Bevezetés a modern fizika fejezeteibe

2. (b)

Elektromágneses hullámok

Utolsó módosítás: 2016. szeptember 28.

Dr. Márkus Ferenc
BME Fizika Tanszék

Dipólsugárzás (1)

Anyagi közeg jelenléte esetén a **D** vektor a polarizáció jelensége miatt módosul

$$\boldsymbol{D} = \varepsilon_0 \boldsymbol{E} + \boldsymbol{P}$$

P: polarizáció vektora

Feltételezve, hogy a **j** *(„külső")* áramsűrűség a közegben zérus (**j**=0), az (1) Maxwell-egyenlet alakja:

$$rot\, \boldsymbol{H} = \varepsilon_0 \dot{\boldsymbol{E}} + \dot{\boldsymbol{P}}$$

Itt a $\dot{\boldsymbol{P}}$ a polarizáció jelensége során megjelenő *(„lokális")* áramsűrűségnek felel meg.

$$\boldsymbol{j}_p = \dot{\boldsymbol{P}}$$

Dipólsugárzás (2)

Matematikailag a $\boldsymbol{j}_p$

hasonlóan beírható (2.a fejezet 33. oldal)

$$\Delta \boldsymbol{A} - \varepsilon_0 \mu_0 \ddot{\boldsymbol{A}} = -\mu_0 \boldsymbol{j}$$

(*) egyenletbe, mintha az „ottani" **j** lenne, így

$$\Delta \boldsymbol{A} - \varepsilon_0 \mu_0 \ddot{\boldsymbol{A}} = -\mu_0 \dot{\boldsymbol{P}}$$

egyenlethez jutunk.

Dipólsugárzás (3)

Mivel „kívülről jött” töltések nincsenek, így $div\,\boldsymbol{D} = 0$

Ekkor $$div\,\boldsymbol{E} = -\frac{1}{\varepsilon_0} div\,\boldsymbol{P}$$

Összefüggés a polarizáció során megjelenő töltéssűrűséget mutatja meg. Ezért a 2.a fejezet 34. oldal

$$\Delta\varphi - \varepsilon_0\mu_0\ddot{\varphi} = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

eredményét alkalmazva kapjuk:

$$\Delta\varphi - \varepsilon_0\mu_0\ddot{\varphi} = \frac{1}{\varepsilon_0} div\,\boldsymbol{P}$$

Dr. Márkus Ferenc
BME Fizika Tanszék

Dipólsugárzás (4)

Az $\boldsymbol{A}$ vektorpotenciál a 2-a fejezet 36. oldal kifejtése szerint:

$$\boldsymbol{A}(x,y,z,t) = \frac{\mu_0}{4\pi}\int_V \frac{1}{r}\frac{\partial \boldsymbol{P}(\xi,\eta,\zeta,t-\frac{r}{c})}{\partial t} d\xi d\eta d\zeta$$

A további számolások elvégzése céljából (!) érdemes bevezetni a $\boldsymbol{Z}$ Hertz-vektort az alábbi definícióval:

$$\boldsymbol{A} = \varepsilon_0\mu_0\dot{\boldsymbol{Z}} \qquad \text{és} \qquad \varphi = -div\,\boldsymbol{Z}$$

Ellenőrzés a Lorenz-feltételen keresztül.

Dr. Márkus Ferenc
BME Fizika Tanszék

Dipólsugárzás (5)

Ekkor a Hertz-vektor:

$$\boldsymbol{Z}(x,y,z,t) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int_V \frac{\boldsymbol{P}(\xi,\eta,\zeta,t-\frac{r}{c})}{r}d\xi d\eta d\zeta$$

A ***P*** polarizáció ismeretében a ***Z*** Hertz-vektor integrálással közvetlenül megkapható, majd belőle az ***A*** vektor- és φ skalárpotenciál deriválásokkal kiszámolható. A következő lépésben pedig ezekből a mérhető ***E*** és ***B*** térmennyiségek adhatók meg. A vázolt módszernek – a segédmennyiségek bevezetésének és a számolásban való alkalmazásának – ez a lényege és tanulsága!

Dipólsugárzás (6)

Tekintsük egyetlen $\boldsymbol{r_0}$ pontbeli dipól terét. Ekkor a $\boldsymbol{P}$ dipólsűrűség:

$$\boldsymbol{P}(\boldsymbol{r},t)=\boldsymbol{p}(t)\delta(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}_0)$$

Itt $\delta(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}_0)$ a Dirac-(delta-)függvény. (Ez mutatja, hogy tényleg csak az $\boldsymbol{r_0}$ helyen van egyetlen $\boldsymbol{p}$(t) dipól.)

Dipólsugárzás (7)

Az előző összefüggéseket felhasználva az $\boldsymbol{E}$ elektromos térerősség:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{E} &= -\dot{\boldsymbol{A}} - \ grad\ \varphi \\ &= -\varepsilon_0\mu_0\ddot{\boldsymbol{Z}} + \ grad\ div\ \boldsymbol{Z} \\ &= \Delta\boldsymbol{Z} - \varepsilon_0\mu_0\ \ddot{\boldsymbol{Z}} + rot\ rot\ \boldsymbol{Z}\end{aligned}$$

A (*) egyenletet (vagy e fejezet 2. oldalát) és a Hertz-vektor definícióját felhasználva az első két tagra fenn áll:

$$\Delta\boldsymbol{Z} - \varepsilon_0\mu_0\ \ddot{\boldsymbol{Z}} = -\ \frac{1}{\varepsilon_0}\boldsymbol{P}$$

Dr. Márkus Ferenc
BME Fizika Tanszék

Dipólsugárzás (8)

De, mivel az $\boldsymbol{r_0}$ ponton kívül máshol nincs dipól, így a szabad térben:

$$\boldsymbol{P} \equiv 0$$

Ezt figyelembe véve az $\boldsymbol{E}$ elektromos térerősség:

$$\boldsymbol{E} = rot\, rot\, \boldsymbol{Z}$$

A részletes számolást mellőzve →

Dipólsugárzás (9)

$$\boldsymbol{E} = rot\, rot\, \boldsymbol{Z}$$

$$= \frac{3(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}_0)(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}_0,\boldsymbol{p})}{r^5} - \frac{\boldsymbol{p}}{r^3}$$

$$+ \frac{1}{c}\left(\frac{3(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}_0)(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}_0,\boldsymbol{p}')}{r^4} - \frac{\boldsymbol{p}'}{r^2}\right)$$

$$+ \frac{1}{c^2}\left(\frac{3(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}_0)(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}_0,\boldsymbol{p}'')}{r^3} - \frac{\boldsymbol{p}''}{r}\right)$$

Itt a ‘ a *t-r/c* argumentum szerinti deriváltat jelöli.

