

Curs 10

UNDE ELECTROMAGNETICE

10.1 Unde electromagnetice

Interacțiunile dintre corpurile electrizate a căror stare de electrizare este stabilă în timp poartă numele de **interacțiuni electrice**.

În cazul în care se realizează transferul stării de electrizare dintr-o regiune a corpului în alta, sau în cazul în care un corp electrizat suferă o deplasare, apare un nou tip de interacțiune pe care o numim **interacțiune magnetică**.

În general, cele două interacțiuni prezentate anterior sunt simultan prezente, constituind împreună **interacțiunea electromagnetică**. Studiul interacțiunilor electromagnetice a arătat că acestea se propagă din aproape în aproape cu viteză finită, egală cu viteza luminii în mediul respectiv. Suportul material care asigură transmiterea acestor interacțiuni în spațiu, ocupat sau neocupat de substanță, îl constituie **câmpul electromagnetic**. Starea locală a câmpului electromagnetic este descrisă de vectorii \vec{H} - **intensitate câmp magnetic** și \vec{E} - **intensitate câmp electric**.

Existența undelor electromagnetice a fost demonstrată de către **Heinrich Hertz** (1857-1894) în anul 1887. El a reușit să determine viteza de propagare a undelor electromagnetice și a pus în evidență printr-o serie de experimente proprietățile acestora. Hertz a demonstrat faptul că undele electromagnetice sunt similare undelor luminoase, acestea din urmă fiind de fapt o categorie de unde electromagnetice.

Aparatul utilizat de Hertz pentru generarea undelor electromagnetice este prezentat în figura 10.1. Acesta este de fapt un circuit oscilant LC serie format dintr-o bobină de inducție și un condensator. Rolul condensatorului este jucat de două sfere identice aflate în aer la o distanță mică una de alta. Bobina de inducție are rolul de a forma pulsuri scurte de tensiune care fac ca alternativ una din sfere să fie încărcată pozitiv, iar cealaltă negativ. Atunci când intensitatea câmpului electric dintre cele două sfere depășește valoarea de străpungere a aerului ($E = 3 \times 10^6 \text{ V/m}$) între sfere se generează o scânteie. Acest lucru se va produce deoarece în câmpuri electrice electronii liberi accelerați primesc o energie suficientă pentru a ioniza moleculele din aer pe care le ciocnesc. Procesul de ionizare furnizează mai mulți electroni care la rândul lor produc noi ionizări. Astfel, aerul dintre cele două sfere este ionizat și devine un bun conductor. Descărcarea electronilor devine un fenomen oscilator de frecvență înaltă. Presupunem că circuit LC considerat are inductanța L datorată bobinei și capacitatea C datorată condensatorului. Deoarece L și C au valori mici, frecvența de oscilație a circuitului este de ordinul a 100 Hz și se calculează cu formula

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (10.1)$$

Receptorul de unde electromagnetice este constituit dintr-o spiră (un circuit oscilant unde condensatorul are plăcile depărtate). Prin ajustarea formei receptorului se obține o scânteie între electrozii acestuia atunci când frecvența proprie de oscilație a receptorului devine egală cu cea a generatorului.

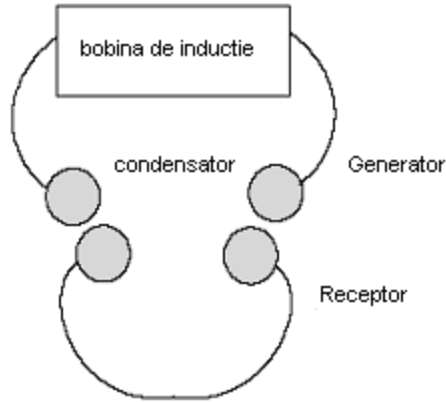


Fig.10.1 Schema aparatului utilizat de Hertz pentru producerea și detectarea undelor electromagnetice.

Hertz a realizat o serie de experiențe (reflexie, difracție, interferență, polarizare) prin care a pus în evidență proprietățile undelor electromagnetice. El a măsurat viteza de propagare a acestor unde. Prin reflexia undelor electromagnetice pe o placă metalică, Hertz a obținut unde staționare, după care a măsurat distanța dintre noduri determinând astfel lungimea lor de undă. Utilizând relația $\lambda=cT$ (4.7), Hertz a găsit viteza undelor electromagnetice $c \cong 3 \cdot 10^8 m/s$.

Spre deosebire de undele mecanice, undele electromagnetice nu au nevoie de un mediu pentru a se propaga.

