frac{\partial \vec{E}_z}{\partial x} = -\frac{\partial \vec{B}_y}{\partial t} \quad (ii)$$

$$\frac{\partial \vec{E}_y}{\partial x} - \frac{\partial \vec{E}_x}{\partial y} = -\frac{\partial \vec{B}_z}{\partial t} \quad (iii)$$

$$** \quad \frac{\partial \vec{B}_z}{\partial y} - \frac{\partial \vec{B}_y}{\partial z} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}_x}{\partial t} \quad (i)$$

$$\frac{\partial \vec{B}_x}{\partial z} - \frac{\partial \vec{B}_z}{\partial x} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}_y}{\partial t} \quad (ii)$$

$$\frac{\partial \vec{B}_y}{\partial x} - \frac{\partial \vec{B}_x}{\partial y} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}_z}{\partial t} \quad (iii)$$

$$*** \quad \frac{\partial \vec{B}_x}{\partial x} + \frac{\partial \vec{B}_y}{\partial y} + \frac{\partial \vec{B}_z}{\partial z} = 0$$

$$**** \quad \frac{\partial \vec{E}_x}{\partial x} + \frac{\partial \vec{E}_y}{\partial y} + \frac{\partial \vec{E}_z}{\partial z} = 0$$

$$\nabla^2 \vec{E} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \vec{B} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$$

Opsti oblik talasne jednačine

Ako se j-na $y=Y\sin(kx-\omega t)$

dvostruko parcijalno diferencira po t i po x dobija se

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\omega^2 Y \sin(kx - \omega t) \quad \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = -k^2 Y \sin(kx - \omega t)$$

Iz ove dve relacije sledi izraz koji se naziva **talasna jednačina**

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \vec{\mathbf{E}} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{\mathbf{E}}}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \vec{\mathbf{B}} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{\mathbf{B}}}{\partial t^2}$$

⇒ **TALASNE JEDNAČINE !!!!**

⇒ **brzina talasa je** $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$

Maksvelove jednačine za vakuum
u diferencijalnom obliku

⇒ rešenja jednačina

$$\nabla^2 \vec{E} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

su,

$$\nabla^2 \vec{B} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$$

ako se *talas prostire duž x-ose*

$$E = E_{\max} \sin \omega(t - x/c)$$

$$B = B_{\max} \sin \omega(t - x/c)$$

⇒ vrednost konstante ϵ_0 i μ_0 se mogu proceniti pomoću električnih i magnetnih merenja

$$\epsilon_0 = 8.85 \text{ pF/m}$$

$$\mu_0 = 12.566 \cdot 10^{-7} \text{ N s}^2/\text{C}^2$$

⇒ za vrednost c se iz $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ dobija vrednost $c = 2.9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

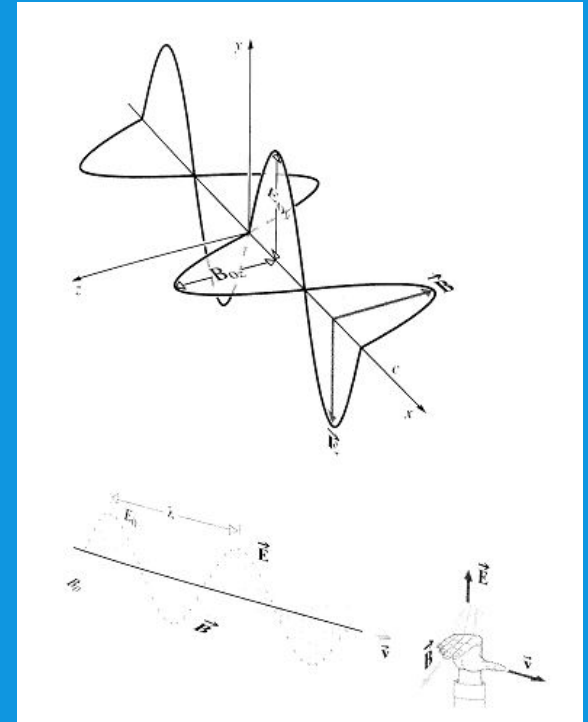
Transferzalni talasi

⇒ analizira se talas koji se prostire u vakuumu duž x-ose

$$\Rightarrow \vec{E} = \vec{E}(x, t)$$

iz **** sledi $\frac{\partial E_x}{\partial x} = 0$

iz * sledi $\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\frac{\partial B_z}{\partial t}$



