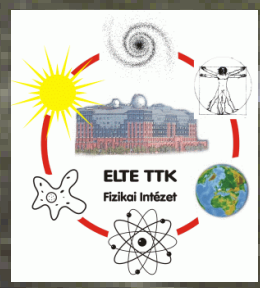
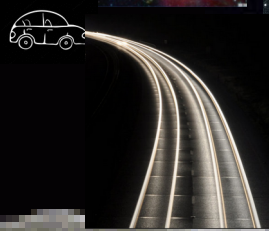




Fény a kanyarban



Az atomoktól a csillagokig

Dávid Gyula
2017. 09. 14.

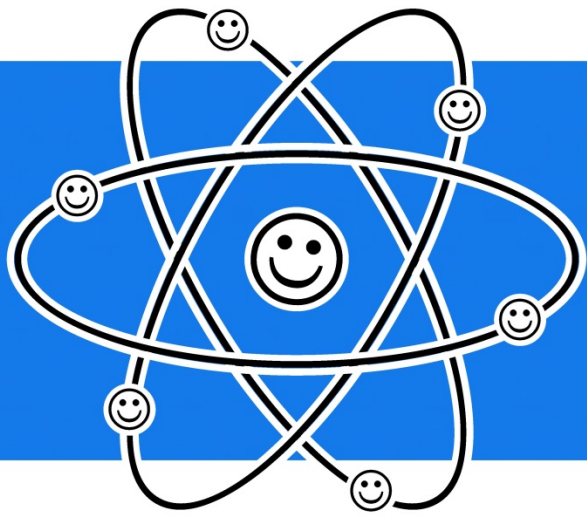


**2015 – A FÉNY
NEMZETKÖZI ÉVE**



**2015 – A FÉNY
NEMZETKÖZI ÉVE**





A fizika mindenké



2015 – A FÉNY
NEMZETKÖZI ÉVE





legyen világosság!

legyen világosság!



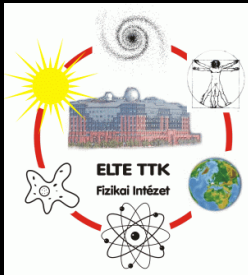




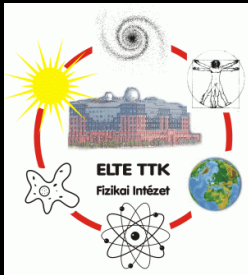
Fény a kanyarban



Fény a kanyarban

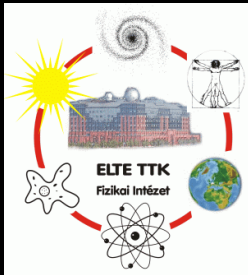


Fény a kanyarban



Az atomoktól a csillagokig

Fény a kanyarban



Az atomoktól a csillagokig

**Dávid Gyula
2017. 09. 14.**

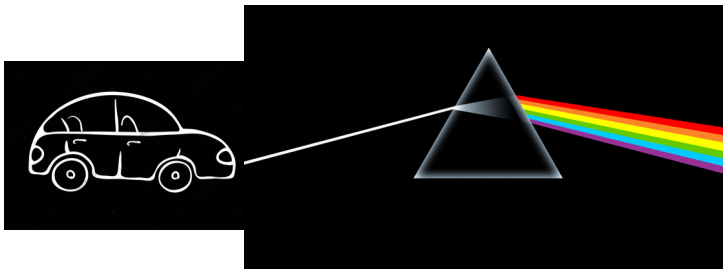
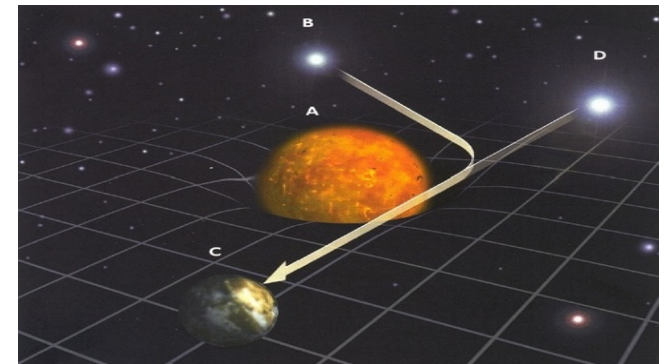
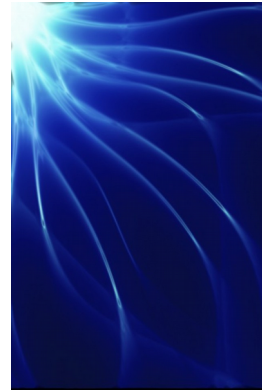
Hogyan lehet bekanyarítani a fényt?



Hogyan lehet bekanyarítani a fényt?



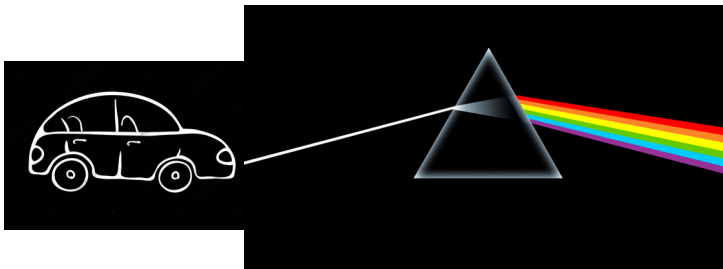
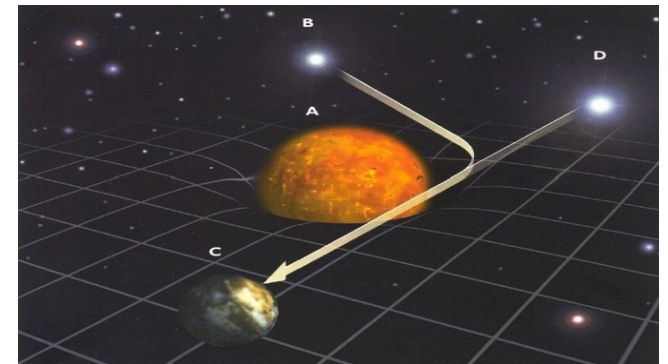
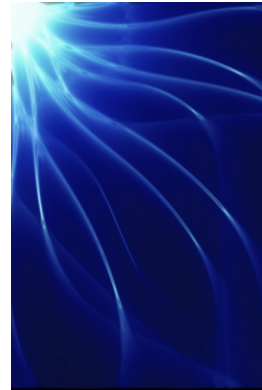
egyszerű
megoldások



Hogyan lehet bekanyarítani a fényt?



egyszerű
megoldások



**Mi azt keressük, amikor a fényt
A FÉNY kanyarítja be!**



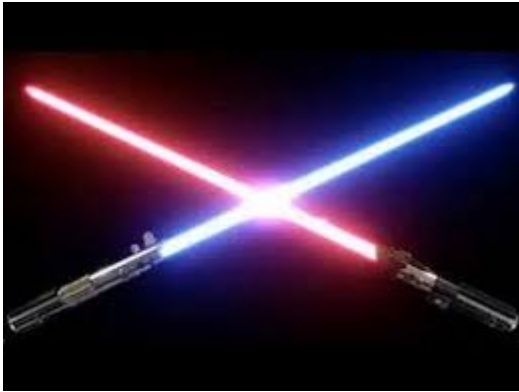


lézerkard

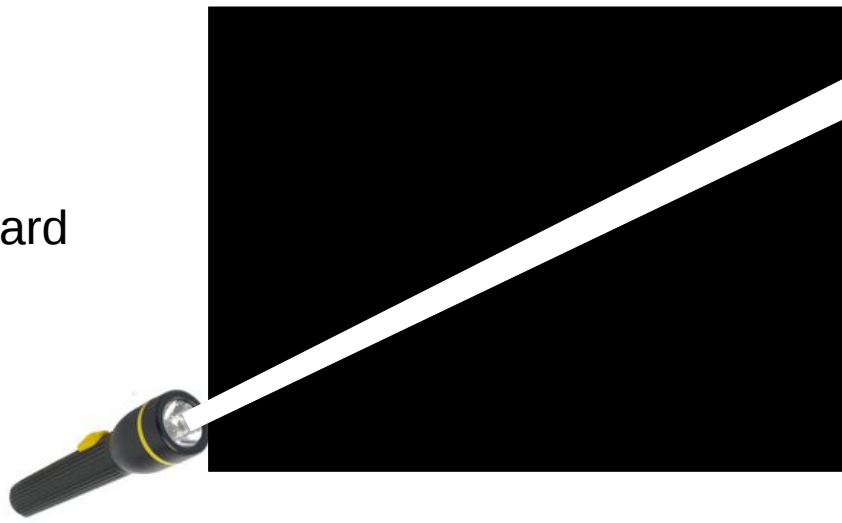


lézerkard





lézerkard

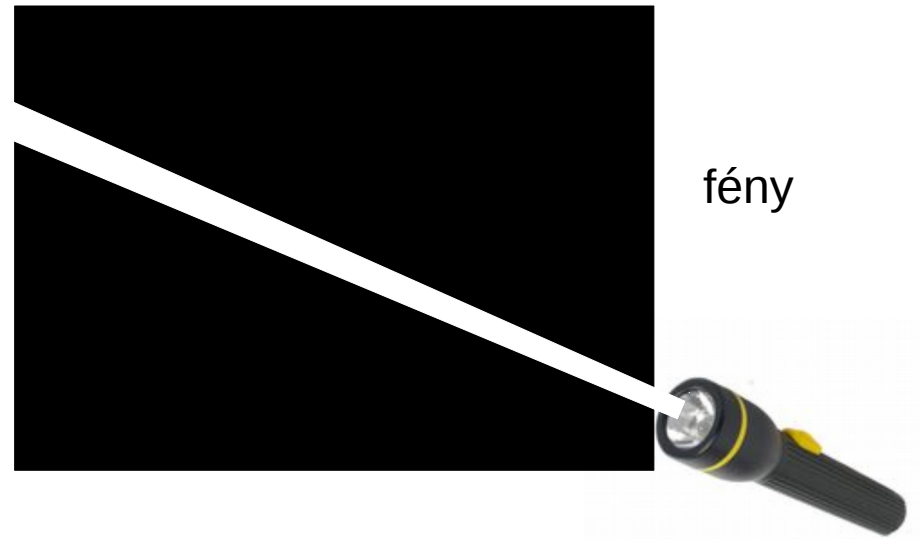


fény





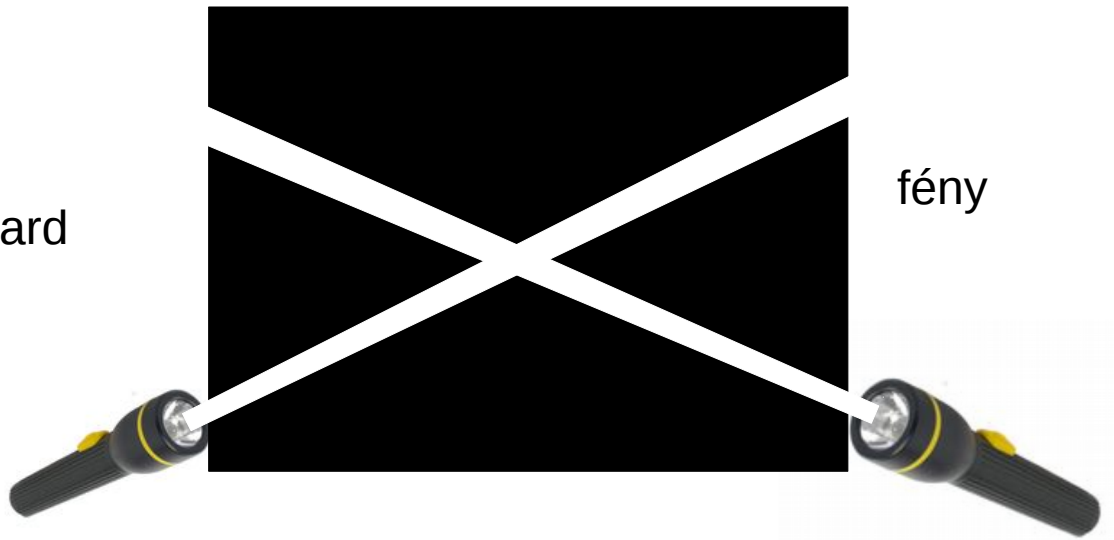
lézerekard



fény



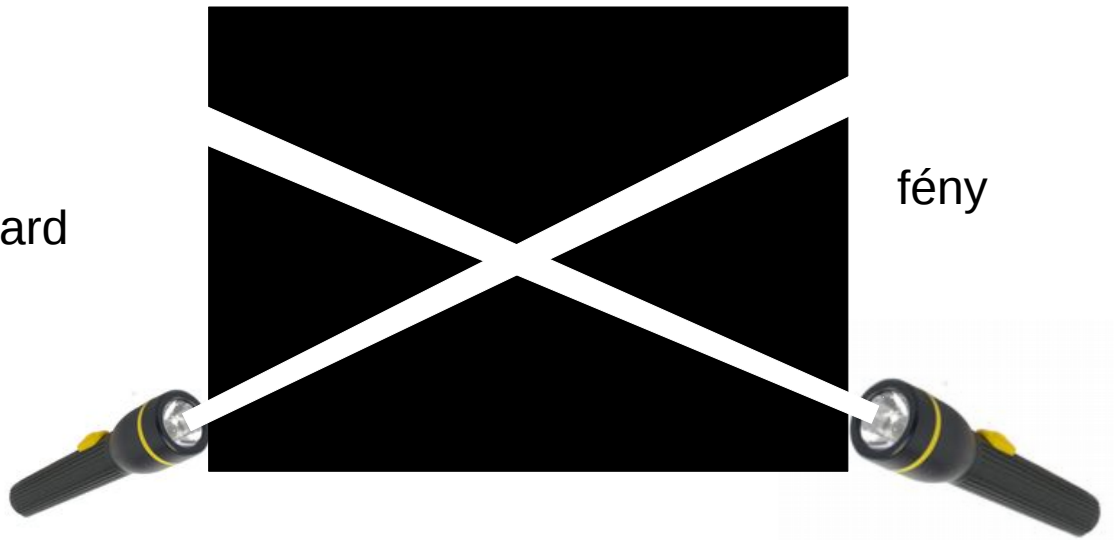
lézerekard



fény



lézerkard

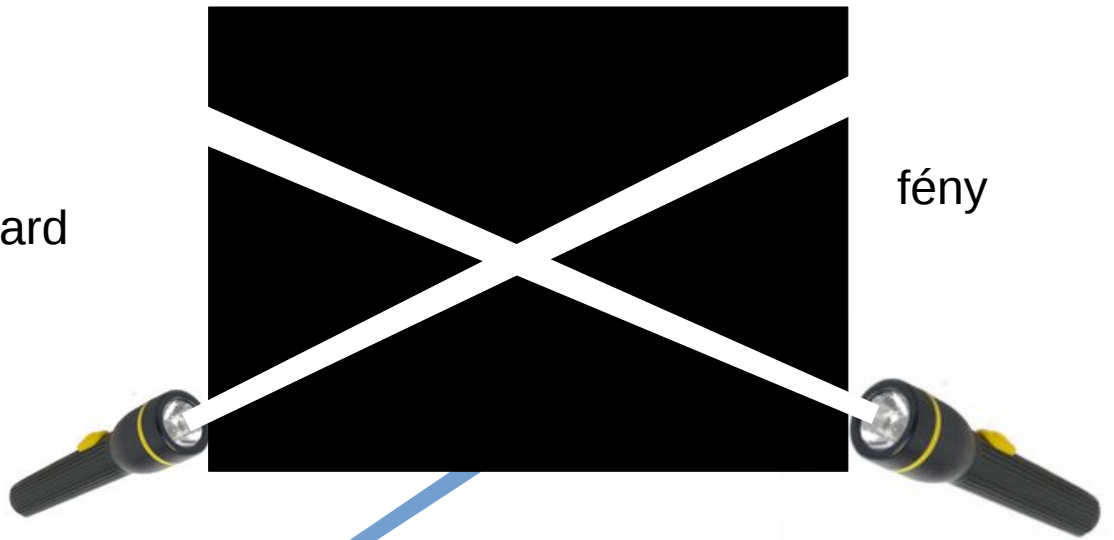


fény





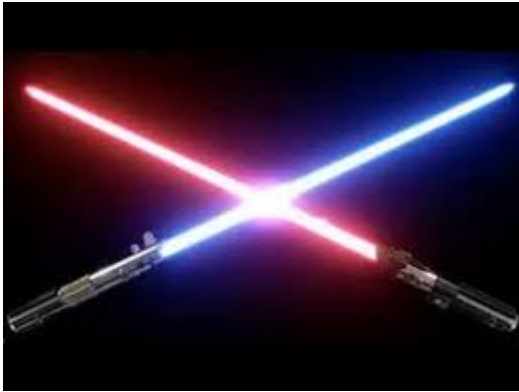
lézerkard



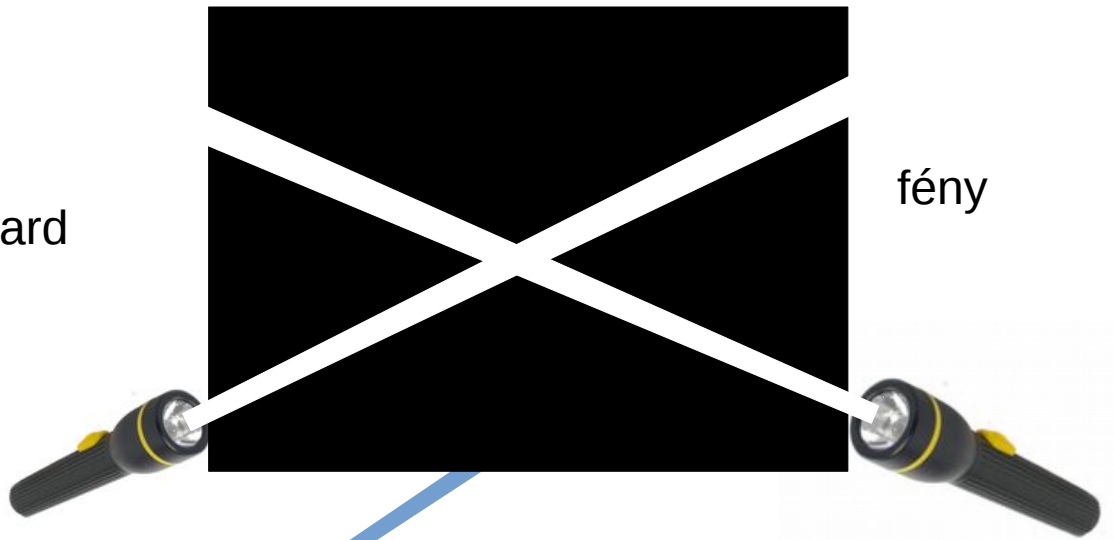
fény

folyadék





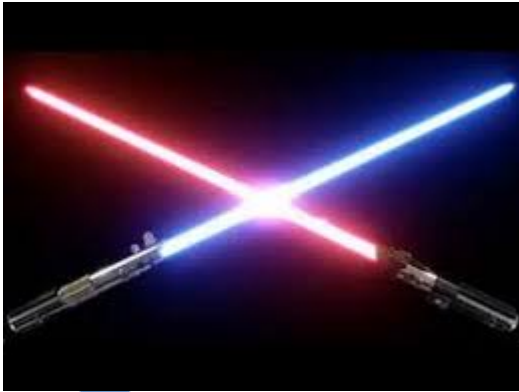
lézerkard



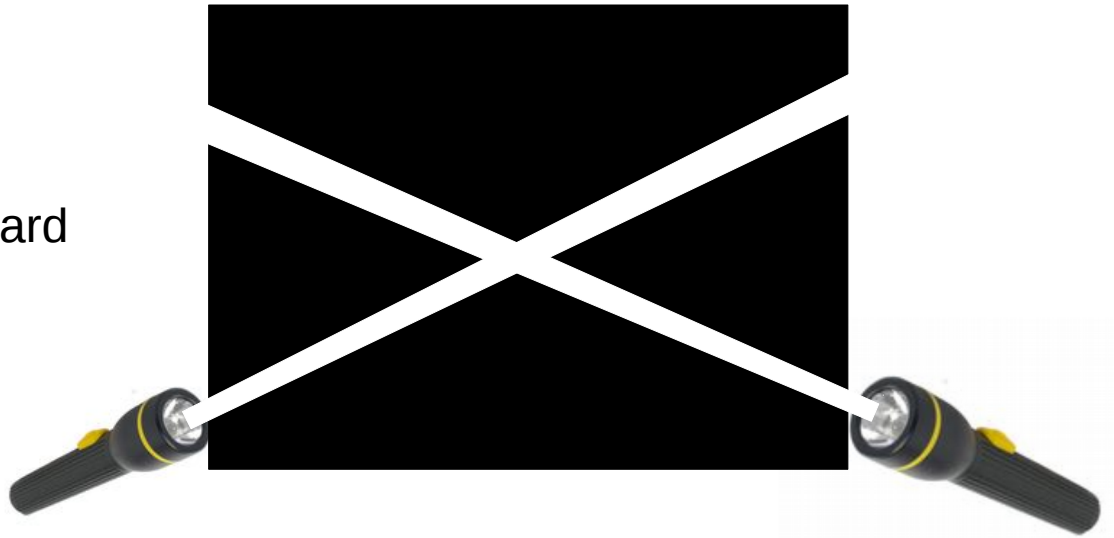
fény

folyadék





lézerkard

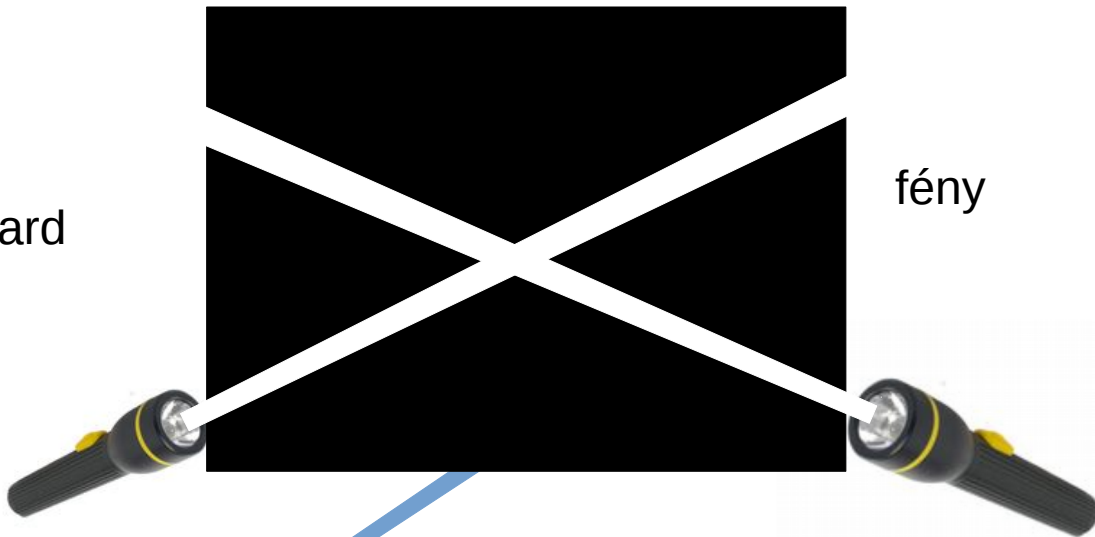


folyadék





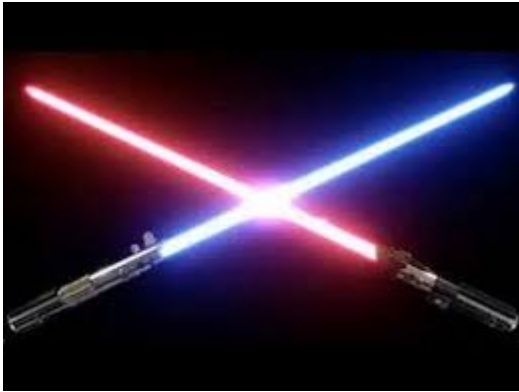
lézerkard



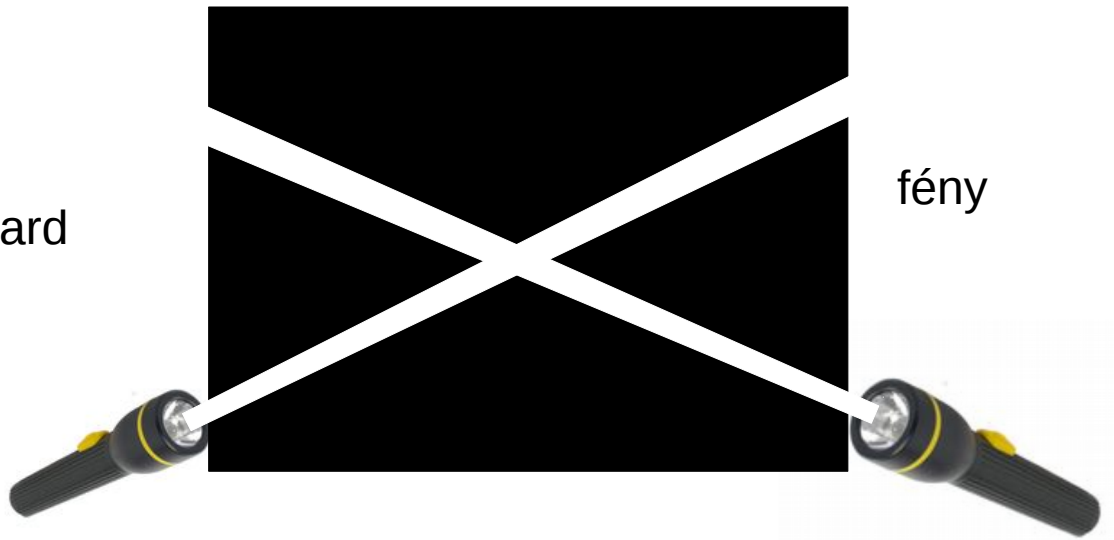
fény

folyadék



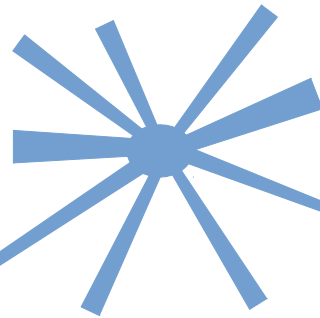


lézerkard



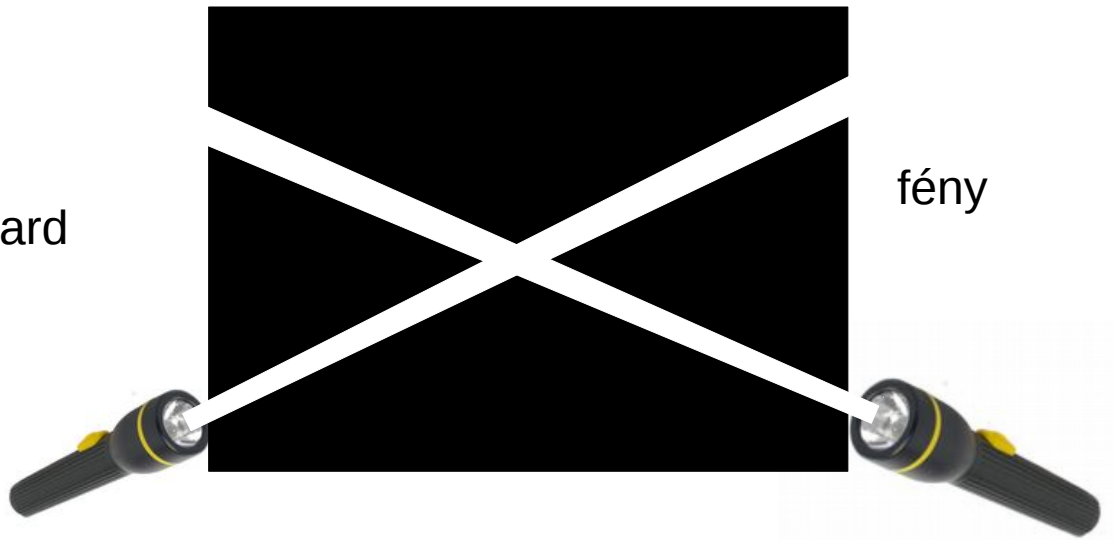
fény

folyadék

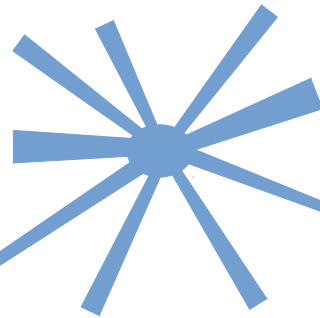




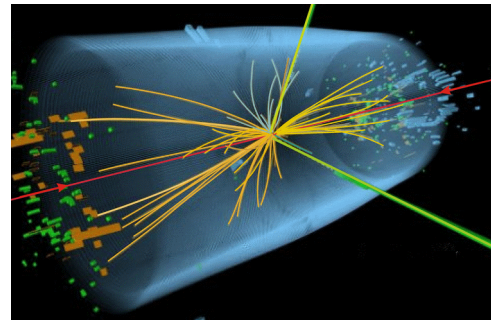
lézerkard



fény



folyadék

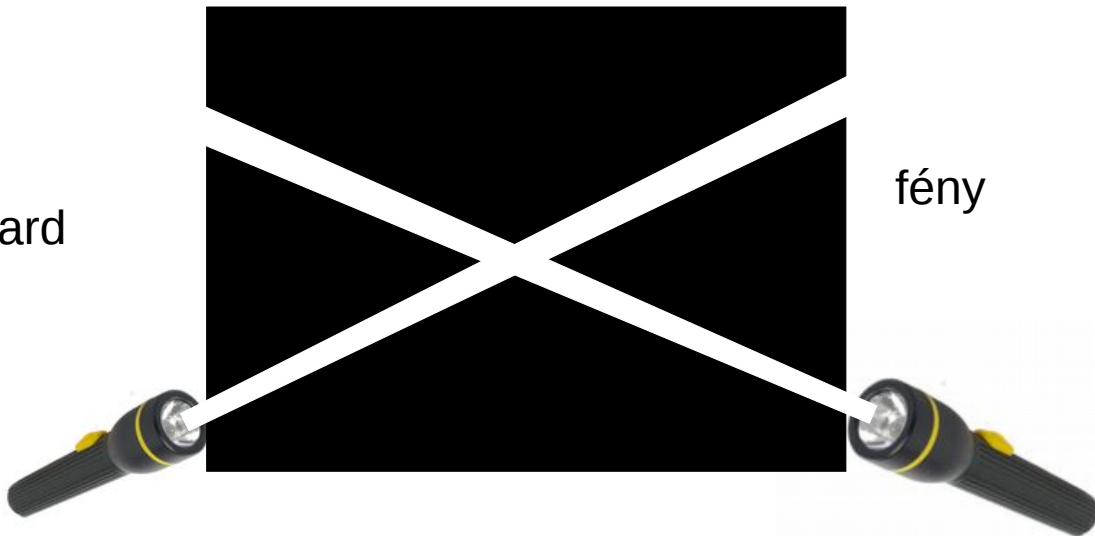


elemi részecskék
ütközése a CERN-ben





lézerkard



fény

**MI A
KÜLÖNBÉSÉG?**

A fényt leíró egyenletek lineárisak,
a megoldásaik összeadhatók

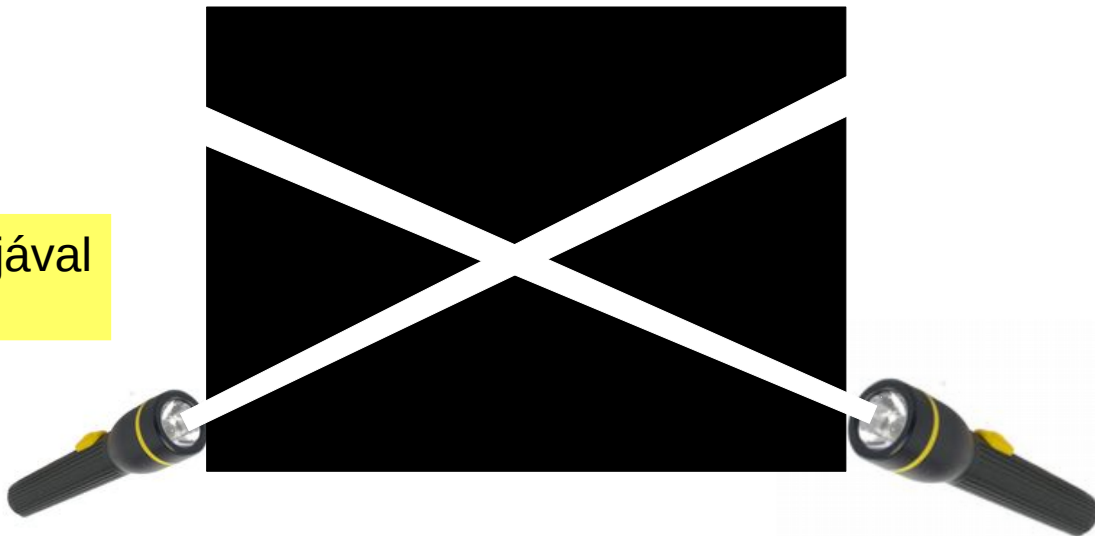
folyadék



A folyadékokat leíró egyenletek nemlineárisak,
a megoldásaik nem adhatók össze

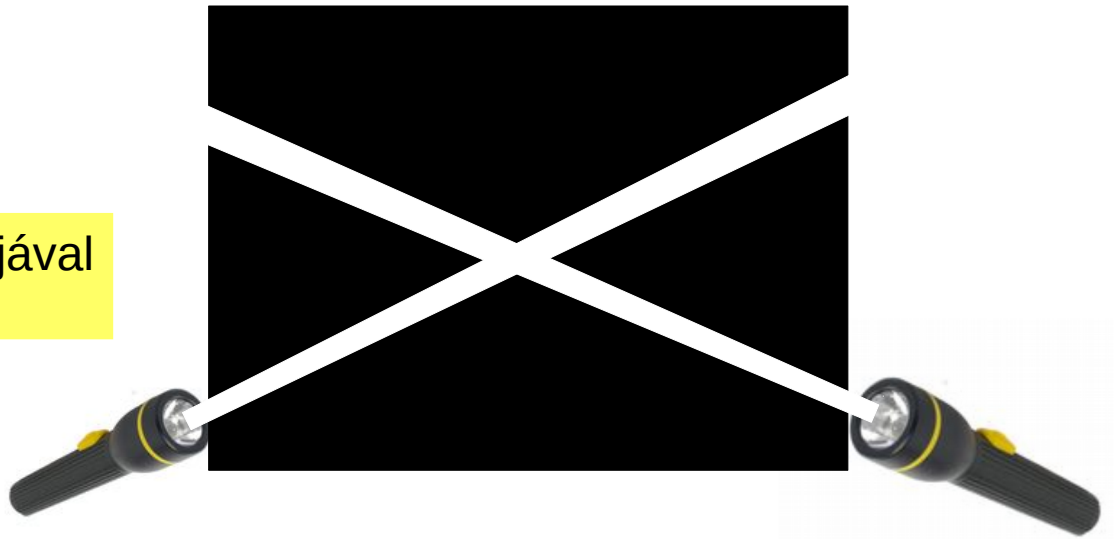
A fény energiát szállít.