10.2 Ecuatiile lui Maxwell

Descrierea teoretică a undelor electromagnetice este făcută cu ajutorul **ecuațiilor lui Maxwell**, elaborate de fizicianul englez James Clerk Maxwell (1831-1879) în anul 1867. Maxwell a selectat și generalizat legile fenomenelor electrice și magnetice alcătuind un sistem complet de ecuații care descriu câmpul electromagnetic. Este interesant de arătat faptul că pe baza ecuațiilor sale Maxwell a dedus existența undelor electromagnetice care au fost mai târziu descoperite experimental de Hertz.

Ecuatiile lui Maxwell în vid (sub formă integrală, respectiv diferențială) sunt

$$I. \oint \vec{E} d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0}, \quad \text{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (\text{legea lui Gauss pentru sarcile electrice}) \quad (10.2)$$

$$II. \oint \vec{B} d\vec{S} = 0, \quad \text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{legea lui Gauss pentru „sarcile magnetice”}) \quad (10.3)$$

$$III. \int \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \iint \vec{B} d\vec{S}, \quad \text{rot} \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \\ (\text{legea inducției electromagnetice a lui Faraday}) \quad (10.4)$$

$$IV. \int \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \iint \vec{E} d\vec{S}, \quad \text{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} \\ (\text{legea lui Ampère}) \quad (10.5)$$

Relația (10.2) ne arată că sursa inducției electrice o constituie o distribuție de sarcină electrică q de densitate ρ .

Relația (10.3) indică faptul că în natură nu există distribuții de sarcini magnetice, liniile de câmp magnetic fiind întotdeauna linii închise.

Relația (10.4) a fost obținută în urma generalizării legii inducției electromagnetice a lui Faraday și arată că un câmp magnetic variabil într-un punct din spațiu determină apariția unui câmp electric rotațional.

Relația (10.5) ne arată că un curent de conducție și un câmp electric variabil generează un câmp magnetic cu liniile de câmp închise.

Fie o undă electromagnetică ce se propagă pe direcția Ox. Intensitatea câmpului electric \vec{E} este orientată de-a lungul axei Oy, iar inducția câmpului magnetic \vec{B} este orientată în direcția a axei Oz. Această presupunere are ca suport rezultatele experimentale obținute de Hertz. O astfel de undă este de tipul undă plană liniar polarizată.

Considerăm un contur dreptunghiular (fig.10.2(a)) de latură l și lungime dx în planul xOy. Evaluăm în raport cu acest dreptunghi integralele $\int \vec{E}d\vec{l}$ și $\iint \vec{B}d\vec{S}$ care intervin în relația (10.4) – legea inducției electromagnetice.

Atunci

$$\int \vec{E}d\vec{l} = E(x+dx, t)l - E(x, t)l \quad (10.6)$$

unde s-a considerat sensul de parcurs al conturului ca fiind cel trigonometric. Pe laturile de lungime dx avem $\vec{E}d\vec{l} = 0$ deoarece \vec{E} și $d\vec{l}$ sunt perpendiculare.

Deoarece

$$E(x+dx, t) = E(x, t) + \left. \frac{\partial E}{\partial x} \right|_{t=ct} dx \quad (10.7)$$

rezultă

$$\int \vec{E}d\vec{l} = \left. \frac{\partial E}{\partial x} \right|_{t=ct} l dx \quad (10.8)$$

Pentru cea de-a doua integrală

$$\iint \vec{B}d\vec{S} = B l dx \Rightarrow \frac{d}{dt} \iint \vec{B}d\vec{S} = \frac{\partial B}{\partial t} l dx \quad (10.9)$$

Înlocuind (10.8) și (10.9) în relația (10.4) rezultă

$$\frac{\partial E}{\partial x} = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (10.10)$$

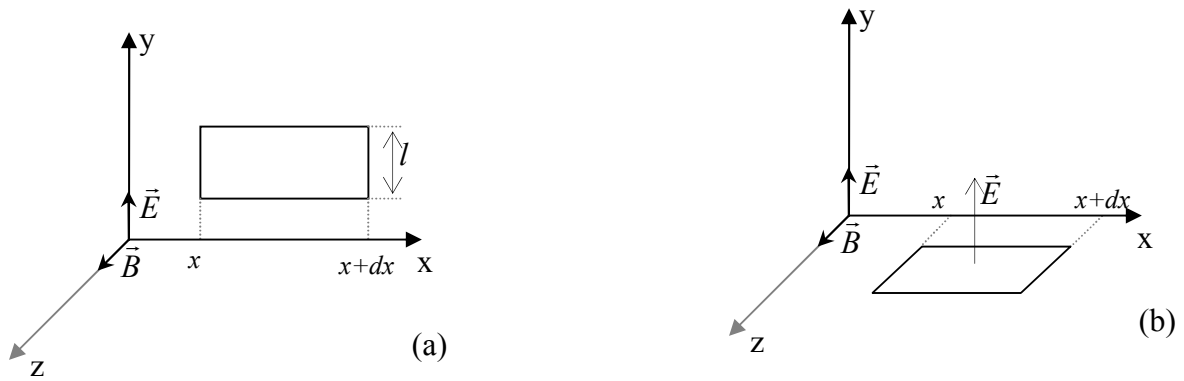


Fig.10.2 Contur dreptunghiular pe care se aplică a.legea inducției electromagnetice respectiv b.legea lui Ampère.

