Modern fizika alkalmazásai a mérnöki gyakorlatban

1. előadás

Előadás anyag és jegyzet: fizipedia …(egyelőre)

ZH - k: 1. a 7. héten

2. a 13. héten

Pót-ZH: a 14. héten

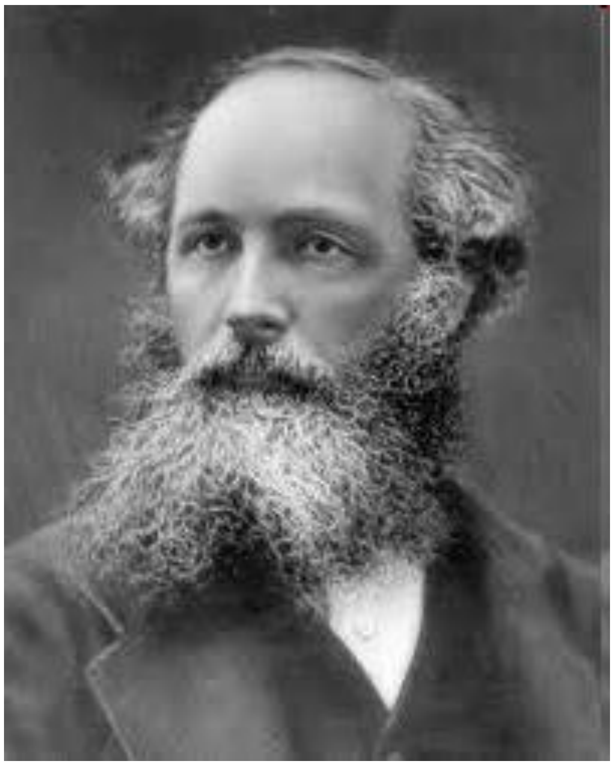
Pót-pót ZH: a pótlási héten

Tematika: - EMH

- Spec. Rel. elm.
- A kvantummechanika kísérleti eredményei
- A kvantummechanika elméleti alapjai
- Kvantummechanikai modellek
- Lézerek, mézerek
- A lézeres méréstechnika alapjai (távolság és idő mérés)
- Optikai szálak, alkalmazások
- Holográfia, holografikus mérési módszerek
- Radioaktivitás, atomerőművek, radioaktív kormeghatározás
- Rtg. forrás, rtg. diffrakció, alkalmazások
- stb.

A *Maxwell-egyenletek* rendszere I.

Vákuumban:



James Clerk Maxwell
(1831-79)

tér → mező

$$I.\quad \oint \vec{E}d\vec{A} = \frac{q}{\varepsilon_0}$$

$$II.\quad \oint \vec{B}d\vec{A} = 0$$

$$III.\quad \oint \vec{B}d\vec{\ell} = \mu_0\left(I + \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}\right)$$

$$IV.\quad \oint \vec{E}d\vec{\ell} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Megold.: hullámegyenlet

e.m. hullámok

A *Maxwell-egyenletek* rendszere II.

anyag jelenlétében:

$$I.\quad \oint \vec{D}d\vec{A} = q$$

$$II.\quad \oint \vec{B}d\vec{A} = 0$$

$$III.\quad \oint \vec{H}d\vec{\ell} = I + \frac{d\Phi_D}{dt}$$

$$IV.\quad \oint \vec{E}d\vec{\ell} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

+ anyagi egyenletek:

$$V.\quad \vec{J} = \sigma\vec{E}$$

$$VI.\quad \vec{D} = \varepsilon_o\vec{E} + \vec{P}$$

$$VII.\quad \vec{B} = \mu_o(\vec{H} + \vec{M})$$

$$VIII.\quad \vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

határfeltételek:

$E_{1t} = E_{2t}$, $D_{1n} = D_{2n}$

$H_{1t} = H_{2t}$, $B_{1n} = B_{2n}$

Elektromágneses hullámok (EMH) I.

Az elektromágneses síkhullám I.

Időben változó elektromos tér → mágneses (indukciós) tér:

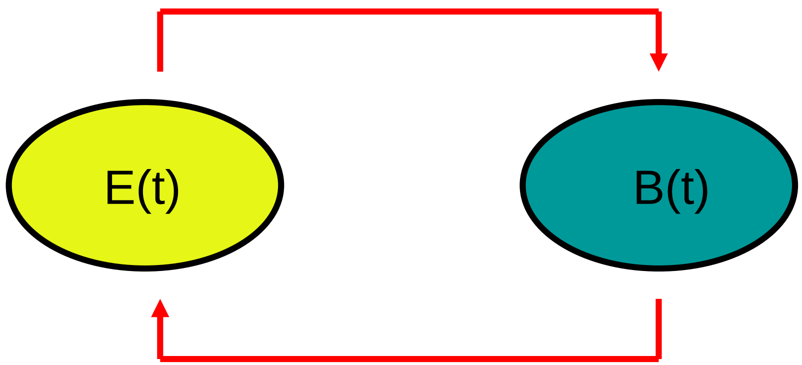
$$\oint \vec{B} d\vec{\ell} = \mu_0 \left(I + \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right)$$

Vákuum: ***I*** = 0 (nincsenek töltött részecskék, áramok)