⇒ *Vektori električnog i magnetnog polja su međusobno normalni*

$$E_y = cB_z$$

Energija elektromagnetnog talasa. Pointingov vektor.

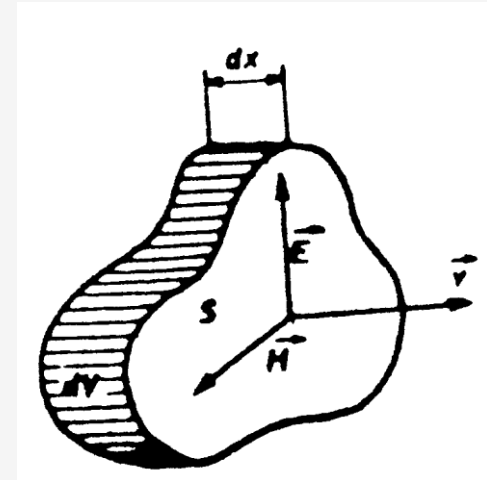
- ⇒ **intezitet Pointingovog vektora je jednak energiji koja se za jedinično vreme prenese talasom kroz jediničnu površinu normalnu na pravac brzine talasa**
- ⇒ **pravac i smer Pointingovog vektora poklapa se sa pravcem i smerom u kome se prenosi energija**

gustina energije električnog i magnetnog polja je, za vakuum,

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

tj. $w = w_E + w_B$

gustina energije se može smatrati konstantnom u svim tačkama infinitezimalne zapremine dV



Energija elektromagnetnog talasa. Pointingov vektor. 3

⇒ iz relacije $E=cB$ sledi da je

$$w_E = w_B, \text{ tj. } w = \varepsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{\mu_0}$$

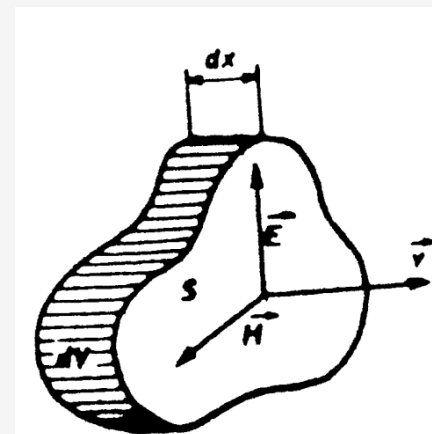
ako je c brzina prostiranja talasa, onda će za vreme dt kroz površinu S proći sva energija dW koja se nalazi u cilindričnom elementu visine $dx = cdt$