În mod similar, pornind de la relația (10.5), evaluăm în lungul unui contur dreptunghiular situat în planul zOx(fig.10.2(b)) integrala $\int \vec{B}d\vec{l}$. Vom avea

$$\int \vec{B}d\vec{l} = B(x,t)l - B(x+dx,t)l \quad (10.11)$$

de unde

$$\int \vec{B}d\vec{l} = -l \frac{\partial B}{\partial x} dx \quad (10.12)$$

În acest caz, fluxul câmpului electric prin suprafața dreptunghiulară considerată este

$$\iint \vec{E}d\vec{S} = El dx \quad (10.13)$$

Astfel, înlocuind termenii din relația (10.5) cu (10.12), respectiv (10.13) rezultă

$$\frac{\partial B}{\partial x} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (10.14)$$

Derivând relația (10.10) în raport cu x se obține

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial B}{\partial t} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial B}{\partial x} \right) \quad (10.15)$$

dar ținând cont de relația (10.14) rezultă

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (10.16)$$

Analog se obține pentru inducția câmpului magnetic expresia

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \quad (10.17)$$

Relațiile (10.16) și (10.17) reprezintă **ecuațiile undelor electromagnetice** (sub forma diferențială). Se observă că ele sunt similare cu ecuația diferențială a undelor mecanice (4.12). Prin compararea relațiilor (10.16) și (10.17) cu (4.12) rezultă că viteza de propagare a undelor electromagnetice este

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (10.18)$$

Înlocuind în (10.18) valorile $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ și $\varepsilon_0 = 8.8549 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ rezultă că viteza undelor electromagnetice are valoarea $c = 2.99792 \times 10^8 \text{ m/s}$.

Soluțiile ecuațiilor (10.16) și (10.17) sunt

$$E = E_m \cdot \cos(\omega \cdot t - k \cdot x) \quad (10.19)$$

$$B = B_m \cdot \cos(\omega \cdot t - k \cdot x) \quad (10.20)$$

Aici E_m și B_m reprezintă *amplitudinea intensității câmpului electric*, respectiv *amplitudinea inducției câmpului magnetic*, ω reprezintă *pulsația undei electromagnetice*, iar k este *numărul de undă*. Să notăm faptul că numărul de undă are o semnificație fizică importantă și anume reprezintă *modulul vectorului de undă*

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (10.21)$$

Aici λ este *lungimea de undă* și reprezintă distanța pe care se propagă unda electromagnetică în timpul unei perioade

$$\lambda = cT = \frac{c}{\nu} \quad (10.22)$$

Vectorul de undă are modulul dat de relația (10.21), direcția și sensul său fiind cele ale undei căreia i se asociază. El este definit prin relația

$$\vec{k} = k\vec{u} = \frac{2\pi}{\lambda}\vec{u} \quad (10.23)$$

unde \vec{u} este versorul direcției de propagare a undei ($u=1$).

Așadar, fenomenul inducției reciproce generează o entitate ce rezultă prin suprapunerea câmpurilor electric, respectiv magnetic, fluctuante, numită **câmp electromagnetic**. Acest câmp se propaga în spațiu sub forma **undei electromagnetice**, care este complet cunoscută dacă se cunosc divergența și rotorul fiecărei componente ale sale (electrică \vec{E} , respectiv magnetică \vec{B}) și care se propagă cu viteza $c \cong 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

Vom arăta că pentru o undă electromagnetică plană vectorii \vec{E} și \vec{B} oscilează perpendicular pe direcția de propagare a undei. Derivând în raport cu x respectiv t relațiile (10.19) respectiv (10.20) rezultă

$$\frac{\partial E}{\partial x} = kE_m \sin(\omega \cdot t - k \cdot x) \quad (10.24)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -\omega B_m \sin(\omega \cdot t - k \cdot x) \quad (10.25)$$

care înlocuite în relația (10.10) conduc la

$$kE_m = \omega B_m \Rightarrow \frac{E_m}{B_m} = \frac{\omega}{k} = c \quad (10.26)$$

Știind că $B = \mu_0 H$, respectiv folosind relația (10.18), din (10.25) rezultă

$$\frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \quad (10.27)$$

Atunci când unda electromagnetică se propagă printr-un mediu material omogen și izotrop caracterizat de permitivitatea relativă ε_r și permeabilitatea magnetică relativă μ_r ,

expresia vitezei undelor electromagnetice devine $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ (permitivitatea absolută a mediului) și pe μ_0 cu $\mu = \mu_r \mu_0$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}} \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}} \quad (10.28)$$

unde $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ (permitivitatea electrică absolută a mediului) și $\mu = \mu_r \mu_0$ (permeabilitatea magnetică absolută a mediului).