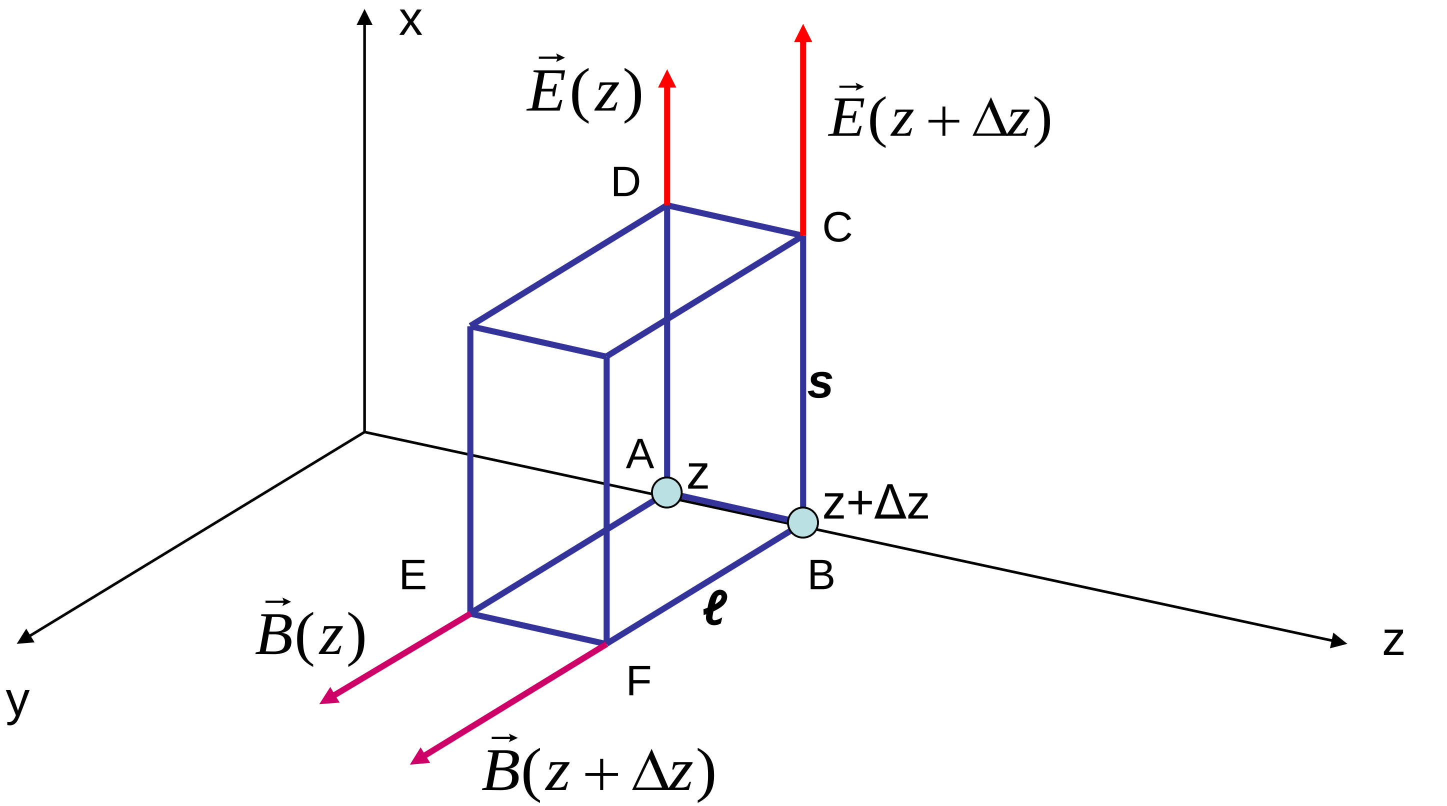
$$\oint \vec{B} d\vec{\ell} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

Időben változó mágneses (indukciós) tér → elektromos tér: $\oint \vec{E} d\vec{\ell} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$

Hipotézis:



Az elektromágneses síkhullám II.



$$\vec{E} = (E_x(t),0,0) \longrightarrow \vec{E} = E(z,t)\vec{i}$$

$$\vec{B} = (0, B_y(t),0) \longrightarrow \vec{B} = B(z,t)\vec{j}$$

Az elektromágneses síkhullám III.

Faraday-törvény:

$$\oint \vec{E}\,d\vec{\ell} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\left[E_x(z+\Delta z) - E_x(z)\right]s = -s\Delta z\,\frac{\Delta B_y}{\Delta t}$$

$$\frac{E_x(z+\Delta z) - E_x(z)}{\Delta z} = -\frac{\Delta B_y}{\Delta t}$$

Ampère-törvény:

$$\oint \vec{B}\,d\vec{\ell} = \mu_0\varepsilon_0\frac{d\Phi_E}{dt}$$

$$\left[-B_y(z+\Delta z) + B_y(z)\right]\ell = \mu_0\varepsilon_0\ell\Delta z\,\frac{\Delta E_x}{\Delta t}$$

$$\frac{B_y(z+\Delta z) - B_y(z)}{\Delta z} = -\mu_0\varepsilon_0\frac{\Delta E_x}{\Delta t}$$

$$\boxed{\frac{\partial E_x}{\partial z} = -\frac{\partial B_y}{\partial t} \qquad \frac{\partial B_y}{\partial z} = -\mu_0\varepsilon_0\frac{\partial E_x}{\partial t}}$$

Az elektromágneses síkhullám IV.

$$\boxed{\frac{\partial E_x}{\partial z} = -\frac{\partial B_y}{\partial t} \qquad \frac{\partial B_y}{\partial z} = -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t}}$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \qquad \frac{\partial}{\partial t}$$

$$\boxed{\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2}}$$

hullámegyenlet

Megoldása: $\tilde{E}_x(z,t) = E_0 e^{i(\omega t \pm kz)} \longrightarrow E_x(z,t) = E_0 \cos(\omega t \pm kz)$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \qquad k = \frac{2\pi}{\lambda} \qquad c = \frac{\omega}{k} \qquad c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$$

Def.: c = 299792458 m/s

Az elektromágneses síkhullám V.

$$\boxed{\frac{\partial E_x}{\partial z} = -\frac{\partial B_y}{\partial t} \qquad \frac{\partial B_y}{\partial z} = -\mu_0\varepsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t}}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \qquad \frac{\partial}{\partial z}$$

$$\boxed{\frac{\partial^2 B_y}{\partial z^2} = \mu_0\varepsilon_0 \frac{\partial^2 B_y}{\partial t^2}}$$

hullámegyenlet

Megoldása: $B_y(z,t) = B_0 \cos(\omega t \pm kz)$

Az elektromágneses síkhullám VI.

$$E_x(z,t) = E_0 \cos(\omega t - kz) \qquad B_y(z,t) = B_0 \cos(\omega t - kz)$$

Behelyettesítünk:

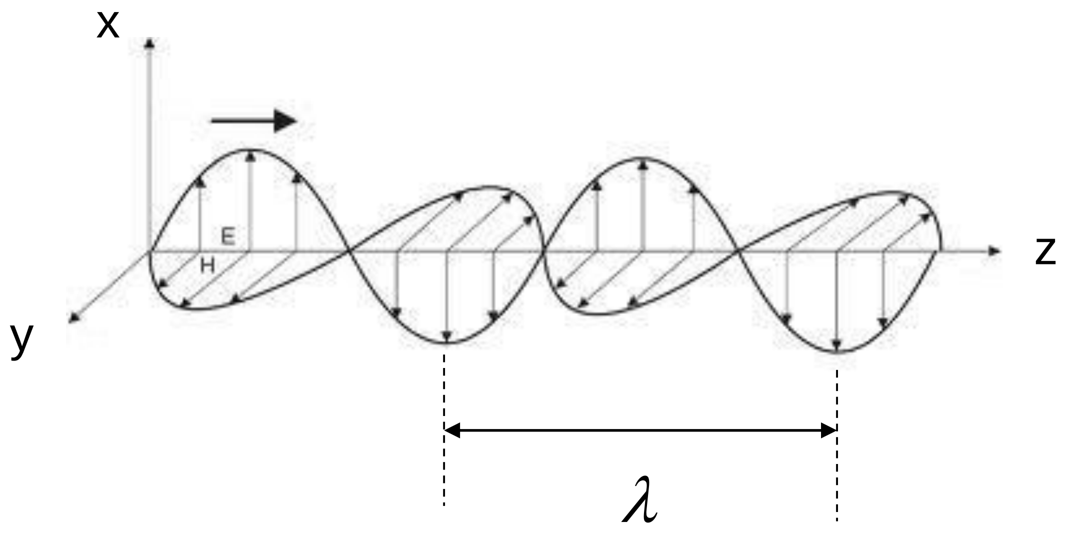
$$\frac{\partial E_x}{\partial z} = -\frac{\partial B_y}{\partial t}$$

$$\frac{1}{c} E_x(z,t) = B_y(z,t) \longrightarrow \frac{1}{c} E_o = B_o$$

Az elektromágneses síkhullám VII.

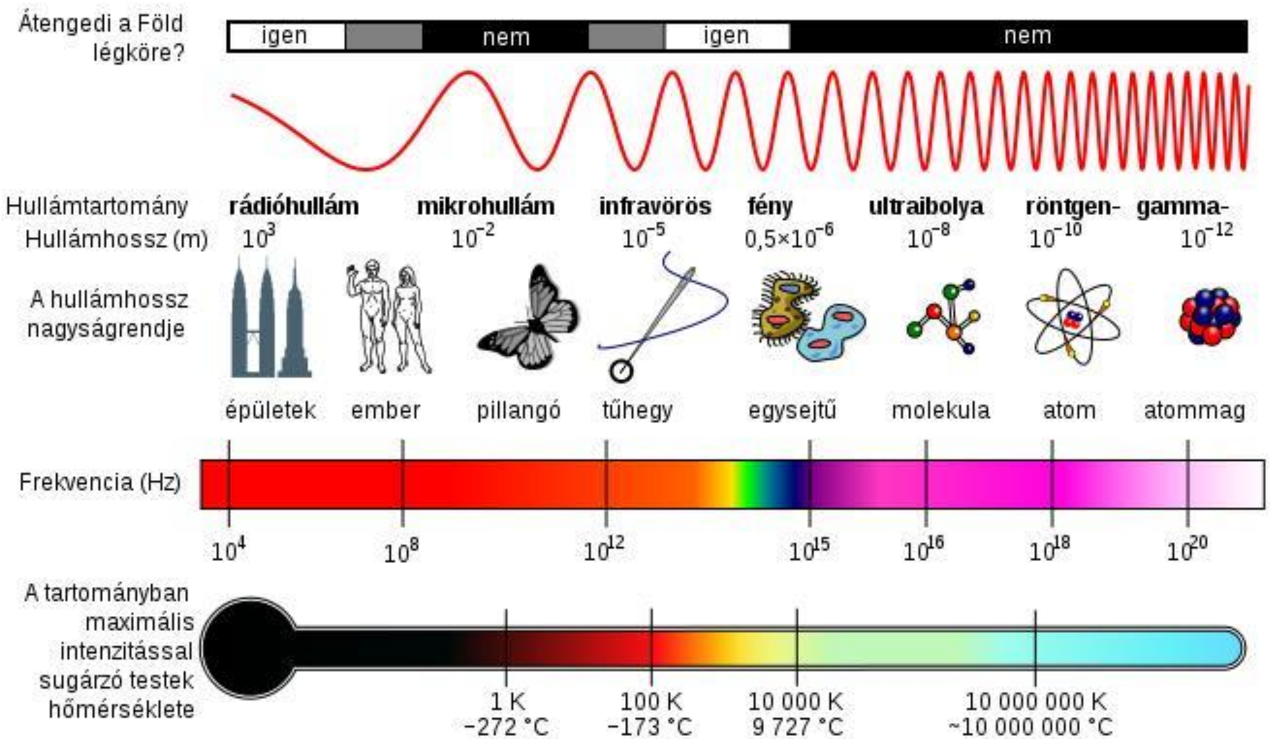
$$E_x(z,t) = E_0 \cos(\omega t - kz + \varphi)$$

$$B_y(z,t) = B_0 \cos(\omega t - kz + \varphi)$$



$$f = \frac{c}{\lambda}$$

Az elektromágneses spektrum



Elnevezés	Hullámhossz (nm)
vörös	640 – 780
narancs	600 – 640
sárga	570 – 600
zöld	490 – 570
kék	430 – 490
ibolya	380 – 430

Néhány érdekesség: Az emberi szem legérzékenyebb a zöld fényre.
A CD és a DVD → vörös lézerfénnyel dolgozik.

A blue-ray disc ⟶ ibolya nyalábbal írható és olvasható.
(a kisebb hullámhossz természetesen nagyobb írássűrűséget jelent)

Ultraibolya (200 nm < λ < 380 nm) lámpák ⟶ orvosi rendelők, vagy műtők fertőtlenítése.