Vajon mi történik a fény energiájával
a sugarak találkozásakor?



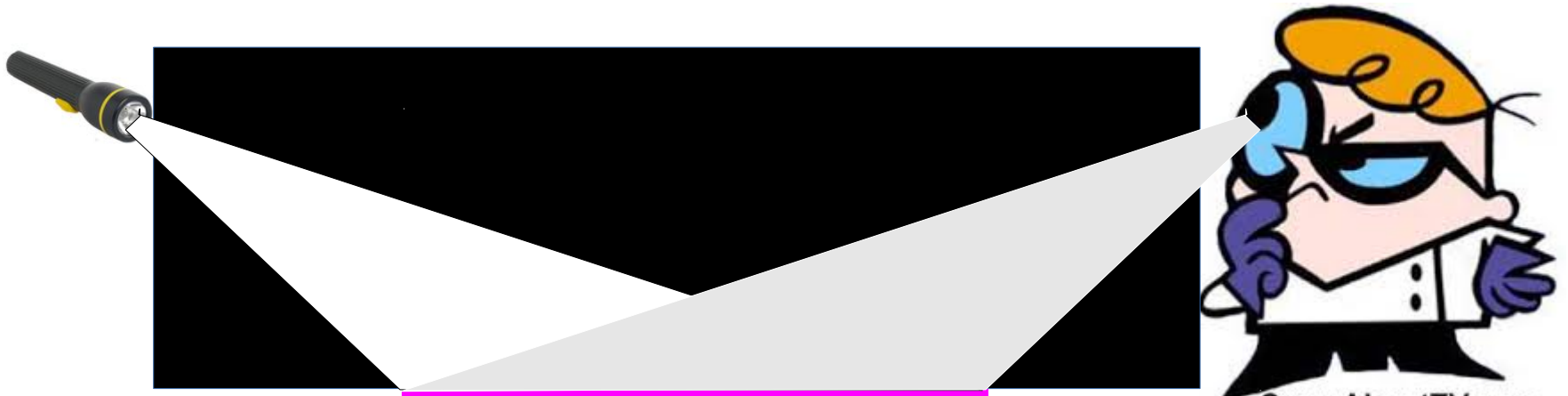
A fény energiát szállít.

Vajon mi történik a fény energiájával
a sugarak találkozásakor?



Egyszerűbb szituáció:


tükről visszaverődő fény






tükör



A fény energiát szállít.

Az energia elindul a lámpából 

A tükörről visszaverődve 
a szemembe jut

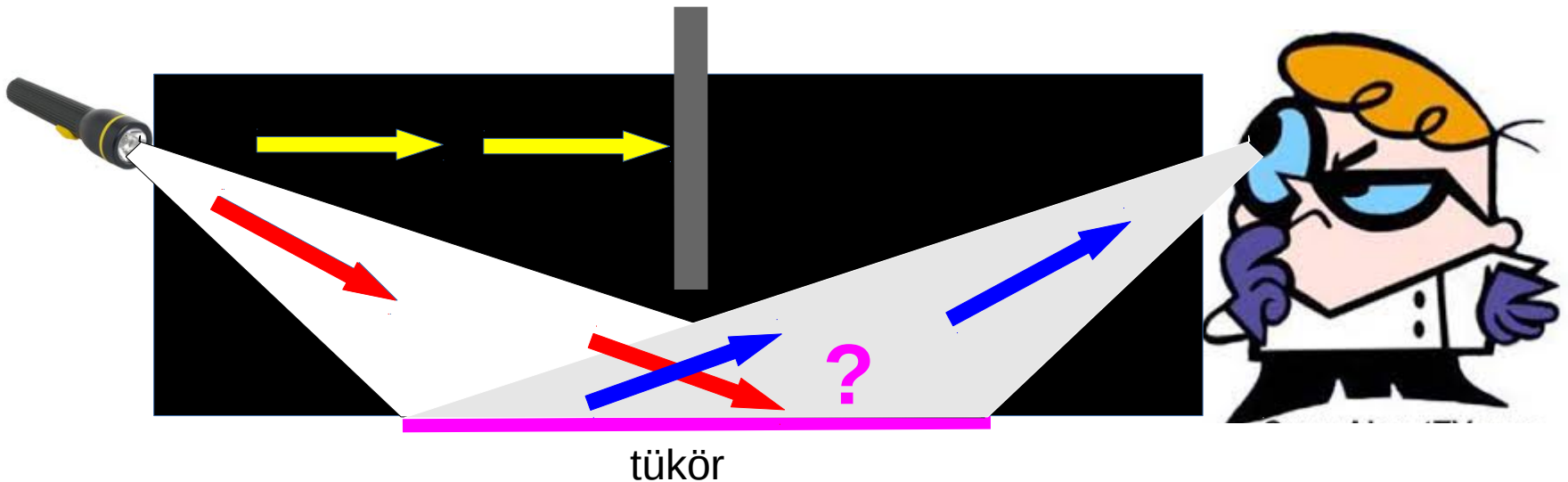
A közvetlen fényenergiát 
egy ernyővel kitakarjuk 



De hogyan áramlik az energia a tükör közelében?



Egyszerre kétfelé mozog?



Mi a fény?

Elektromágneses hullám

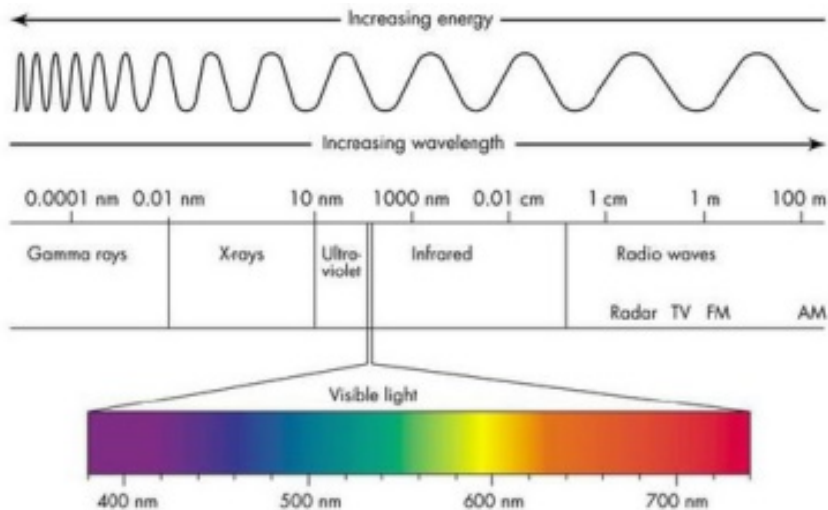


Mi a fény?

Elektromágneses hullám

Az elektromos és a mágneses mező vektora:

E és **B** térben és időben változik



And God said

$$\oiint_{\partial V} \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$
$$\oiint_{\partial V} \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$
$$\oint_{\partial S} \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{A}$$
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_s + \mu_0 \epsilon_0 \iint_S \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{A}$$

and *then* there was light.



James Clark Maxwell
(1838–1879)

Mi a fény?

Elektromágneses hullám

Az elektromos és a mágneses mező vektora:

E és **B** térben és időben változik

Maxwell egyenletei

$$\oiint_{\partial V} \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

$$\oiint_{\partial V} \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

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

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_s + \mu_0 \epsilon_0 \iint_S \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{A}$$

(csak ijesztésképpen :)



Mi a fény?

Elektromágneses hullám

Az elektromos és a mágneses mező vektora:

E és **B** térben és időben változik

A legegyszerűbb esetben ez a változás térben és időben is periodikus: ez a **monokromatikus (egyszínű)** elektromágneses síkhullám

Maxwell egyenletei

$$\oiint_{\partial V} \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

$$\oiint_{\partial V} \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

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

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_s + \mu_0 \epsilon_0 \iint_S \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{A}$$

(csak ijesztésképpen :)



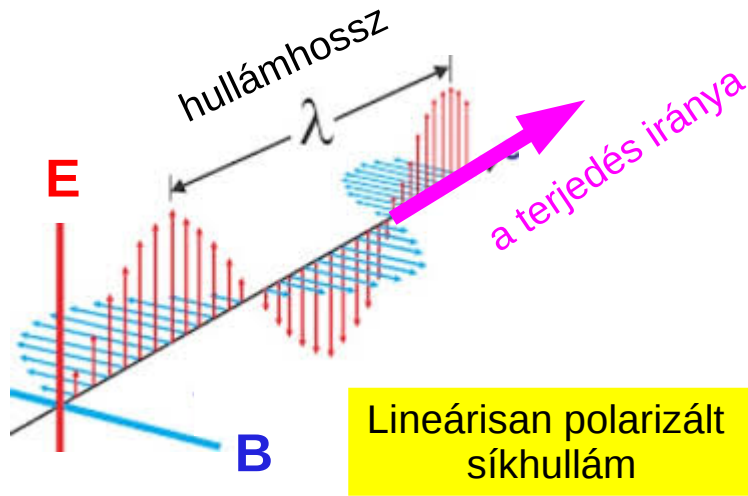
Mi a fény?

Elektromágneses hullám

Az elektromos és a mágneses mező vektora:

E és **B** térben és időben változik

A legegyszerűbb esetben ez a változás térben és időben is periodikus: ez a **monokromatikus (egyszínű)** elektromágneses síkhullám



Maxwell egyenletei

$$\oiint_{\partial V} \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

$$\oiint_{\partial V} \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

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

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_s + \mu_0 \epsilon_0 \iint_S \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{A}$$

(csak ijesztésképpen :)

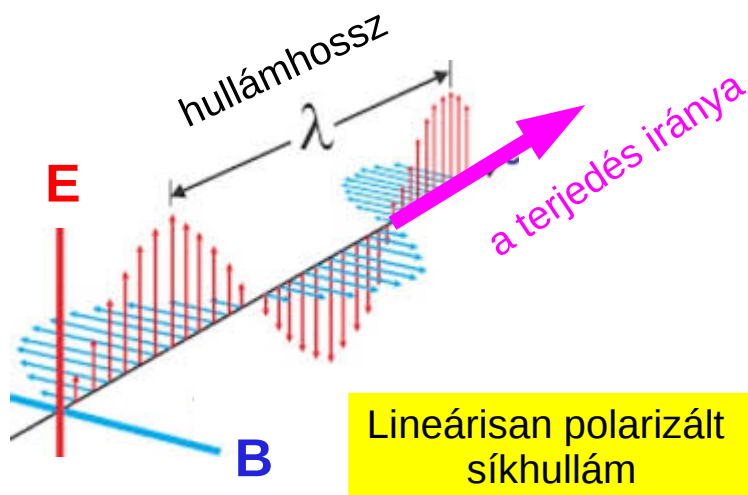
Mi a fény?

Elektromágneses hullám

Az elektromos és a mágneses mező vektora:

E és **B** térben és időben változik

A legegyszerűbb esetben ez a változás térben és időben is periodikus: ez a **monokromatikus (egyszínű)** elektromágneses síkhullám



Maxwell egyenletei

$$\oiint_{\partial V} \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

$$\oiint_{\partial V} \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

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

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_s + \mu_0 \epsilon_0 \iint_S \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{A}$$

(csak ijesztésképpen :)

A fény **transzverzális** hullám:
az **E** és **B** vektorok merőlegesek a terjedés irányára

Ráadásul **egymásra is** merőlegesek!

A hullámban **E** és **B** nagysága ugyanakkora (CGS mértékegység-rendszerben)

Érdekesség: vannak olyan helyek, ahol **E** és **B** is nulla!



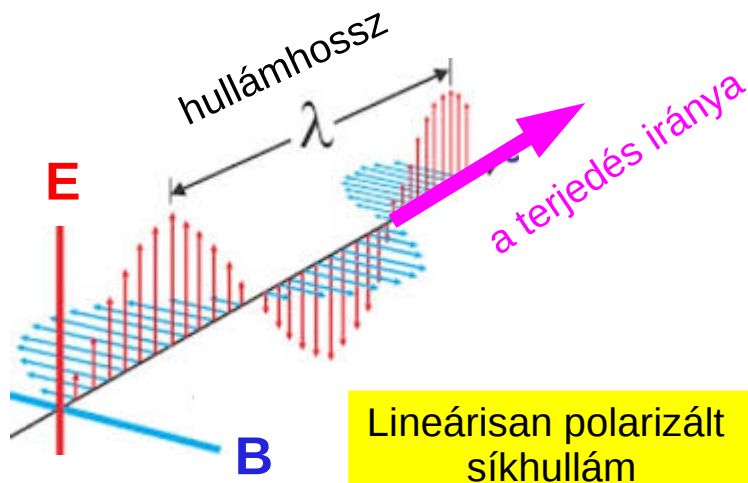
Mi a fény?

Elektromágneses hullám

Az elektromos és a mágneses mező vektora:

E és **B** térben és időben változik

A legegyszerűbb esetben ez a változás térben és időben is periodikus: ez a **monokromatikus (egyszínű)** elektromágneses síkhullám



Maxwell egyenletei

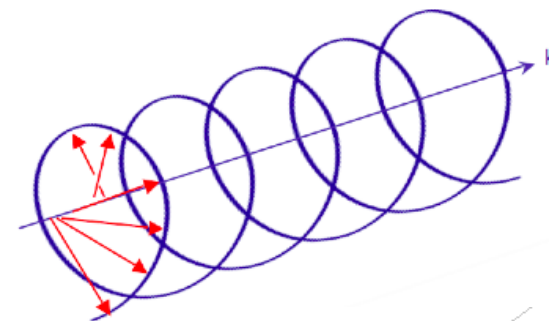
$$\oiint_{\partial V} \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

$$\oiint_{\partial V} \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

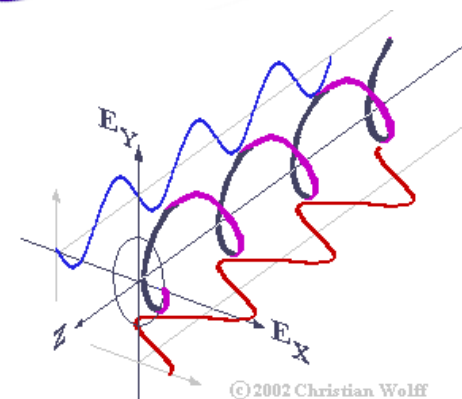
$$\oint_{\partial S} \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{A}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_s + \mu_0 \epsilon_0 \iint_S \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{A}$$

Cirkulárisan polarizált síkhullám



Ebben az esetben **E** és **B** sehol sem nulla!



© 2002 Christian Wolff



Mi hullámzik?

Az elektromágneses mező



Kitérő: mi az a **MEZŐ**?



Kitérő: mi az a **MEZŐ**?

fizikai mező: folytonos eloszlású anyag

matematikai mező: a tér pontjaihoz rendelt mennyiségek

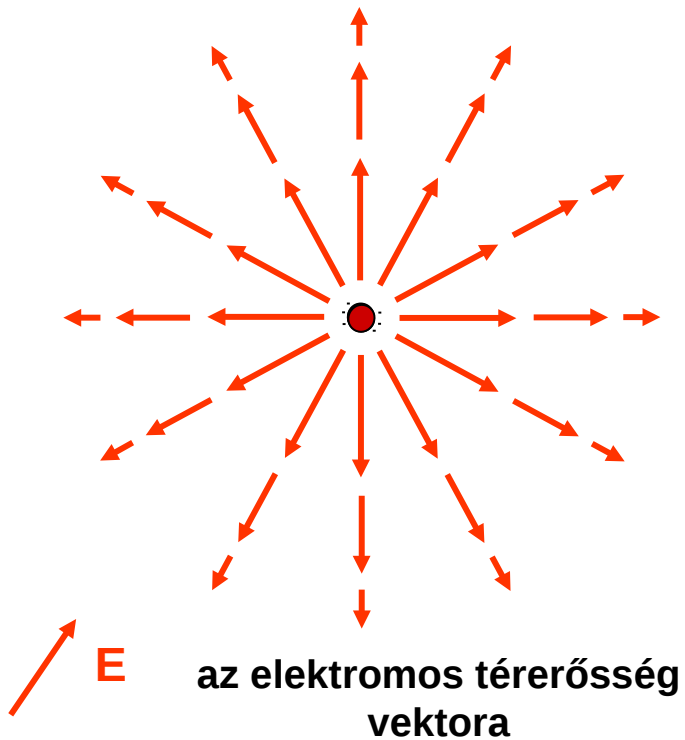


Kitérő: mi az a **MEZŐ**?

fizikai mező: folytonos eloszlású anyag

matematikai mező: a tér pontjaihoz rendelt mennyiségek

Példák: **elektromos mező
egy töltés körül**

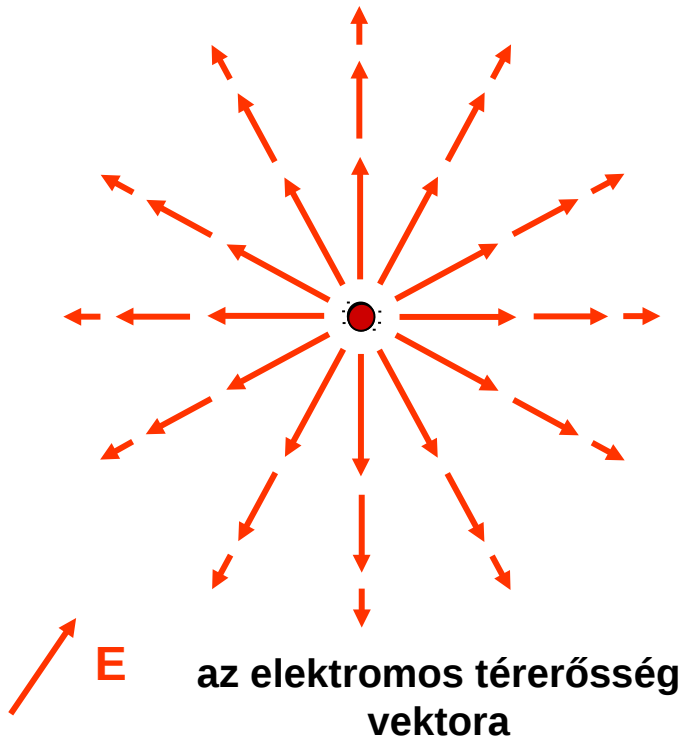


Kitérő: mi az a **MEZŐ**?

fizikai mező: folytonos eloszlású anyag

matematikai mező: a tér pontjaihoz rendelt mennyiségek

Példák: **elektromos mező**
egy töltés körül

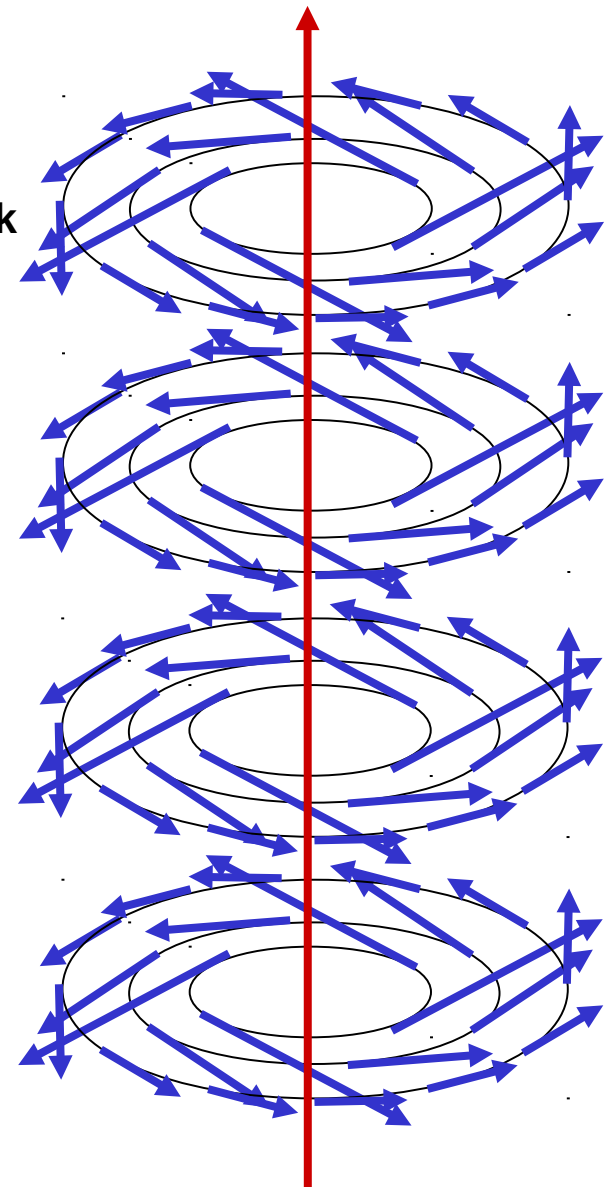


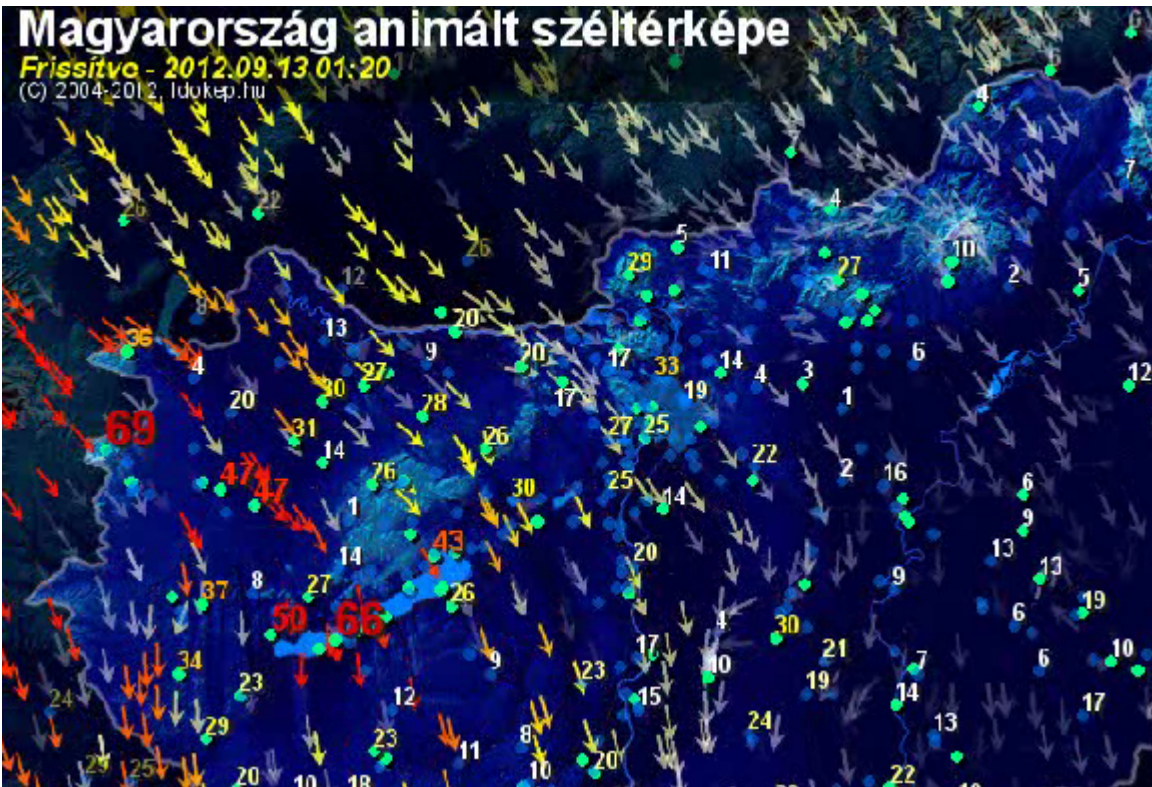
mágneses mező
egy áramjárta drót körül

B
a mágneses térerősség vektora

a tér minden pontjában van egy vektor

ez a **VEKTORMEZŐ**





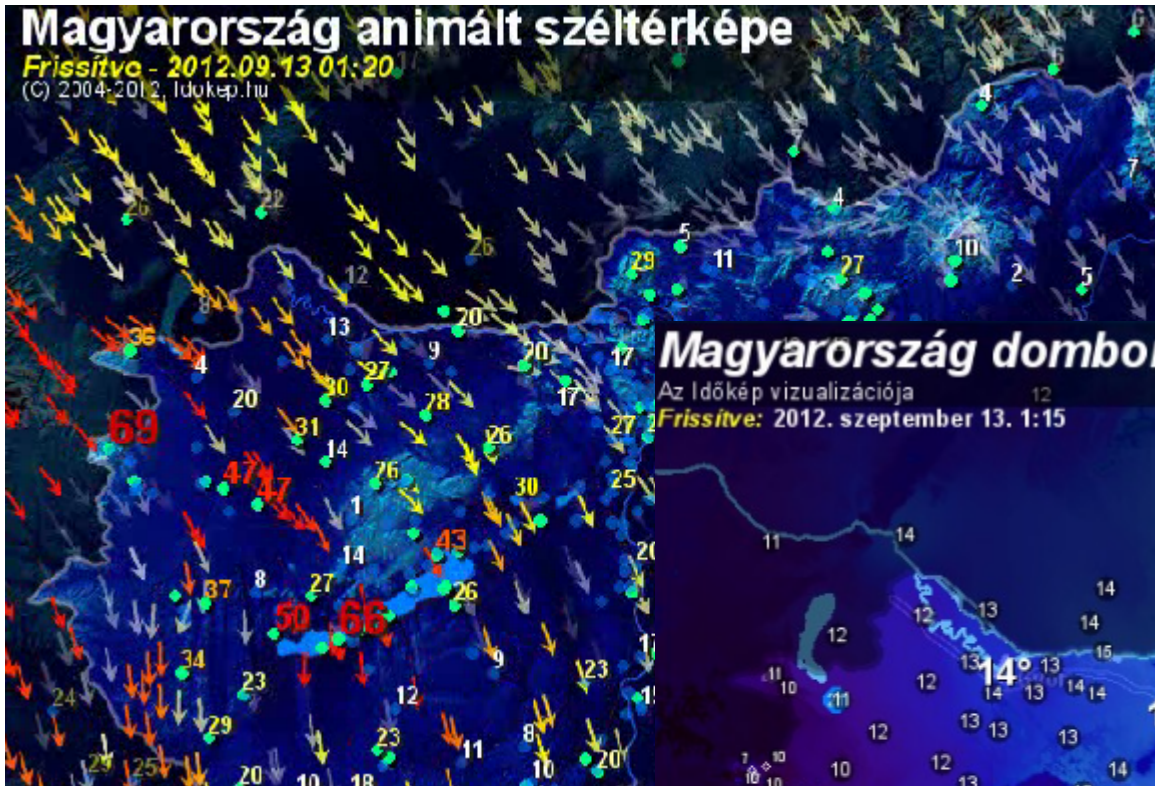
ez is vektormező:
minden pontban egy
szélsébség-vektor

köszönet az ábrákért az Időképnek



Magyarország animált szélterképe

Frissítő - 2012.09.13 01:20
(C) 2004-2012, Időkép.hu



ez is vektormező:

minden pontban egy
szélsébség-vektor

Magyarország domborzati hőterképe 15°C

Az Időkép vizualizációja
Frissítő: 2012. szeptember 13. 1:15



minden pontban egy
hőmérséklet-érték:
egyetlen számadat
(SKALÁR)

ez a SKALÁRMEZŐ

köszönet az ábrákért az Időképnek



Az elektromágneses mező



Az elektromágneses mező

egy olyan fizikai mező,
azaz folytonos eloszlású
(nem atomos) anyag,

amely két (matematikai)
vektormezővel jellemezhető:

az **E** és **B** vektorokat kell
megadnunk
a tér minden pontjában,
minden időpillanatban