Mărimea $n = \sqrt{\mu_r \varepsilon_r}$ este de **indicele de refracție** al mediului. În cazul mediilor care nu sunt feromagnetice $\mu_r = 1$ rezultă $n = \sqrt{\varepsilon_r}$.

Ținând cont de relația (10.28), relația (10.26) se poate scrie

$$\begin{aligned} \frac{E}{H} &= \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \\ \frac{E}{B} &= \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} = c \end{aligned} \quad (10.29)$$

În cazul general al unei unde electromagnetice plane care se propagă într-o direcție caracterizată de versorul \vec{u} , relația dintre \vec{E} și \vec{H} devine

$$\vec{E} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} (\vec{u} \times \vec{H}) \quad (10.30)$$

\vec{E} , \vec{u} și \vec{H} sau \vec{B} formează un triedru drept. O reprezentare a unei unde electromagnetice plane este dată în figura 10.3.

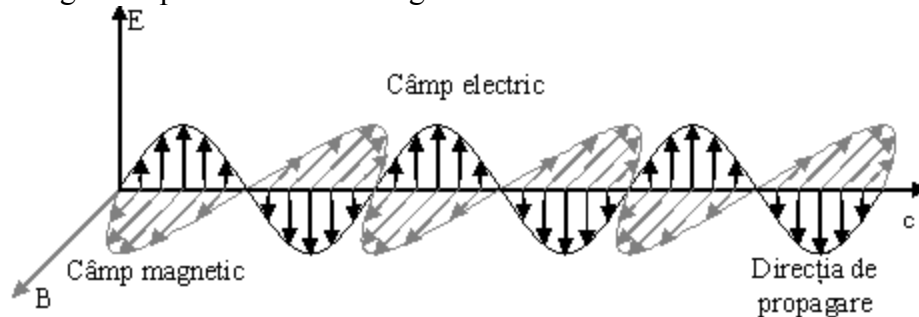


Fig.10.3 Reprezentarea schematică a unei plane.

10.3 Energia undelor electromagnetice. Vectorul Poynting

O proprietate extrem de importantă a undelor electromagnetice este aceea că ele transportă energie și impuls. Pentru a caracteriza energia dintr-o regiune a spațiului unde există o undă electromagnetică vom considera densitatea de energie a componentei electrice, respectiv a componentei magnetice a câmpului

$$w_E = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 \quad (10.31)$$

și

$$w_M = \frac{1}{2\mu_0} B^2 \quad (10.32)$$

Densitatea totală de energie a unei undei electromagnetice este

$$w = w_E + w_M = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2 \quad (10.33)$$

sau dacă se ține cont de relația (10.29) rezultă

$$w_M = \frac{1}{2\mu_0} B^2 = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 = w_E \quad (10.34)$$

Astfel energia unei undei electromagnetice este împărțită în mod egal între componenta electrică și cea magnetică rezultand

$$w = \frac{1}{\mu_0} B^2 = \varepsilon_0 E^2 \quad (10.35)$$

Deoarece \vec{E} și \vec{B} sunt mărimi care variază (extrem de rapid) în timp, este mai indicat să se lucreze cu media lor temporală

$$\langle E^2 \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T E_m^2 \cos\left(\frac{2\pi}{T}t - kx\right) dt = \frac{E_m^2}{2} \quad (10.36)$$

de unde rezultă

$$\langle w \rangle = \varepsilon_0 \frac{E_m^2}{2} \quad (10.37)$$

Considerăm un cilindru de arie S și lungime $c\Delta t$ a cărui axă este în direcția de propagare a undei (fig.10.4). Baza din dreapta a cilindrului este străbătută în intervalul Δt de energia care se găsește în cilindru la momentul de timp $t \ll \Delta t$, adică

$$W = \langle w \rangle S c \Delta t \quad (10.38)$$

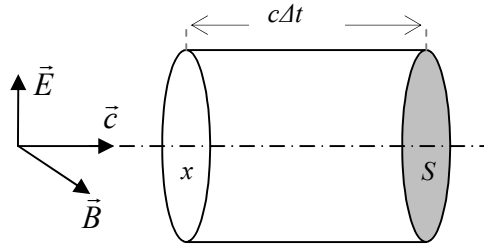


Fig.10.4 Propagarea energiei undelor electromagnetice.