$$dw = \varepsilon_0 E^2 S c dt$$

po definiciji je $P = dw/Sdt$

sledi da je

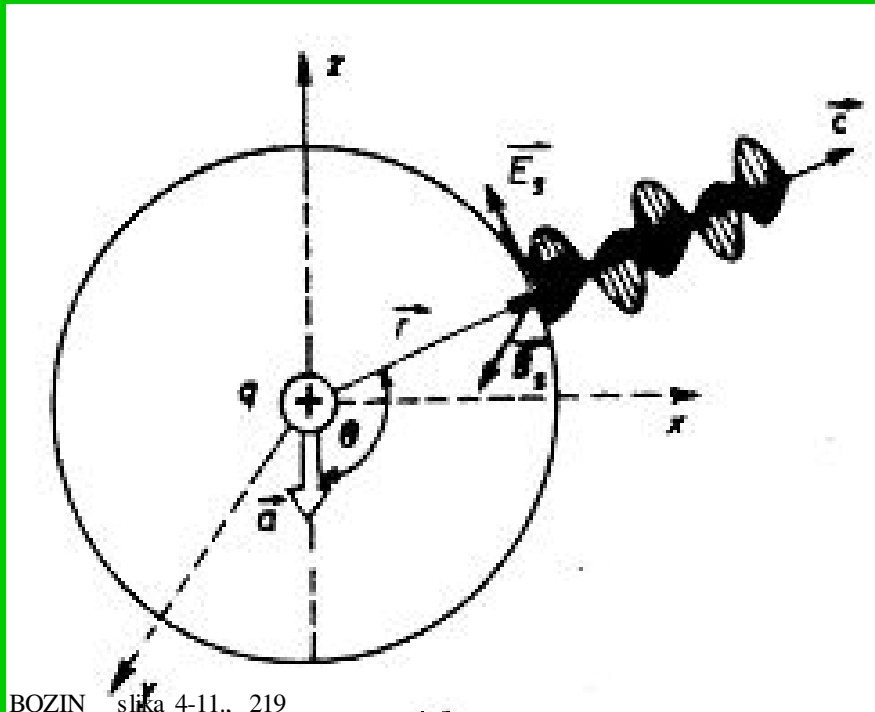
$$P = \varepsilon_0 E^2 c = \frac{1}{\mu_0} EB \quad \Longrightarrow \quad \vec{P} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B} = c^2 \varepsilon_0 \vec{E} \times \vec{B}$$



Zračenje naelektrisanog tela koje se kreće ubrzano

⇒ Iz Maksvelovih relacija se može izvesti izraz za magnetno polje koje generiše naelektrisanje u kretanju

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q}{r^2} \vec{v} \times \vec{r}_0 + \frac{\mu_0}{4\pi cr} \frac{qd\vec{v}}{dt} \times \vec{r}_0 \quad \text{za vakuum!}$$



radijaciona
komponenta

Određivanje brzine svetlosti

- ⇒ određivanje brzine svetlosti bio je jedan od najvažnijih problema fizike i optike uopšte
- ⇒ dobro slaganje dobijene vrednosti za c sa konstantom iz Maksvelovih jednačina odigralo je najvažniju ulogu pri dokazivanju *elektromagnetne prirode svetlosti*
- ⇒ Galilejev pokušaj određivanja brzine svetlosti 1607. godine nije doveo do rezultata zbog nemogućnosti trenutnog reagovanja na svetlosni signal