Az elektromágneses mező

egy olyan fizikai mező,
azaz folytonos eloszlású
(nem atomos) anyag,

amely két (matematikai)
vektormezővel jellemezhető:

az **E** és **B** vektorokat kell
megadnunk
a tér minden pontjában,
minden időpillanatban

Az elektromágneses mező

erőt gyakorol a vele
köölcsönható részecskékre

A kölcsönhatás mértéke
a **Q** elektromos töltés,
„csatolási állandó”:

$$F = Q (E + (1/c) v \times B)$$



Az elektromágneses mező

egy olyan fizikai mező,
azaz folytonos eloszlású
(nem atomos) anyag,

amely két (matematikai)
vektormezővel jellemezhető:

az **E** és **B** vektorokat kell
megadnunk
a tér minden pontjában,
minden időpillanatban

Az elektromágneses mező

erőt gyakorol a vele
kölcsönható részecskékre

A kölcsönhatás mértéke
a **Q** elektromos töltés,
„csatolási állandó”:

$$F = Q (E + (1/c) v \times B)$$

Az elektromágneses mezőnek energiája van

Az energia sűrűsége
(térfogategységben levő energia):

$$w = (1/2) (E^2 + B^2)$$



Az elektromágneses mező

egy olyan fizikai mező,
azaz folytonos eloszlású
(nem atomos) anyag,

amely két (matematikai)
vektormezővel jellemezhető:

az **E** és **B** vektorokat kell
megadnunk
a tér minden pontjában,
minden időpillanatban

Az elektromágneses mező

erőt gyakorol a vele
köölcsönható részecskékre

A kölcsönhatás mértéke
a **Q** elektromos töltés,
„csatolási állandó”:

$$F = Q (E + (1/c) v \times B)$$

Az elektromágneses mezőnek energiája van

Az energia sűrűsége
(térfogategységben levő energia):

$$w = (1/2) (E^2 + B^2)$$

Az elektromágneses mező energiája áramlik

Az energiaáramlás erőssége
(felületegységen át
időegységenként átment energia):

$$S = c (E \times B)$$



Az elektromágneses mező

egy olyan fizikai mező,
azaz folytonos eloszlású
(nem atomos) anyag,

amely két (matematikai)
vektormezővel jellemezhető:

az **E** és **B** vektorokat kell
megadnunk
a tér minden pontjában,
minden időpillanatban

Az elektromágneses mező

erőt gyakorol a vele
köölcsönható részecskékre

A kölcsönhatás mértéke
a **Q** elektromos töltés,
„csatolási állandó”:

$$F = Q (E + (1/c) v \times B)$$

Az elektromágneses mezőnek energiája van

Az energia sűrűsége
(térfogategységben levő energia):

$$w = (1/2) (E^2 + B^2)$$

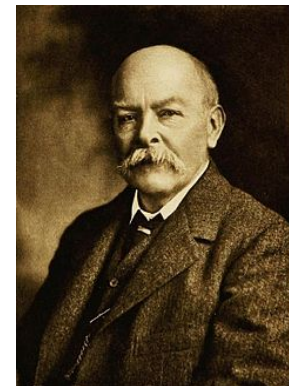
Az elektromágneses mező energiája áramlik

Az energiaáramlás erőssége
(felületegységen át
időegységenként átment energia):

$$S = c (E \times B)$$

Ez a **Poynting-vektor**
(1884)

John Henry Poynting
(1852–1914)



Fizikai rendszerek dinamikája



Fizikai rendszerek dinamikája

tömegpont

mező



Fizikai rendszerek dinamikája

tömegpont

$r(t)$

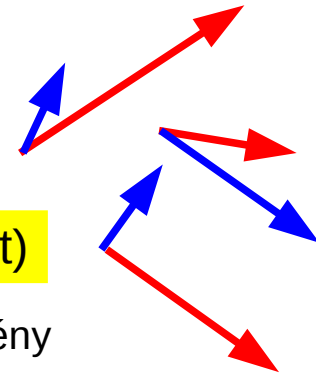
a rendszer dinamikáját
leíró függvény(ek)

3 db egyváltozós függvény

mező

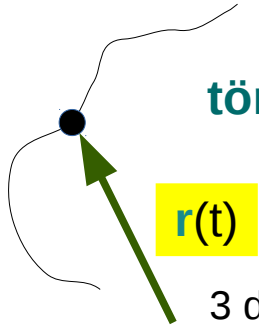
$E(r, t), B(r, t)$

6 db négyváltozós függvény



Fizikai rendszerek dinamikája

tömegpont



$r(t)$

3 db egyváltozós függvény

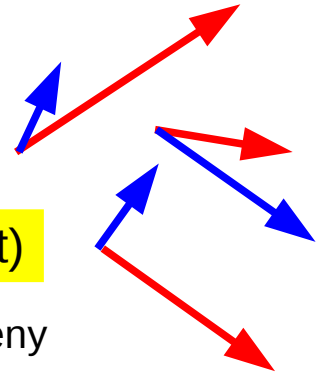
$$ma = \mathbf{F} \quad \text{Newton-törvény}$$

a rendszer dinamikáját leíró függvény(ek)

a dinamikát meghatározó egyenletek

mező

$\mathbf{E}(r, t), \mathbf{B}(r, t)$



6 db négyváltozós függvény

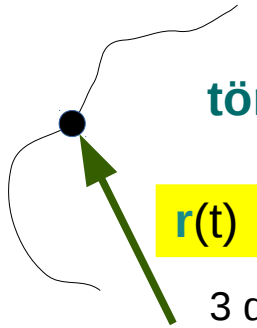
Maxwell-egyenletek

$$\begin{aligned} \oiint_{\partial V} \vec{E} \cdot d\vec{A} &= \frac{Q}{\epsilon_0} \\ \oiint_{\partial V} \vec{B} \cdot d\vec{A} &= 0 \\ \oint_{\partial S} \vec{E} \cdot d\vec{l} &= -\iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{A} \\ \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} &= \mu_0 I_s + \mu_0 \epsilon_0 \iint_S \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{A} \end{aligned}$$



Fizikai rendszerek dinamikája

tömegpont



$r(t)$

3 db egyváltozós függvény

$$m\mathbf{a} = \mathbf{F} \quad \text{Newton-törvény}$$

$$E = K + V = \frac{1}{2} m \mathbf{v}^2 + V(\mathbf{r})$$

a rendszer dinamikáját leíró függvény(ek)

a dinamikát meghatározó egyenletek

energiaviszonyok

a dinamikai egyenletek következményei!

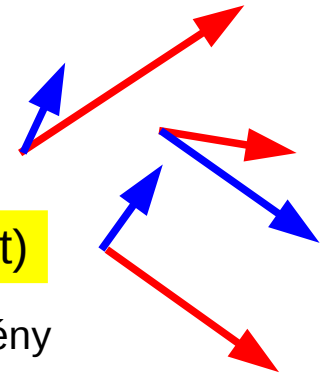
mező

$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t), \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$

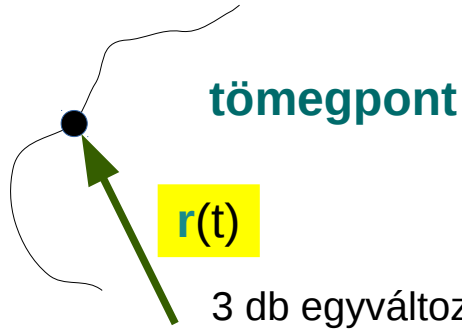
6 db négyváltozós függvény

Maxwell-egyenletek

$$\begin{aligned} \oiint_{\partial V} \vec{E} \cdot d\vec{A} &= \frac{Q}{\epsilon_0} \\ \oiint_{\partial V} \vec{B} \cdot d\vec{A} &= 0 \\ \oint_{\partial S} \vec{E} \cdot d\vec{l} &= -\iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{A} \\ \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} &= \mu_0 I_s + \mu_0 \epsilon_0 \iint_S \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{A} \end{aligned}$$



Fizikai rendszerek dinamikája



a rendszer dinamikáját leíró függvény(ek)

$ma = F$ Newton-törvény

$E = K + V = \frac{1}{2} m v^2 + V(r)$

a dinamikát meghatározó egyenletek

energiaviszonyok

a dinamikai egyenletek következményei!

mező

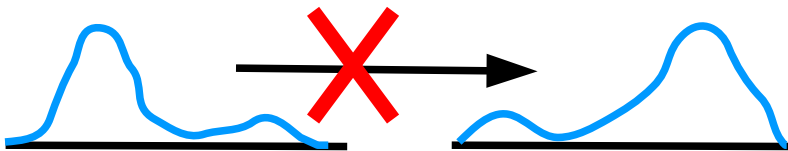
$E(r, t), B(r, t)$

6 db négyváltozós függvény

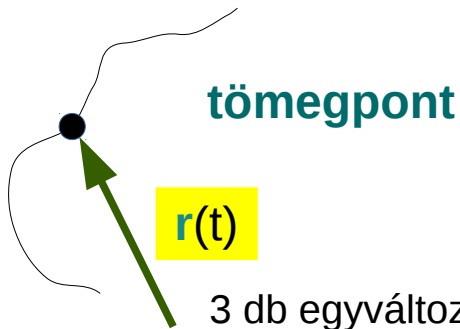
Maxwell-egyenletek

$$\begin{aligned} \oint_{\partial V} \vec{E} \cdot d\vec{A} &= \frac{Q}{\epsilon_0} \\ \oint_{\partial V} \vec{B} \cdot d\vec{A} &= 0 \\ \oint_{\partial S} \vec{E} \cdot d\vec{l} &= - \iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{A} \\ \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} &= \mu_0 I_s + \mu_0 \epsilon_0 \iint_S \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{A} \end{aligned}$$

Nincs „energia-teleportáció” vagy „átutalás”



Fizikai rendszerek dinamikája



tömegpont

$r(t)$

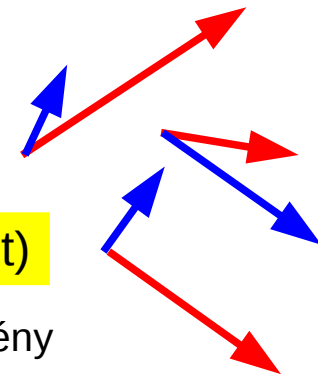
3 db egyváltozós függvény

a rendszer dinamikáját leíró függvény(ek)

mező

$E(r, t), B(r, t)$

6 db négyváltozós függvény



$ma = F$ Newton-törvény

a dinamikát meghatározó egyenletek

Maxwell-egyenletek

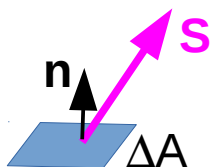
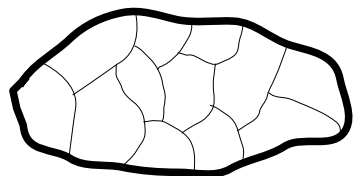
$E = K + V = \frac{1}{2} m v^2 + V(r)$

energiaviszonyok

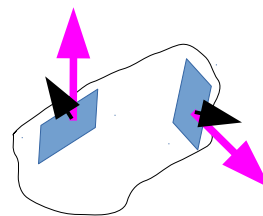
$$\begin{aligned} \oint_{\partial V} \vec{E} \cdot d\vec{A} &= \frac{Q}{\epsilon_0} \\ \oint_{\partial V} \vec{B} \cdot d\vec{A} &= 0 \\ \oint_{\partial S} \vec{E} \cdot d\vec{l} &= -\iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{A} \\ \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} &= \mu_0 I_s + \mu_0 \epsilon_0 \iint_S \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{A} \end{aligned}$$

a dinamikai egyenletek következményei!

$E = \sum w(r) \Delta V$

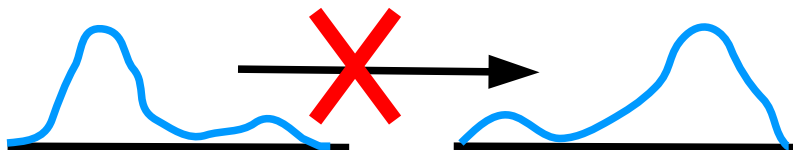


$\Delta E = (Sn) \Delta A \Delta t$



$\Delta E = - \sum (Sn) \Delta A \Delta t$
ami kifolyik...

Nincs „energia-teleportáció” vagy „átutalás”



Az energia lokális megmaradása:

$\Delta (\sum w(r) \Delta V) = - \sum (Sn) \Delta A \Delta t$



Az elektromágneses mezőnek energiája van

Az energia sűrűsége
(térfogategységben levő energia):

$$w = \frac{1}{2} (E^2 + B^2)$$

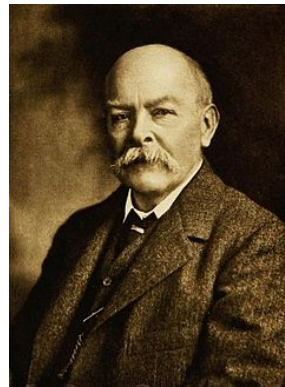
Az elektromágneses mező energiája áramlik

Az energiaáramlás erőssége
(felületegységen át
időegységenként átment energia):

$$S = c (E \times B)$$

Ez a **Poynting-vektor**
(1884)

John Henry Poynting
(1852–1914)



Az elektromágneses mezőnek energiája van

Az energia sűrűsége
(térfogategységben levő energia):

$$w = \frac{1}{2} (E^2 + B^2)$$

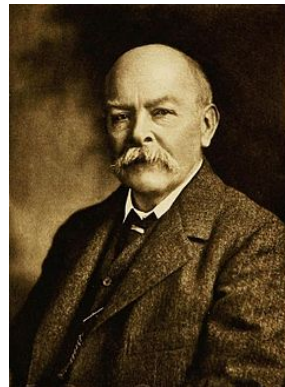
Az elektromágneses mező energiája áramlik

Az energiaáramlás erőssége
(felületegységen át
időegységenként átment energia):

$$S = c (E \times B)$$

Ez a Poynting-vektor
(1884)

John Henry Poynting
(1852–1914)



Poynting-vektor

(az energiaáram-sűrűség vektora)

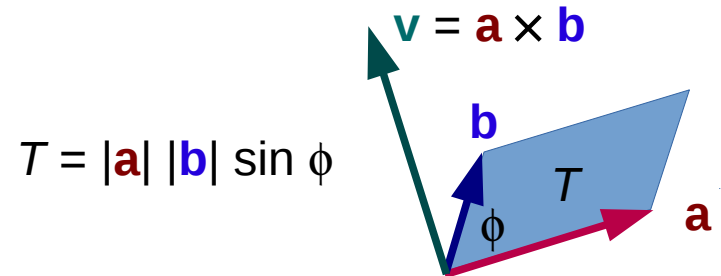
$$S = c (E \times B)$$

vektoriális szorzás $a \times b = v$

a v vektor merőleges a és b síkjára

$$|v| = T$$

T a paralelogramma területe



$$T = |a| |b| \sin \phi$$

$T = 0$, ha a és b párhuzamos

$T = \max$, ha a és b merőleges

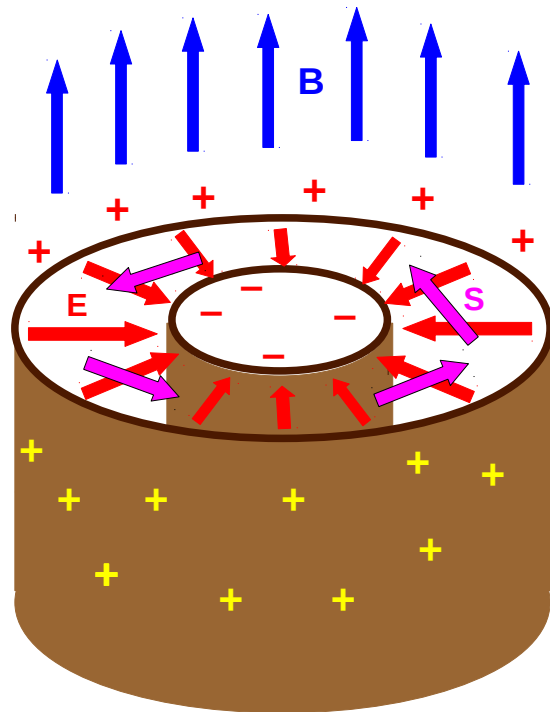


Energiaáramlás sztatikus rendszerben ? !!!



Energiaáramlás sztatikus rendszerben ? !!!

Feltöltött hengerkondenzátor
mágneses mezőben



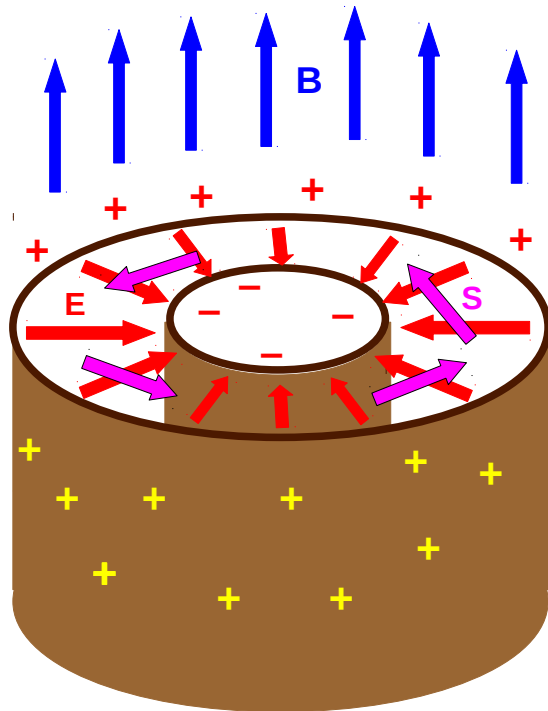
A Poynting-vektor körbejár!

Az energia tehetetlensége miatt
ennek a nyugvó rendszernek
rejtett perdülete van!



Energiaáramlás sztatikus rendszerben ? !!!

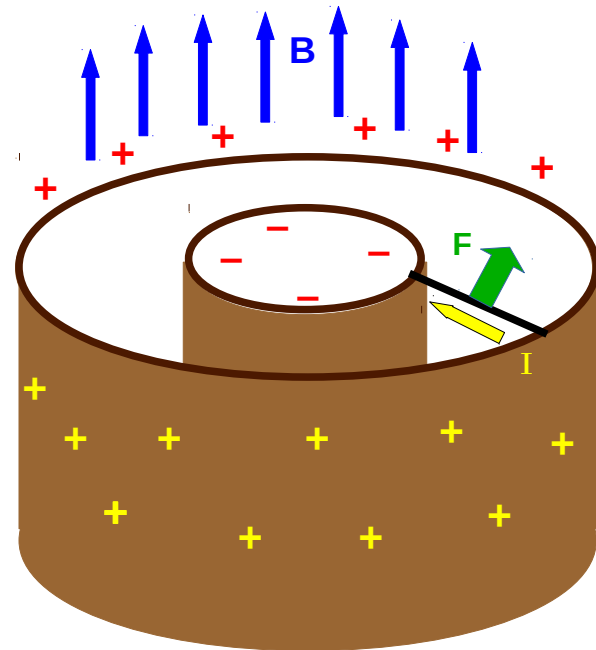
Feltöltött hengerkondenzátor
mágneses mezőben



A Poynting-vektor körbejár!

Az energia tehetetlensége miatt
ennek a nyugvó rendszernek
rejtett perdülete van!

A rendszer **perdülete**
a kondenzátor rövidre zárásával
forgássá alakítható

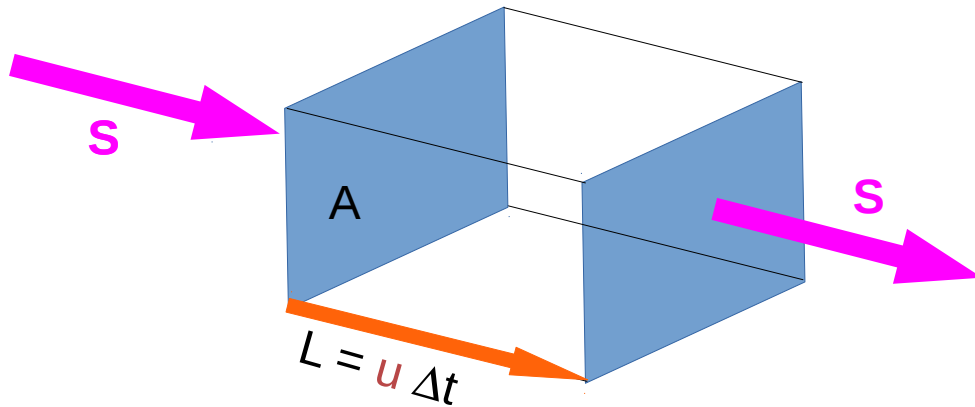


A kondenzátort kisütő áramra erő hat,
ennek forgatónyomatéka
mechanikai forgásba hozza a rendszert

Mekkora az energia áramlási sebessége?



Mekkora az energia áramlási sebessége?



A dobozba az A felületen át Δt idő alatt befolyt

$$\Delta E = S A \Delta t \quad \text{energia.}$$

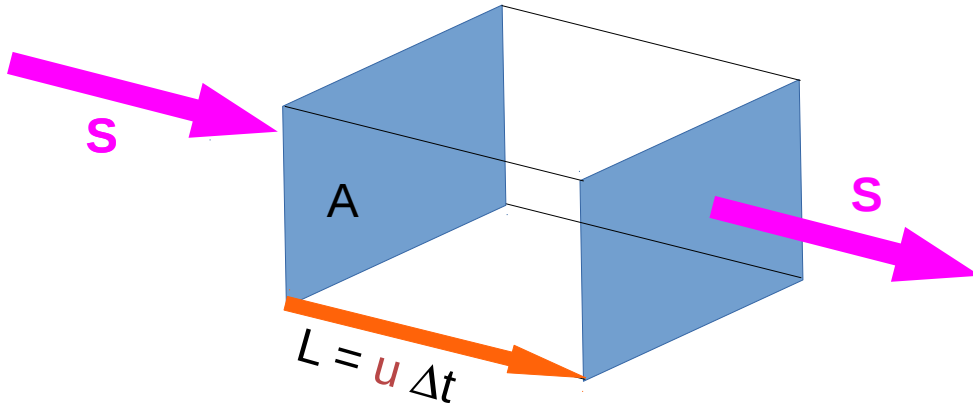
Ez az energia u sebességgel

$$L = u \Delta t \quad \text{távolságra jutott el.}$$

A dobozt w sűrűséggel kitöltő összes energia:

$$E = w V = w A L = w A u \Delta t$$

Mekkora az energia áramlási sebessége?



A dobozba az A felületen át Δt idő alatt befolyt

$$\Delta E = S A \Delta t \quad \text{energia.}$$

Ez az energia u sebességgel

$$L = u \Delta t \quad \text{távolságra jutott el.}$$

A dobozt w sűrűséggel kitöltő összes energia:

$$E = w V = w A L = w A u \Delta t$$

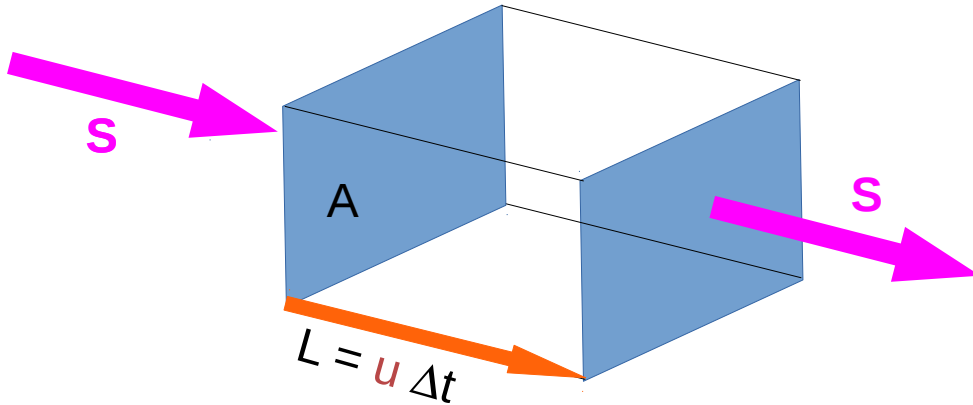
De ami befolyik, az rögtön kifolyik!

Ezért az A alapterületű, L hosszúságú dobozban bent levő energia megegyezik a befolyt ΔE energiával: $E = \Delta E$

$$w A u \Delta t = S A \Delta t$$



Mekkora az energia áramlási sebessége?



A dobozba az A felületen át Δt idő alatt befolyt

$$\Delta E = S A \Delta t \quad \text{energia.}$$

Ez az energia u sebességgel

$$L = u \Delta t \quad \text{távolságra jutott el.}$$

A dobozt w sűrűséggel kitöltő összes energia:

$$E = w V = w A L = w A u \Delta t$$

De ami befolyik, az rögtön kifolyik!

Ezért az A alapterületű, L hosszúságú dobozban bent levő energia megegyezik a befolyt ΔE energiával: $E = \Delta E$

$$w A u \Delta t = S A \Delta t$$

Az u sebességvektor és az S Poynting-vektor iránya megegyezik.
Tehát az energia áramlási sebessége:

$$u = S / w$$



Mekkora az energia áramlási sebessége?

$$u = S / w$$



Mekkora az energia áramlási sebessége?

$$u = S / w$$

Alkalmazzuk ezt az eredményt az elektromágneses mezőre:

$$S = c (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) \quad w = (1/2) (\mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2)$$

Ezért az elektromágneses energia u áramlási sebessége:

$$u = S / w = 2 c \mathbf{E} \times \mathbf{B} / (\mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2)$$



Mekkora az energia áramlási sebessége?

$$u = S / w$$

Alkalmazzuk ezt az eredményt az elektromágneses mezőre:

$$S = c (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) \quad w = (1/2) (\mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2)$$

Ezért az elektromágneses energia u áramlási sebessége:

$$u = S / w = 2 c \mathbf{E} \times \mathbf{B} / (\mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2)$$

Becsüljük meg a sebesség nagyságát!

$$\begin{aligned} u = |u| &= 2 c |\mathbf{E} \times \mathbf{B}| / (\mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2) = 2 c |\mathbf{E}| |\mathbf{B}| \sin \phi / (\mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2) \leq \\ &\leq 2 c |\mathbf{E}| |\mathbf{B}| / (\mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2) = c \sqrt{\mathbf{E}^2 \mathbf{B}^2} / [(\mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2)/2] \leq c \end{aligned}$$

Emlékeztető:

$$|\mathbf{a} \times \mathbf{b}| = |\mathbf{a}| |\mathbf{b}| \sin \phi$$
$$\sin \phi \leq 1$$

$$\sqrt{xy} \leq \frac{x+y}{2}$$

számtani és mértani közép



Mekkora az energia áramlási sebessége?

$$u = S / w$$

Alkalmazzuk ezt az eredményt az elektromágneses mezőre:

$$S = c (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) \quad w = (1/2) (\mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2)$$

Ezért az elektromágneses energia u áramlási sebessége:

$$u = S / w = 2 c \mathbf{E} \times \mathbf{B} / (\mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2)$$

Becsüljük meg a sebesség nagyságát!

$$\begin{aligned} u = |u| &= 2 c |\mathbf{E} \times \mathbf{B}| / (\mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2) = 2 c |\mathbf{E}| |\mathbf{B}| \sin \phi / (\mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2) \leq \\ &\leq 2 c |\mathbf{E}| |\mathbf{B}| / (\mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2) = c \sqrt{\mathbf{E}^2 \mathbf{B}^2} / [(\mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2)/2] \leq c \end{aligned}$$

Emlékeztető:

$$|\mathbf{a} \times \mathbf{b}| = |\mathbf{a}| |\mathbf{b}| \sin \phi$$
$$\sin \phi \leq 1$$

$$\sqrt{xy} \leq \frac{x+y}{2}$$

számtani és mértani közép

Meglepő felfedezés:

a Poynting-vektor képletében szereplő c paraméter az elektromágneses energia terjedési sebességének **felső korlátját** jelenti!

$$|u| \leq c$$



Mekkora az energia áramlási sebessége?

$$u = |\mathbf{u}| = 2 c |\mathbf{E} \times \mathbf{B}| / (\mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2) = 2 c |\mathbf{E}| |\mathbf{B}| \sin \phi / (\mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2) \leq$$

$$\leq 2 c |\mathbf{E}| |\mathbf{B}| / (\mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2) = c \sqrt{\mathbf{E}^2 \mathbf{B}^2} / [(\mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2)/2] \leq c$$

a Poynting-vektor képletében szereplő c paraméter az elektromágneses energia terjedési sebességének **felső korlátját** jelenti!



Mekkora az energia áramlási sebessége?

$$u = |\mathbf{u}| = 2 c |\mathbf{E} \times \mathbf{B}| / (\mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2) = 2 c |\mathbf{E}| |\mathbf{B}| \sin \phi / (\mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2) \leq \\ \leq 2 c |\mathbf{E}| |\mathbf{B}| / (\mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2) = c \sqrt{\mathbf{E}^2 \mathbf{B}^2} / [(\mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2)/2] \leq c$$

a Poynting-vektor képletében szereplő c paraméter az elektromágneses energia terjedési sebességének **felső korlátját** jelenti!

Emlékeztető:

$$|\mathbf{a} \times \mathbf{b}| = |\mathbf{a}| |\mathbf{b}| \sin \phi \\ \sin \phi \leq 1$$

$$\sqrt{xy} \leq \frac{x+y}{2}$$

számtani és mértani közép

Mikor lesz az egyenlőtlenség helyett egyenlőség?

Az első helyen akkor, ha $\sin \phi = 1$, azaz \mathbf{E} és \mathbf{B} merőlegesek.

A számtani és mértani közép képletében akkor, ha $x=y$, azaz $\mathbf{E}^2 = \mathbf{B}^2$, az \mathbf{E} és \mathbf{B} vektorok nagysága azonos.

Ha tehát a téridő egy pontjában \mathbf{E} és \mathbf{B} egymásra merőleges és egyforma nagyságú, akkor ott az elektromágneses energia a maximális c sebességgel mozog.



Mekkora az energia áramlási sebessége?

$$u = |\mathbf{u}| = 2 c |\mathbf{E} \times \mathbf{B}| / (\mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2) = 2 c |\mathbf{E}| |\mathbf{B}| \sin \phi / (\mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2) \leq \\ \leq 2 c |\mathbf{E}| |\mathbf{B}| / (\mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2) = c \sqrt{\mathbf{E}^2 \mathbf{B}^2} / [(\mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2)/2] \leq c$$

a Poynting-vektor képletében szereplő c paraméter az elektromágneses energia terjedési sebességének **felső korlátját** jelenti!

Emlékeztető:

$$|\mathbf{a} \times \mathbf{b}| = |\mathbf{a}| |\mathbf{b}| \sin \phi \\ \sin \phi \leq 1$$

$$\sqrt{xy} \leq \frac{x+y}{2}$$

számtani és mértani közép

Mikor lesz az egyenlőtlenség helyett egyenlőség?