Intensitatea unei undei electromagnetice, ca și a celei mecanice, este definită ca fiind cantitatea de energie transportată de unda care străbate unitatea de arie perpendiculară pe direcția de propagare în unitatea de timp

$$I = \frac{W}{S\Delta t} = c\langle w \rangle \quad (10.39)$$

$$I = \langle cw \rangle = \langle c\varepsilon_0 E^2 \rangle = c\varepsilon_0 \langle E^2 \rangle = \frac{c\varepsilon_0}{2} E_m^2 \quad (10.40)$$

Cu ajutorul relației (10.18), (10.40) devine

$$I = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \langle E^2 \rangle = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} E_m^2 \quad (10.41)$$

Propagarea unei unde electromagnetice este însoțită de un transport de energie pe direcția și în sensul propagării acesteia. Măsura acestui fenomen este dată de vectorul lui Poynting, definit prin relația

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{\mu_0} \quad (10.42)$$

având modulul

$$|\vec{P}| = \frac{BE}{\mu_0} \quad (10.43)$$

Se observă însă că

$$\left\langle \frac{BE}{\mu_0} \right\rangle = \left\langle \frac{E^2}{c\mu_0} \right\rangle = \frac{\langle E^2 \rangle}{c\mu_0} = \frac{E_m^2}{2c\mu_0} = I \quad (10.44)$$

adică media temporală a vectorului Poynting este egală cu intensitatea unei I , $\langle P \rangle = I$.

10.4 Presiunea și impulsul undelor electromagnetice

În 1619 Johannes Kepler a considerat că presiunea luminii este cea care acționând asupra cozii cometelor face ca acestea să se îndepărteze de Soare. Acest argument a fost în favoarea teoriei corpusculare a luminii. Când unda luminoasă este absorbită este absorbit și impulsul corespunzător, iar pe suprafața respectivă se exercită o presiune. Presupunem că unda electromagnetică trimite normal pe o suprafață energia W în intervalul de timp Δt . Maxwell a arătat că dacă această energie este absorbită complet pe suprafață ea va transmite un impuls egal cu

$$p = \frac{W}{c} \quad (10.45)$$

Ținând cont de definițiile pentru presiune P (forța exercitată pe unitatea de suprafață) și forța (variația impulsului în raport cu timpul)

$$\left. \begin{array}{l} P = \frac{F}{S} \\ F = \frac{dp}{dt} \end{array} \right\} \Rightarrow P = \frac{1}{S} \frac{dp}{dt} \quad (10.46)$$

de unde rezultă

$$P = \frac{1}{S} \frac{d}{dt} \left(\frac{W}{c} \right) = \frac{1}{Sc} \frac{dW}{dt} \quad (10.47)$$

Știind că intensitatea unei este dată de relația

$$I = \frac{dW}{Sdt} \quad (10.48)$$

relatia (10.47) pentru presiunea undelor electromagnetice devine

$$P = \frac{I}{c} \quad (10.49)$$

Dacă suprafața pe care cade unda electromagnetică este perfect reflectătoare și incidența este normală, atunci impulsul transmis suprafeței este de două ori mai mare decât în cazul în care unda este absorbită pe suprafață, adică

$$p = \frac{2W}{c} \quad (10.50)$$

iar presiunea exercitată pe suprafață va fi

$$P = \frac{2I}{c} \quad (10.51)$$

10.5 Producerea undelor electromagnetice

Sarcinile electrice aflate în repaus și curenții staționari nu pot produce unde electromagnetice. Dacă într-un conductor curentul variază atunci se poate produce o undă electromagnetică. Mecanismul fundamental responsabil pentru producerea undelor electromagnetice este accelerarea sarcinilor electrice. Cel mai simplu mecanism de producere a undelor electromagnetice este oscilația unui dipol electric. Un dipol oscilant are momentul dipolar descris de formula

$$p = p_0 \cos \omega t \quad (10.52)$$

unde $p_0 = q \cdot d$ este momentul dipolar, ω este pulsația mișcării, iar d este distanța dintre cele două sarcini.

Considerăm, în continuare, producerea undelor electromagnetice într-o antenă $\lambda/2$. În acest caz două bare (fiecare de lungime $\lambda/4$) sunt conectate la o sursă de tensiune alternativă (oscilator LC). Lungimea fiecărei bare este $\lambda/4$, unde λ este lungimea de undă a radiației electromagnetice. În figura 10.5 este prezentată situația în care curentul în fiecare bară este îndreptat în sus.

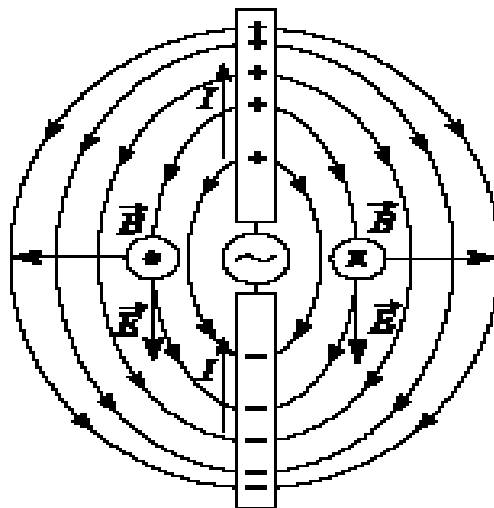


Fig.10.5 Producerea undelor electromagnetice de o antenă semiundă.