Dr. Márkus Ferenc
BME Fizika Tanszék

Dipólsugárzás (10)

A $\boldsymbol{B}$ mágneses térerősség:

$$\boldsymbol{B} = rot\ \boldsymbol{A} = \frac{1}{c} rot \dot{\boldsymbol{Z}} =$$

$$= -\frac{(\boldsymbol{r} - \boldsymbol{r}_0) \times \boldsymbol{p}'}{r^3} - \frac{1}{c} \frac{(\boldsymbol{r} - \boldsymbol{r}_0) \times \boldsymbol{p}''}{r^2}$$

Dipólsugárzás (11)

Az ***E*** nagyságrendje a $\boldsymbol{p}(t) = p_0 \, e^{i\omega t}$

harmonikus dipólrezgés esetén

a sztatikus zónában: $\left|\dfrac{\boldsymbol{p}}{r^3}\right| = \dfrac{p_0}{r^3}$

a középső zónában: $\left|\dfrac{\boldsymbol{p}'}{c\, r^2}\right| = \dfrac{\omega \, p_0}{c\, r^2}$

a hullám zónában: $\left|\dfrac{\boldsymbol{p}''}{c^2\, r}\right| = \dfrac{\omega^2 \, p_0}{c^2\, r}$

Dipólsugárzás (12)

A három zóna térerősségeinek aránya:

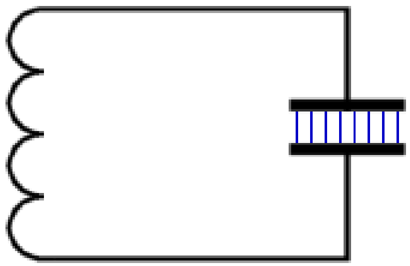
$$\frac{p_0}{r^3} : \frac{\omega\, p_0}{c\, r^2} : \frac{\omega^2\, p_0}{c^2\, r} = \frac{1}{r^2} : \frac{\omega}{c\, r} : \frac{\omega^2}{c^2}$$

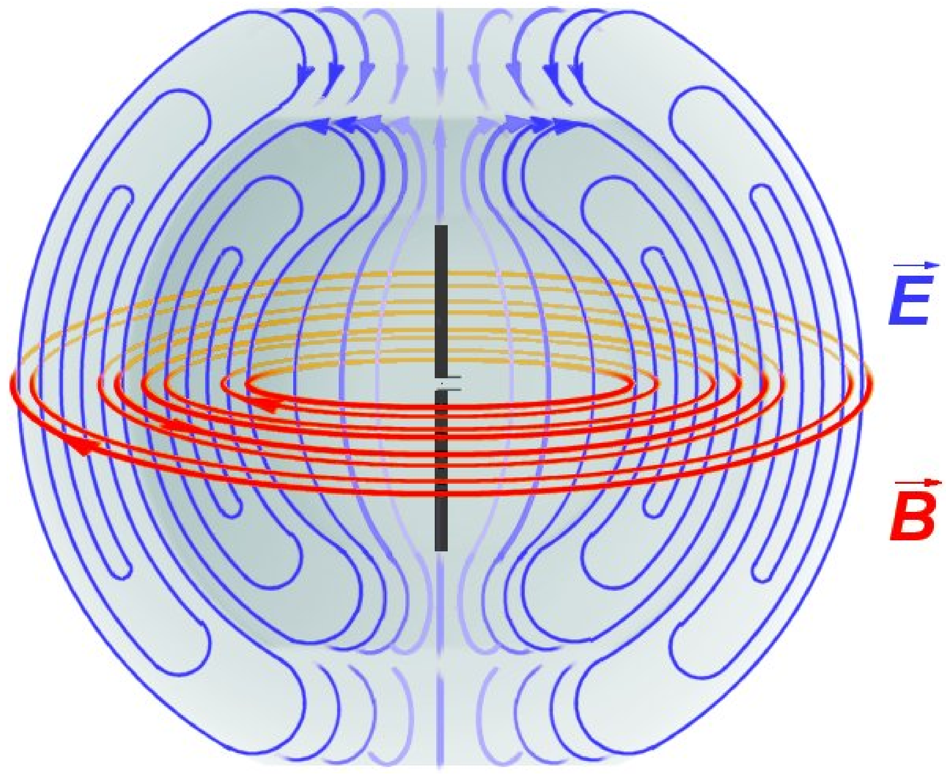
$$= \frac{1}{r^2} : \frac{2\pi}{\lambda\, r} : \frac{(2\pi)^2}{\lambda^2}$$

Azaz nagy távolságban már csak a hullámzónára jellemző érték marad meg.

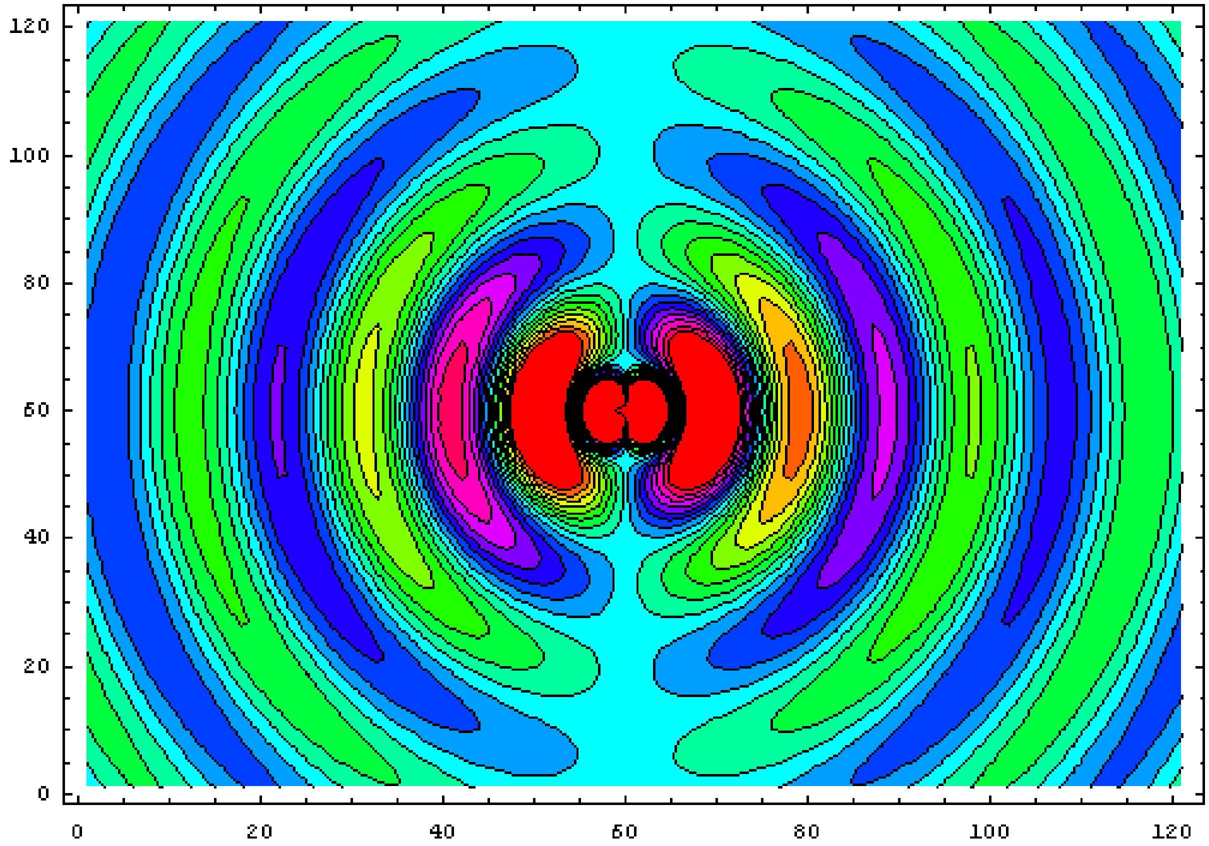
Dr. Márkus Ferenc
BME Fizika Tanszék

Dipólsugárzás – a sugárzás keltése





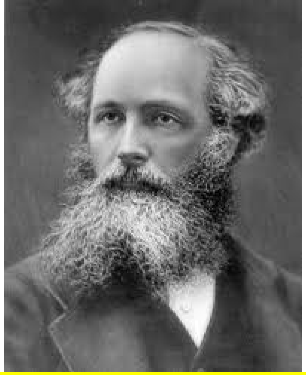
1 Hz-es függőlegesen oszcilláló dipól elektromos tere