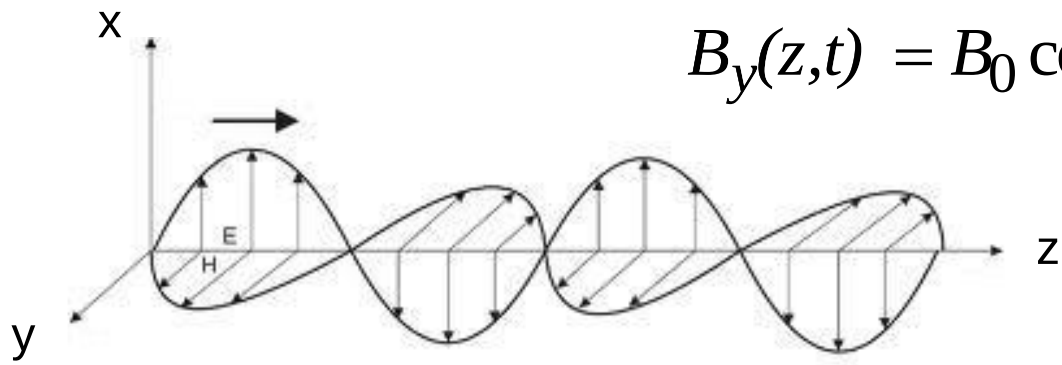
UV ⟶ alkalmazzák élelmiszerek baktériummentesítésére is.

A kemény UV (λ < 200 nm) fényforrás ⟶ litográfia ⟶ processzorgyártásban.

A Poynting-vektor

$$E_x(z,t) = E_0 \cos(\omega t - kz + \varphi)$$

$$B_y(z,t) = B_0 \cos(\omega t - kz + \varphi)$$



Hullám terjedési iránya → Poynting-vektor:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$

$$\left|\vec{S}\right| = EH = E\frac{B}{\mu_o} = \frac{1}{\mu_o} E_o B_o \cos^2(\omega t - kz)$$

$$\frac{1}{\mathrm{c}} E_o = B_o$$

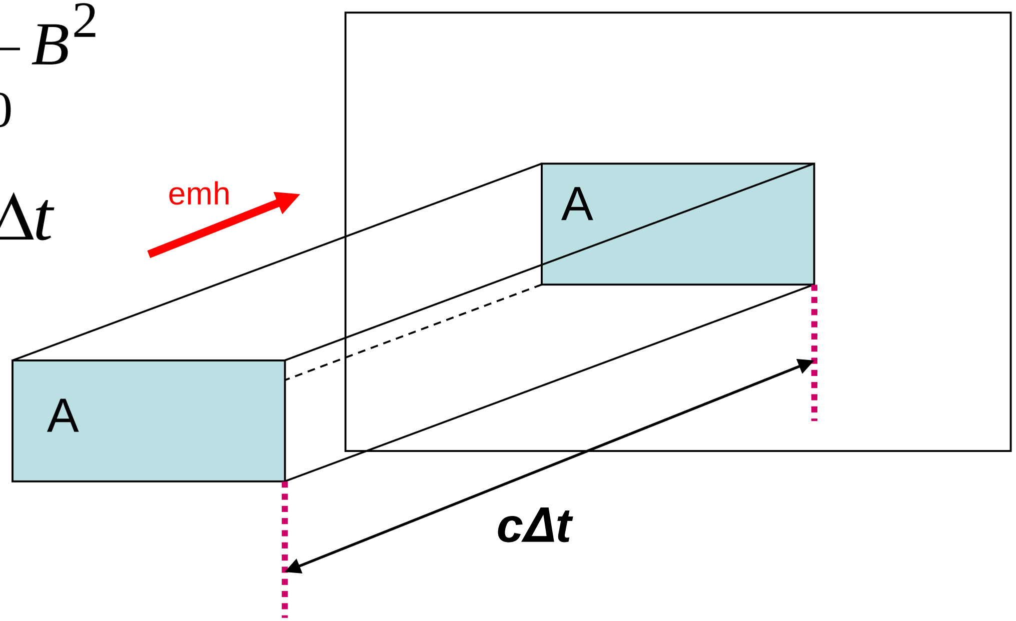
$$\left|\vec{S}\right| = S = \sqrt{\frac{\varepsilon_o}{\mu_o}} E_o^2 \cos^2(\omega t - kz) \xrightarrow[\text{átlagolás}]{} \left\langle S \right\rangle = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\varepsilon_o}{\mu_o}} E_o^2$$

Az EMH intenzitása

Felületre merőlegesen beeső síkhullám:

$$\varepsilon_{\mathrm{E}} = \frac{1}{2}\varepsilon_o E^2 \qquad \varepsilon_{\mathrm{B}} = \frac{1}{2}\frac{1}{\mu_0}B^2$$

Beeső energia: $\Delta W = \langle u \rangle A c \Delta t$



$$\text{intenzitás} = \frac{\Delta W}{A\Delta t} = \langle u \rangle c$$

$$u = \varepsilon_{\mathrm{E}} + \varepsilon_{\mathrm{B}} = \varepsilon_o E^2 = \frac{1}{\mu_o}B^2 = \varepsilon_o E_o^2 \cos^2(\omega t - kz)$$

$$\langle u \rangle = \langle \varepsilon_{\mathrm{E}} + \varepsilon_{\mathrm{B}} \rangle = \frac{1}{2}\varepsilon_o E^2 = \frac{1}{2}\frac{1}{\mu_o}B^2$$

Láttuk: $\langle S \rangle = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\varepsilon_o}{\mu_o}}E_o^2$

$$\langle S \rangle = c\langle u \rangle$$

intenzitás = ⟨ S ⟩

A napsugárzás intenzitása, napenergia

A Föld légkörét elérő napsugárzás : ≈ 1350 W/m^2

A légkörben elnyelődik : ≈ 250 W/m^2

A világűrbe reflektálódik : ≈ 100 W/m^2

Földfelszínre jutó átlagos sugárzás : ≈ 1000 W/m^2

= 1000•(Föld energiaszükéglete)

Magyarországon:

Téli hónapokban : ≈ 250 - 600 W/m^2

Nyári hónapokban : ≈ 600 - 1000 W/m^2

Napsütéses órák száma (Bp) : ≈ 2057 óra

M.o. teljes energiafelhasználása: ≈ 10^{17} J

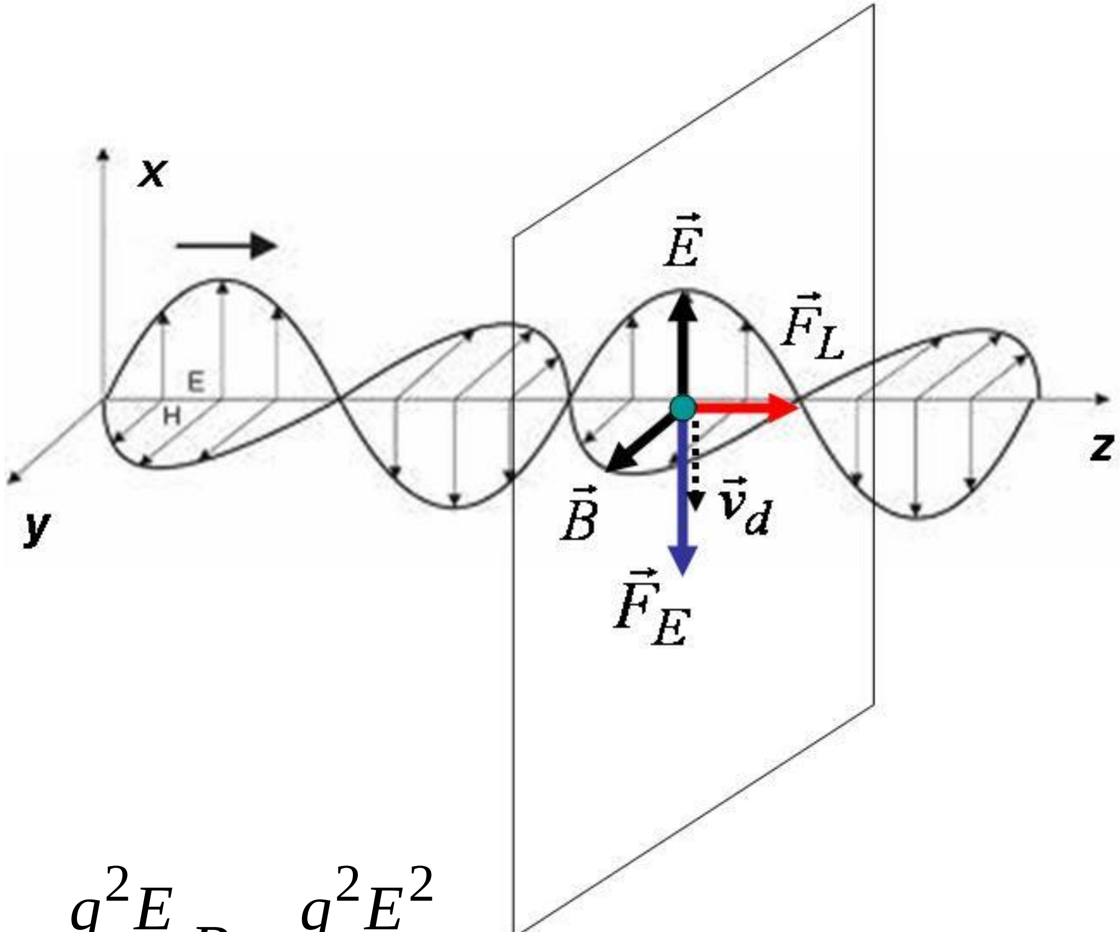
Összehasonlítás: ???

Az e.m. síkhullám impulzusa I.

Kérdés: van-e a hullámnak impulzusa?

$$\vec{E} = E(z,t)\vec{i}$$

$$\vec{B} = B(z,t)\vec{j}$$



$$F_E = qE = bv_d$$

$$v_d = \frac{qE}{b}$$

$$F_L = qv_d B = \frac{q^2 E}{b} B = \frac{q^2 E^2}{bc}$$

Az e.m. síkhullám impulzusa II.

$$F_E = qE = bv_d \qquad v_d = \frac{qE}{b} \qquad F_L = qv_d B = \frac{q^2E}{b}B = \frac{q^2E^2}{bc}$$

$$\frac{dW}{dt} = F_E v_d = qE\frac{qE}{b} = \frac{q^2E^2}{b}$$

$$\frac{dW}{dt} = cF_L$$

$$\frac{dW}{dt} = c\frac{dp}{dt}$$

$$\int \ldots dt$$

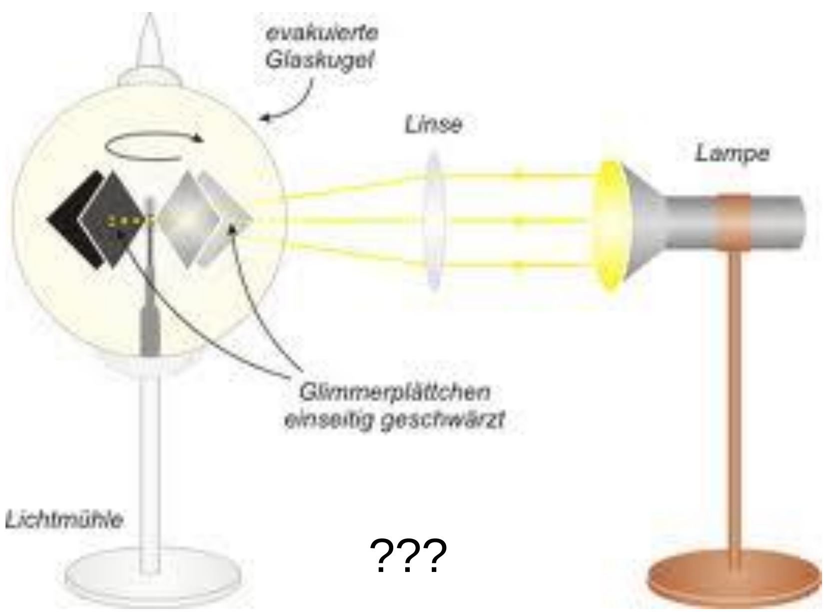
$$\boxed{W = cp}$$

Az emh impulzussűrűsége: $p = \frac{u}{c} = \frac{S}{c^2}$

Az e.m. síkhullám impulzusa III.