Oscilatorul forțează sarcinile să se accelereze când într-o parte când în cealaltă. Deoarece câmpul electric creat de sarcini oscilează continuu între cele două bare, antena poate fi aproximată cu un dipol oscilant. Liniile de câmp magnetic formează cercuri concentrice în jurul antenei în plane perpendiculare pe aceasta. Direcțiile vectorilor \vec{E} și \vec{B} sunt perpendiculare, iar câmpul magnetic este nul pe toată axa antenei.

În cele două puncte în care este reprezentat \vec{B} este arătat și vectorul Poynting \vec{P} îndreptat înspre exteriorul antenei. Acest lucru indică faptul că antena emite energie în orice moment de timp. Dacă se ia în calcul faptul că \vec{E} și \vec{B} sunt defazate cu $\pi/2$, în apropierea antenei ar rezulta că $\vec{P} = 0$ și deci nu ar avea loc o emisie de energie. Acest raționament este greșit. La distanțe mari de dipol existența radiației electromagnetice se datorează caracterului variabil al câmpului electric care generează un câmp magnetic variabil care la rândul lui dă naștere unui câmp electric variabil și așa mai departe. Se demonstrează că la distanțe mari de dipol

$$E \sim \frac{1}{r} \quad \text{și} \quad B \sim \frac{1}{r} \quad (10.53)$$

astfel rezultă că

$$I = \langle P \rangle \sim \frac{1}{r^2} \quad (10.54)$$

Se observă că intensitatea și puterea radiației sunt maxime pe un plan perpendicular pe antenă care trece prin mijlocul acesteia. De-a lungul antenei intensitatea undei este nulă.

Calcululele care pot fi efectuate pornind de la ecuațiile Maxwell arată că

$$I = \frac{\sin \theta}{r^2} \quad (10.55)$$

unde θ este unghiul măsurat de la axa antenei.

Undele electromagnetice induc un curent în antena receptoare, iar răspunsul este maxim când antena este paralelă cu câmpul electric în acel punct.

10.6 Spectrul undelor electromagnetice

Spectrul undelor electromagnetice acoperă un domeniu foarte larg (vezi fig.10.6 și 10.7). Astfel, el cuprinde undele gama, raze X, undele ultraviolete, vizibile, infraroșii și undele radio. De remarcat faptul că undele luminoase (domeniul vizibil) studiate în principal de optică reprezintă numai un mic segment din spectrul undelor electromagnetice.