Dr. Márkus Ferenc
BME Fizika Tanszék

André-Marie Ampère
1775-1836, francia fizikus

Michael Faraday
1791-1867, angol fizikus



James Clerk Maxwell
1831-1879, skót elméleti fizikus

Heinrich Rudolf Hertz
1857-1894, német fizikus

Maxwell 1864-ben írta fel az elektrodinamika négy törvényét egy csatolt egyenletrendszerben. Észrevette, hogy az **Ampere**-törvény módosításra szorul: a változó elektromos tér ugyanúgy létrehoz mágneses teret, mint az áramok. E tag figyelembe vételével az egyenletekből következik a töltésmegmaradás, ami egy máig alapvetőnek gondolt megmaradási tétel.

Maxwell megmutatta, hogy az egyenletek szerint létrejöhetnek elektromágneses hullámok, olyan hullámok, melyekben az oszcilláló elektromos és mágneses mező halad vákuumban.

Maxwell (1865) ezt írta: *"Ez a sebesség olyan közel esik a fényéhez, hogy erős okunk van feltételezni, hogy a fény maga (beleértve a hősugárzást és a többi sugárzást ha létezik) elektromágneses zavar, mely hullám formájában terjed az elektromágneses térben az elektromágnesesség törvényei szerint."*

Maxwell következtetése helyes volt, de nem érhette meg annak Heinrich **Hertz** által elvégzett 1888-as igazolását. A fény mennyiségi értelmezése elektromágneses hullámként, melyet Maxwell tett meg, a 19. századi fizika egyik nagy diadala.

Valójában Michael **Faraday** hasonló gondolatot fogalmazott meg a fényről 1846-ban, de nem volt képes annak mennyiségi leírását adni, sebességét megjósolni. A maxwelli elektrodinamika felfedezése nagy hatással volt a fizikára, olyan új elméletek csíráztak ki belőle, mint például a speciális relativitáselmélet. Az elektrodinamika kvantált elmélete, a relativisztikus kvantumelektrodinamika a mai fizikai elméletek legpontosabbika.

Az elektromágnesség számos gyakorlati felhasználása gazdagítja mindennapi életünket a mikrohullámú sütőtől a lézerkésen át egészen a modern távközlési rendszerekig.

Kitekintés: Mi lehet a vektorpotenciál fizikai jelentése? Az Aharonov-Bohm-effektus (1)

Az indukció jelenségének tanulmányozása során *Faraday* feltételezett olyan állapotot (→ elektrotonikus állapot) és egy hozzá kapcsolódó fizikai mennyiséget, amely változása kapcsolatba hozható a ***E*** és ***B*** mérhető fizikai mennyiségekkel.

Maxwell az ***A*** vektorpotenciált olyan matematikai mennyiségként értelmezte és definiálta, amelynek változása az ***E*** és ***B*** mérhető fizikai mennyiségeket adja meg.

Kitekintés: Mi lehet a vektorpotenciál fizikai jelentése? Az Aharonov-Bohm-effektus (2)

„Egy kísérletsorozat – amelynek menetét intenzív gondolkodás írta elő, minden matematikai számítás nélkül – vezette Faraday-t ahhoz, hogy felismerje valaminek a létezését, amelyről mi tudjuk, hogy az egy matematikai mennyiség, amelyet azonban az elektromágneses elmélet alapmennyiségének lehet tekinteni. De minthogy ő ehhez a fogalomhoz tisztán empirikus úton jutott, fizikai létet tulajdonított neki. … Az *elektrotonikus* állapot Faraday-féle elképzelésének az a tudományos értéke, hogy arra ösztökéli az elmét, olyan mennyiséget ragadjon meg, amelynek változásától függnek a tényleges mennyiségek."

J. C. Maxwell

Forrás: J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism* (Clarendon, Oxford, 1873). /Simonyi Károly: *A fizika kultúrtörténete* (Gondolat, Budapest, 1986)./

Kitekintés: Mi lehet a vektorpotenciál fizikai jelentése? Az Aharonov-Bohm-effektus (3)

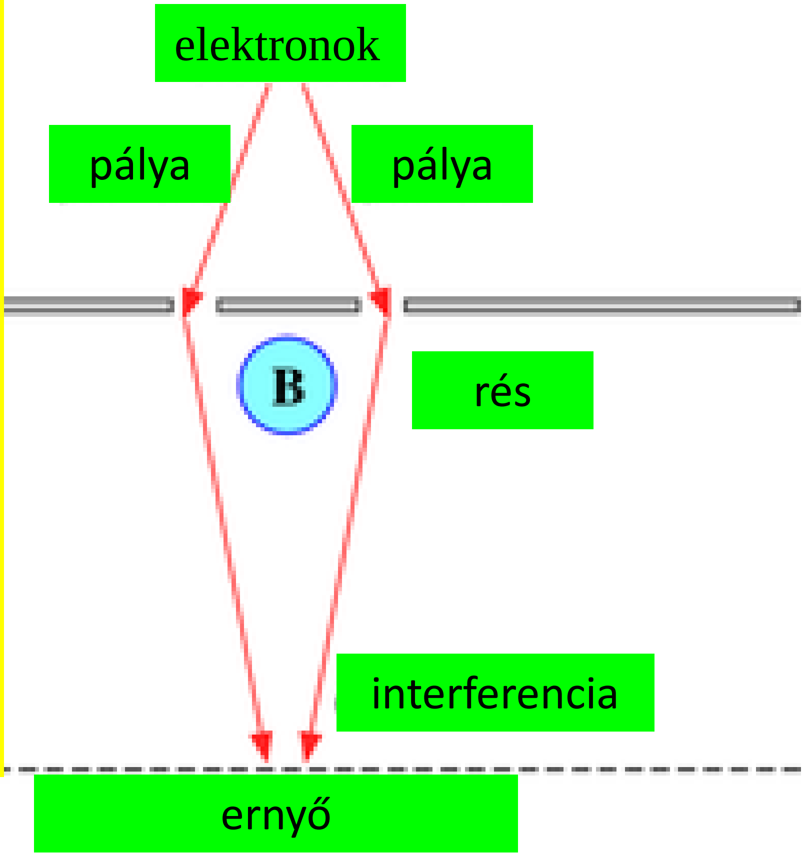
Konklúzió: A klasszikus elektrodinamikában a vektorpotenciál matematikai mennyiség.

Viszont →

A ma Aharonov-Bohm-effektusnak nevezett jelenséget először W. Ehrenberg és R. E. Siday jósolta meg 1949-ben. Később, tőlük függetlenül, Y. Aharonov és D. Bohm hasonló feltételezésekhez jutottak 1959-ben. →
A vektorpotenciálnak a kvantumelektrodinamikában van fizikai realizációja!