Az első helyen akkor, ha $\sin \phi = 1$, azaz \mathbf{E} és \mathbf{B} merőlegesek.

A számtani és mértani közép képletében akkor, ha $x=y$, azaz $\mathbf{E}^2 = \mathbf{B}^2$, az \mathbf{E} és \mathbf{B} vektorok nagysága azonos.

Ha tehát a téridő egy pontjában \mathbf{E} és \mathbf{B} egymásra merőleges és egyforma nagyságú, akkor ott az elektromágneses energia a maximális c sebességgel mozog.

Előfordul-e ez a szituáció a valóságban?

Az elektromágneses síkhullámokban épp ez a helyzet valósul meg!



Elektromágneses síkhullám energiaviszonyai



Elektromágneses síkhullám energiaviszonyai

E és **B** merőleges egymásra és a terjedési irányra, és egyforma nagyságú:

$$|\mathbf{E}| = |\mathbf{B}| = A$$

Ezért $\mathbf{S} = c (\mathbf{E} \times \mathbf{B})$ a terjedési irányba mutat, és nagysága

$$|\mathbf{S}| = c |\mathbf{E} \times \mathbf{B}| = c |\mathbf{E}| |\mathbf{B}| = c A^2$$

Az energiasűrűség: $w = \frac{1}{2} (\mathbf{E}^2 + \mathbf{E}^2) = A^2$

Ezért az energia terjedési sebessége: $u = \mathbf{S} / w = c A^2 / A^2 = c$
ahogy várható volt.



Elektromágneses síkhullám energiaviszonyai

E és **B** merőleges egymásra és a terjedési irányra, és egyforma nagyságú:

$$|\mathbf{E}| = |\mathbf{B}| = A$$

Ezért $\mathbf{S} = c (\mathbf{E} \times \mathbf{B})$ a terjedési irányba mutat, és nagysága

$$|\mathbf{S}| = c |\mathbf{E} \times \mathbf{B}| = c |\mathbf{E}| |\mathbf{B}| = c A^2$$

Az energiasűrűség: $w = \frac{1}{2} (\mathbf{E}^2 + \mathbf{E}^2) = A^2$

Ezért az energia terjedési sebessége: $u = \mathbf{S} / w = c A^2 / A^2 = c$
ahogy várható volt.

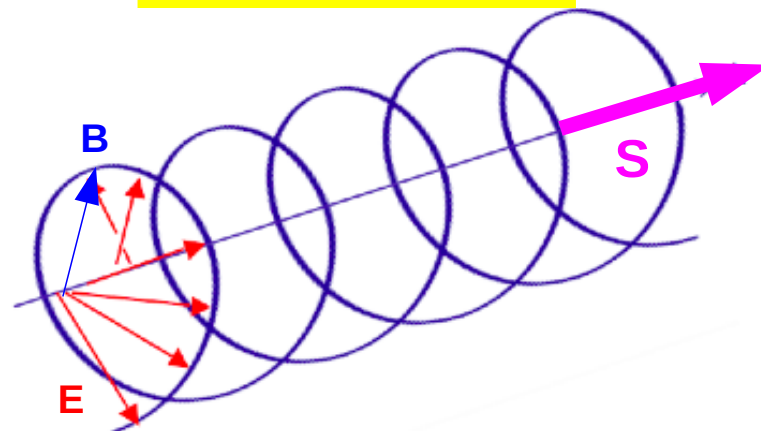
De vigyázat!

Az A mennyiség nem állandó, hanem térben és időben változik,
sőt bizonyos helyeken nulla.
Szabad-e vele egyszerűsíteni?



Elektromágneses síkhullám energiaviszonyai

Cirkulárisan polarizált síkhullám



bár **E** és **B** vetületei szinuszosan változnak,
a vektorok hossza állandó

adott pontban **E** és **B** egymásra merőleges,
egyforma szögsebességgel forog körbe:

a Poynting-vektor

$$\mathbf{S} = c (\mathbf{E} \times \mathbf{B})$$

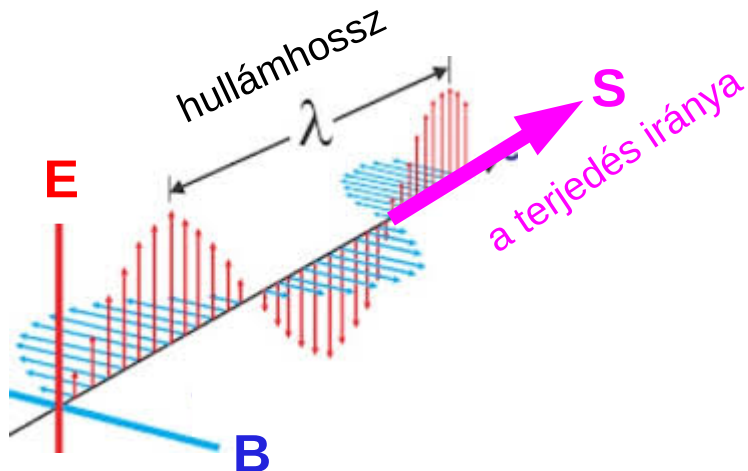
mindenütt és mindig ugyanakkora

Homogén energiaterjedés



Elektromágneses síkhullám energiaviszonyai

Lineárisan polarizált síkhullám



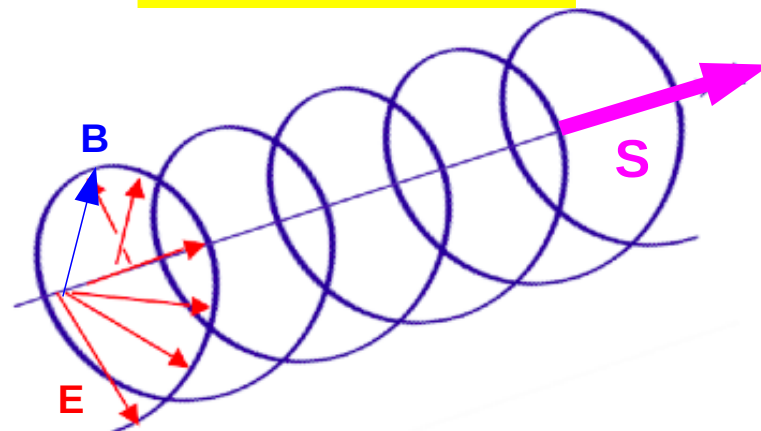
Csomópontok: **E** és **B** is nulla

A csomópont után **E** és **B** egyszerre váltis előjelet, ezért **S** iránya nem változik

De a csomópontokban az **S** Poynting-vektor is nulla

Hogyan megy át az energia a csomópontokon?

Cirkulárisan polarizált síkhullám



bár **E** és **B** vetületei szinuszosan változnak, a vektorok hossza állandó

adott pontban **E** és **B** egymásra merőleges, egyforma szögsebességgel forog körbe:

a Poynting-vektor

$$\mathbf{S} = c (\mathbf{E} \times \mathbf{B})$$

mindenütt és mindig ugyanakkora

Homogén energiaterjedés

Hogyan megy át az energia a csomópontokon?

| | | |
|--|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Hullámok: térben és időben is periodikus jelenségek: | $\Phi(x, t)$ | |
| Az $x=0$ koordinátájú helyen: | $\Phi(0, t) = A \cos(\omega t)$ | periódusidő: $T = 2\pi / \omega$ |
| A $t=0$ időpontban: | $\Phi(x, 0) = A \cos(kx)$ | hullámhossz: $\lambda = 2\pi / k$ |
| Az (x, t) pontban: | $\Phi(x, t) = A \cos(kx - \omega t)$ | |



Hogyan megy át az energia a csomópontokon?

Hullámok: térben és időben is periodikus jelenségek:

$$\Phi(x, t)$$

Az $x=0$ koordinátájú helyen: $\Phi(0, t) = A \cos(\omega t)$

periódusidő: $T = 2\pi / \omega$

A $t=0$ időpontban:

$$\Phi(x, 0) = A \cos(kx)$$

hullámhossz: $\lambda = 2\pi / k$

Az (x, t) pontban:

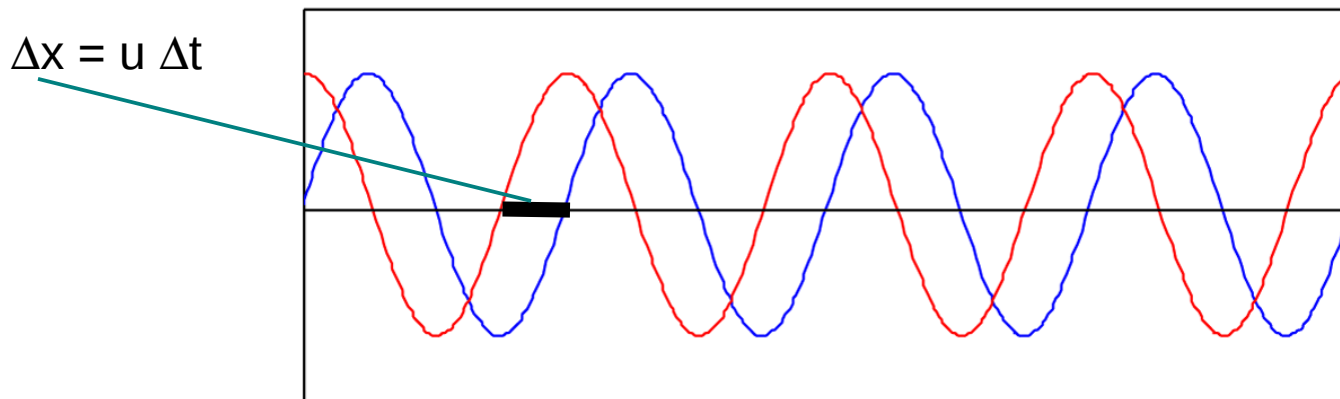
$$\Phi(x, t) = A \cos(kx - \omega t)$$

De ez a függvény így is írható:

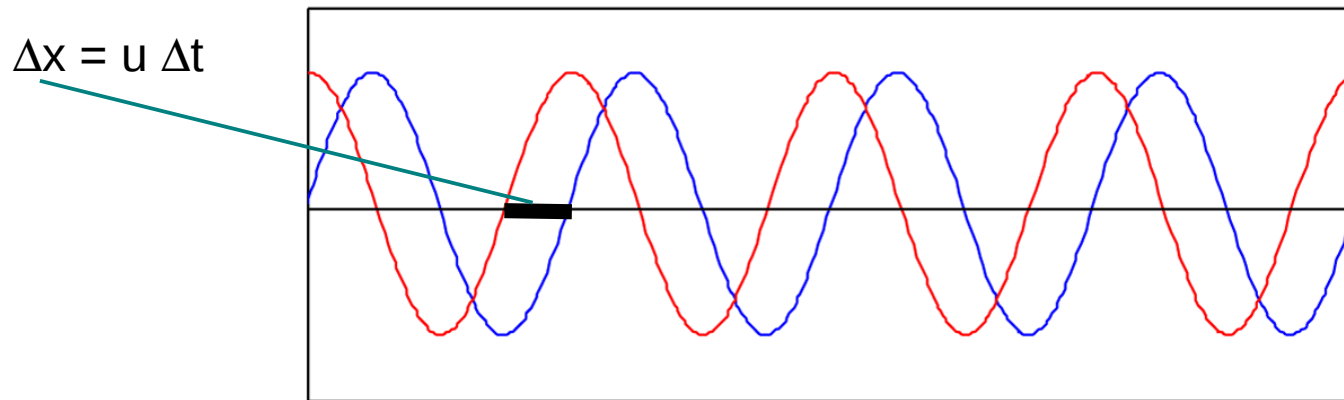
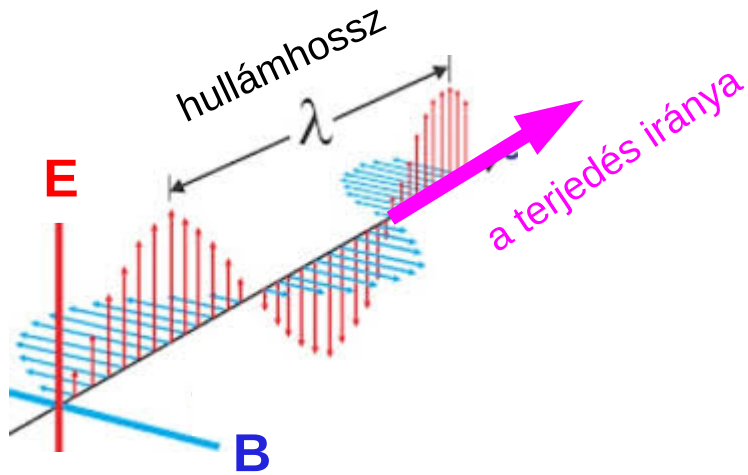
$$\Phi(x, t) = A \cos[k(x - ut)]$$

$$u = \omega/k$$

A hullám u sebességgel halad x irányban: **a csomópontok is eltolódnak!**

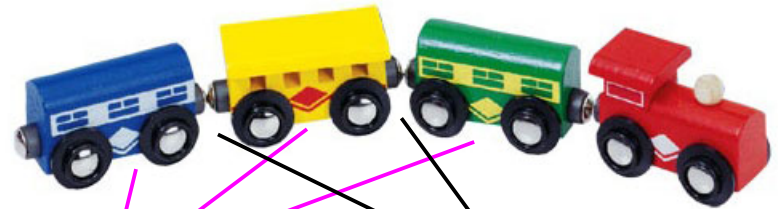
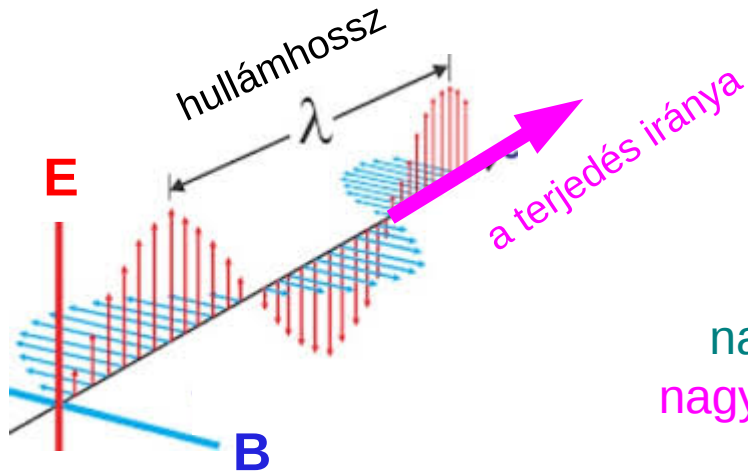


Hogyan megy át az energia a csomópontokon?



Hogyan megy át az energia a csomópontokon?

A lineárisan polarizált hullám olyan, mint a vonat



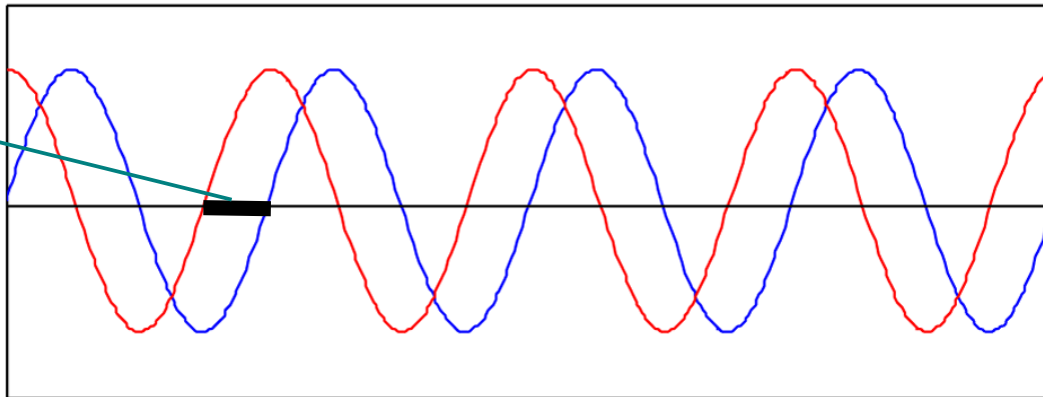
nagy utassűrűség
nagy utasáram-sűrűség

nulla utassűrűség
nulla utasáram-sűrűség

**csomópontok:
ezek is eltolódnak!**

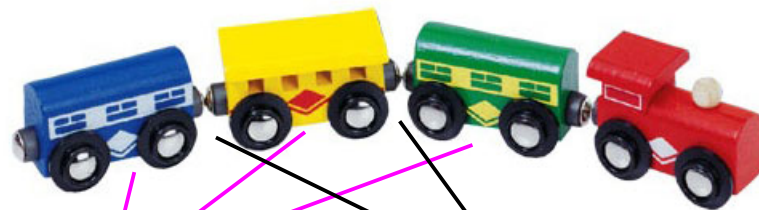
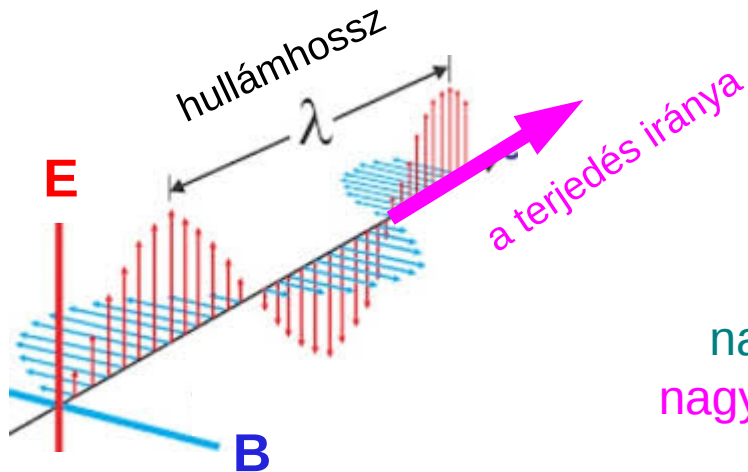
de az egész vonat halad!

$$\Delta x = u \Delta t$$



Hogyan megy át az energia a csomópontokon?

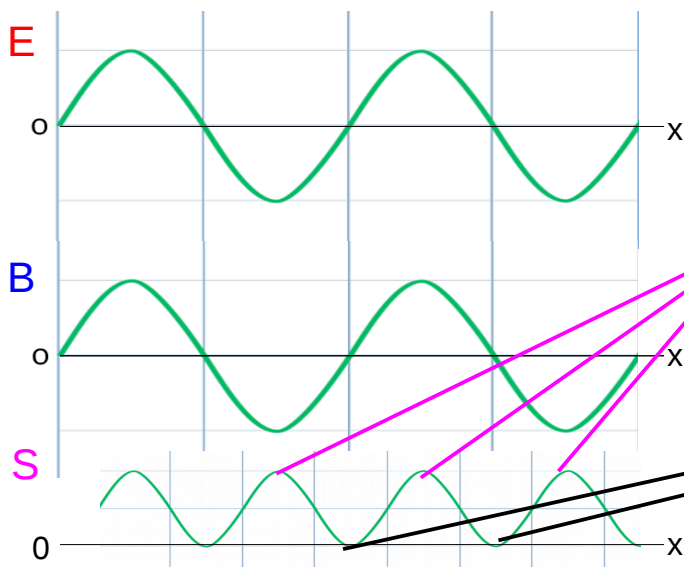
A lineárisan polarizált hullám olyan, mint a vonat



nagy utassűrűség
nagy utasáram-sűrűség

nulla utassűrűség
nulla utasáram-sűrűség

**csomópontok:
ezek is eltolódnak!**



nagy energiasűrűség
nagy energiaáram-sűrűség

nulla energiasűrűség
nulla energiaáram-sűrűség

$$u = \omega/k = c$$

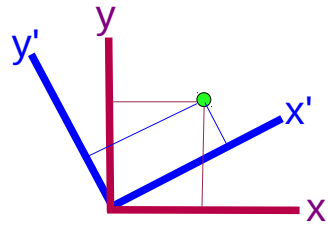


Kis kitérő a relativitáselméletről



Kis kitérő a relativitáselméletről

Hagyományos
koordináta-transzformáció:
forgatás



$$(x, y) \longleftrightarrow (x', y')$$
$$x'^2 + y'^2 = x^2 + y^2$$

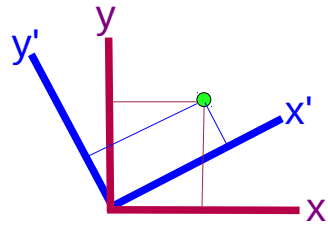
Invariáns mennyiség:

$$x'^2 + y'^2 = x^2 + y^2$$



Kis kitérő a relativitáselméletről

Hagyományos
koordináta-transzformáció:
forgatás



$$(x, y) \longleftrightarrow (x', y')$$

Invariáns mennyiség:

$$x'^2 + y'^2 = x^2 + y^2$$

Inerciarendszerek közti
koordináta-transzformáció:
Lorentz-transzformáció

$$(x, t) \longleftrightarrow (x', t')$$

$$x'^2 - c^2 t'^2 = x^2 - c^2 t^2$$

$$(E, B) \longleftrightarrow (E', B')$$

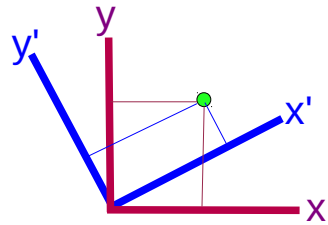
$$E'B' = EB$$

$$E'^2 - B'^2 = E^2 - B^2$$



Kis kitérő a relativitáselméletről

Hagyományos
koordináta-transzformáció:
forgatás



$$(x, y) \longleftrightarrow (x', y')$$

Invariáns mennyiség:

$$x'^2 + y'^2 = x^2 + y^2$$

Inerciarendszerek közti
koordináta-transzformáció:
Lorentz-transzformáció

$$(x, t) \longleftrightarrow (x', t')$$

$$x'^2 - c^2 t'^2 = x^2 - c^2 t^2$$

$$(E, B) \longleftrightarrow (E', B')$$

$$E'B' = EB$$

$$E'^2 - B'^2 = E^2 - B^2$$

Az az elektromágneses konfiguráció, amikor **E** és **B** merőleges és egyforma nagyságú, és ennek következtében az elektromágneses energia c sebességgel terjed, Lorentz-transzformációra nézve invariáns: hiszen mindkét invariáns mennyiség nulla. Ezt minden inerciális megfigyelő ugyanúgy észleli. Ez a jelenség a **FÉNY**.

A fény – speciálisan az elektromágneses síkhullám – minden inerciális megfigyelő számára fény.

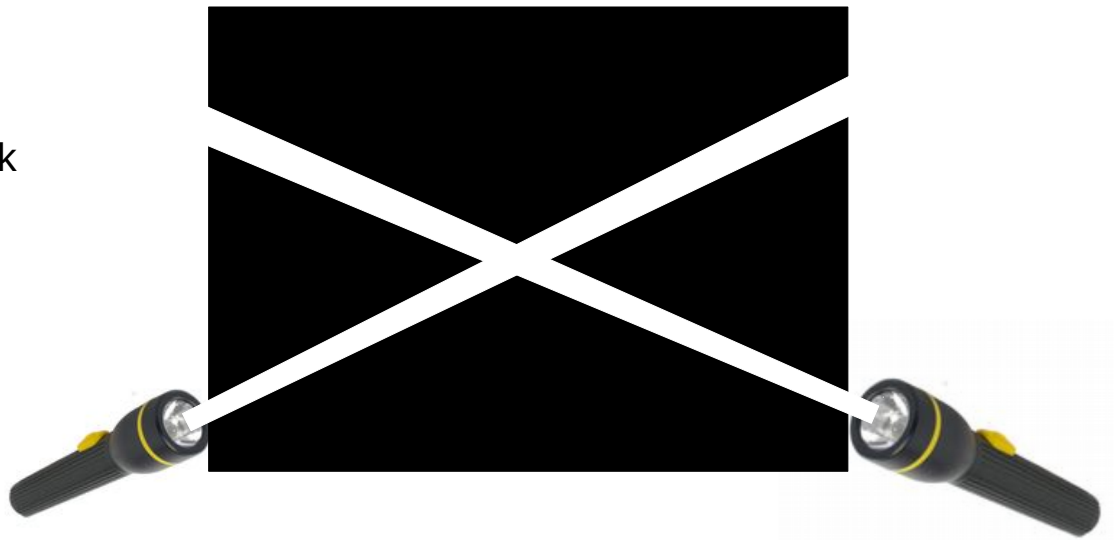
Ez az állítás nem a relativitáselmélet kiindulópontja, hanem a koronája.



Adjunk össze két fényt!

A Maxwell-egyenletek ezt megengedik

De vajon továbbra is igaz lesz,
hogy **E** és **B** merőlegesek
és egyforma nagyságúak?



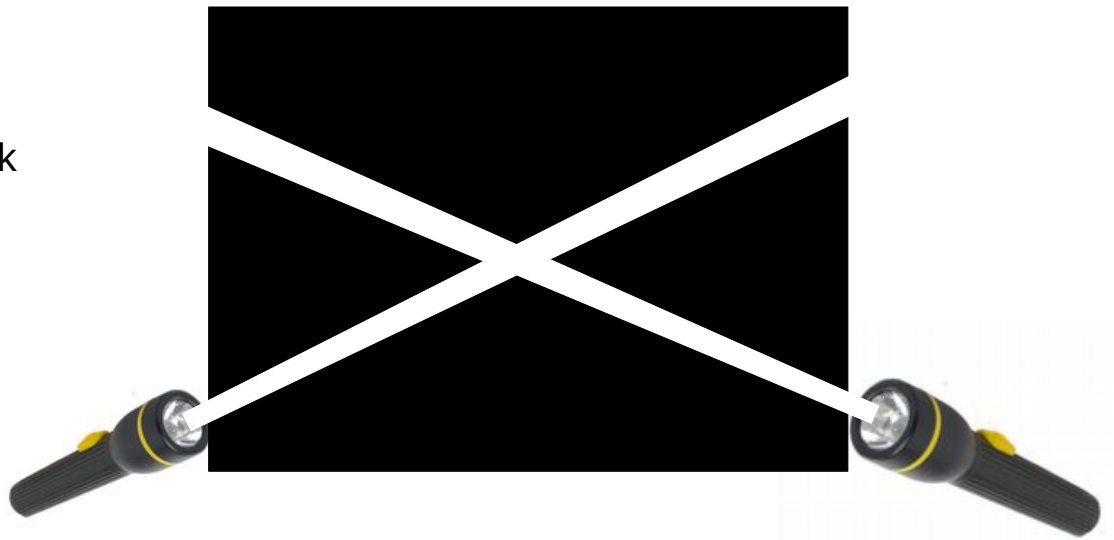
Adjunk össze két fényt!

A Maxwell-egyenletek ezt megengedik

De vajon továbbra is igaz lesz,
hogy **E** és **B** merőlegesek
és egyforma nagyságúak?

Általában NEM!

FÉNY + FÉNY ~~X~~ FÉNY



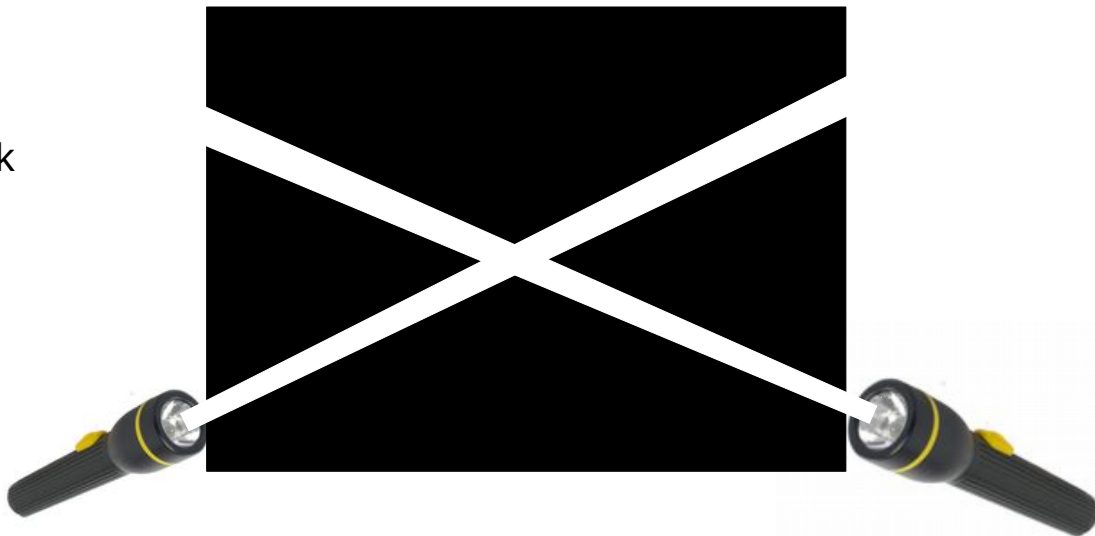
Adjunk össze két fényt!

A Maxwell-egyenletek ezt megengedik

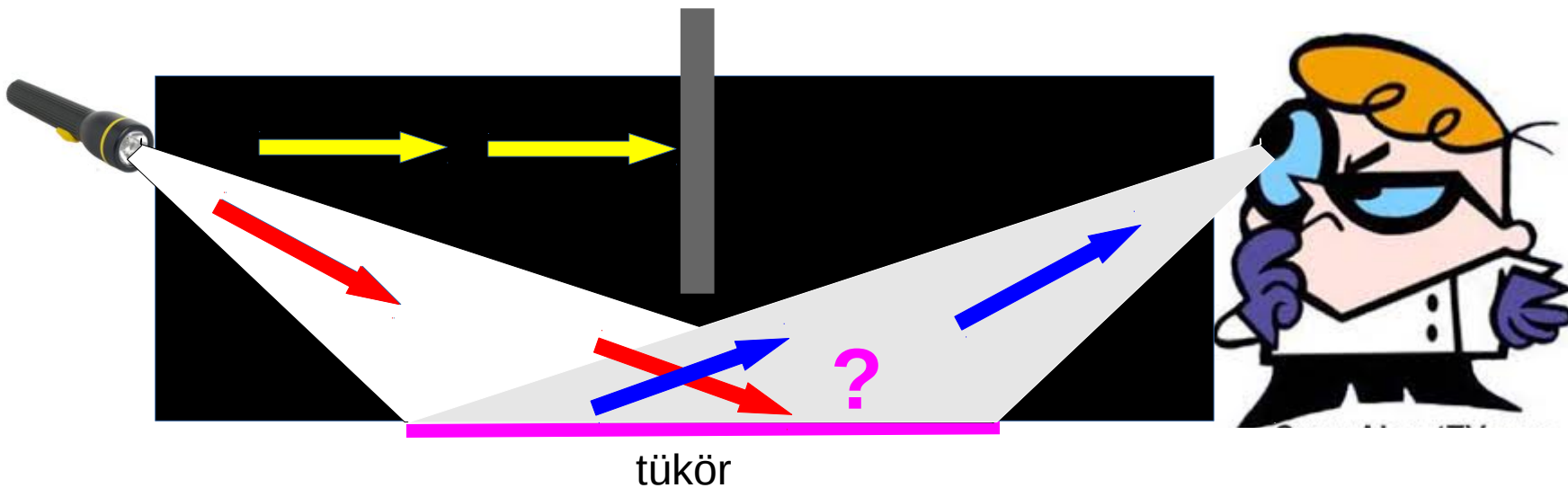
De vajon továbbra is igaz lesz,
hogy **E** és **B** merőlegesek
és egyforma nagyságúak?