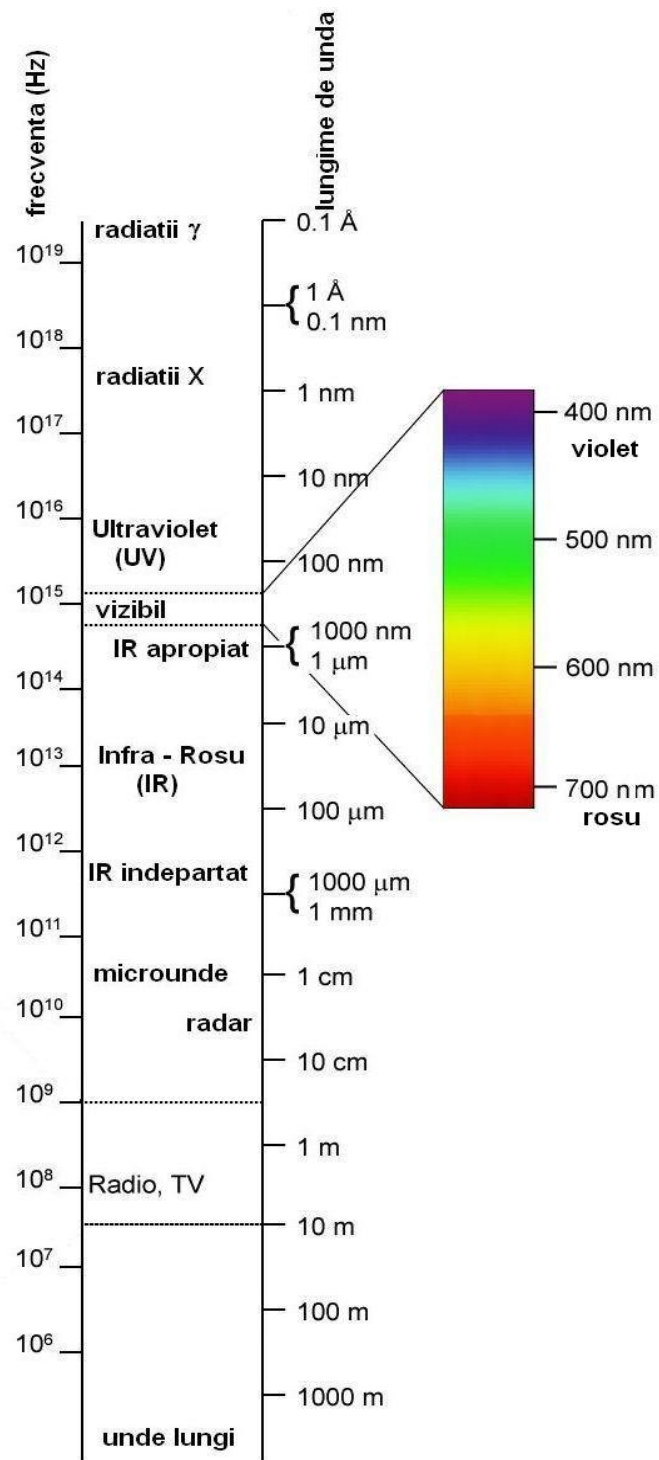


Fig.10.7 Spectrul undelor electromagnetice.

a. Undele radio

În 1887 Henrich Hertz, profesor de fizică la Technische Hochschule în Karlsruhe din Germania a generat și a detectat primele unde electromagnetice. Undele obținute de Hertz sunt astăzi clasificate ca fiind în domeniul de radiofrecvență care acopera domeniul $1 \div 10^9 \text{ Hz}$ (lungimea de undă variază de la la 0.3 m la câțiva km). Aceste unde sunt emise de circuitele electro-oscilante (spre exemplu, curentul alternativ de 50 Hz ce trece prin cablurile de transmisie a energiei generează o undă electromagnetică cu $\lambda = \frac{c}{\nu} = 6 \cdot 10^6 \text{ m} = 6 \cdot 10^3 \text{ km}$).

Nu există limită superioară teoretică pentru astfel de unde. Frecvențele cele mai mici ale acestei benzi sunt utilizate în emisiile de radio și televiziune.

b. Microundele

Domeniul microundelor are frecvențele cuprinse între $10^9 \div 3 \cdot 10^{11} \text{ Hz}$. (lungimile de undă între $1 \text{ mm} \div 30 \text{ cm}$). Radiațiile capabile să penetreze atmosfera Pământului au lungimile de undă cuprinse între $1 \text{ cm} \div 30 \text{ cm}$. Microundele sunt importante pentru comunicațiile cu vehiculele din spațiul cosmic și deasemenea în radioastronomie. Microundele sunt utilizate în telefonie, pentru ghidarea avioanelor, la cuptoarele cu microunde și pentru determinarea vitezelor (radar). Atomii neutri de hidrogen, distribuiți în vaste regiuni din spațiul cosmic, emit microunde cu lungimea de undă de 21 cm ($\nu = 1420 \text{ MHz}$).

c. Radiațiile infraroșii (IR)

Domeniul infraroșu se extinde între $3 \cdot 10^{11} \div 4 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$. El este împărțit în 4 regiuni (cu limite stabilite arbitrar):

- a) IR apropiat ($780\text{-}3000 \text{ nm}$)
- b) IR intermediar ($3000\text{-}6000 \text{ nm}$)
- c) IR îndepărtat ($6000\text{-}15000 \text{ nm}$)
- d) IR extrem ($15000 \text{ nm} - 1.0 \text{ mm}$)

Orice material radiază și absoarbe unde IR datorită agitației termice a moleculelor sale. Moleculele oricărui obiect cu temperatura peste 0 K emit radiații IR. Această emisie se datorează tranzițiilor ce au loc între nivelele de vibrație ale moleculelor. Radiațiile infraroșii sunt emise într-un spectru continuu de corpurile calde.

Trebuie remarcat faptul că jumătate din energia emisă de Soare corespunde domeniului IR. Becurile emit mai multă radiație infraroșie decât lumină. În materialele incandescente, în filamentele metalice încălzite puternic, gradul de agitație termică este mare astfel că electronii care sunt accelerați suferă frecvente ciocniri. Rezultă o emisie numită radiație termică care este sursa principală de lumină.

Corpurile eminesc emite radiații infraroșii de la 3000 nm având un maxim al emisiei în jur de 10000 nm .

Energia radiațiilor IR este măsurată cu dispozitive ce au detectoare sensibile la absorbția de radiații IR. Unele detectoare pot fi cuplate prin intermediul unui sistem de scanare la un tub catodic fapt care duce la producerea unei imagini în IR. Un astfel de aparat este cunoscut sub numele de termograf.