Metodi određivanja brzine svetlosti

Astronomski

Posmatranje pomračenja Jupiterovih satelita

Olaf Romer, 1675. godine

Posmatranje aberacije

Bradley, 1728. godine

Laboratorijski

Metod prekidanja

Feziau, 1849. godine

Cornu, 1876. godine

Perrotin, 1902. godine

Metod rotirajućeg ogledala

predložio *Arago*, 1838. godine

realizovao *Foucault*, 1862. godine

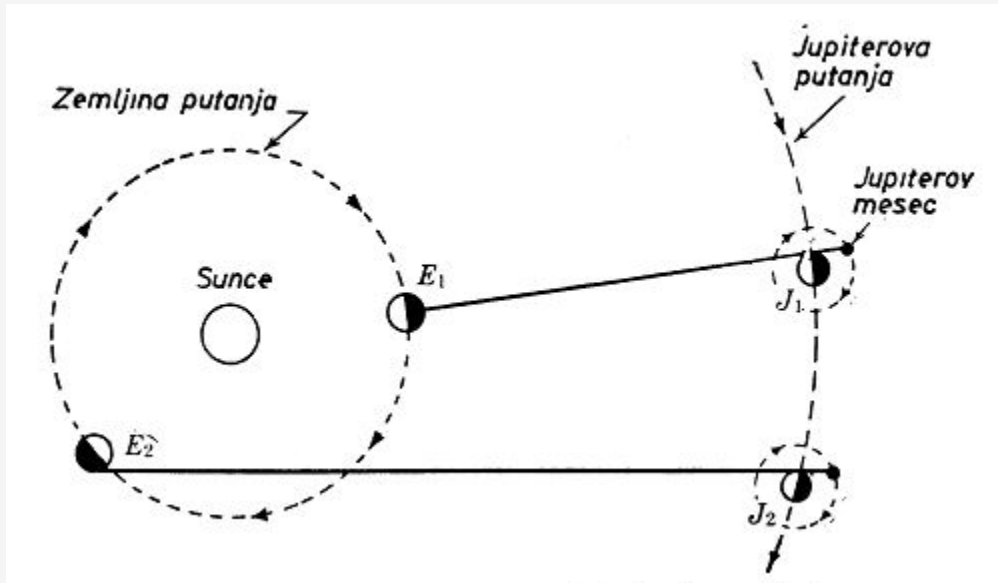
usavršio **MICHELSON** *

Posmatranje pomračenja Jupiterovih satelita
Olaf Romer, 1675. godine

- ⇒ osnovna ideja – posmatranje ”časovnika” na velikom rastojanju od posmatrača
- ⇒ kao ”časovnik” može biti skorišćen bilo koji periodičan proces
- ⇒ Romer je u posmatranjima koristio periodično pomračenje Jupiterovih satelita

Elektromagnetni talasi Određivanje brzine svetlosti 3

Posmatranje pomračenja Jupiterovih satelita 2



⇒ revolucija Jupitera je oko 12 godina

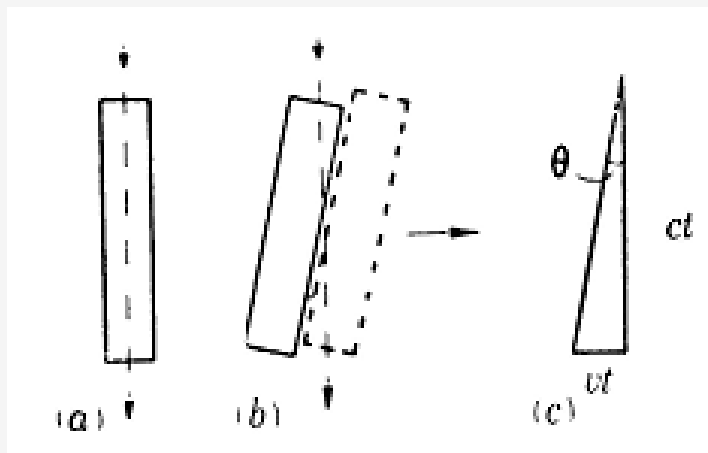
Slika nije u srazmeri!

Sirs slika 1-9., 8

- ⇒ Romer je zaključio da je svetlosti potrebno oko 22 minuta da pređe rastojanje jednako prečniku Zemljine orbite
- ⇒ najbolji podatak za ovo rastojanje u to doba je iznosilo oko 276 miliona kilometara
- ⇒ dobijena vrednost za c **bi iznosila** oko $2,1 \cdot 10^8$ m/s