Kitekintés: Mi lehet a vektorpotenciál fizikai jelentése? Az Aharonov-Bohm-effektus (4)

Az elektronok a réseken áthaladva interferencia képet hoznak létre, amely az ernyőn látható. A ***B*** mágneses tér egy tekercsbe van zárva, tehát az elektronokra közvetlen hatása (pl. Lorentz-effektuson keresztül) nincs. A mágneses tér ki- és bekapcsolásával azonban az interferenciacsíkok az előző helyzethez képest elmozdulnak! Ez azt jelenti, hogy az elektronokhoz rendelhető hullámfüggvények fázisa meg kell változzon! Ha a mágneses tér árnyékolt, akkor mi változtatja meg a fázisokat? → Az ***A*** vektorpotenciál a tekercsen kívül is jelen van!!!



Hullámoptika - Monokromatikus síkhullámok (1)

A hullámegyenlet megoldásaként előálló a „+" irányba terjedő síkhullámok általános alakja:

$$f\left(t-\frac{\boldsymbol{n}\,\boldsymbol{r}}{c}\right)$$

Mivel az argumentum tetszőleges számmal szorozható, így szokás ezt a **-ω** értékkel tenni, azaz

$$t-\frac{\boldsymbol{n}\,\boldsymbol{r}}{c}\rightarrow-\omega\left(t-\frac{\boldsymbol{n}\,\boldsymbol{r}}{c}\right)=\frac{\omega}{c}\boldsymbol{n}\,\boldsymbol{r}-\omega t$$

Korábbról emlékszünk, hogy a hullámszám

$$k=\frac{1}{\lambda}=\frac{\nu}{c}$$

Dr. Márkus Ferenc
BME Fizika Tanszék

Monokromatikus síkhullámok (2)

Most azonban $\frac{\omega}{c}$ jelent meg, amely $2\boldsymbol{\pi}$-szerese a $\frac{\nu}{c}$ -nek.

Bevezetjük ugyanazzal a k jelöléssel a cirkuláris hullámszám fogalmát, amely tehát így

$$k = \frac{\omega}{c}$$

A terjedési irányt is figyelembe vevő cirkuláris hullámszám vektor:

$$\boldsymbol{k} = k\boldsymbol{n}$$

Monokromatikus síkhullámok (3)

Ezzel az argumentum a $\boldsymbol{kr} - \omega t$ alakra hozható.

Harmonikus hullámok vizsgálatára szorítkozva a térerősségek alakja:

$$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},t) = \boldsymbol{E}_0 e^{i(\boldsymbol{kr}-\omega t)}$$

$$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{r},t) = \boldsymbol{H}_0 e^{i(\boldsymbol{kr}-\omega t)}$$

-A $_0$ index az amplitúdó konstans értékére utal.
-A hullám szinuszos/koszinuszos jellege a komplex írásmódban benne van. A számolás ebben az alakban egyszerűbb. Ugyanakkor a térerősségek értékei – mind az amplitúdók, mind a teret megadó értékek – komplexek, amelynek valós részei adják a fizikai mennyiségek tényleges értékeit.
- A monokromatikusságot az egyetlen $\boldsymbol{\omega}$ körfrekvencia jelenléte testesíti meg.

Monokromatikus síkhullámok (4)

A térmennyiségek idő és hely szerinti deriváltjait célszerű előre kiszámolni:

$$\frac{\partial \boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},t)}{\partial t} = -i\omega \boldsymbol{E}_0 e^{i(\boldsymbol{kr}-\omega t)} \qquad \frac{\partial \boldsymbol{H}(\boldsymbol{r},t)}{\partial t} = -i\omega \boldsymbol{H}_0 e^{i(\boldsymbol{kr}-\omega t)}$$

$$div\ \boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},t) = i\boldsymbol{k}\boldsymbol{E}_0 e^{i(\boldsymbol{kr}-\omega t)} \qquad div\ \boldsymbol{H}(\boldsymbol{r},t) = i\boldsymbol{k}\boldsymbol{H}_0 e^{i(\boldsymbol{kr}-\omega t)}$$

$$rot\ \boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},t) = i\boldsymbol{k} \times \boldsymbol{E}_0 e^{i(\boldsymbol{kr}-\omega t)}$$

$$rot\ \boldsymbol{H}(\boldsymbol{r},t) = i\boldsymbol{k} \times \boldsymbol{H}_0 e^{i(\boldsymbol{kr}-\omega t)}$$

Monokromatikus síkhullámok (5)

$rot\,\boldsymbol{H} = \dot{\boldsymbol{D}}$ $rot\,\boldsymbol{E} = -\dot{\boldsymbol{B}}$ $div\,\boldsymbol{D} = 0$ $div\,\boldsymbol{B} = 0$

egyszerűsítések után az alábbiakat kapjuk:

$$\boldsymbol{k} \times \boldsymbol{H}_0 = -\omega\varepsilon\boldsymbol{E}_0 \qquad \boldsymbol{k} \times \boldsymbol{E}_0 = \omega\mu\boldsymbol{H}_0$$

$$\varepsilon\boldsymbol{k}\boldsymbol{E}_0 = 0 \qquad \mu\boldsymbol{k}\boldsymbol{H}_0 = 0$$

Ezt követően szokás elhagyni a $_0$ indexet, nem feledve, hogy a további formulák már csak az amplitúdókat tartalmazzák!

Dr. Márkus Ferenc
BME Fizika Tanszék

Monokromatikus síkhullámok (6)

A szabad tér egyenletei:

$$\boldsymbol{k} \times \boldsymbol{H} = -\omega \varepsilon \boldsymbol{E} \qquad \boldsymbol{k} \times \boldsymbol{E} = \omega \mu \boldsymbol{H}$$

$$\varepsilon \boldsymbol{k} \boldsymbol{E} = 0 \qquad \mu \boldsymbol{k} \boldsymbol{H} = 0$$

A hullámok transzverzális tulajdonsága és a jobbkéz-szabály itt is látható!

Monokromatikus síkhullámok (7)

Tekintsük a $\boldsymbol{k} \times \boldsymbol{E} = \omega\mu\boldsymbol{H}$ egyenletet.

Balról vektoriálisan megszorozva ***k***-val kapjuk:

$$\boldsymbol{k} \times (\boldsymbol{k} \times \boldsymbol{E}) = \omega\mu\boldsymbol{k} \times \boldsymbol{H}$$

Felhasználva, hogy

$$\boldsymbol{A} \times (\boldsymbol{B} \times \boldsymbol{C}) = \boldsymbol{B}(\boldsymbol{A}\boldsymbol{C}) - \boldsymbol{C}(\boldsymbol{A}\boldsymbol{B})$$

$$\boldsymbol{k} \times (\boldsymbol{k} \times \boldsymbol{E}) = \boldsymbol{k}(\boldsymbol{k}\boldsymbol{E}) - k^2\boldsymbol{E}$$

Mivel ***k*** merőleges ***E***-re, ezért a jobb oldal első tagja eltűnik.