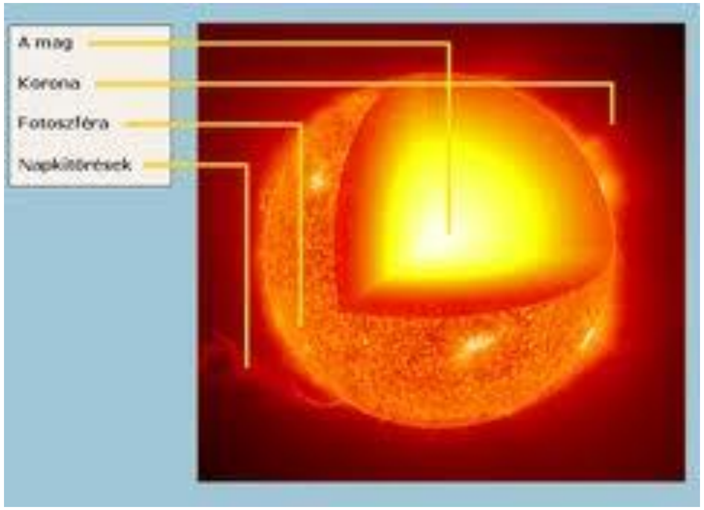
$$\frac{dW}{dt} = cF_L \xrightarrow{F_L = PA} \frac{dW}{dt} = cPA$$

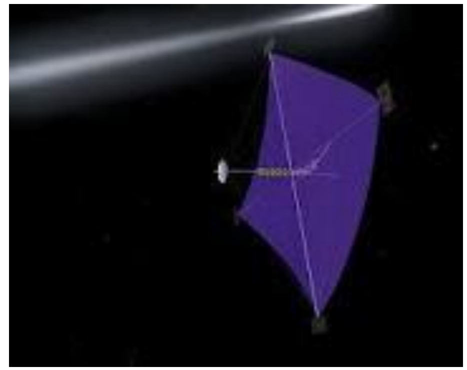
Fénynyomás: $\frac{dW}{cAdt} = P \longrightarrow P = \frac{1}{c} I_{(\text{int.})} = \frac{1}{c}\langle S \rangle_{\acute{a}tl.} = u$



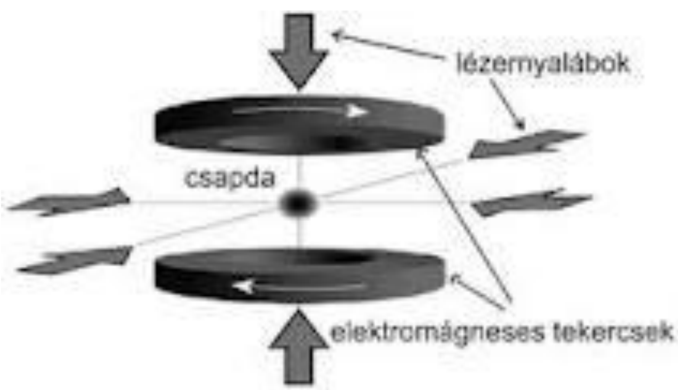
???

Fénynyomás → példák:





Napfény-vitorlás



R = 100 %

$$P = 2\frac{1}{c} I_{(\text{int.})} = 2\frac{1}{c} \langle S \rangle_{\acute{a}tl.} = 2u$$

EMH polarizációja I.

$$E_x(z,t) = E_{0x}\cos(\omega t - kz)$$

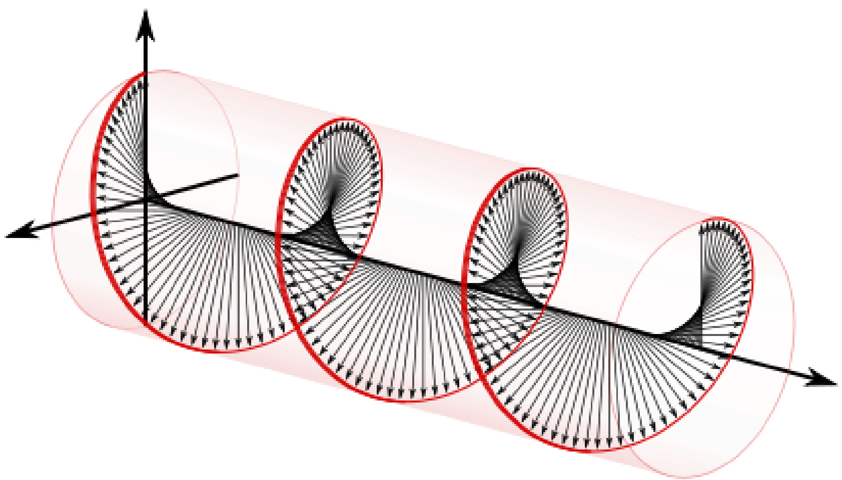
$$E_y(z,t) = E_{0y}\cos(\omega t - kz)$$