Posmatranje aberacije

⇒ analogija kišnih kapi - KOMENTAR



Sirs slika 1-10., 8

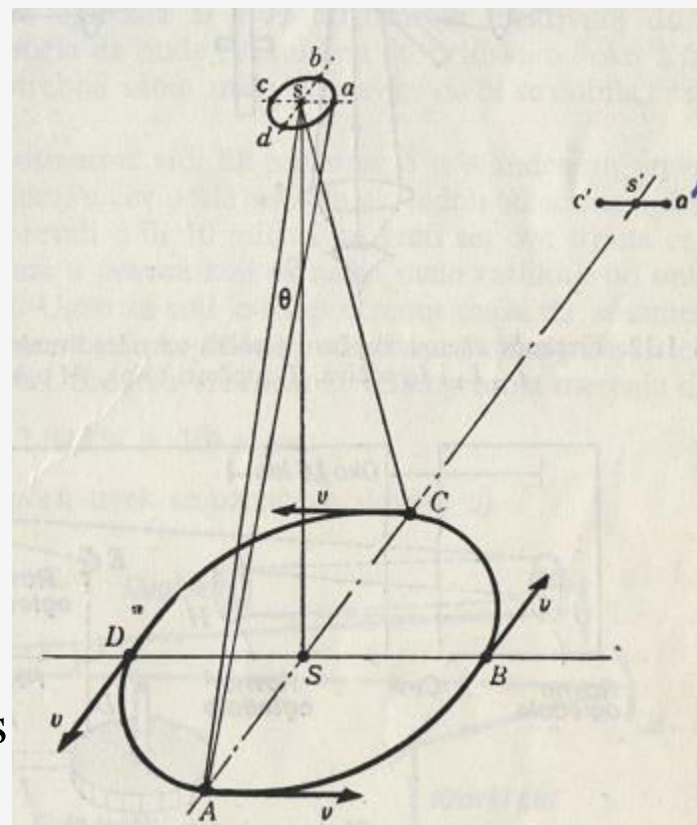
⇒ KOMENTAR

⇒ vrednost 2θ iznosi oko 41 sekundu

⇒ dobija se da je c približno 3030000 km/s

Sirs slika 1-11., 9

Slika nije u srazmeri!



Metod prekidanja

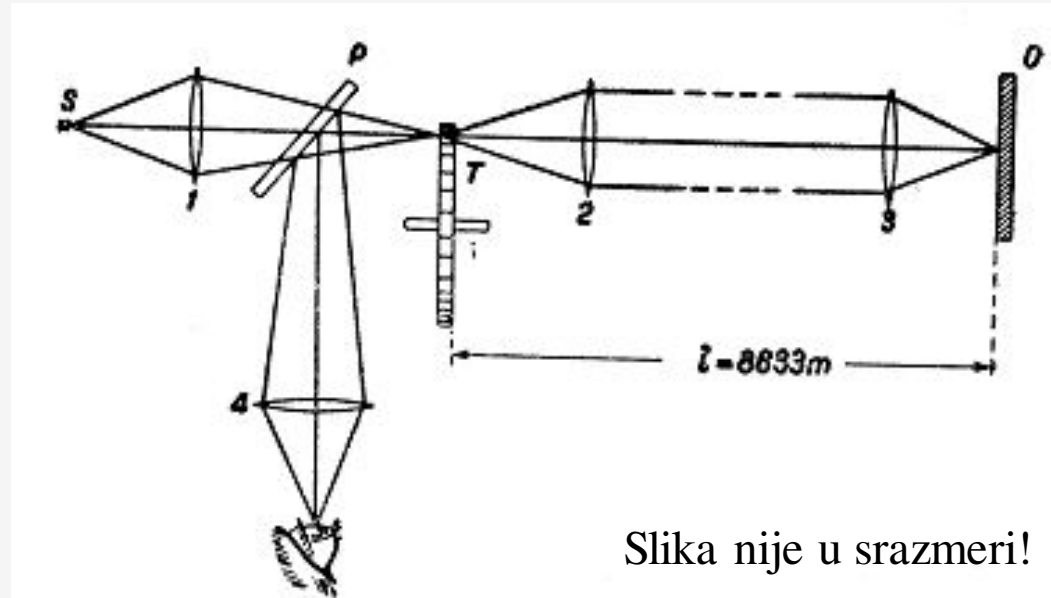
⇒ KOMENTAR

$$\frac{2D}{c} = \frac{1}{2z\nu}$$

D rastojanje

ν broj obrta u sekundi

z “red zamračenja”



Slika nije u srazmeri!