Monokromatikus síkhullámok (8)

Így $$-k^2\boldsymbol{E} = \omega\mu\boldsymbol{k}\times\boldsymbol{H}$$

és felhasználva, hogy $$\boldsymbol{k}\times\boldsymbol{H} = -\omega\varepsilon\boldsymbol{E}$$

kapjuk:

$$k^2 = \omega^2\varepsilon\mu$$

Ebből

$$c = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$$

Hullámok polárossága (1)
Síkban poláros hullám

Az $\boldsymbol{E}_0$ és $\boldsymbol{H}_0$ vektorok komplex értékű vektorok, így ezek minden komponense is az. Az $\boldsymbol{E}_0$ komplex vektor – hasonlóan $\boldsymbol{H}_0$ is – felírható

$$\boldsymbol{E}_0 = \sum_j \boldsymbol{E}_{0j} e^{i\delta_j}$$

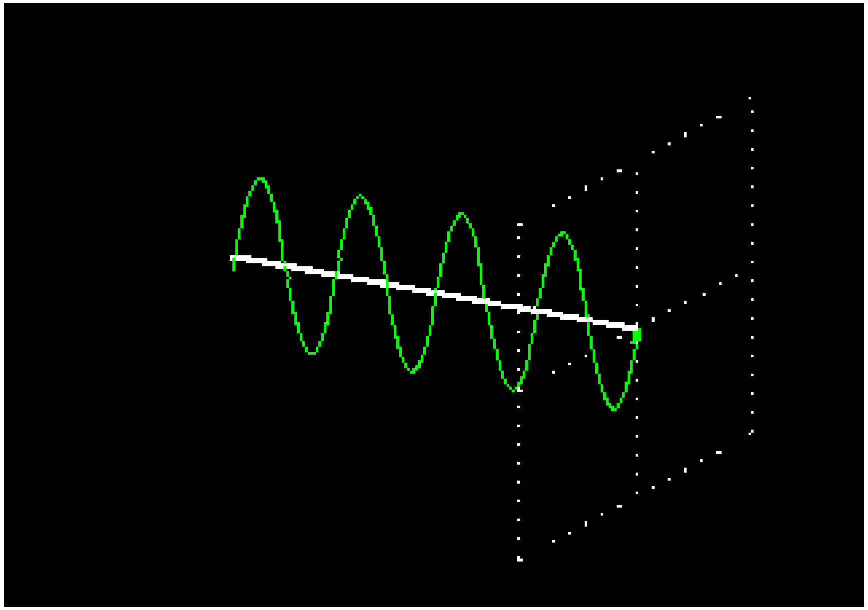
alakban, ahol az $\boldsymbol{E}_{0j}$ valós értékű vektor, a komplex tulajdonságot az e-ados kifejezés adja a $\boldsymbol{\delta}_j$ kezdőfázisokon keresztül ($j=x,y,z$). Pl. az x tengely irányába terjedő hullám esetére a térerősség y és z komponensei:

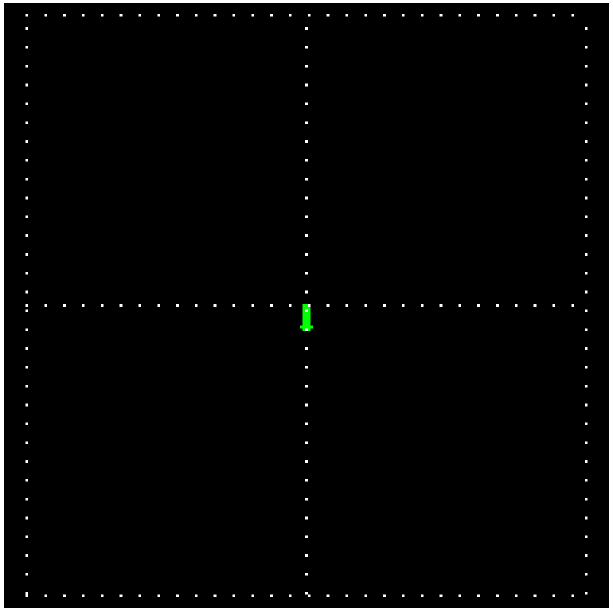
$$E_y = E_{0y} e^{i\delta_y} e^{i(\boldsymbol{kr}-\omega t)} \qquad E_z = E_{0z} e^{i\delta_z} e^{i(\boldsymbol{kr}-\omega t)}$$

Dr. Márkus Ferenc
BME Fizika Tanszék

Hullámok polárossága (2)
Síkban poláros hullám

Ha komponensek $\delta = \delta_y = \delta_z$ fázisa megegyezik, akkor a rezgés egy síkban történik (lásd a következő sorozatokon):