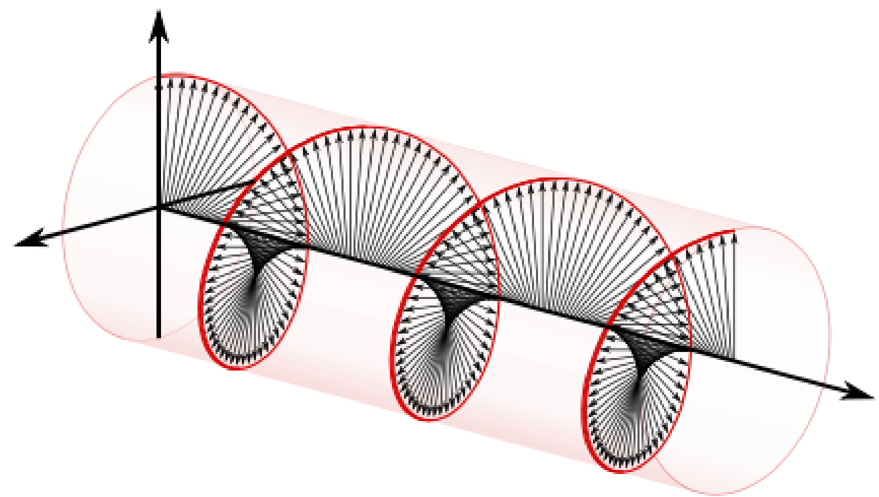
Lineárisan polarizált hullám

Δφ = 0

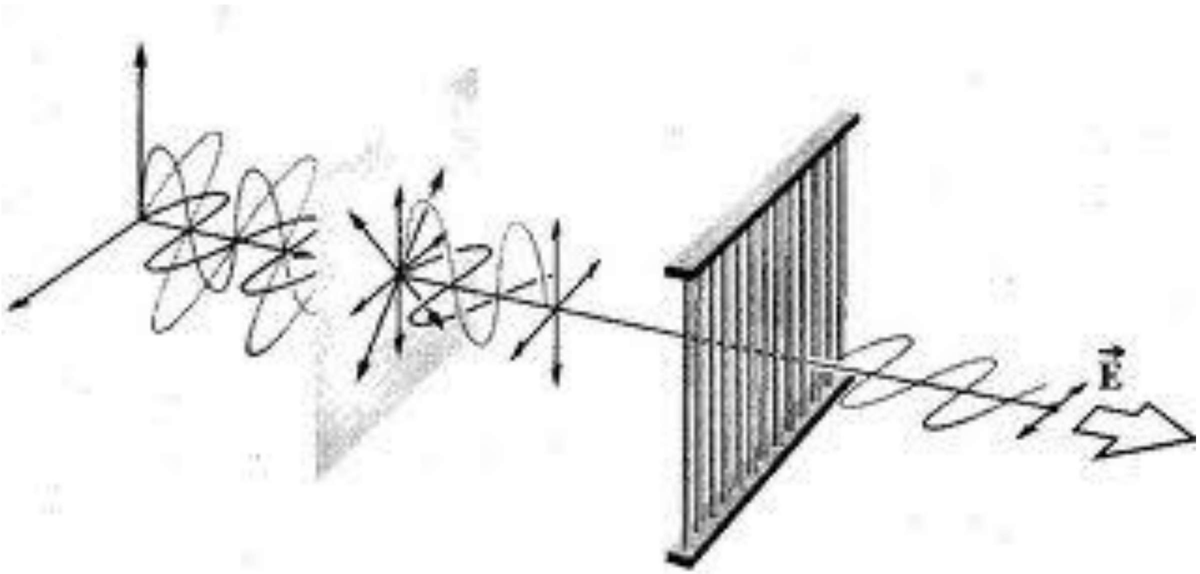
Cirkulárisan polarizált hullám

Δφ = 90°



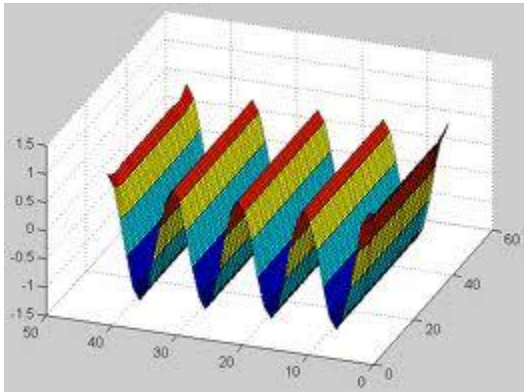


EMH polarizációja II.

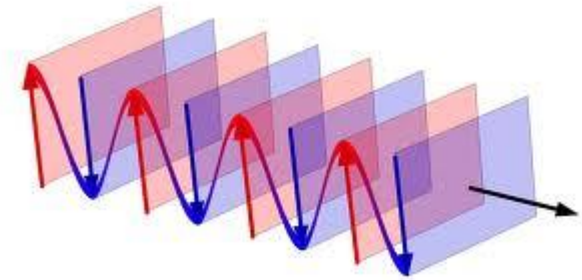


Hertz kísérleti szűrője:

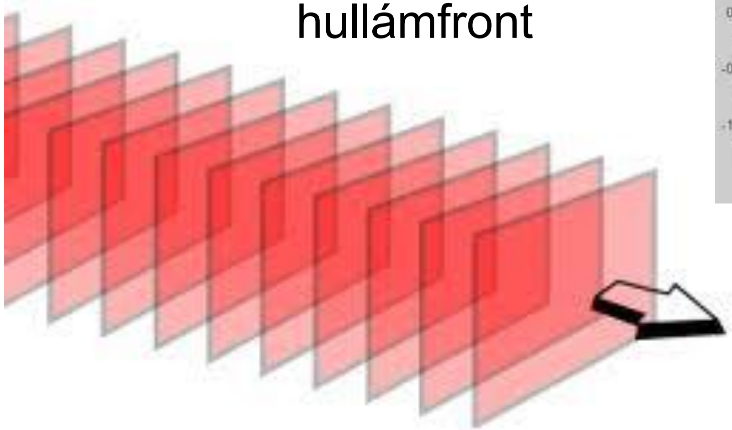
Síkhullám, gömbhullám



Síkhullám:



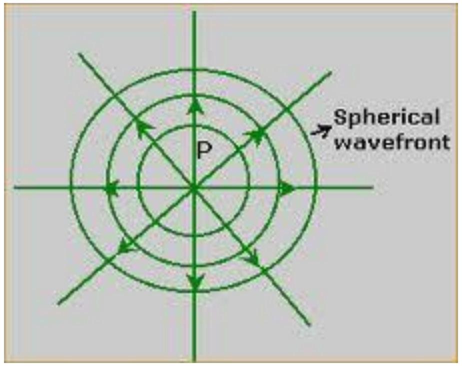
hullámfront

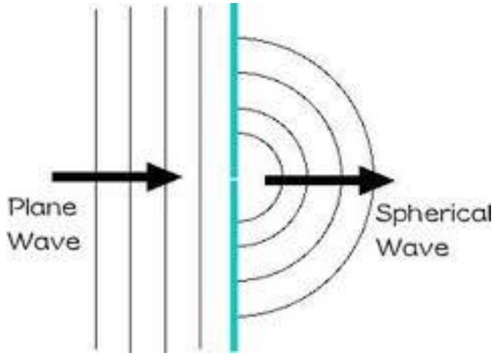


$$E_x(z,t) = E_0 \cos(\omega t \pm kz) \qquad B_y(z,t) = B_0 \cos(\omega t \pm kz)$$