Vucic, Ivanovic slika 133-6., 322

⇒ glavna teškoća je u tačnom ustanovljavanju momenta zamračenja

⇒ potrebni čist vazduh, dobra optika i jaki svetlosni izvori

rezultati merenja po metodu prekidanja

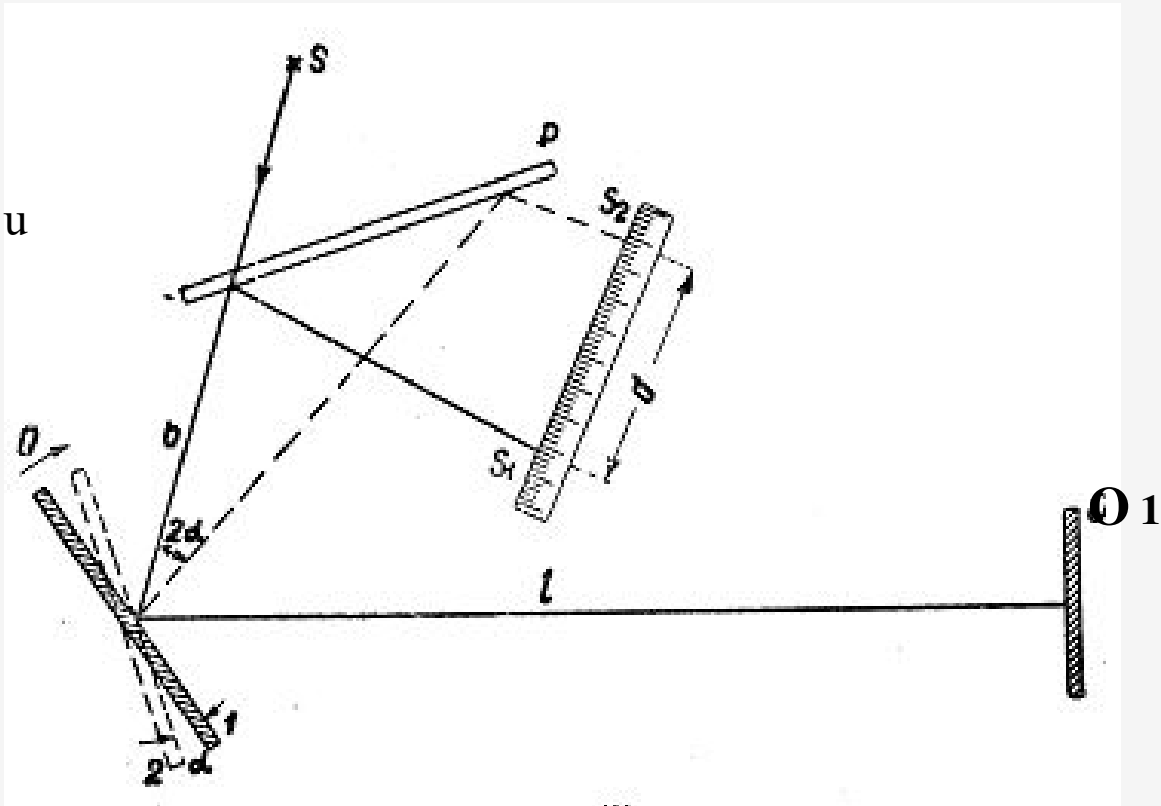
Fizeau 1849.godine	D=8.63 km	c=315000 km/s
Cornu 1876.godine	D=23 km	c=300000 km/s
Perrotin 1902.godine	D=46 km	c=299870 km/s

Metod rotirajućeg ogledala

⇒ KOMENTAR

⇒ položaj lika izvora S se pomera u zavisnosti od brzine rotacije ogledala

⇒ ogledalo O1 je uglavnom izdubljeno sferno čiji centar leži na osi rotacije ogledala O



rezultati merenja po metodu rotirajućeg ogledala

Foucault 1862.godine

$c=298000$ km/s

Newcomb 1891.godine

$c=299810$ km/s

Michelson 1902.godine

$c=299890$ km/s

Michelson 1926. godine

$c=299796$ km/s

Vucic, Ivanovic slika 133-7., 323

Elektromagnetni talasi
Određivanje brzine svetlosti 6

Ustanovljeno je polovinom XIX veka da je brzina svetlosti manja u vodi nego u vazduhu; *ova činjenica je tada smatrana za konačan dokaz neodrživosti korpuskularne prirode svetlosti* - pažnja !