Általában NEM!

FÉNY + FÉNY ~~X~~ FÉNY

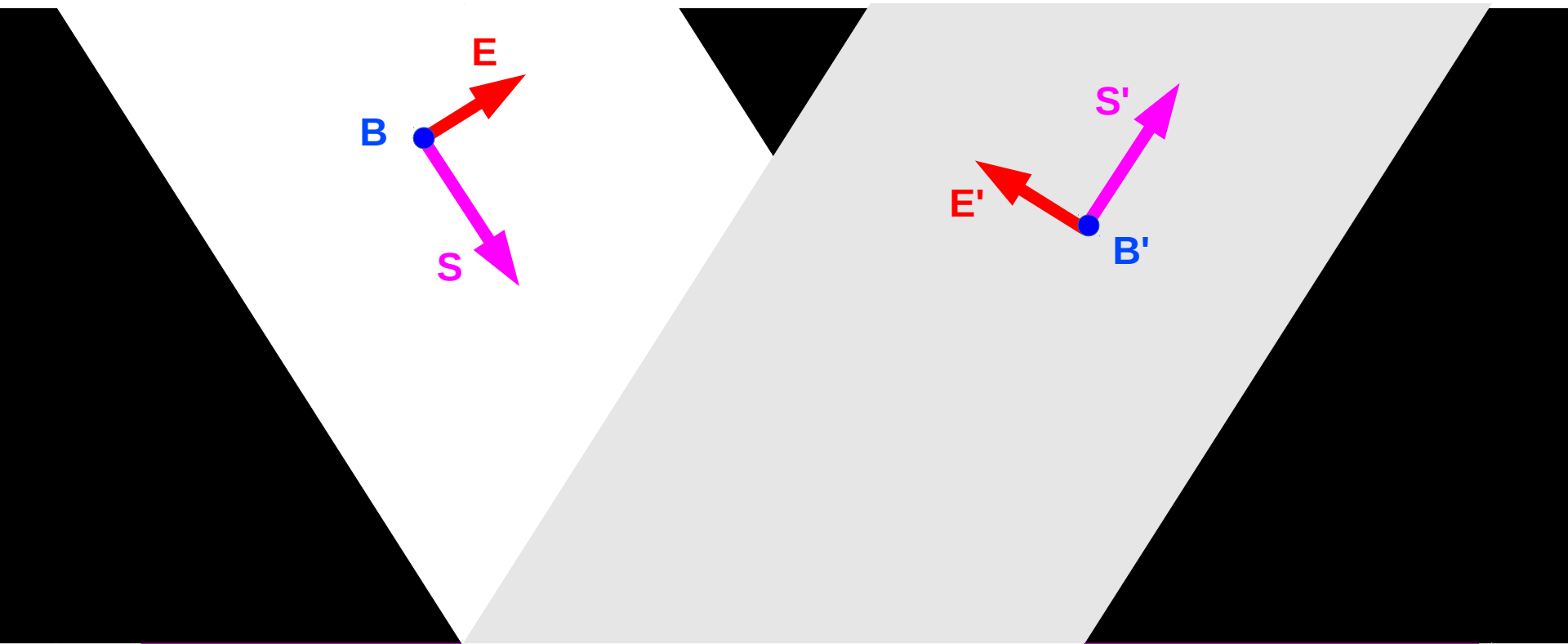


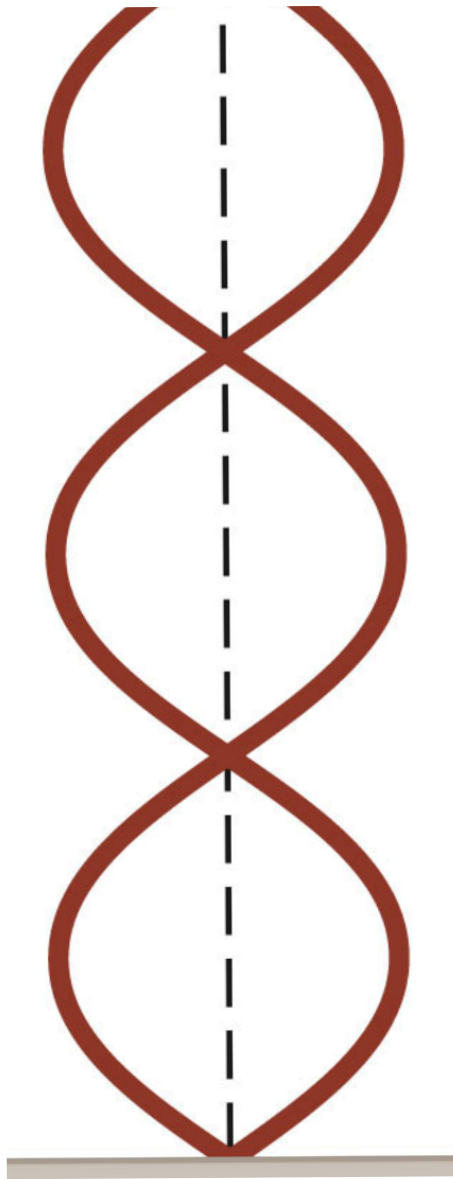
Vizsgáljuk meg részletesen a tükörről visszaverődő fény esetét!



Közel a tükörhöz a lámpa széttartó nyalábja párhuzamos síkhullámnak tekinthető, akárcsak a visszavert hullám:

De mi a helyzet az átfedési tartományban?

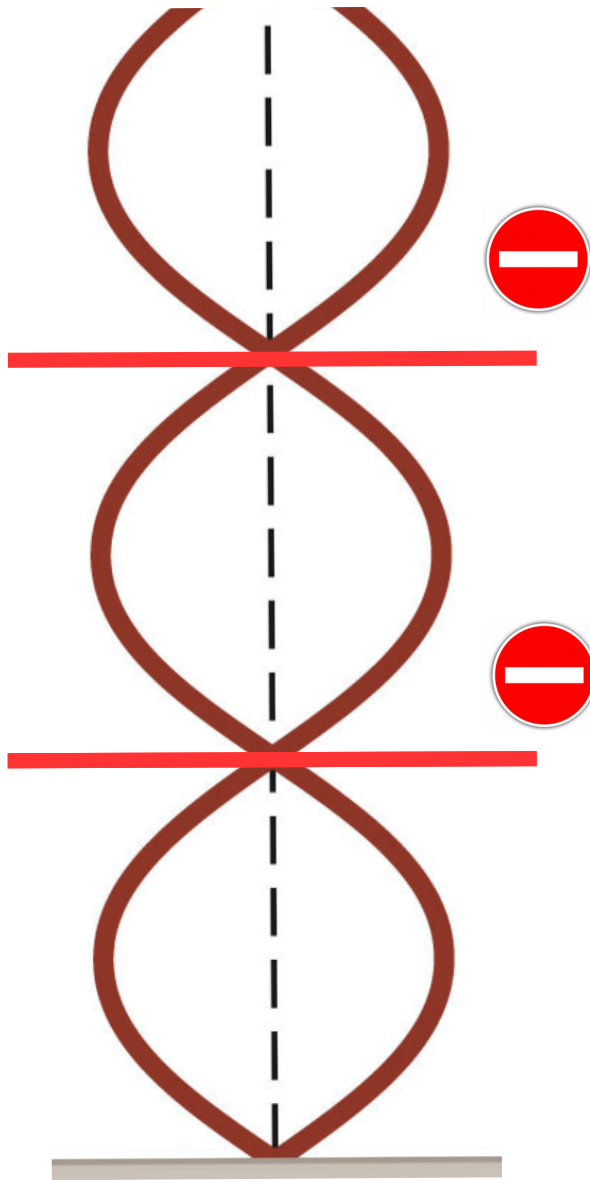




Az eredeti és a visszavert hullám
interferenciájának következtében

ÁLLÓHULLÁM jön létre

Ennek csomópontjai a visszaverő tükörtől
fix távolságban vannak, nem mozognak.



Az eredeti és a visszavert hullám interferenciájának következtében

ÁLLÓHULLÁM jön létre

Ennek csomópontjai a visszaverő tükörtől fix távolságban vannak, nem mozognak.

E csomópontok együtt olyan síkokat alkotnak, ahol a **B** térerősség tartósan nulla.

Így itt az **S** Poynting-vektor is nulla.

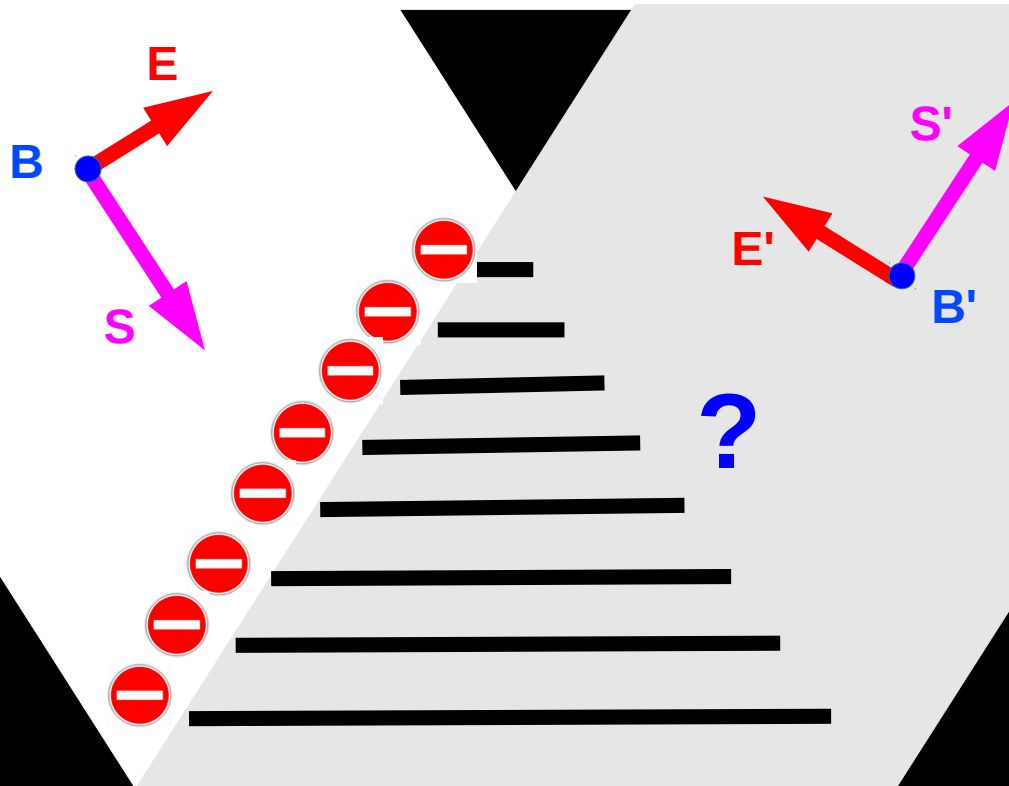
E tiltott síkokon tehát **NEM ÁRAMLIK ÁT** az energia.

Akkor pedig hogyan jut el a tükörig, és onnan a szemünkbe?

A két fénynyaláb átfedési tartományban tiltott síkok alakulnak ki, ahol az \mathbf{S} Poynting-vektor tartósan nulla.

Itt nem haladhat át az energia.

(Megjegyzés: a valóságban a tiltott síkok jóval sűrűbben helyezkednek el, távolságuk a fény hullámhosszának nagyságrendjébe esik.)



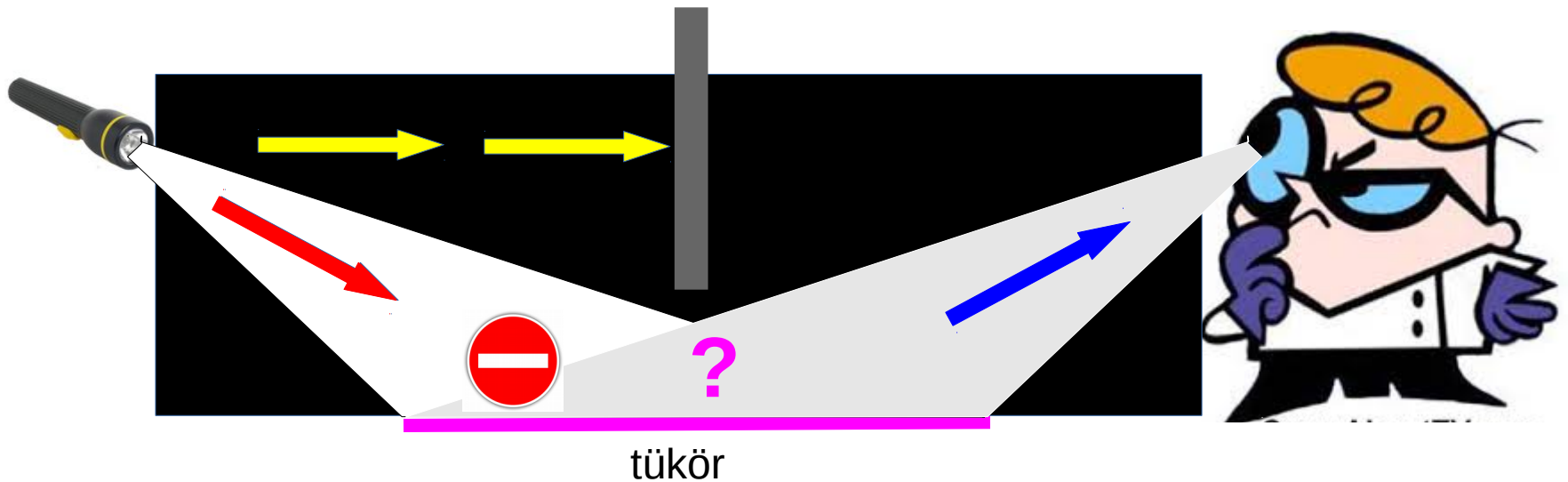
A két fénynyaláb átfedési tartományban tiltott síkok alakulnak ki, ahol az **S** Poynting-vektor tartósan nulla

Itt nem haladhat át az energia.

Pedig mégis a szemünkbe jut valahogy...

A közvetlen utat pedig kitakartuk

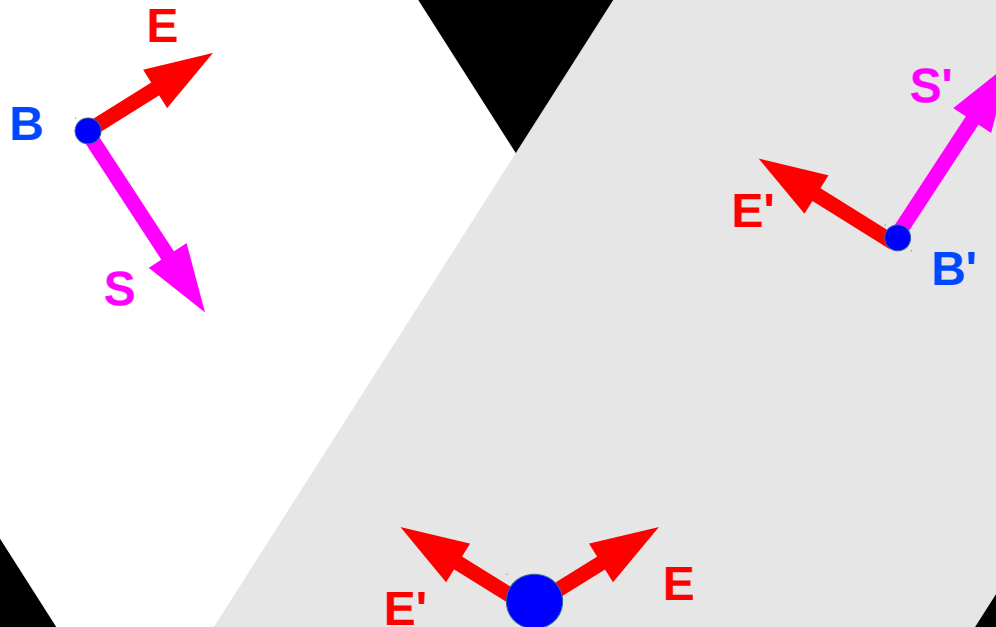
Ez az asztali tükör paradoxona



A megoldás kézenfekvő.

A Maxwell-egyenletek lineárisak, a megoldásaikat össze lehet adni.

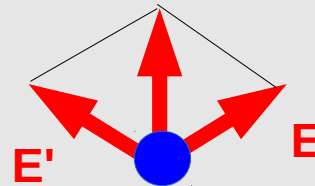
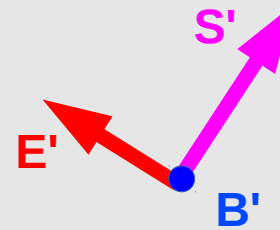
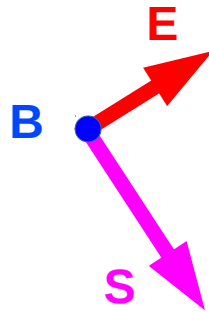
Nem az energiát, nem a Poynting-vektort, hanem a térerősségeket!



A megoldás kézenfekvő.

A Maxwell-egyenletek lineárisak, a megoldásaikat össze lehet adni.

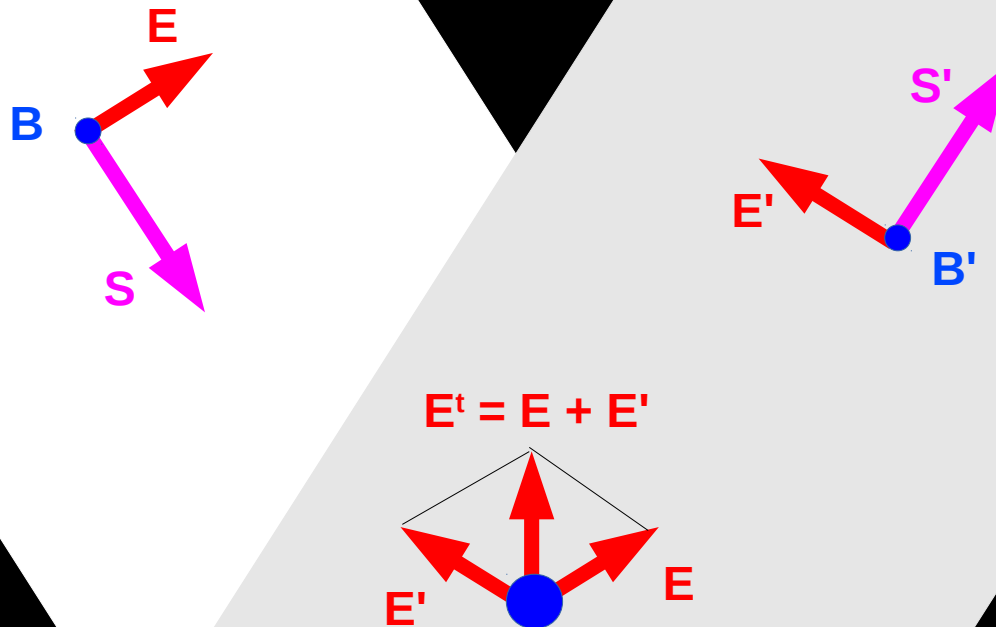
Nem az energiát, nem a Poynting-vektort, hanem a térerősségeket!



A megoldás kézenfekvő.

A Maxwell-egyenletek lineárisak, a megoldásaikat össze lehet adni.

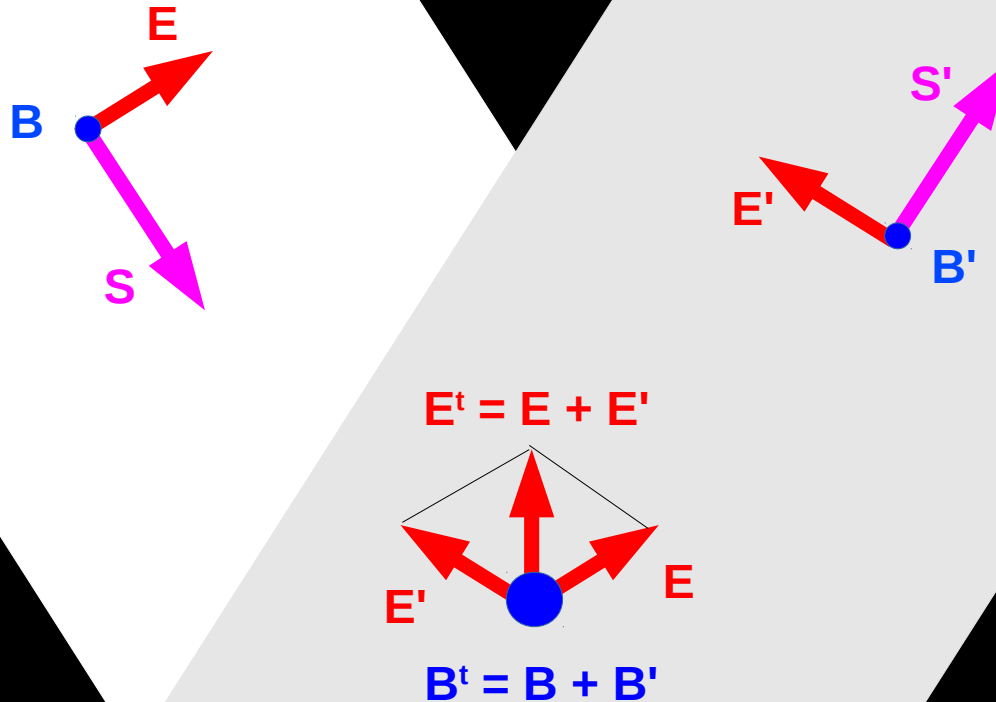
Nem az energiát, nem a Poynting-vektort, hanem a térerősségeket!



A megoldás kézenfekvő.

A Maxwell-egyenletek lineárisak, a megoldásaikat össze lehet adni.

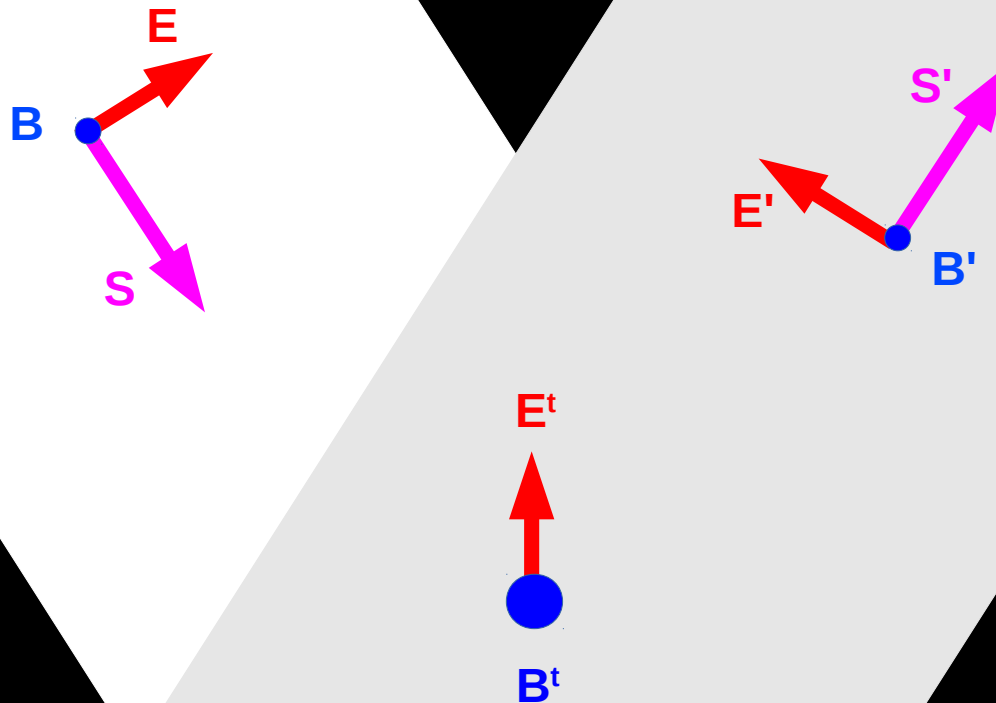
Nem az energiát, nem a Poynting-vektort, hanem a térerősségeket!



A megoldás kézenfekvő.

A Maxwell-egyenletek lineárisak, a megoldásaikat össze lehet adni.

Nem az energiát, nem a Poynting-vektort, hanem a térerősségeket!

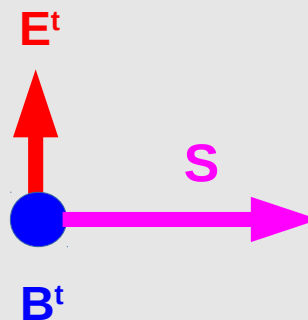
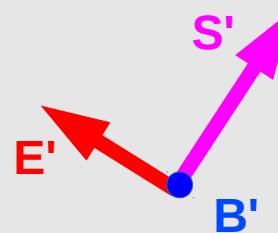
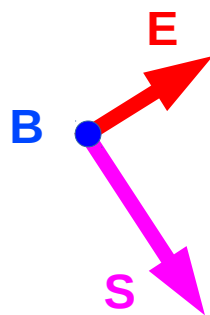


A megoldás kézenfekvő.

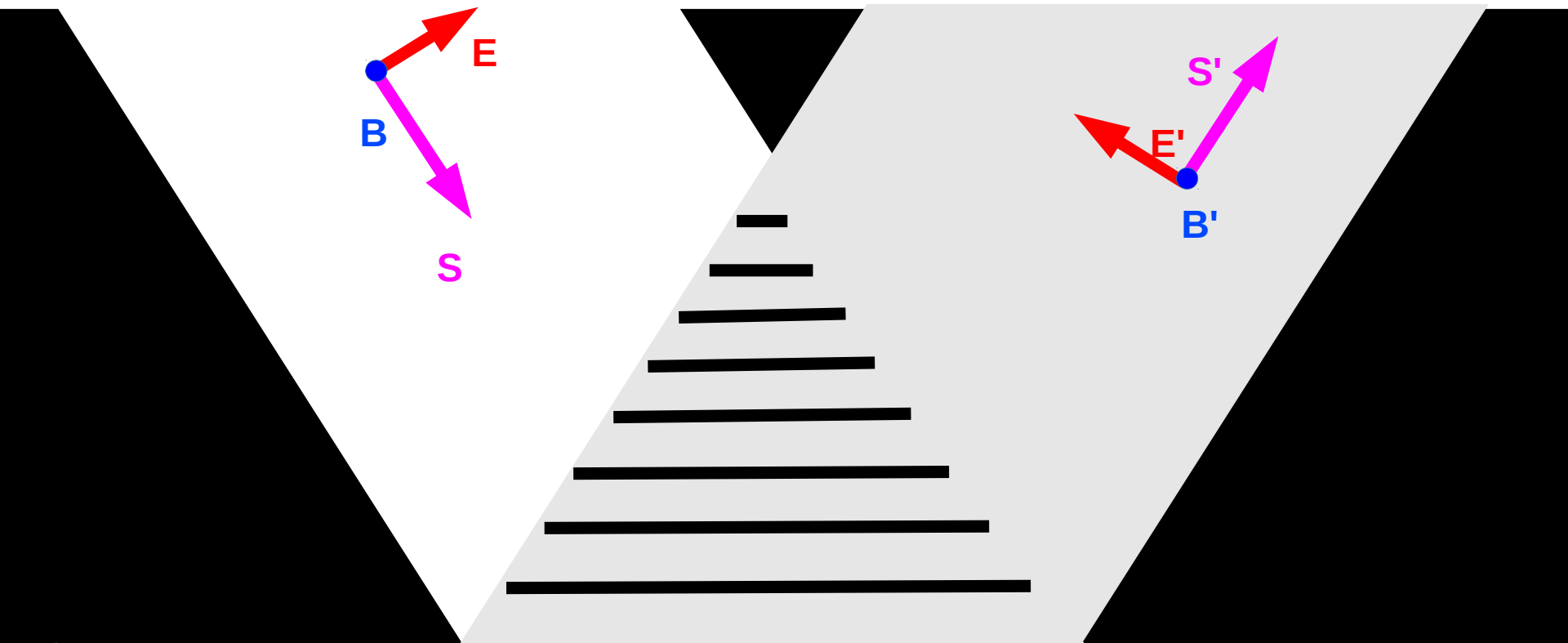
A Maxwell-egyenletek lineárisak, a megoldásaikat össze lehet adni.

Nem az energiát, nem a Poynting-vektort, hanem a térerősségeket!

Az eredő térerősségekből kell kiszámítani az eredő Poynting-vektort!

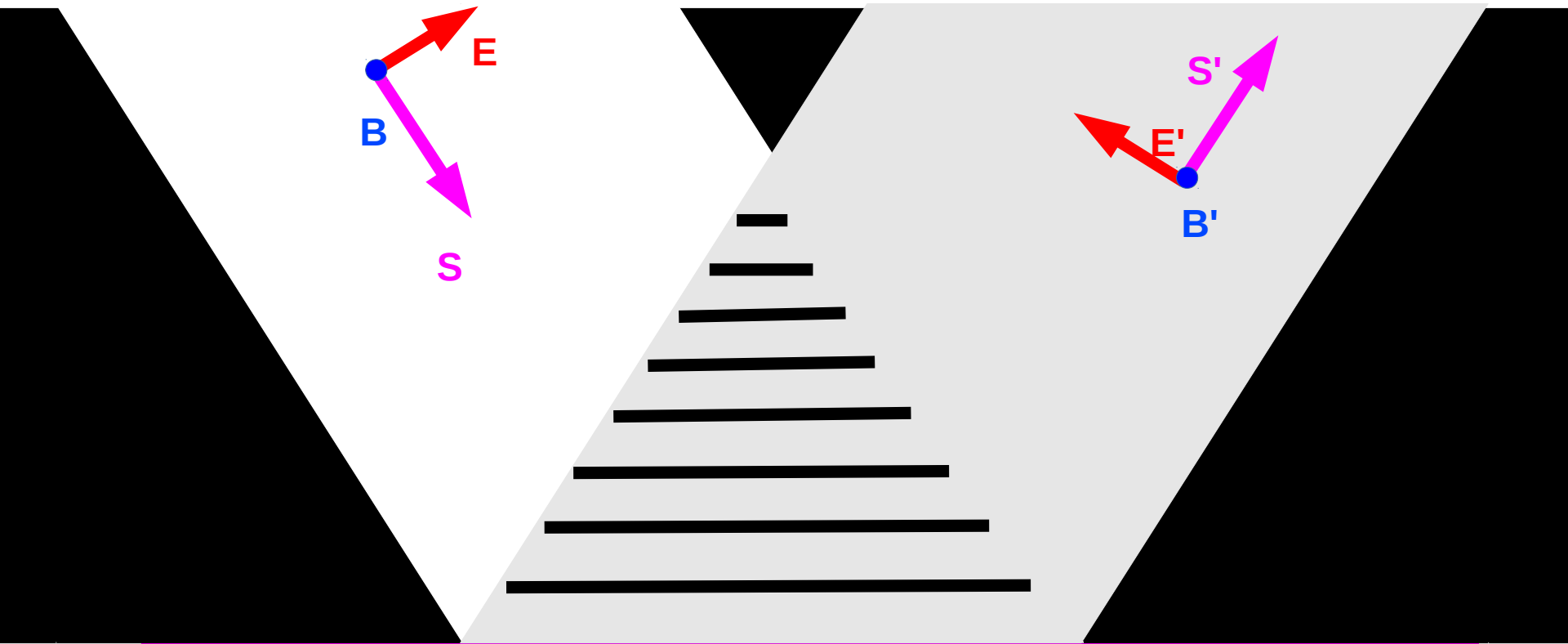


A megoldás kézenfekvő.