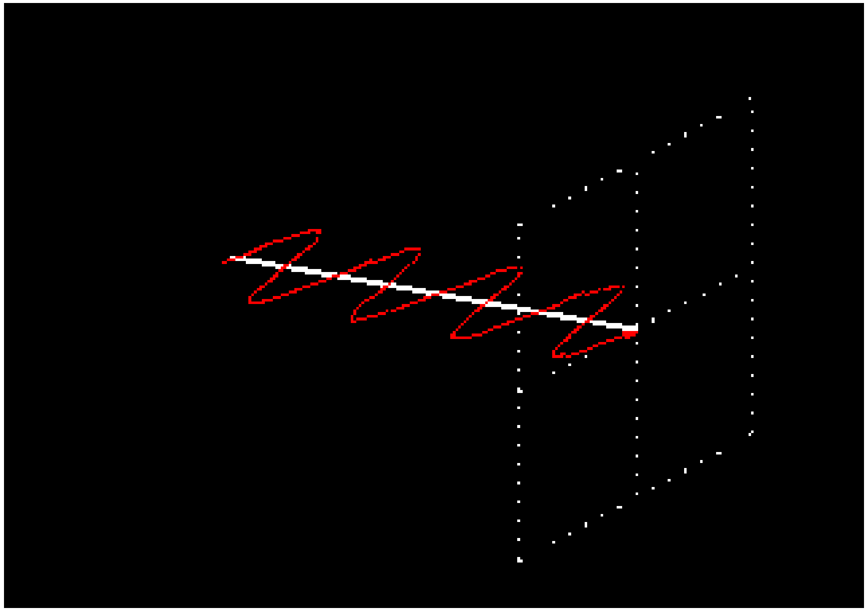


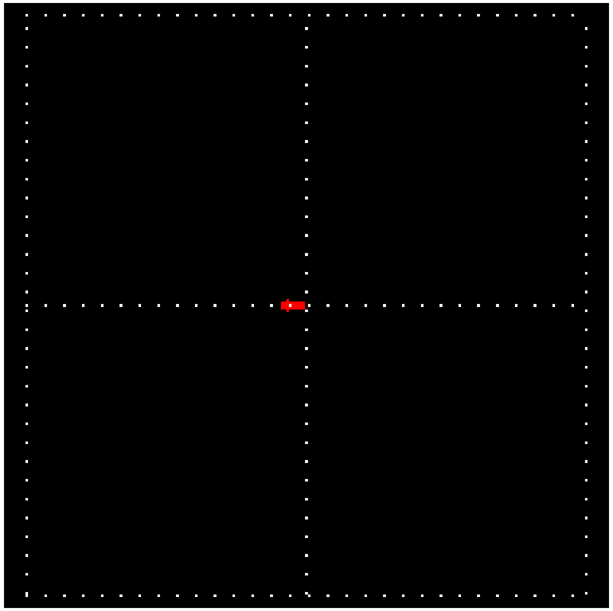


A z-komponens rezgése

Dr. Márkus Ferenc
BME Fizika Tanszék

Hullámok polárossága (3)
Síkban poláros hullám



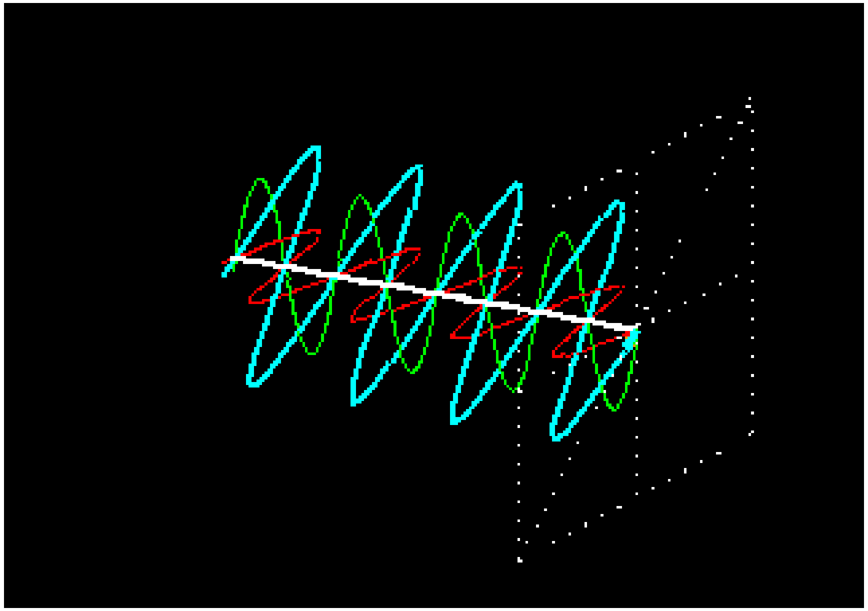


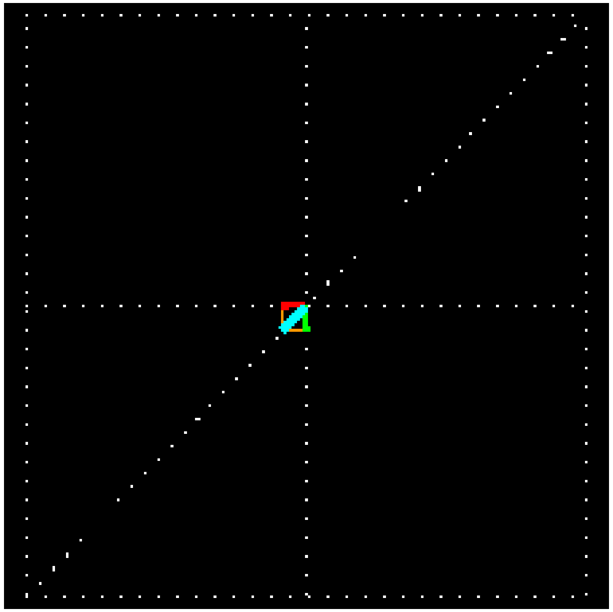
Az y-komponens rezgése

Dr. Márkus Ferenc
BME Fizika Tanszék

Hullámok polárossága (4)
Síkban poláros hullám

Az eredményezett hullám síkban poláros:

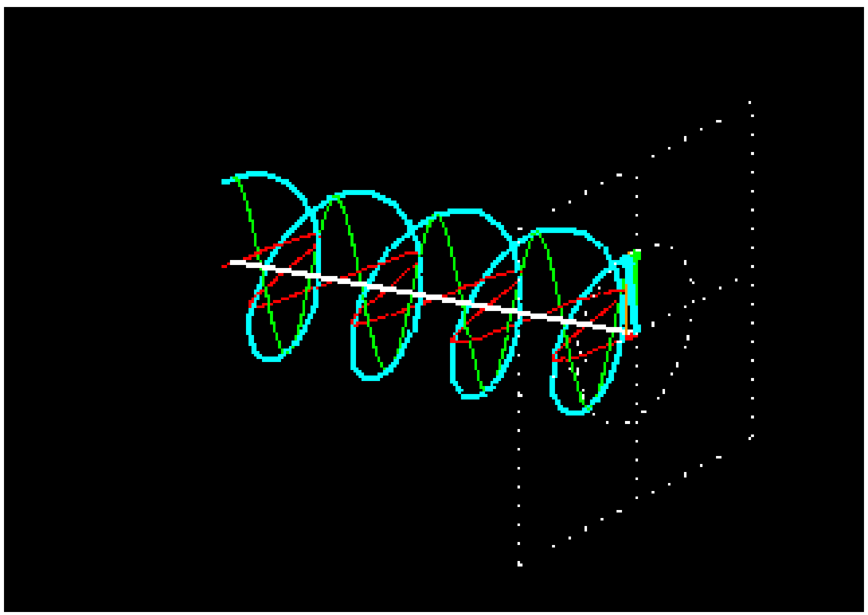


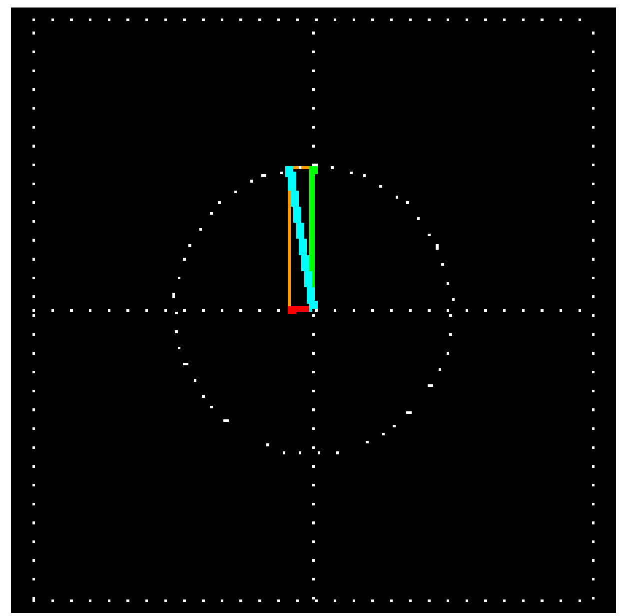


Ha olyan koordináta rendszert választunk, hogy pl. E_y=0 legyen, akkor az (x,y) sík a polarizáció síkja, míg az (x,z) sík a rezgési sík.

Hullámok polárossága (5)
Cirkulárisan poláros hullám

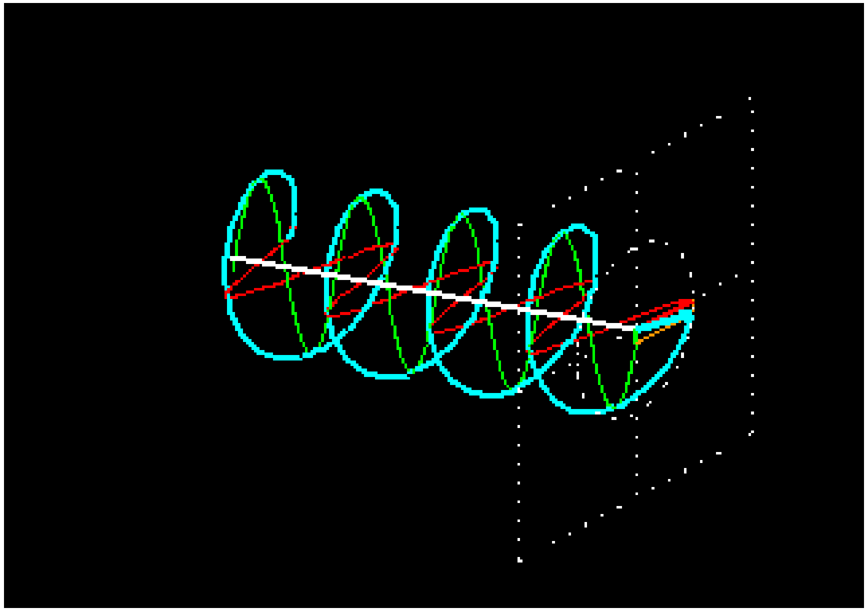
Amennyiben az amplitúdók megegyeznek, azaz $E_{0y} = E_{0z}$, valamint a fázisokra fenn áll, hogy $\delta_z = \delta_y - \frac{\pi}{2}$, akkor az eredményezett hullám jobbra cirkulárisan poláros:

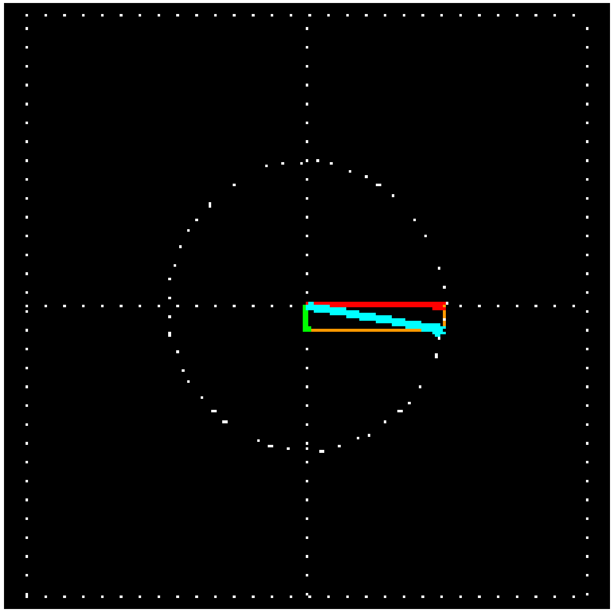




Hullámok polárossága (6)
Cirkulárisan poláros hullám

Amennyiben az amplitúdók megegyeznek, azaz $E_{0y} = E_{0z}$, valamint a fázisokra fenn áll, hogy $\delta_z = \delta_y + \frac{\pi}{2}$, akkor az eredményezett hullám balra cirkulárisan poláros:

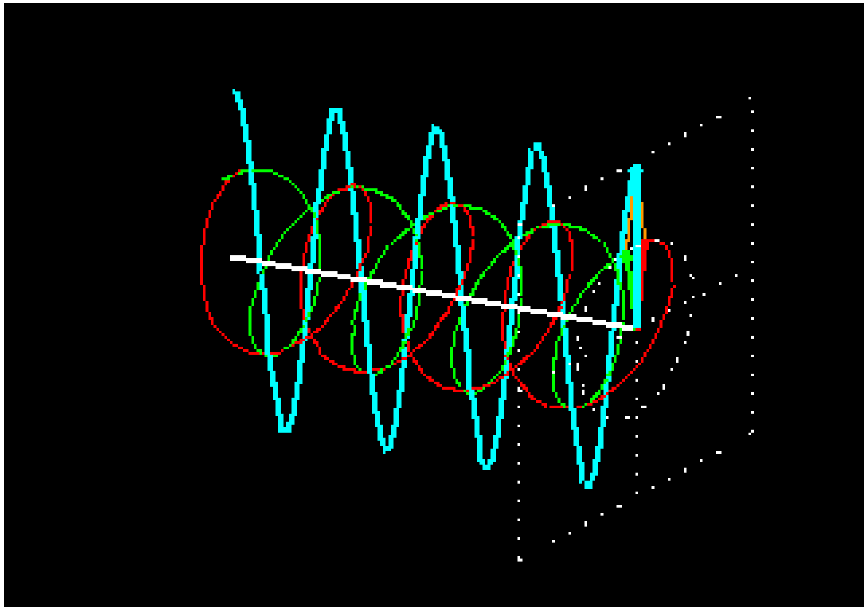


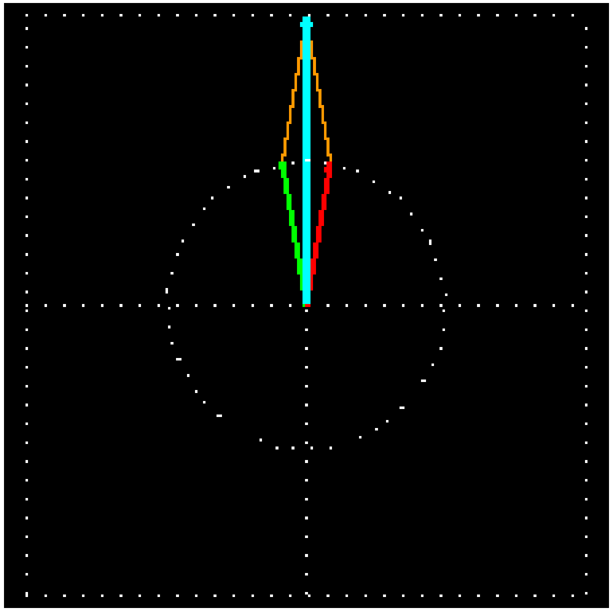


Dr. Márkus Ferenc
BME Fizika Tanszék

Hullámok polárossága (7)
Hullámok szuperpozíciója

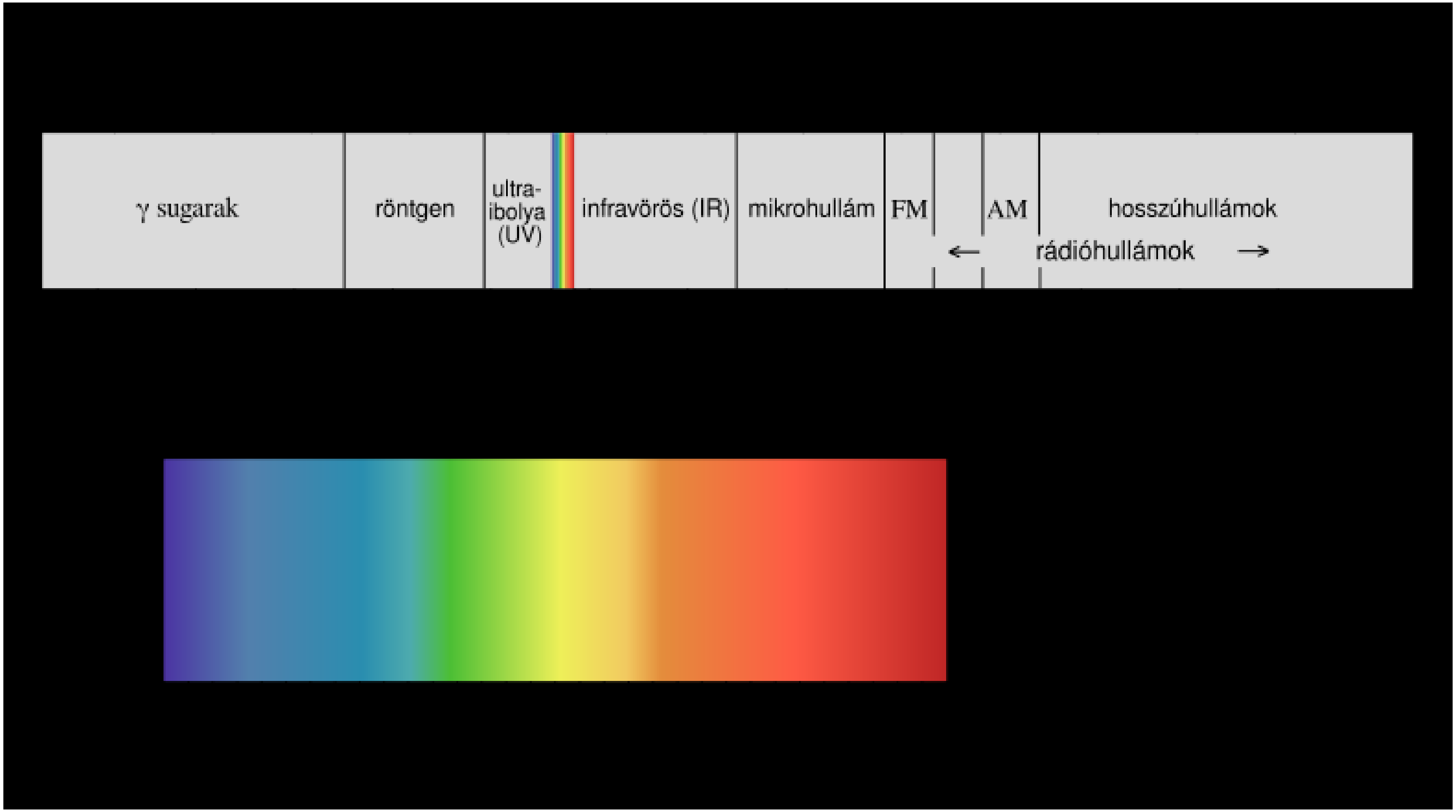
Két azonos amplitúdójú, egy balra és egy jobbra cirkulárisan poláros hullám síkban poláros hullámot eredményez:



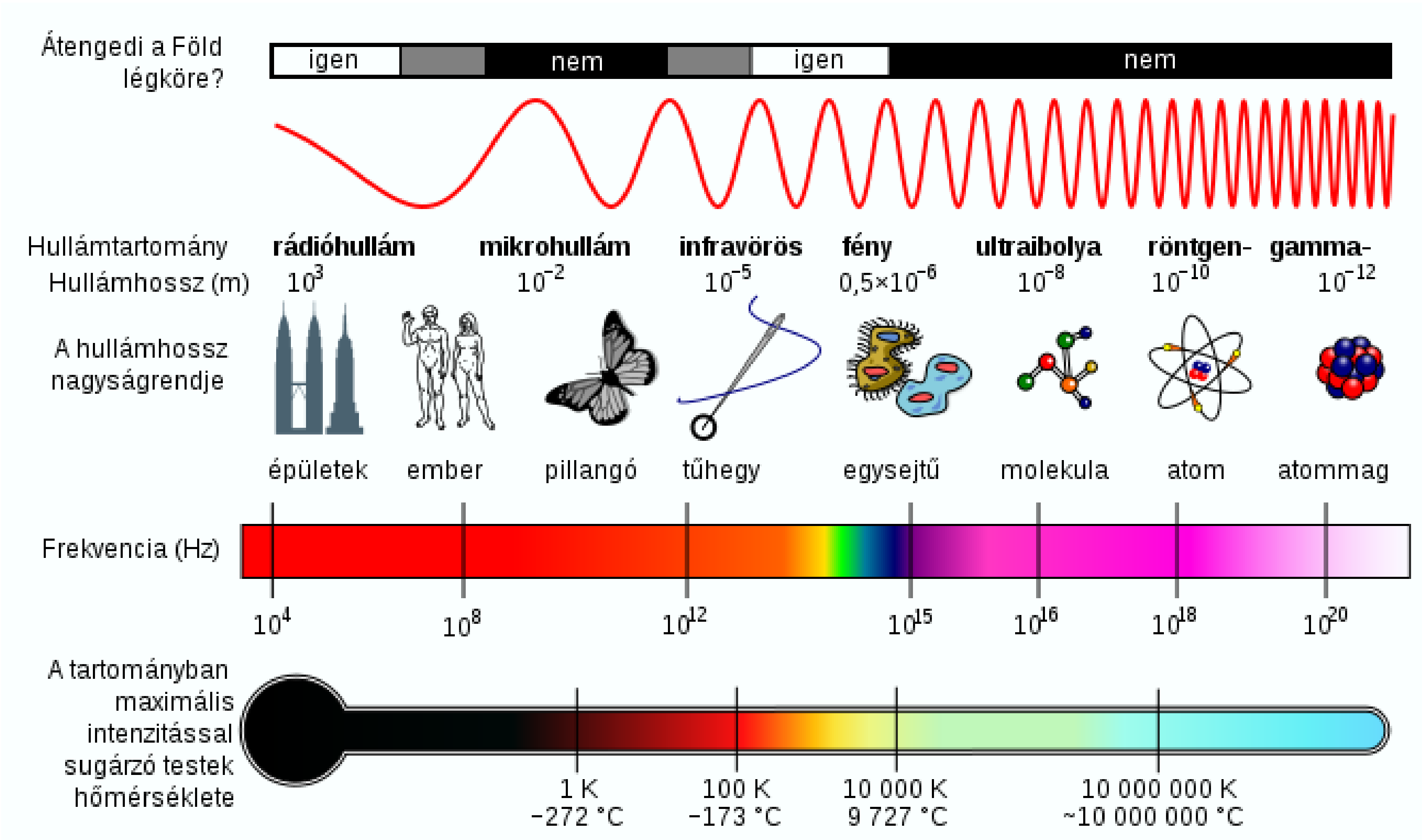


Dr. Márkus Ferenc
BME Fizika Tanszék

Az elektromágneses spektrum – a fény elektromágneses hullám (1)



Az elektromágneses spektrum – a fény elektromágneses hullám (2)



Dr. Márkus Ferenc
BME Fizika Tanszék

Kérdések (1)

Miben áll a polarizáció jelensége? Miként írható le az (***E***, ***D***, ***P***) térmennyiségekkel?
A polarizációt milyen módon vezetjük be a Maxwell-egyenletekbe?
Mi a polarizációs töltéssűrűség és a polarizációs áram?
Milyen kapcsolat van a polarizáció vektora és a potenciálok között?
Hogyan célszerű bevezetni a Hertz-vektort?
Milyen matematikai alakkal lehet megadni egy pontbeli dipólt?
A dipólsugárzás tere milyen zónákra osztható?
Milyen a térmennyiségek időbeli és térbeli fejlődése? *(A fizikai fejlődés és vázlatos grafikus megjelenítés kell, nem a 17. és 18. fólián kifejtett matematikai végeredmény!)*
Mi a vektorpotenciálok fizikai jelentésével kapcsolatos klasszikus elektrodinamikabeli és a modern, kvantumos tulajdonságot tartalmazó felfogás? / → Faraday, Maxwell, Aharonov-Bohm/

Kérdések (2)

Milyen matematikai alakkal írhatók le a síkhullámok?
Mi a cirkuláris hullámszám?
Mit jelent az, hogy monokromatikus egy síkhullám, és milyen matematikai alakkal írható le?
Milyen alakra írhatók át a Maxwell-egyenletek monokromatikus síkhullámok esetén?
Hogyan jelenik meg a polárosság fogalma? Milyen eseteket ismer?
Mi az elektromágneses spektrum? Hol helyezkedik el benne a látható fény?

(folyt. köv.)

(A ilyen színnel írt kérdések a mélyebben érdeklődők részére vannak.)