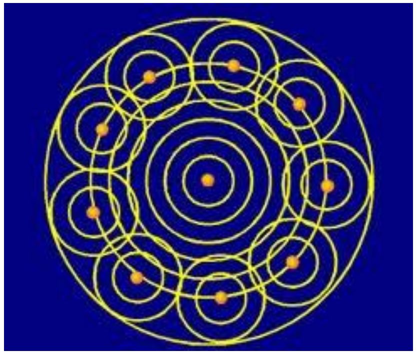
Gömbhullám:

$$E(z,t) = \frac{E_0}{r} \cos(\omega t \pm \vec{k}\vec{r}) \qquad B(z,t) = \frac{B_0}{r} \cos(\omega t \pm \vec{k}\vec{r})$$



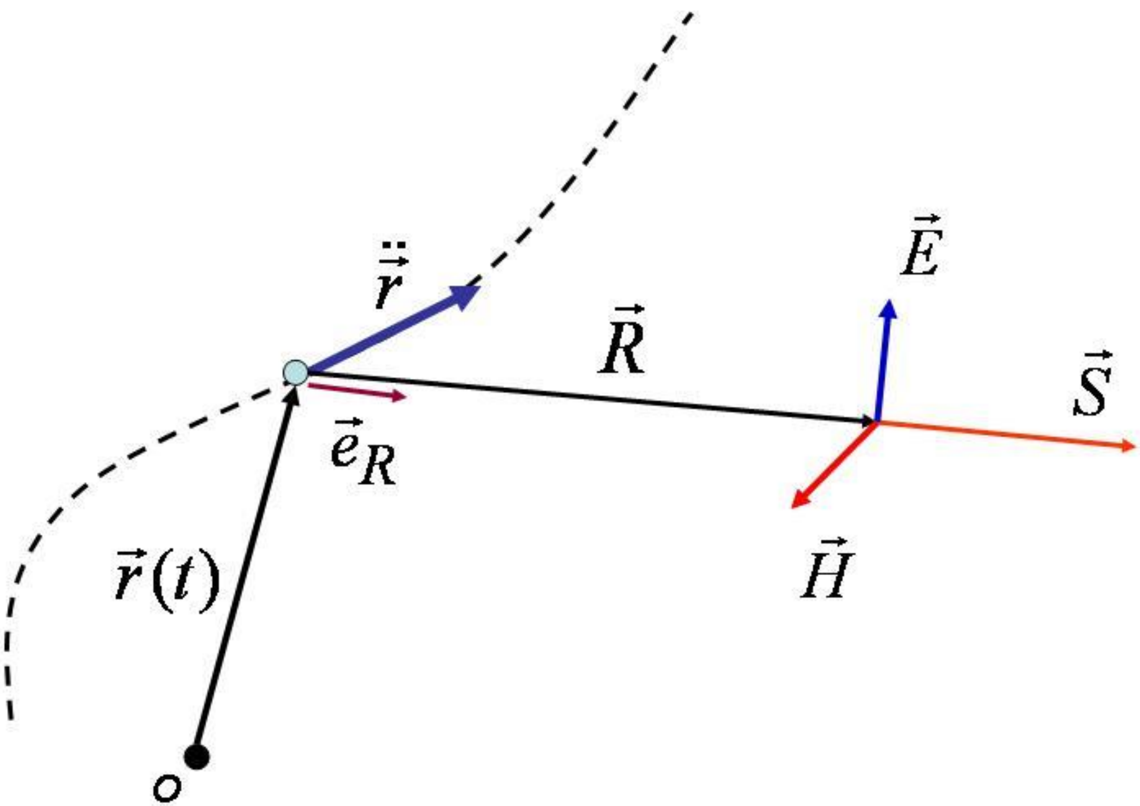


Huygens elv



Töltött részecske sugárzása

Egy gyorsuló részecske elektromos és mágneses tere távoltérben
(***R* >> *d***, ahol ***d*** az emh forrásának jellemző mérete)



$$\vec{H} \sim \frac{q}{R}\ddot{\vec{r}} \times \vec{e}_R$$

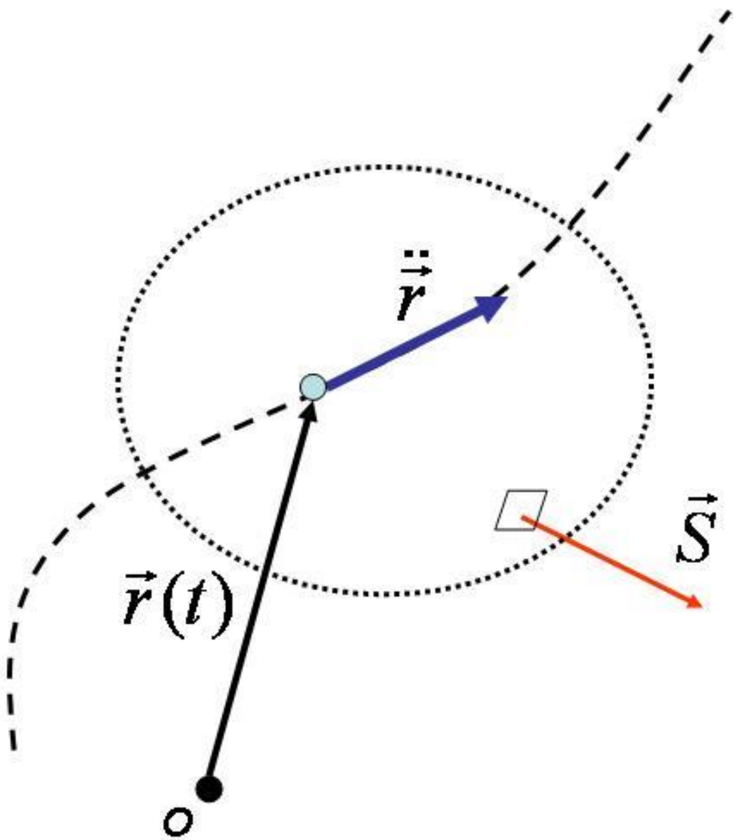
$$\vec{E} \sim \frac{q}{R}\left(\ddot{\vec{r}} \times \vec{e}_R\right) \times \vec{e}_R$$

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$

$$\left|\vec{S}\right| \sim \left(\ddot{\vec{r}}\right)^2$$

$$\left|\vec{S}\right| \sim \frac{1}{r^2}$$

Sugárzási teljesítmény



$$P_{sug} = \oint_A \vec{S} d\vec{A}$$

$$P_{\mathrm{sug}} \sim \left(\ddot{\vec{r}}\right)^2$$