Un exemplu de emițător IR poate fi laserul cu CO_2 . Folosit ca sursă de putere continuă cu nivelul de 100 W este utilizat mult în industrie, în special în tăieri de precizie

și tratamente termice. Emisia sa din IR ($18.3-23\mu\text{m}$) este ușor absorbită de corpul uman fapt ce îl face util în medicină pentru diverse operații.

d. Radiațiile vizibile

Domeniul vizibile corespunde radiațiilor electromagnetice cu frecvențe între $3.84 \cdot 10^{14} - 7.69 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ (lungimi de undă cuprinse în intervalul $390 \div 780 \text{ nm}$). Ea este produsă prin tranzițiile electronilor în interiorul atomilor și moleculelor. Spre exemplu, acest fenomen se produce în tuburile de descărcare (tuburi umplute cu un gaz în care se realizează o descărcare electrică, atomii se excită și emit o radiație vizibilă). Radiația emisă este caracteristică diverselor nivele energetice determinând apariția unor spectre de linii sau benzi de frecvențe bine determinate. Astfel Kryptonul 86 are liniile foarte înguste, între care linia cu lungimea de undă $\lambda=605.780210 \text{ nm}$ și lărgimea la semiînălțime egală cu 0.000470 nm (ceea ce corespunde la o lărgime de 400 MHz). Din 1983 această linie este utilizată la definirea unității de lungime ($1\text{m} = 1650763.73$ lungimi de undă ale Kr86).

Newton a fost primul care a observat că lumina albă este un amestec de culori din spectrul vizibil. Culoarea reprezintă răspunsul fenomenologic și psihologic al omului la diferitele frecvențe ale spectrului vizibil care se extinde de la $3.84 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ pentru roșu și care trece prin galben, verde, albastru și violet până la aproximativ $7.69 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$. Culoarea nu este o proprietate a luminii însăși ci o manifestare a sistemului nervos uman.

e. Radiațiile ultraviolete (UV)

Lângă spectrul radiațiilor luminoase se găsește spectrul radiațiilor ultraviolete (UV), între $8 \cdot 10^{14} \div 3.4 \cdot 10^{16}$. El a fost descoperit de Johann Willhelm Ritter (1776-1810).

Ochiul uman nu poate percepe undele UV deoarece corneea absoarbe în particular radiațiile cu lungimile de undă cele mai mici, iar cristalinul absoarbe puternic radiațiile cu lungimea de undă din jurul a 300 nm . Insectele, de exemplu albinele, pot percepe radiațiile ultraviolete.

Atomii emit radiații ultraviolete când au loc dezexcitări ale electronilor de pe nivelele energetice cele mai înalte pe nivele energetice mai joase ale atomilor. O altă situație este atunci când doi atomi cărora le lipsește câte un electron de valență se combină în molecule biatomice astfel că aceștia se cuplează în perechi în procesul de creare a legăturii chimice. Aceștia sunt puternic legați de ansamblul astfel creat și, în consecință, stările excitate ale acestor molecule sunt plasate în ultraviolet. Moleculele din atmosferă N_2 , O_2 , CO_2 și H_2O au astfel de rezonanțe în ultraviolet.

f. Razele X

Razele X au fost descoperite în 1895 de Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923). Ele au domeniul cuprins în intervalul $2.4 \cdot 10^{16} \div 5 \cdot 10^{19} \text{ Hz}$, având lungimile de undă foarte mici ($6 \cdot 10^{-3} - 1.25 \text{ nm}$).

O metodă practică de obținere a acestor radiații este aceea de a accelera electroni și a-i orienta către ținte realizate din diverse materiale. Aceasta determină o decelerare rapidă a electronilor care vor emite o radiație de frânare. În plus atomii țintei pot deveni ionizați în cursul acestui bombardament. Pot fi eliminați electronii din păturile interioare foarte apropiate de nucleu. Atunci când o astfel de stare este ocupată de un electron din

păturile superioare se pot emite radiații X. Rezultatul obținut este o radiație specifică materialului țintei și ea poartă numele de radiație caracteristică.

Pe baza utilizării razelor X funcționează aparatele ce realizează radiografiile cu raze X, telescoapele cu raze X, microscopul cu raze X, difractometrele de raze X.

În 1984 un grup de la Lawrence Livermore National Laboratory (SUA) a reușit să realizeze un laser cu lungimea de undă de 20.6 nm care emite deci în domeniul razelor X.

g. Radiațiile gama

Radiațiile gama sunt radiațiile electromagnetice cu frecvențe mai mari de $5 \cdot 10^{19}$ Hz și respectiv cu lungimile de undă cele mai mici. Ele sunt emise în tranzițiile între nivelele energetice ale particulelor ce alcătuiesc nucleul atomic. Datorită lungimilor de undă mici este practic imposibil să se observe comportarea ondulatorie a acestora.