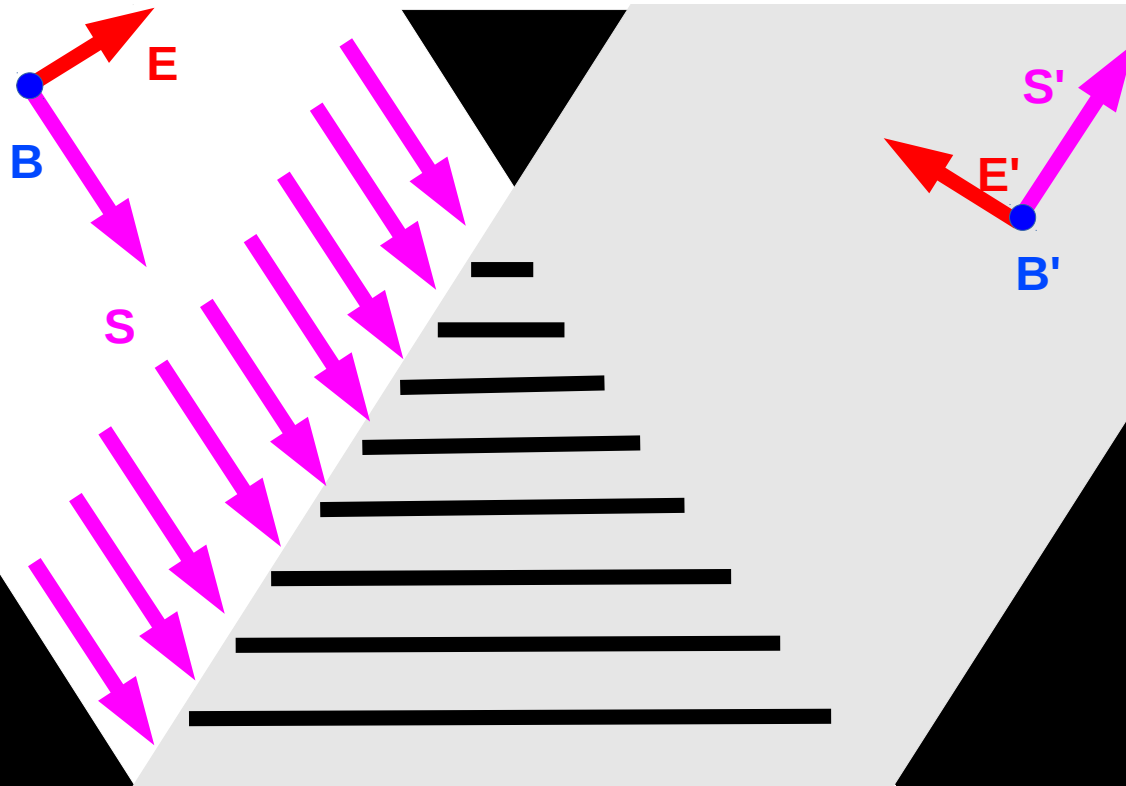
A megoldás kézenfekvő.

A „tiltott síkok” nem hogy akadályoznák az energia mozgását,



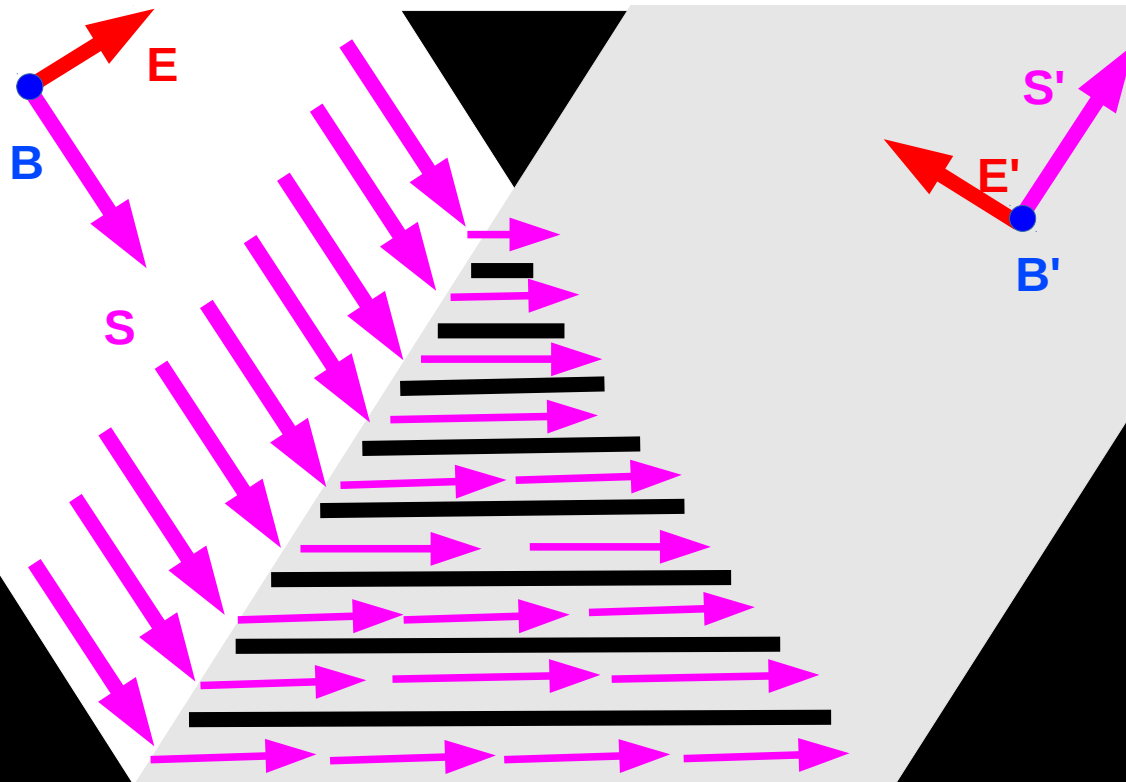
A megoldás kézenfekvő.

A „tiltott síkok” nem hogy akadályoznák az energia mozgását, hanem éppen segítenek neki, az energia a kialakított **csatornákon** át halad,



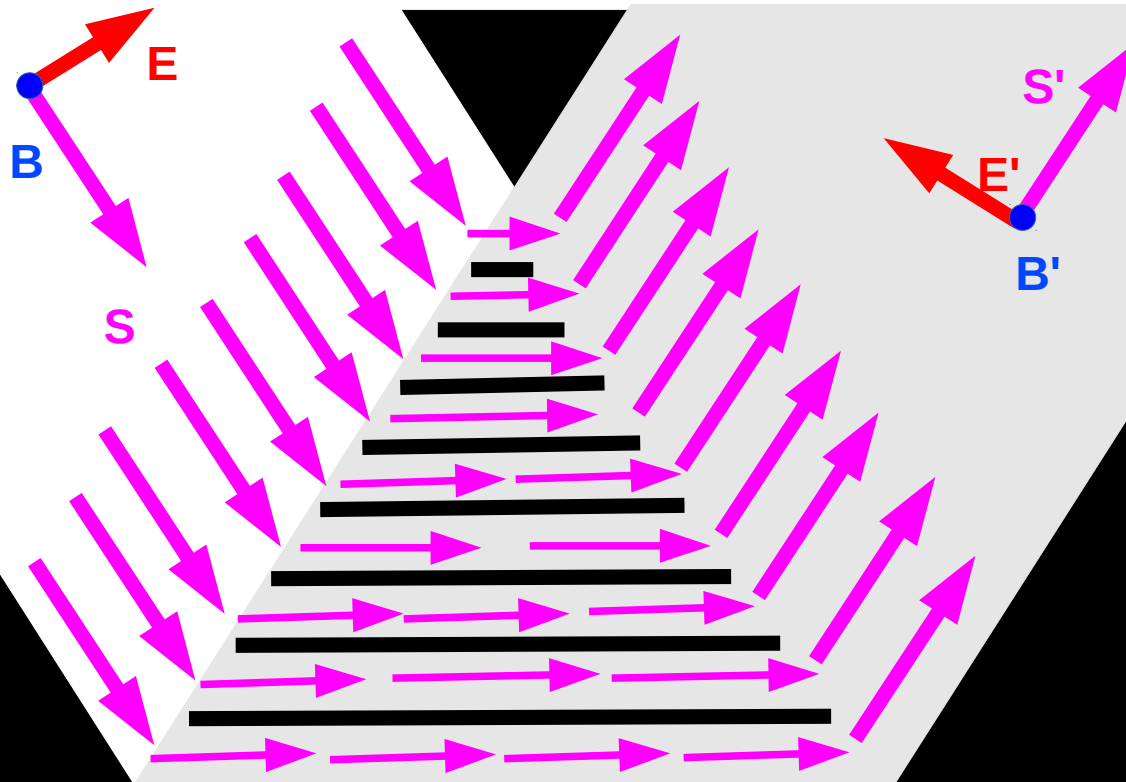
A megoldás kézenfekvő.

A „tiltott síkok” nem hogy akadályoznák az energia mozgását, hanem éppen segítenek neki, az energia a kialakított **csatornákon** át halad, és így tud irányt változtatni.



A megoldás kézenfekvő.

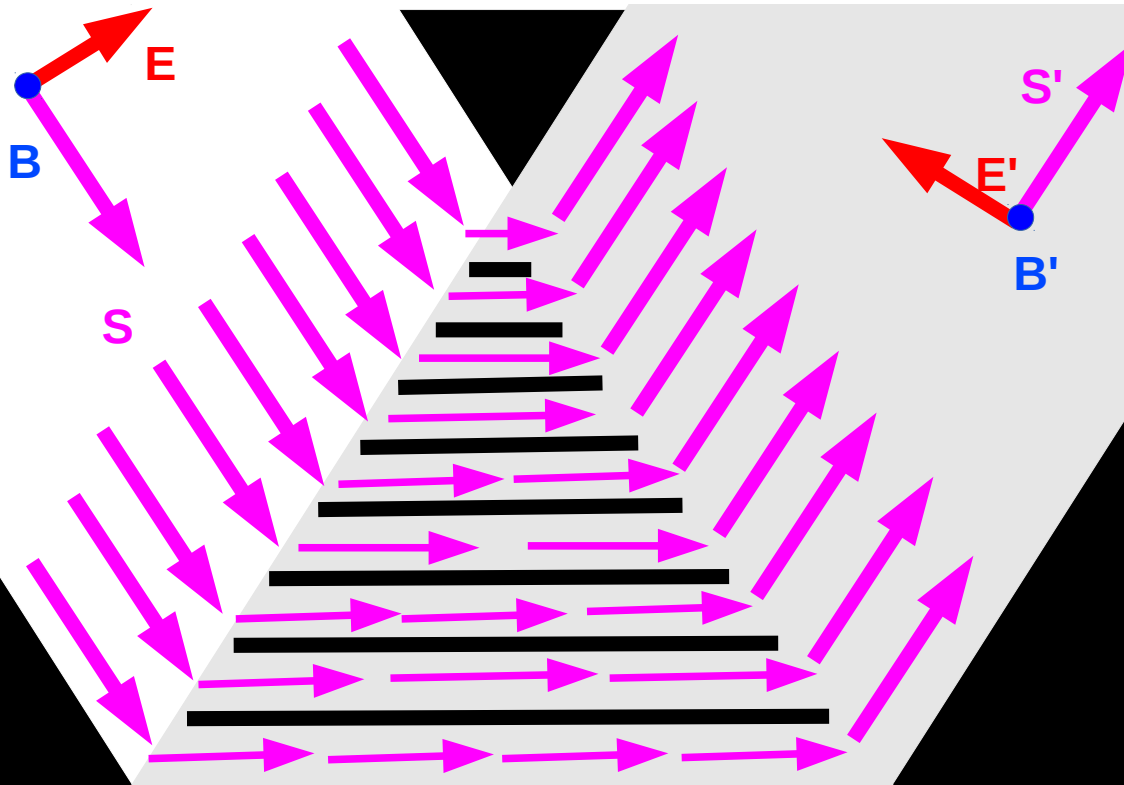
A „tiltott síkok” nem hogy akadályoznák az energia mozgását, hanem éppen segítenek neki, az energia a kialakított **csatornákon** át halad, és így tud irányt változtatni.



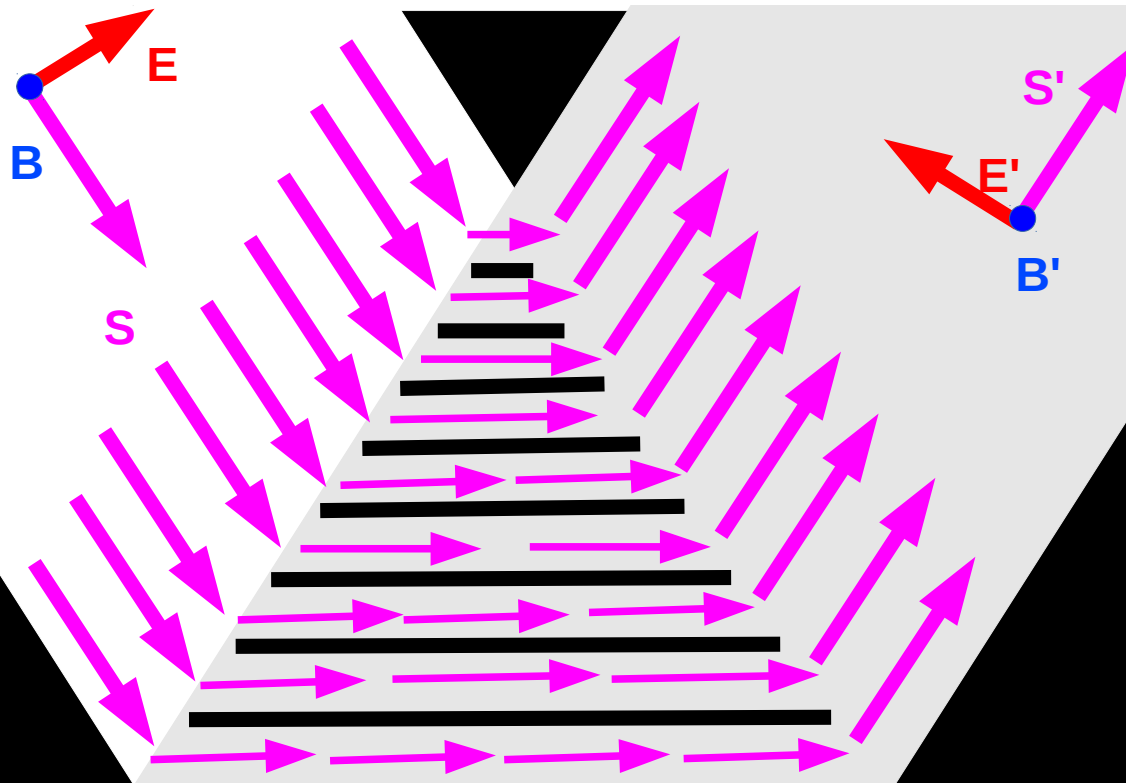
A megoldás kézenfekvő?

No de ahol energia áramlik, ott impulzus is van.
Az impulzus megváltoztatásához **erő** kell.

Milyen erő hat a fényáramra?
Kivel van az Erő?



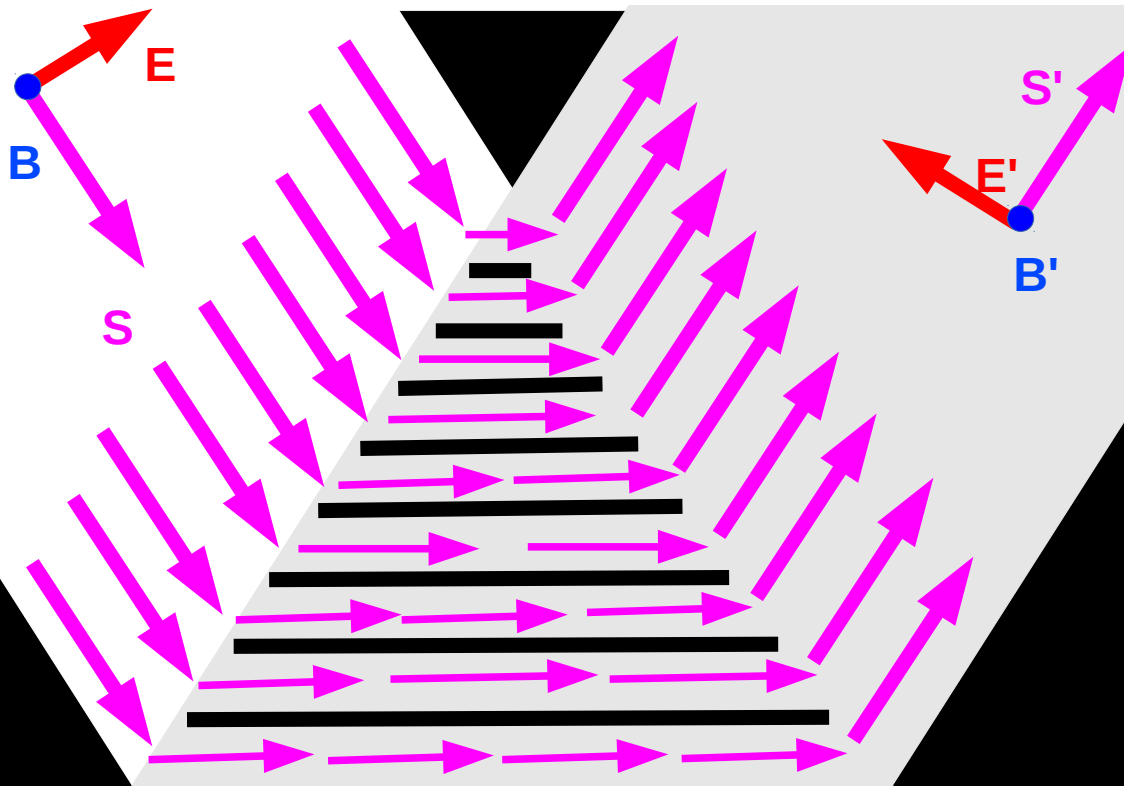
Eljutottunk a fő kérdésig:
milyen hatás, milyen erő kanyarítja be a fényanyag útját vákuumban?



Eljutottunk a fő kérdésig:
milyen hatás, milyen erő kanyarítja be a fényanyag útját vákuumban?
Nem a tükör, mert odáig el sem jut a fény...

A válasz egyszerű: **maga a fény!**

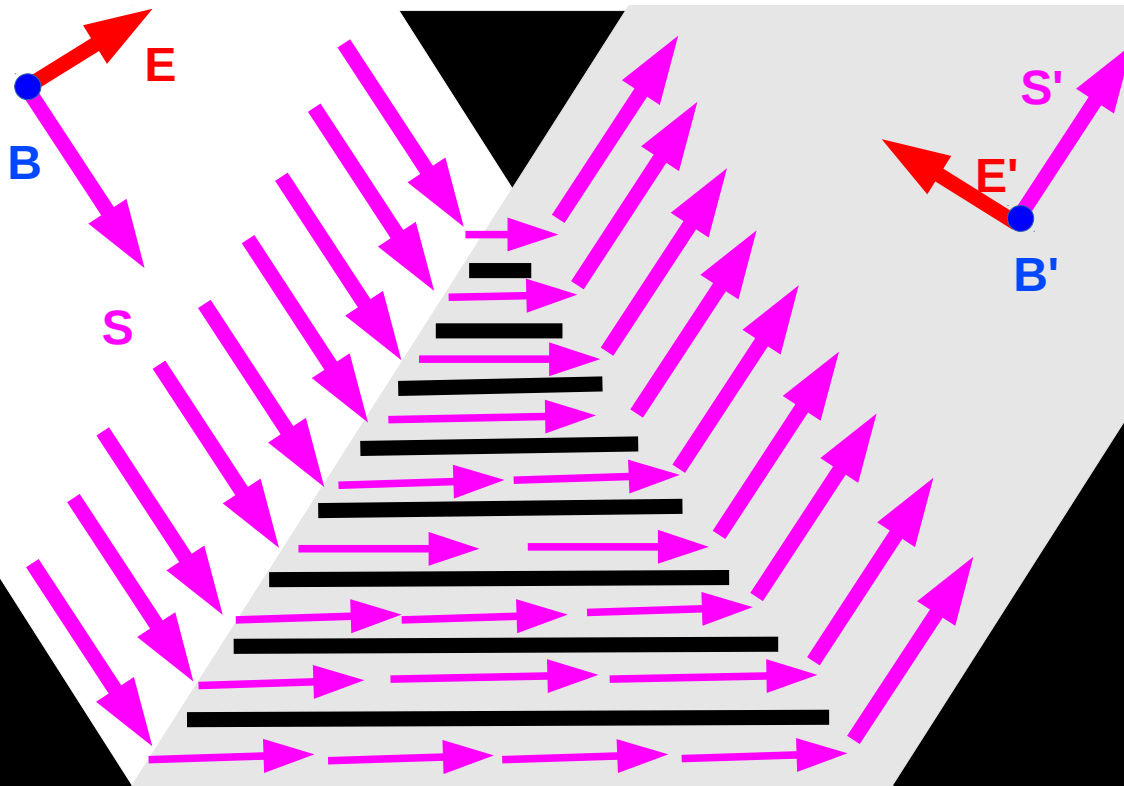
A tükör közelében kialakult elektromágneses mezőkonfiguráció gyakorol erőhatást az érkező fényanyagra



A válasz egyszerű: maga a fény!

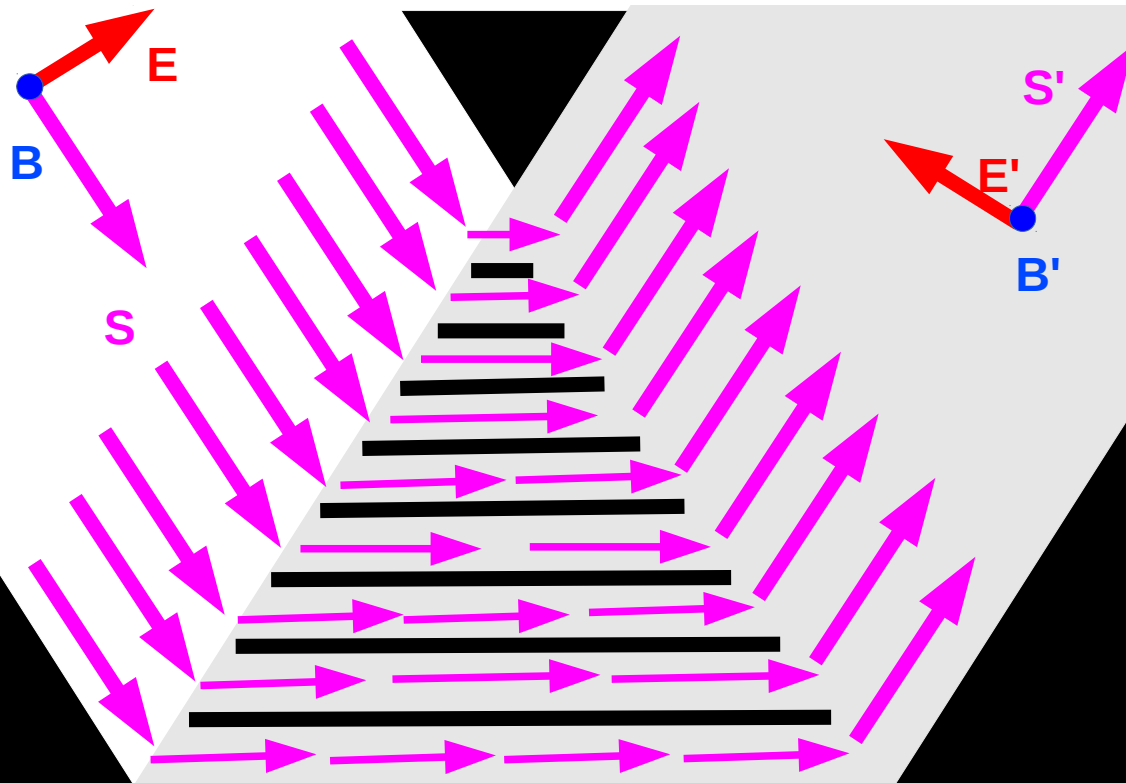
Utászelmélet: a fény bekapcsolásakor az első utász fénykatonák megépítik azokat az utakat, amiken a később érkezők mozoghatnak

De a fény mindig mozog... Vajon milyen mezők ácsorognak a tükör közelében?



A válasz egyszerű: maga a fény!

A válasz helyes, de az ördög a részletekben lakik

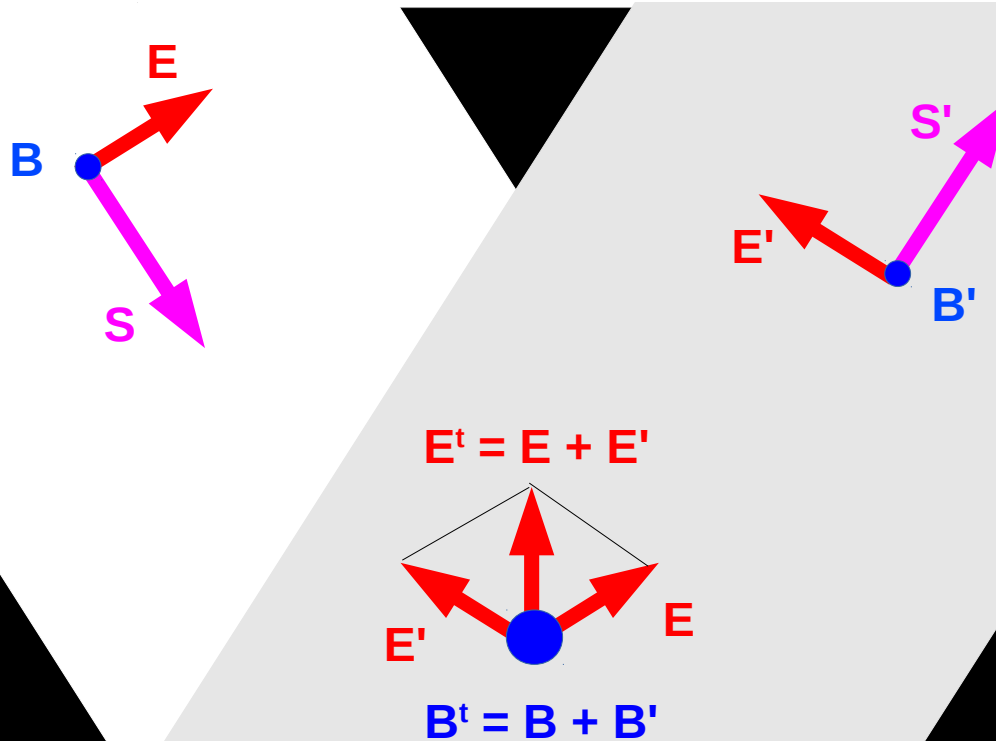


A válasz egyszerű: **maga a fény!**

A válasz helyes, de az ördög a részletekben lakik

Miért rajzoltuk egyforma nagyságúra az **E** és **E'** vektorokat?
Ezek pontról pontra és pillanatról pillanatra változnak!

Az eredő **E** vektor általában nem felfelé mutat!

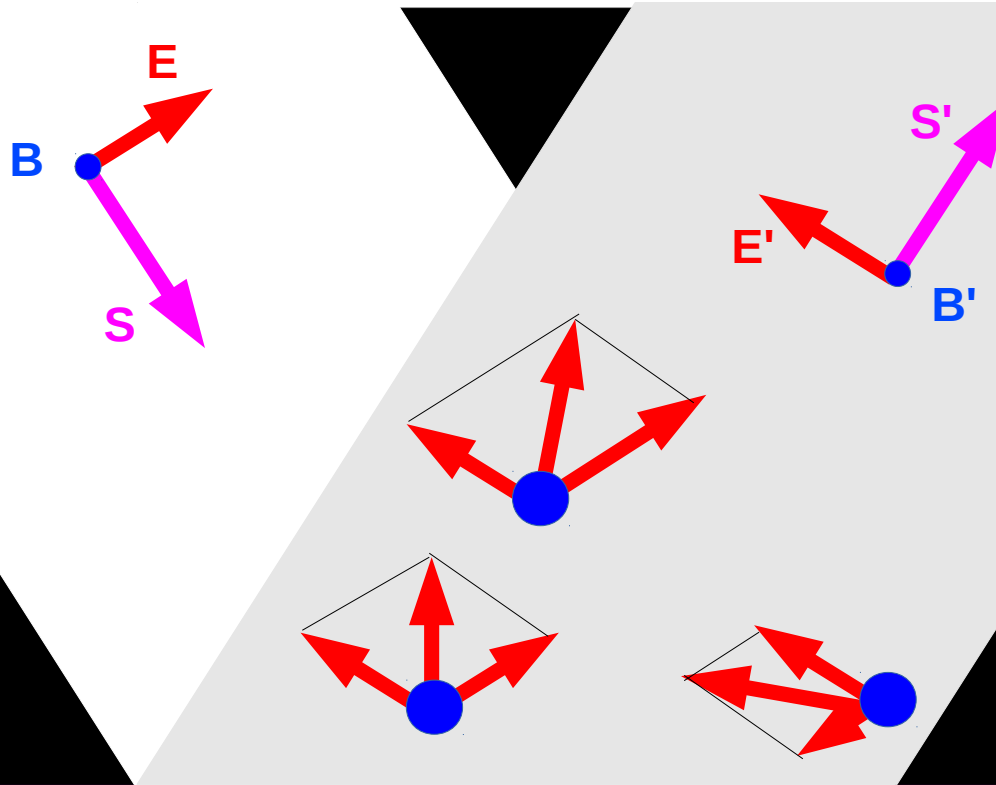


A válasz egyszerű: maga a fény!

A válasz helyes, de az ördög a részletekben lakik

Miért rajzoltuk egyforma nagyságúra az E és E' vektorokat?
Ezek pontról pontra és pillanatról pillanatra változnak!

Az eredő E vektor általában nem felfelé mutat!