upoređivanje najboljih rezultati merenja dobijenih različitim metodama

Metod rotirajućeg ogledala	$c=299796$ km/s	<i>Michelson</i> , 1926. godine
Metod prekidanja (usavršen)	$c=299793$ km/s	<i>Bergstrand</i> , 1950. godine
Radiogeodezija	$c=299792$ km/s	<i>Aslakson</i> , 1949. godine
Šuplji rezonator	$c=299792.5$ km/s	<i>Essen</i> , 1950. godine

Indeks prelamanja

- ⇒ brzina svetlosti u supstancijalnim sredinama je manja od brzine svetlosti u vakuumu
- ⇒ brzina svetlosti u supstancijalnim sredinama **zavisi od talasne dužine** svetlosti
- ⇒ brzina svetlosti u supstancijalnim sredinama **zavisi od talasne dužine** svetlosti, što predstavlja pojavu poznatu kao DISPERZIJA
- ⇒ **apsolutni indeks prelamanja** neke supstance je brojno jednak količniku brzine svetlosti u vakuumu i brzine svetlosti u toj supstanci

$$n=c/v$$

- ⇒ relativni indeks prelamanja dve supstance se definiše kao količnik brzine svetlosti jednoj i drugoj sredini

- ⇒ pri navođenju podatka za n obično se koristi podatak za žutu svetlost talasne dužine $\lambda=589\text{nm}$
- ⇒ indeks prelamanja vazduha veoma malo zavisi od talasne dužine, tj. disperzija je zanemarljiva

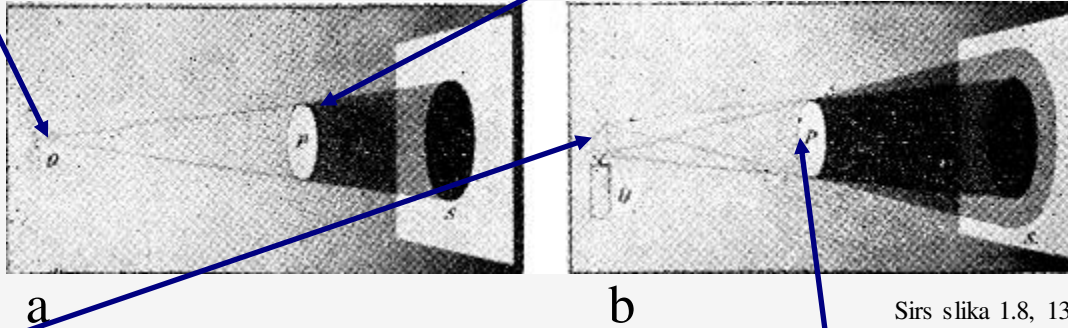
primer

“boja” svetlosti i talasna dužina	n
ljubičasta, $\lambda=435.9\text{ nm}$	1.002957
crvena, $\lambda=656.3\text{ nm}$	1.0002914

INDEKSI PRELAMANJA	
(Za svetlost talasne dužine 0,0000589 cm)	
Staklo	1,46 – 1,96
Islandski krečnjak (CaCO_3)	1,658
Kvarc (SiO_2)	1,544
Kuhinjska so (NaCl)	1,544
Fluorit (CaF_2)	1,434
Ugljendisulfid (CS_2)	1,629
Etil-alkohol.....	1,361
Voda	1,333

Senke

- ⇒ na slici a izvor je tačkast, tj. mnogo manji od predmeta; na zastoru se stvara **geometrijska senka predmeta**