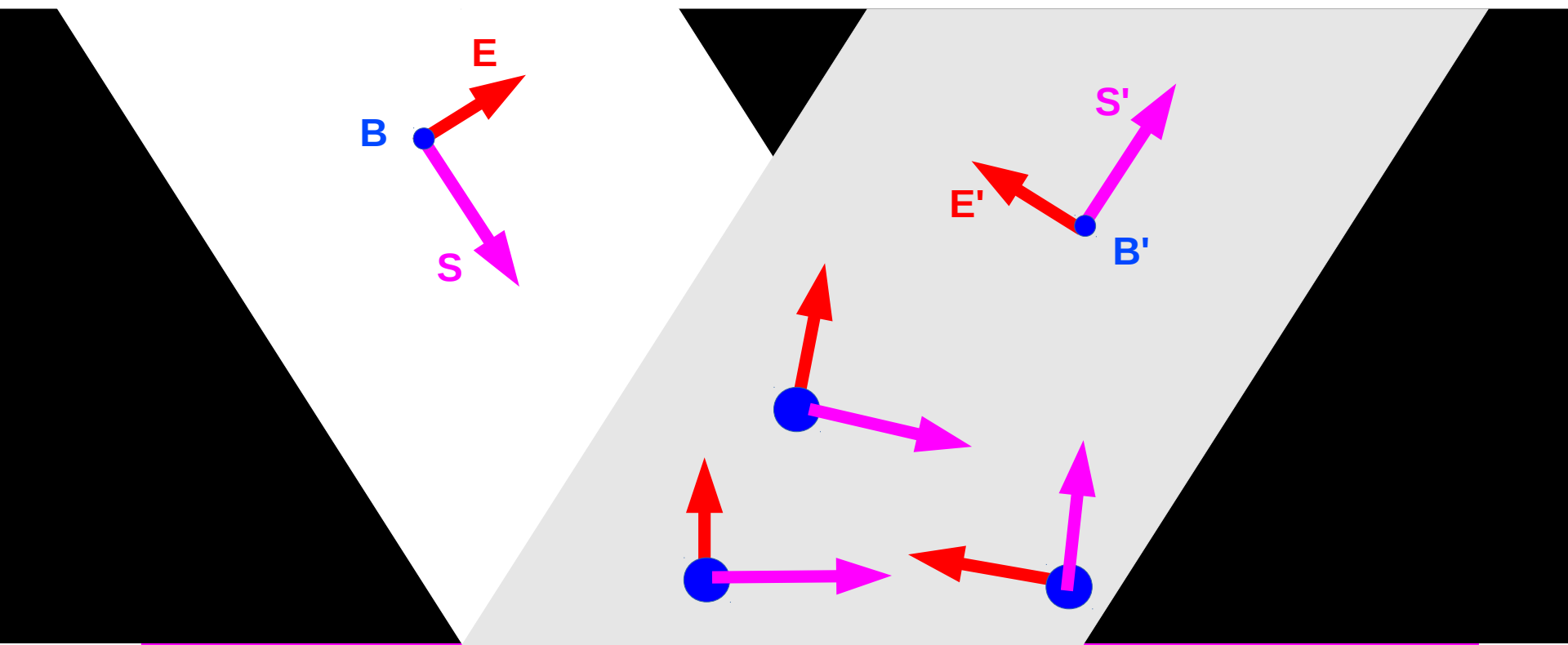


A válasz egyszerű: **maga a fény!**

A válasz helyes, de az ördög a részletekben lakik

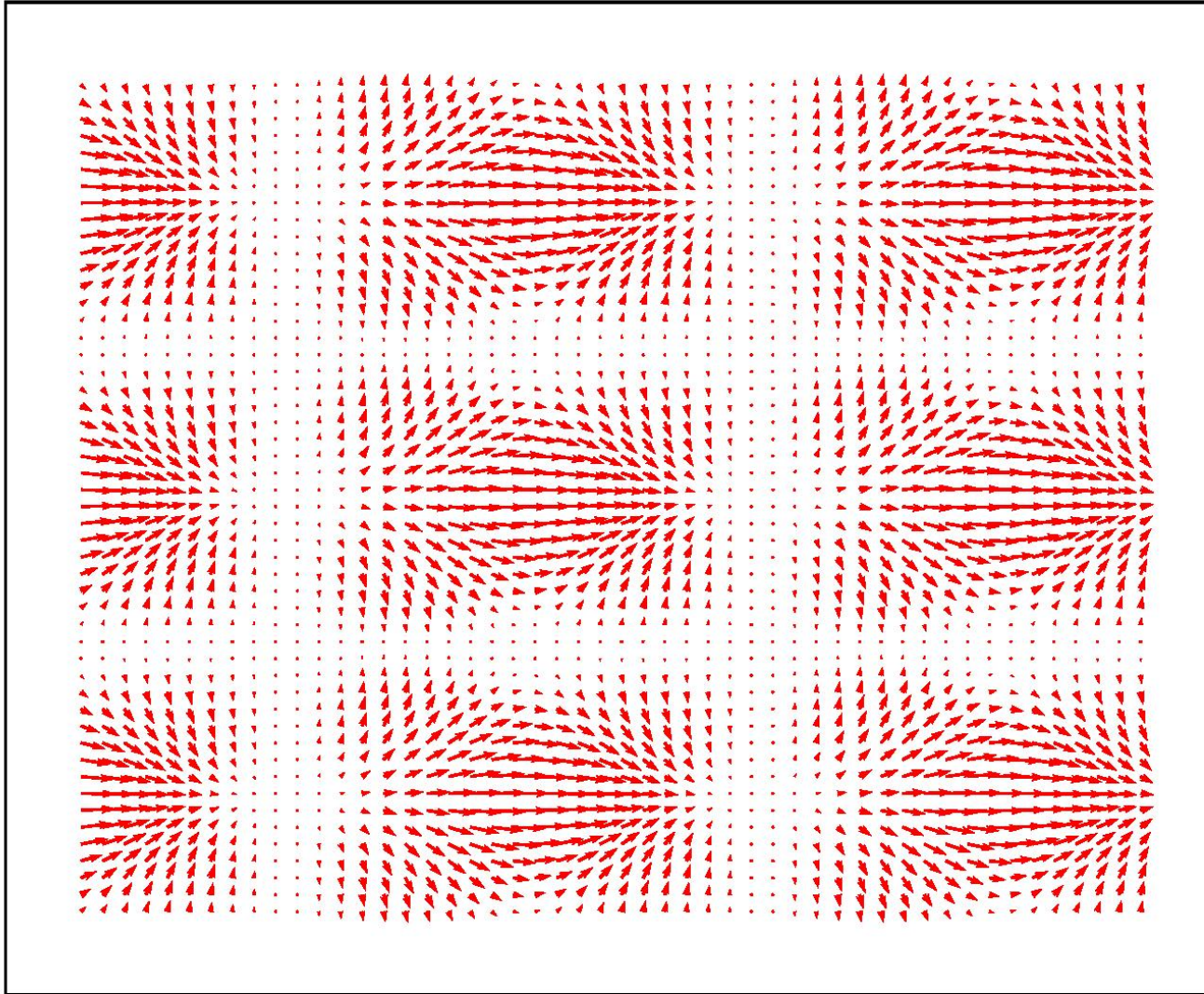
Az eredő **E** vektor általában nem felfelé mutat!

Ezért az eredő **S** sem tisztán jobbra mutat, hanem ingadozik



A válasz helyes, de az ördög a **részletekben** lakik

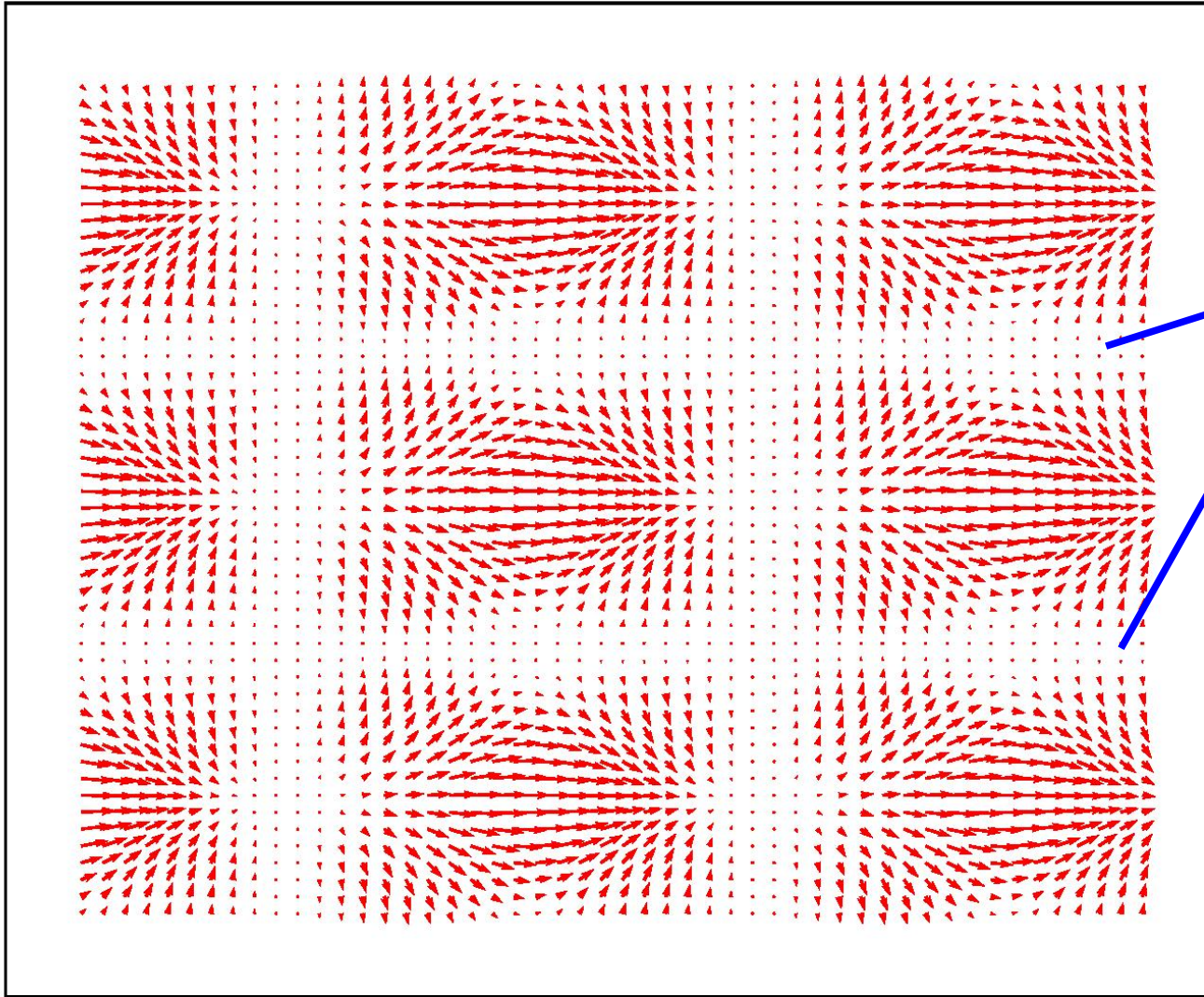
Íme a részletek, Python programmal ábrázolva – köszönet Cserti Józsefnek!



ez egy piciny részlet
a **Poynting-vektorok**
eloszlásából

A válasz helyes, de az ördög a **részletekben** lakik

Íme a részletek, Python programmal ábrázolva – köszönet Cserti Józsefnek!



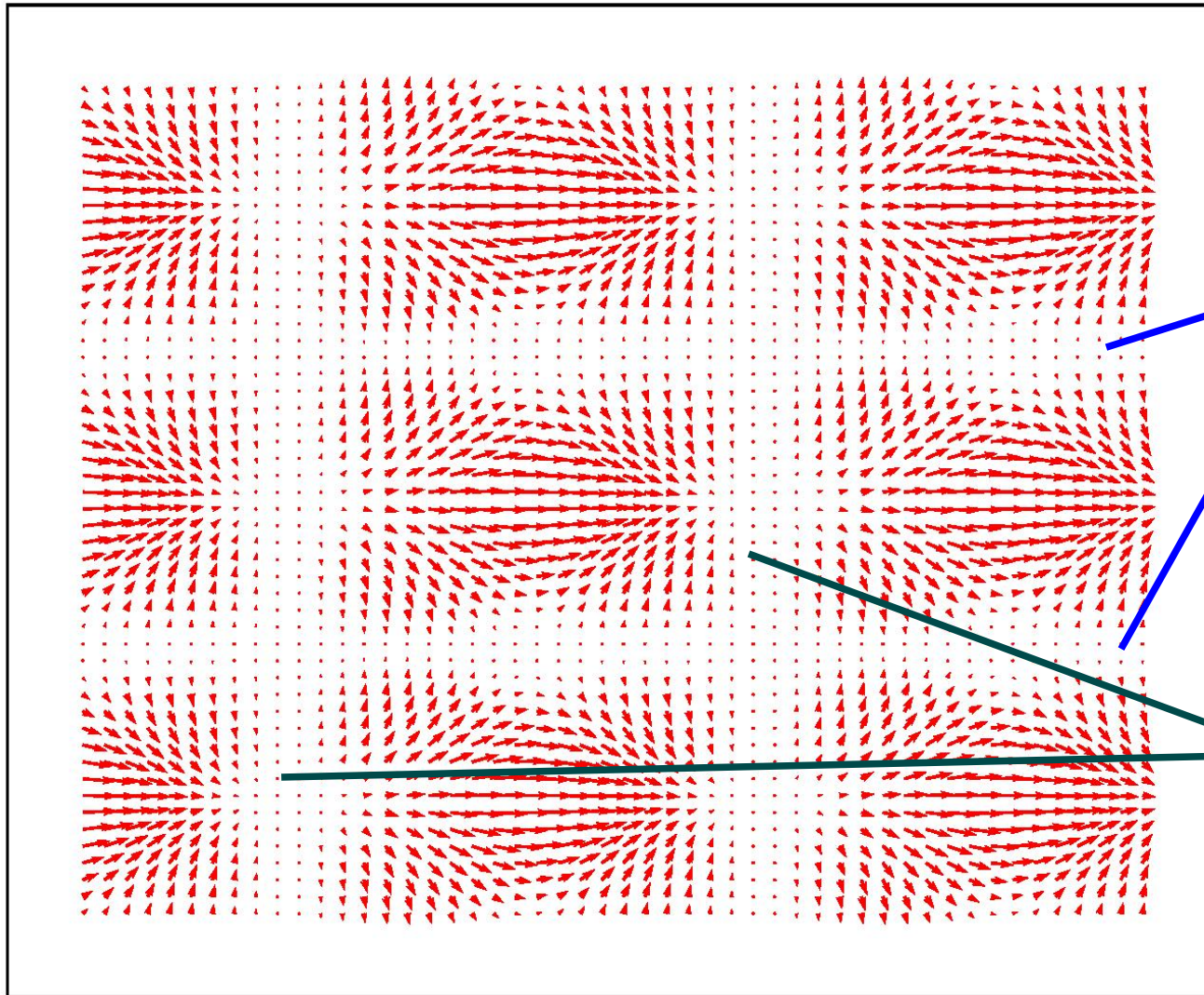
ez egy piciny részlet
a **Poynting-vektorok**
eloszlásából

a tiltott síkok

tartósan
energiaáram-mentes
tartományok

A válasz helyes, de az ördög a **részletekben** lakik

Íme a részletek, Python programmal ábrázolva – köszönet Cserti Józsefnek!



ez egy piciny részlet
a **Poynting-vektorok**
eloszlásából

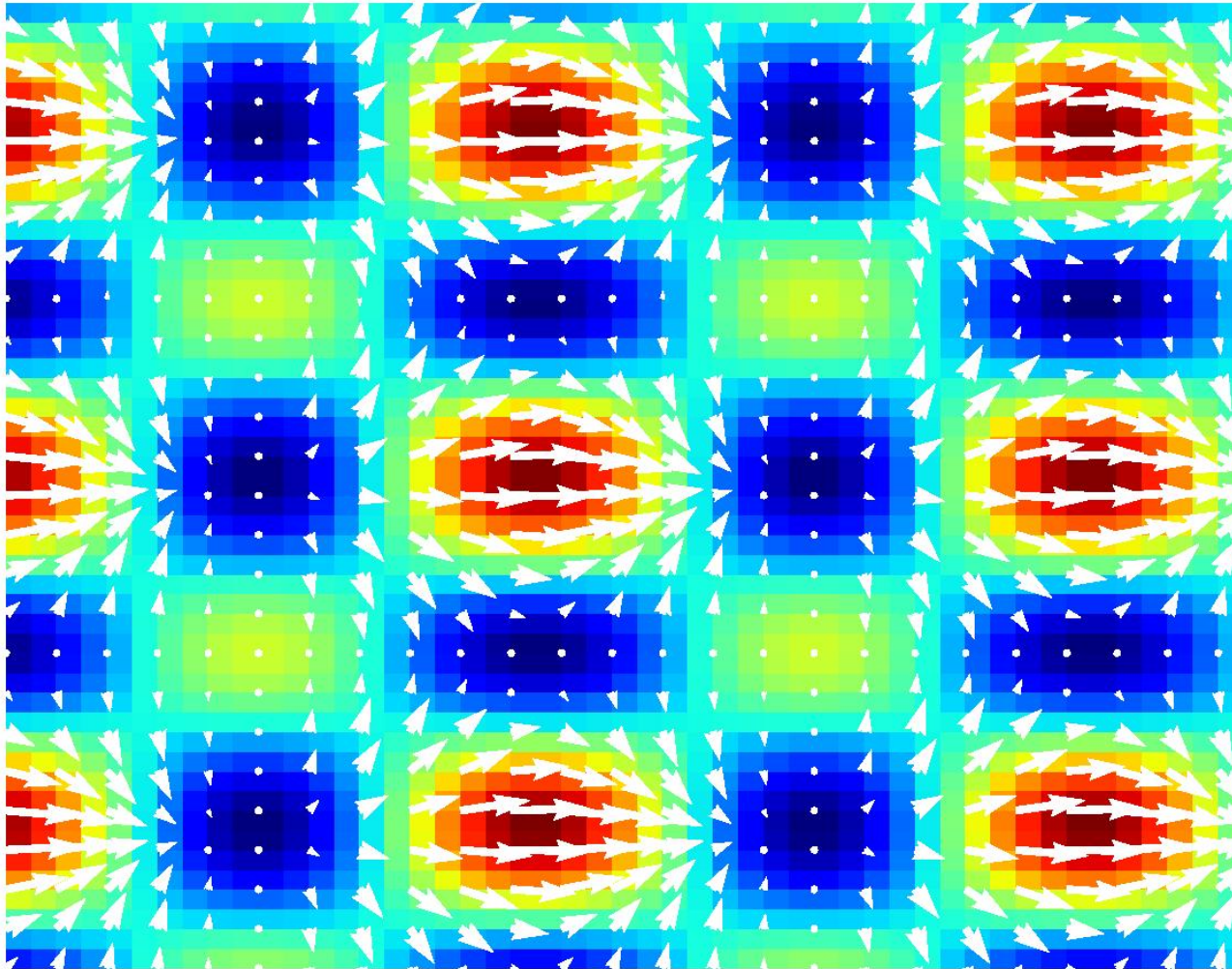
a tiltott síkok

tartósan
energiaáram-mentes
tartományok

hát ezek a sávok
micsodák?

ezek a mozgó
vonatperonok!

Íme a részletek, Python programmal ábrázolva – köszönet Cserti Józsefnek!

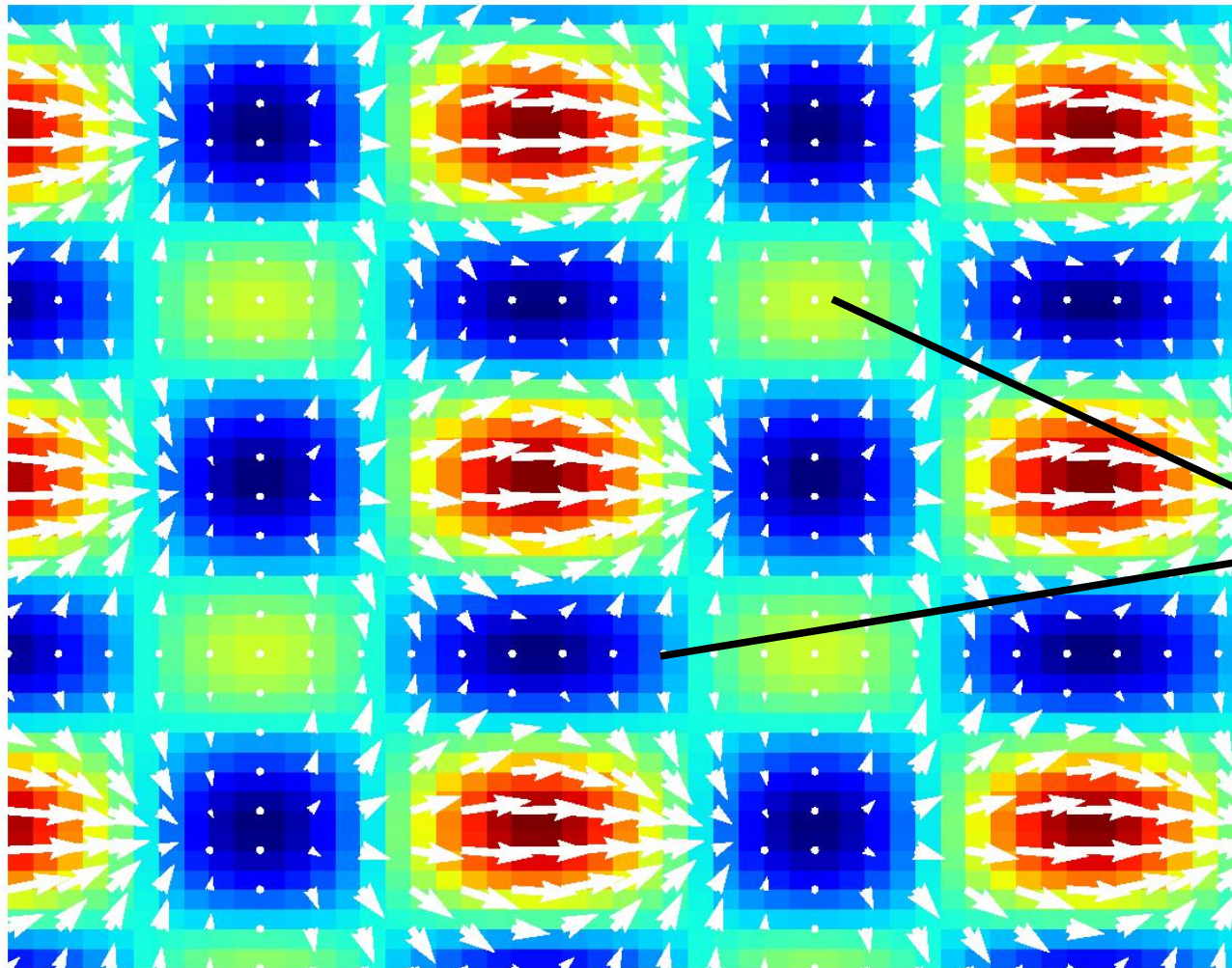


a színek a w
energiasűrűséget
ábrázolják

sötétkék a kicsi,
bordó a nagy sűrűség

a fehér nyilak a
Poynting-vektorokat
mutatják

Íme a részletek, Python programmal ábrázolva – köszönet Cserti Józsefnek!



a színek a w
energiasűrűséget
ábrázolják

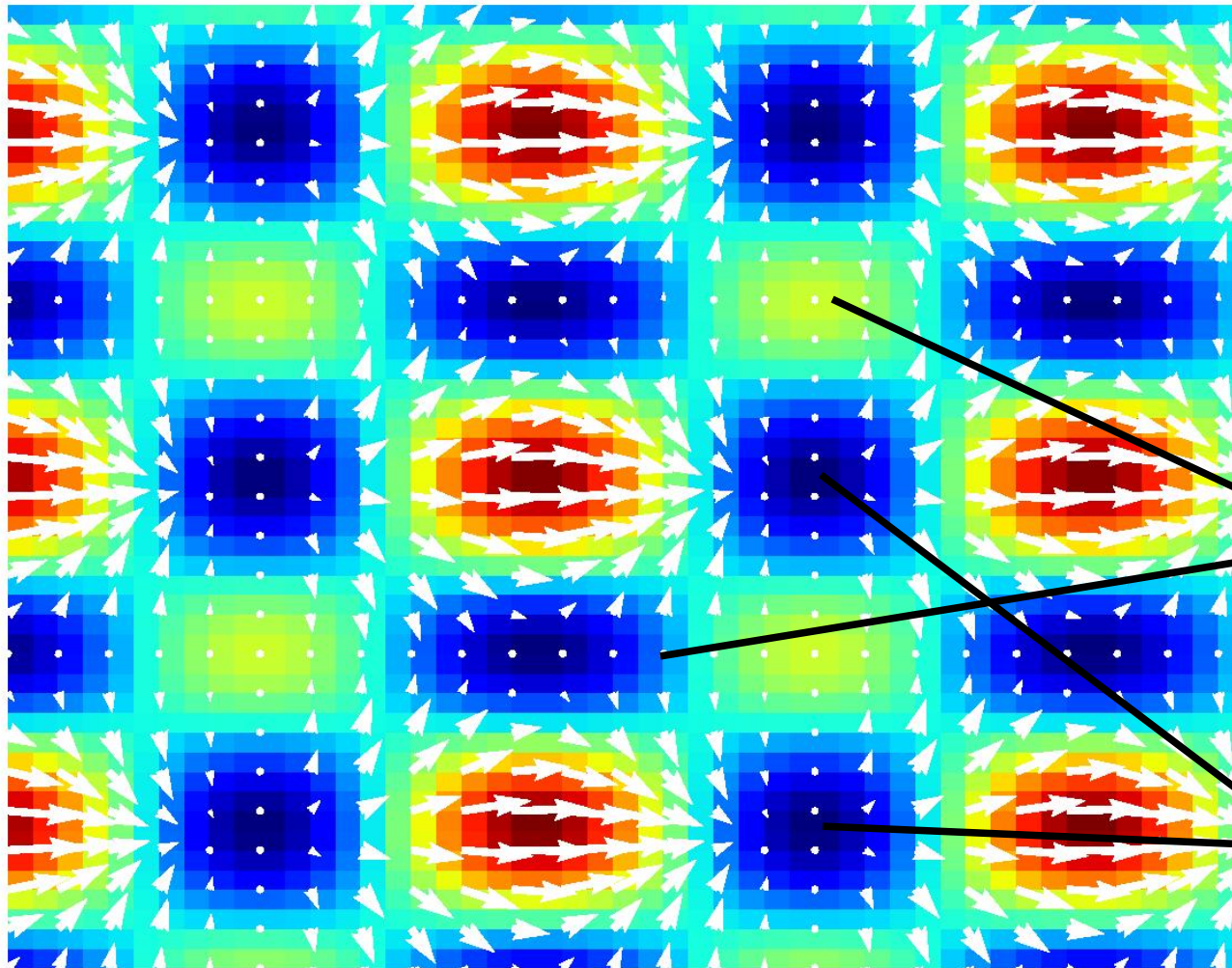
sötétkék a kicsi,
bordó a nagy sűrűség

a fehér nyilak a
Poynting-vektorokat
mutatják

a tiltott síkok

itt az S vektor nulla,
de a w
energiasűrűség nem!