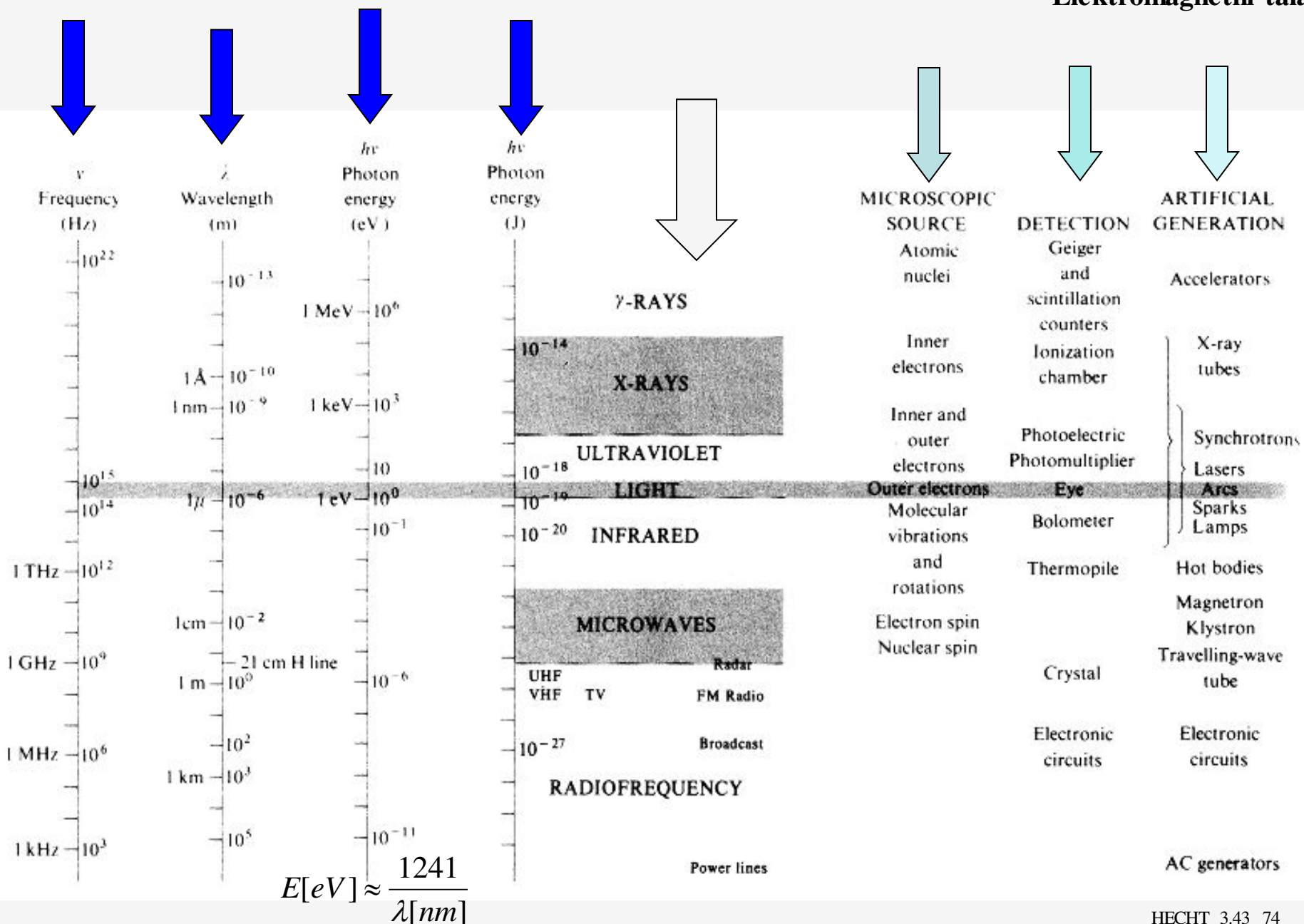
Sirs slika 1.8, 13

- ⇒ na slici b izvor nije tačkast, tj. nije mnogo manji od predmeta; oblast na zastoru koja ne dobija svetlost od izvora naziva se **glavna senka**, okružena **polusenkom**

posmatrač koji se nalazi u senci ne vidi ni jedan deo izvora;
posmatrač koji se nalazi u polisenci vidi jedu deo izvora ali ne i ceo izvor

primer
pomračenje Sunca

Elektromagnetni talasi



Elektromagnetni talasi

Elektromagnetni spektar

napomena
vidljivi deo spektra
je pojednostavljeno
prikazan