Íme a részletek, Python programmal ábrázolva – köszönet Cserti Józsefnek!



a színek a w
energiasűrűséget
ábrázolják

sötétkék a kicsi,
bordó a nagy sűrűség

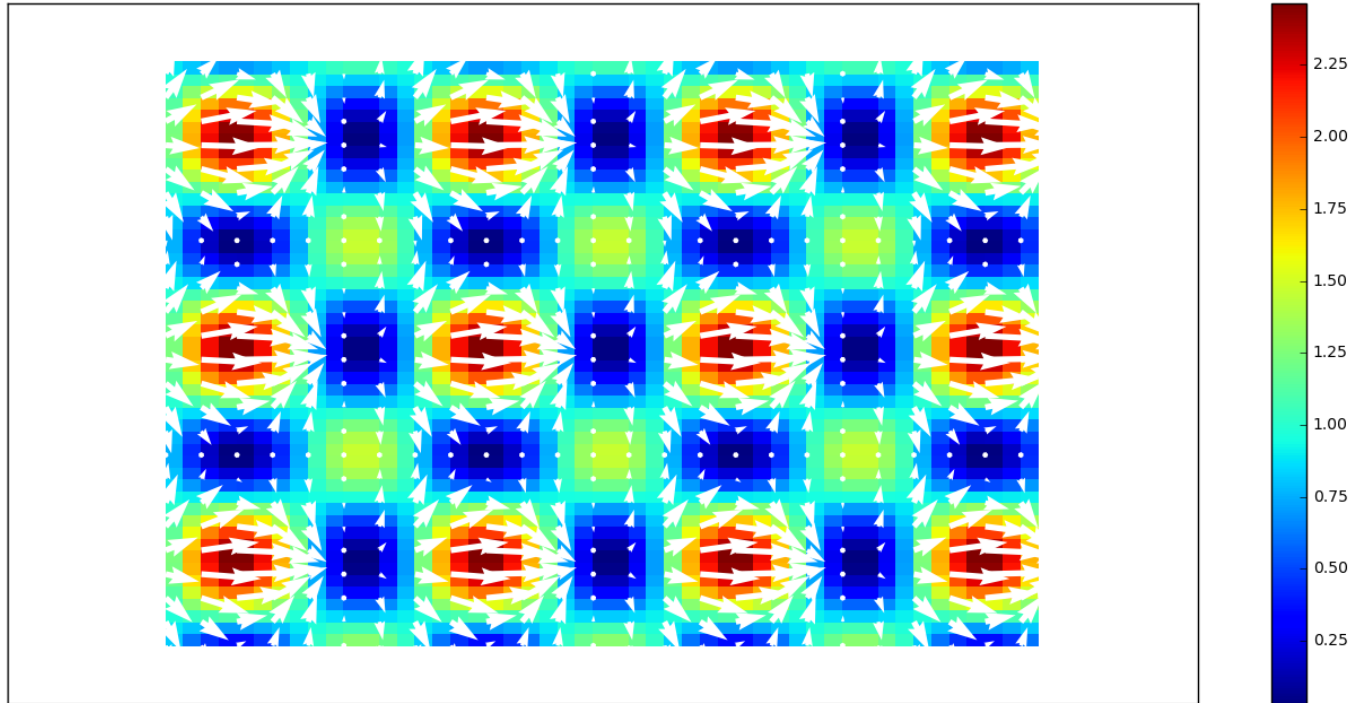
a fehér nyilak a
Poynting-vektorokat
mutatják

a tiltott síkok

itt az S vektor nulla,
de a w
energiasűrűség nem!

mozgó vonatperon

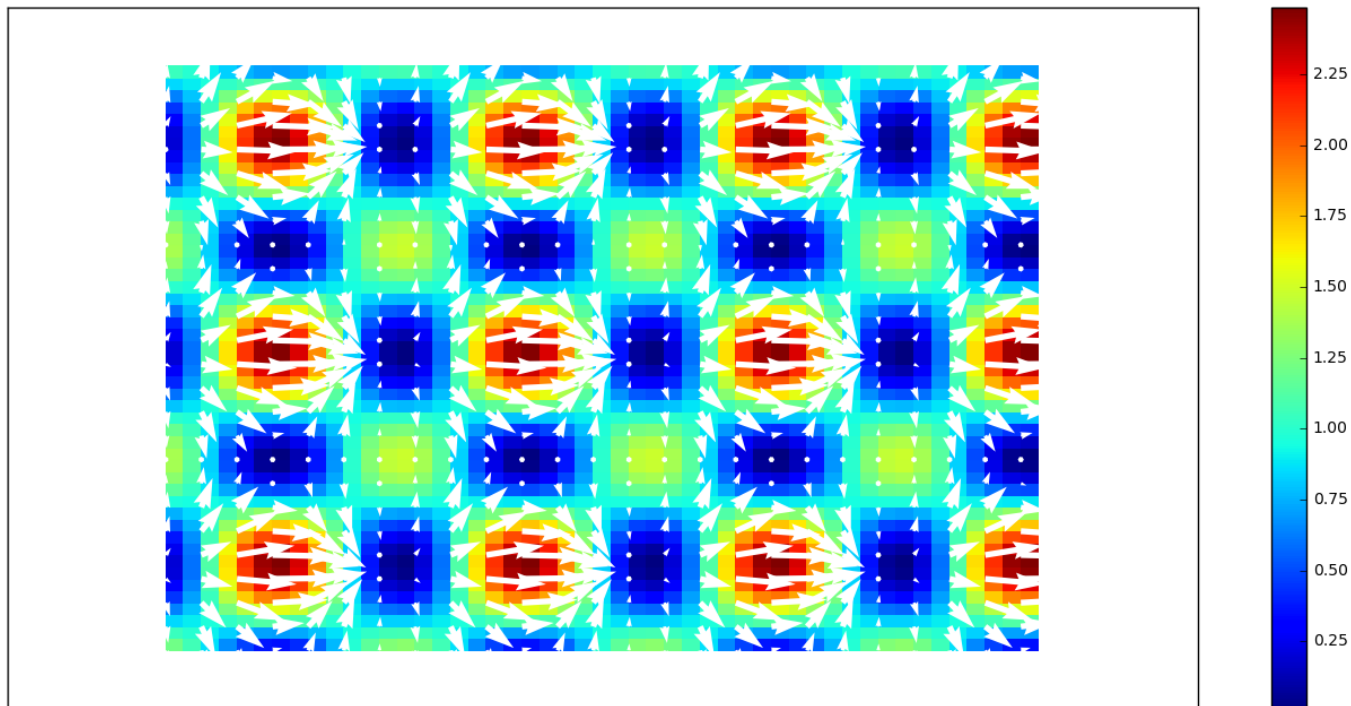
itt S és w is nulla



Az energiasűrűség és a Poynting-mező időbeli változása

Némi hullámtan + középiskolás trigonometria

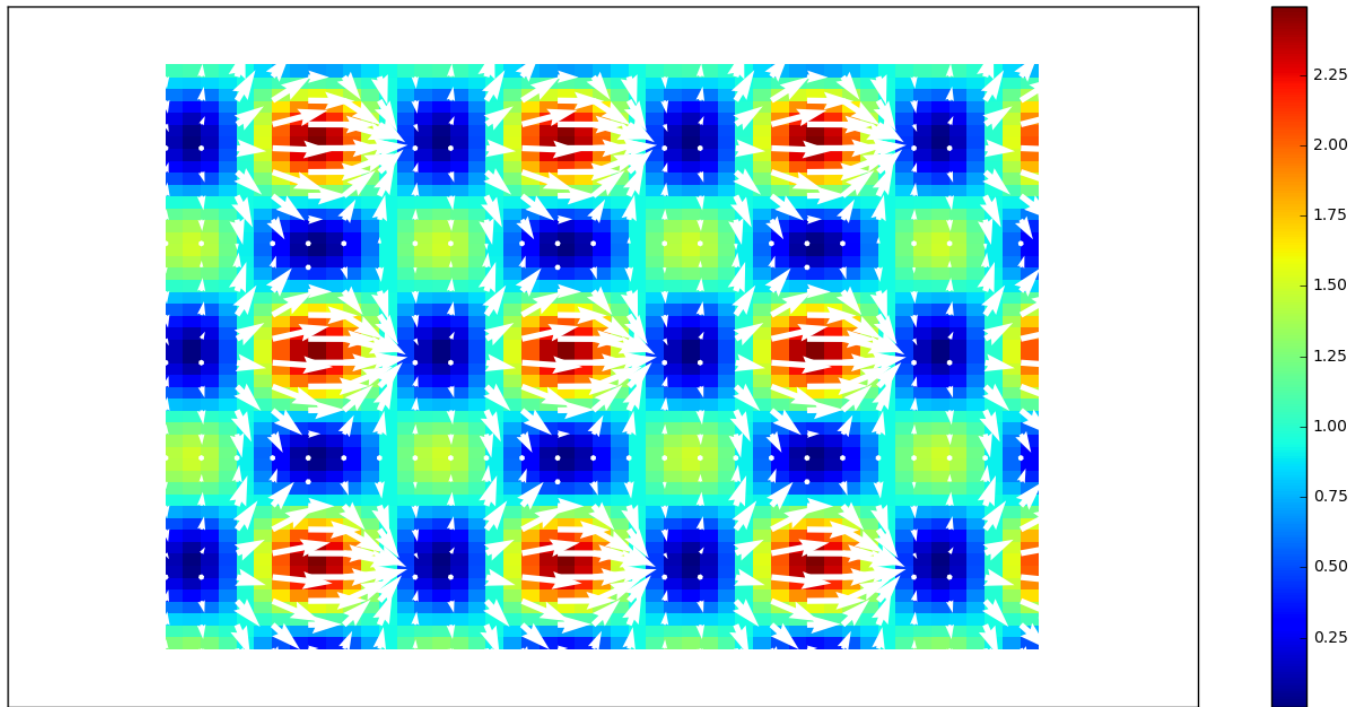
A megjelenítésért köszönet Cserti Józsefnek.



Az energiasűrűség és a Poynting-mező időbeli változása

Némi hullámtan + középiskolás trigonometria

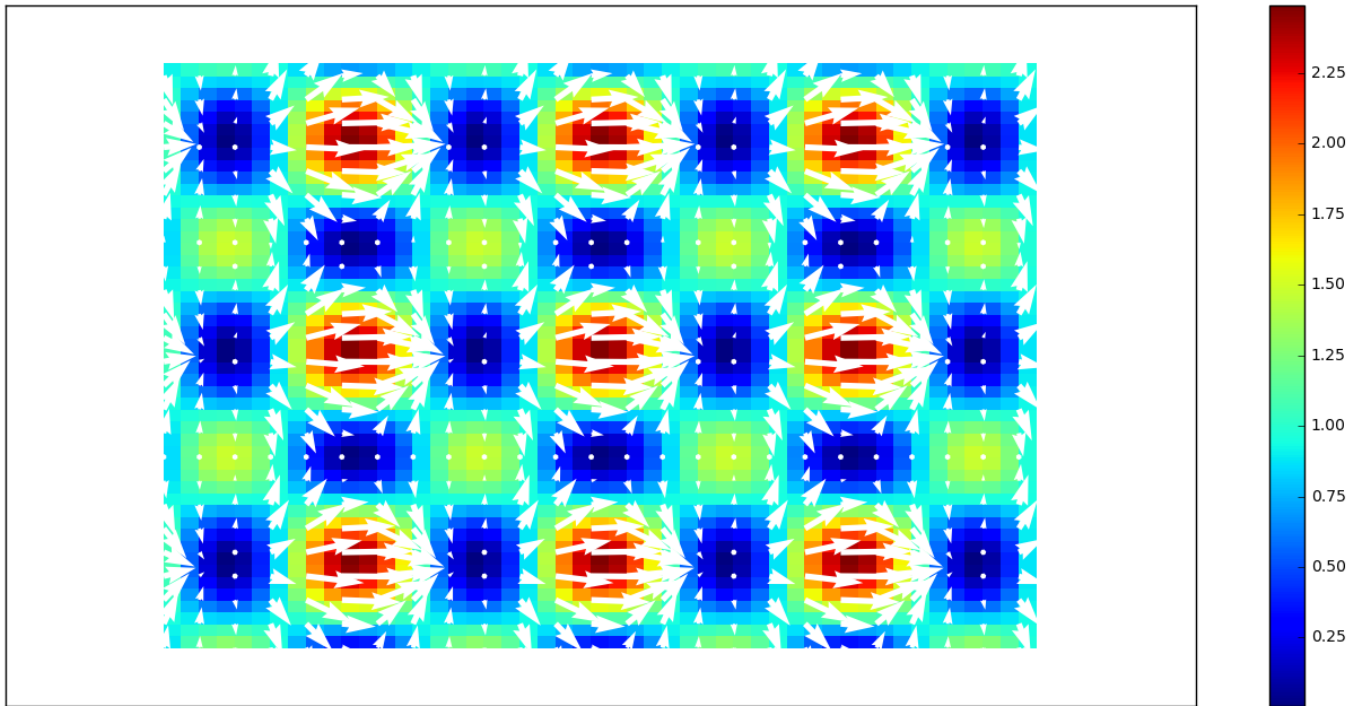
A megjelenítésért köszönet Cserti Józsefnek.



Az energiasűrűség és a Poynting-mező időbeli változása

Némi hullámtan + középiskolás trigonometria

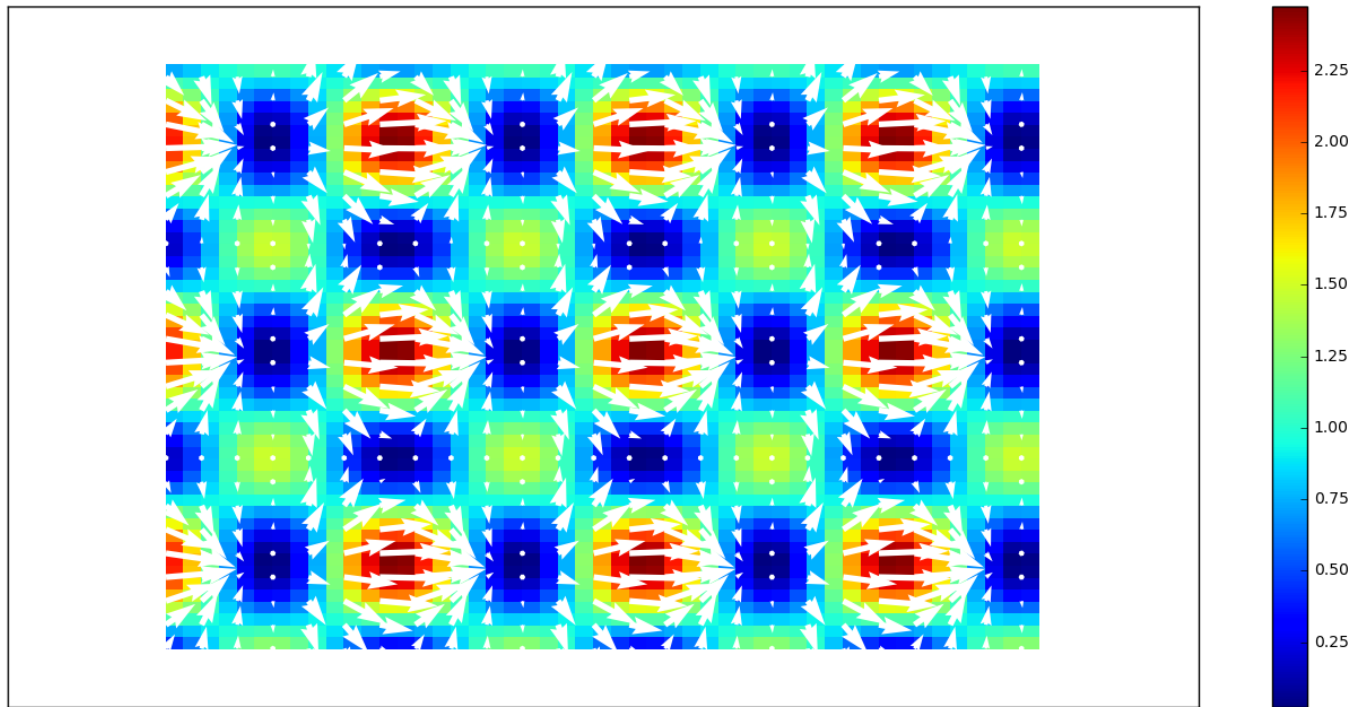
A megjelenítésért köszönet Cserti Józsefnek.



Az energiasűrűség és a Poynting-mező időbeli változása

Némi hullámtan + középiskolás trigonometria

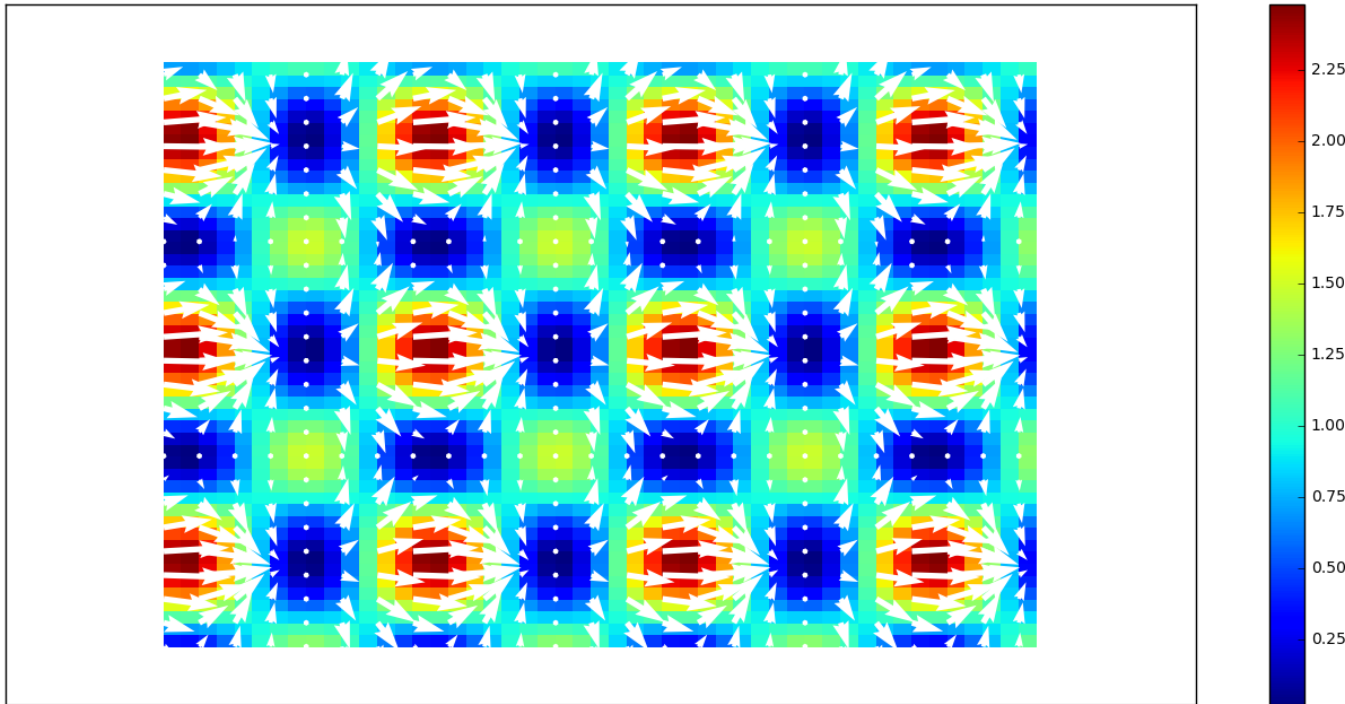
A megjelenítésért köszönet Cserti Józsefnek.



Az energiasűrűség és a Poynting-mező időbeli változása

Némi hullámtan + középiskolás trigonometria

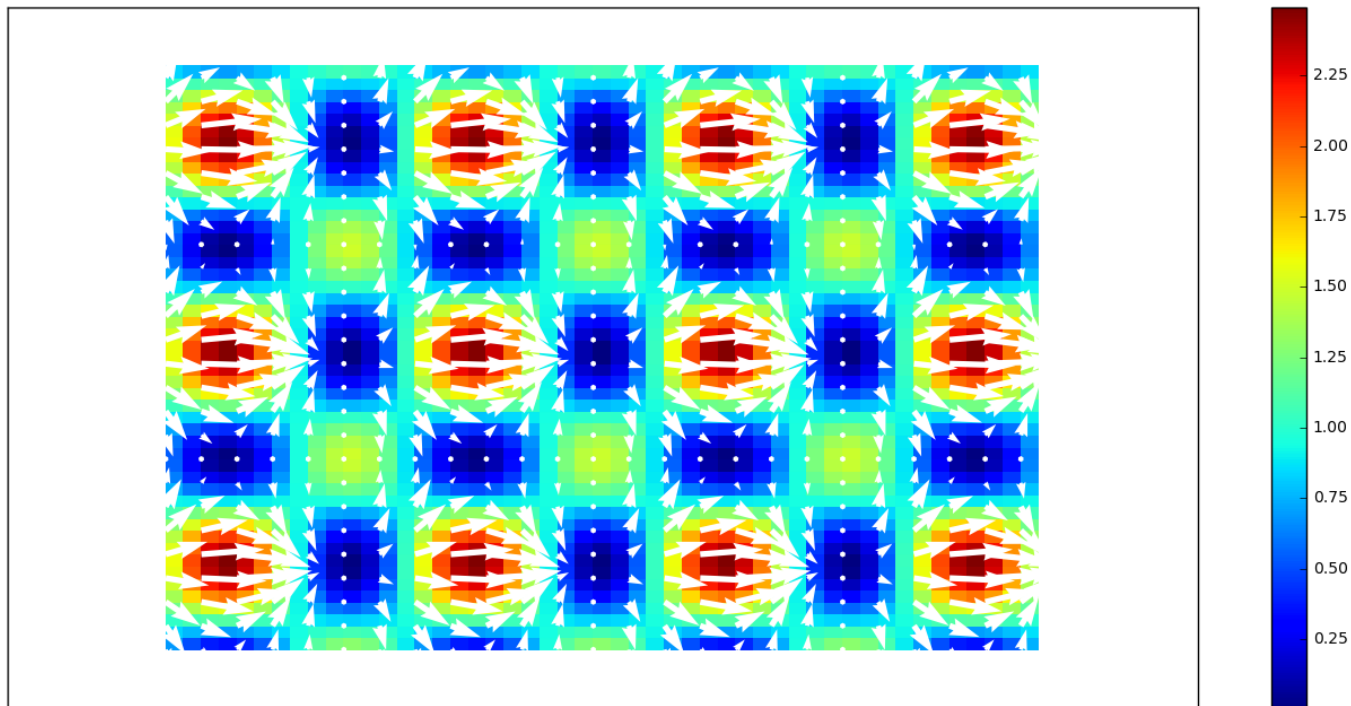
A megjelenítésért köszönet Cserti Józsefnek.



Az energiasűrűség és a Poynting-mező időbeli változása

Némi hullámtan + középiskolás trigonometria

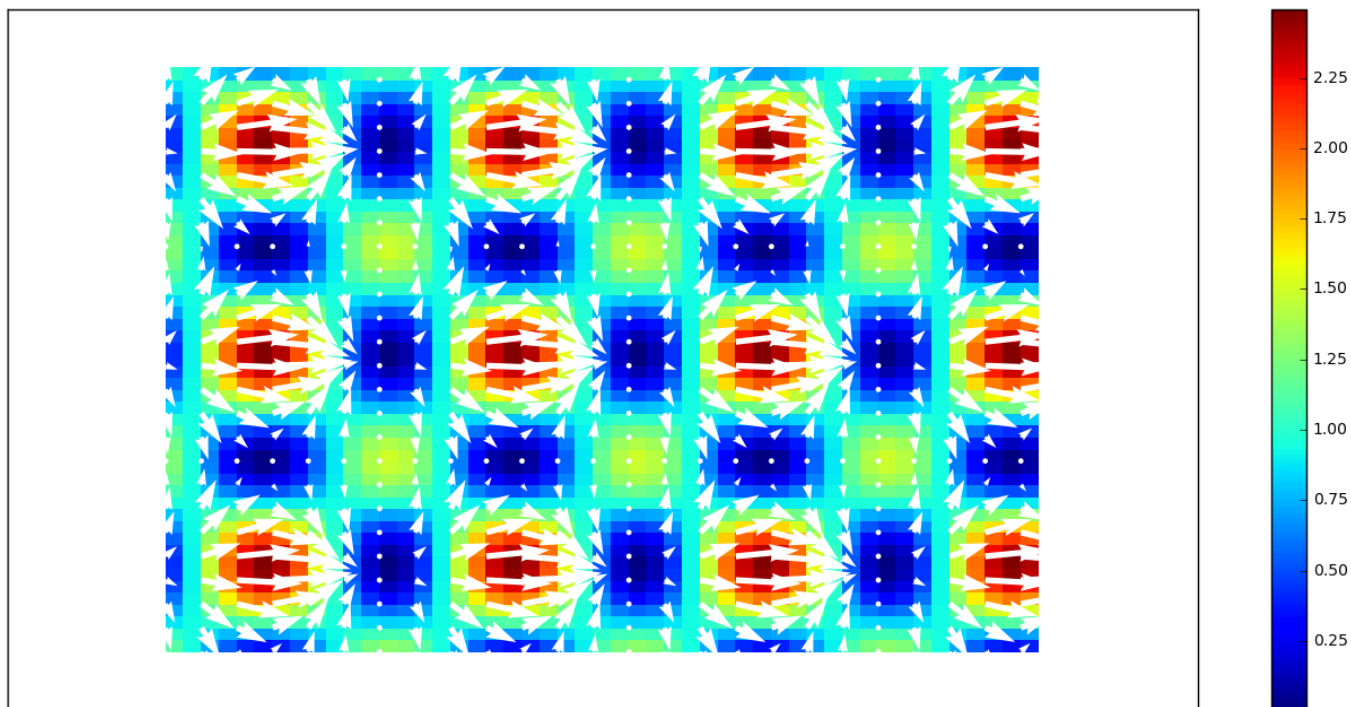
A megjelenítésért köszönet Cserti Józsefnek.



Az energiasűrűség és a Poynting-mező időbeli változása

Némi hullámtan + középiskolás trigonometria

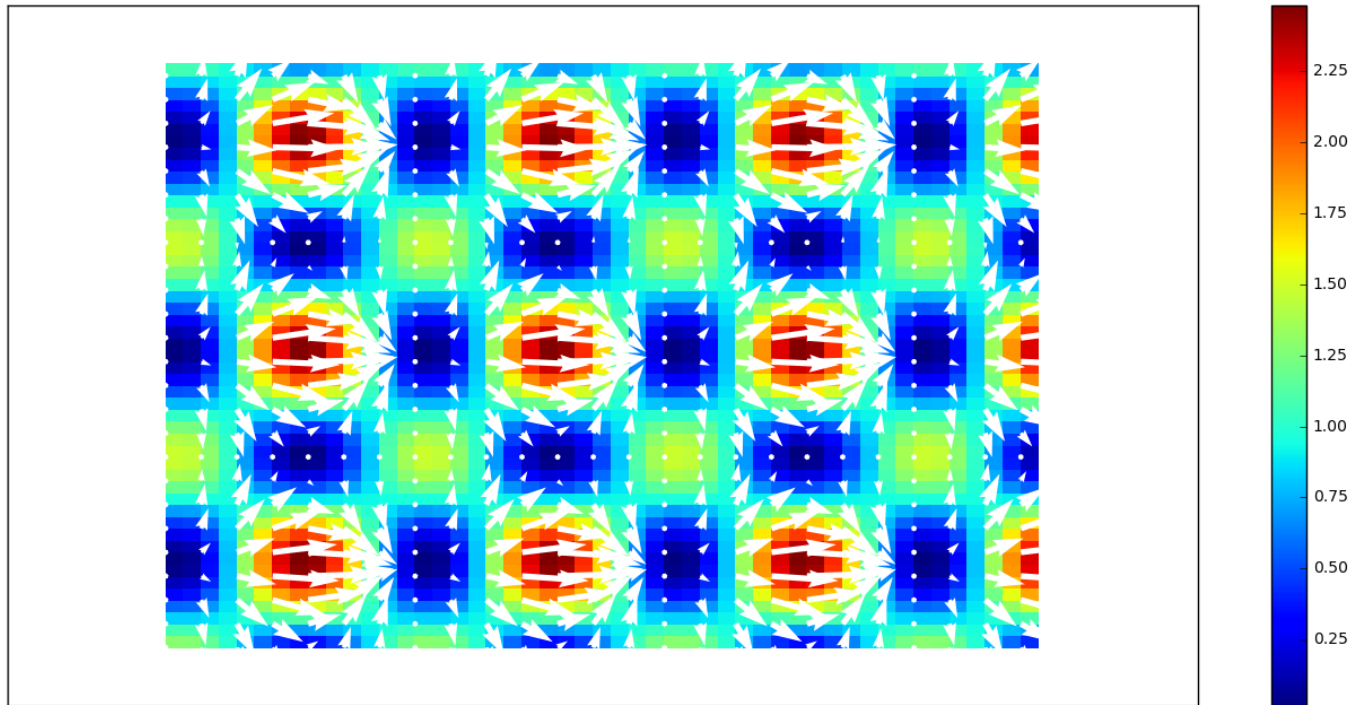
A megjelenítésért köszönet Cserti Józsefnek.



Az energiasűrűség és a Poynting-mező időbeli változása

Némi hullámtan + középiskolás trigonometria

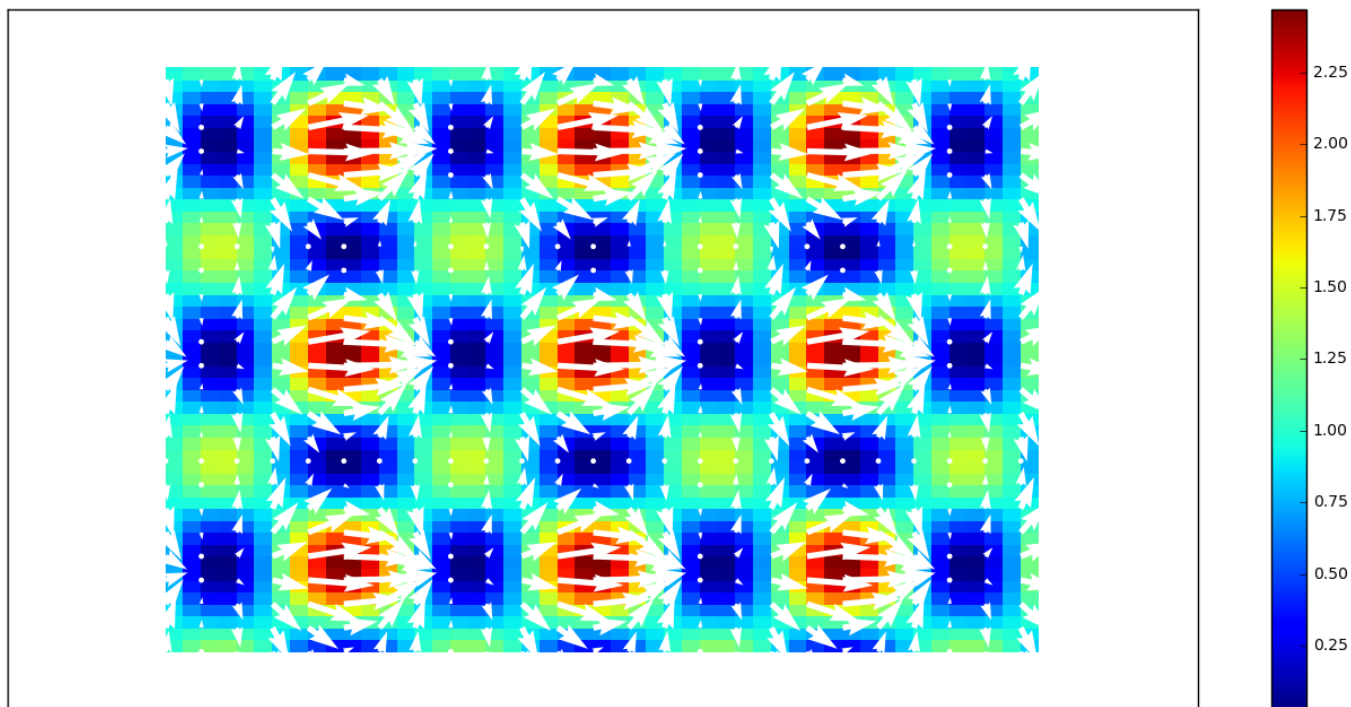
A megjelenítésért köszönet Cserti Józsefnek.



Az energiasűrűség és a Poynting-mező időbeli változása

Némi hullámtan + középiskolás trigonometria

A megjelenítésért köszönet Cserti Józsefnek.



Az energiasűrűség és a Poynting-mező időbeli változása

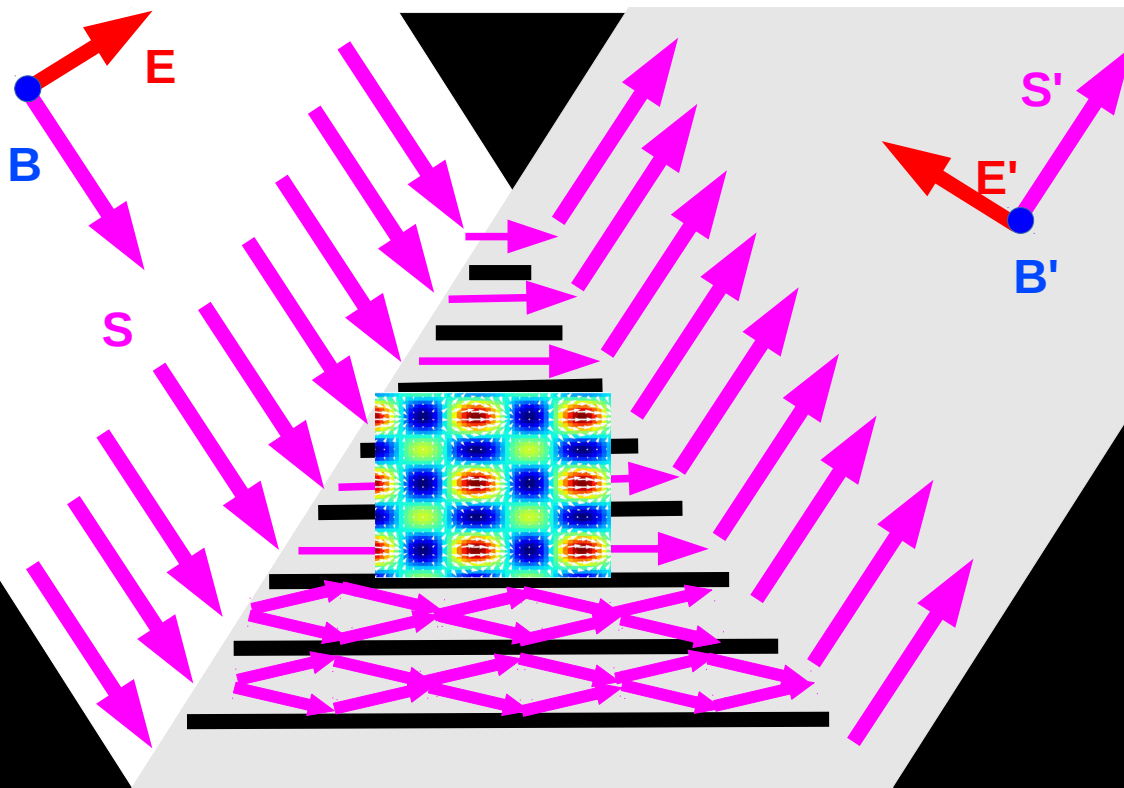
Némi hullámtan + középiskolás trigonometria

A megjelenítésért köszönet Cserti Józsefnek.

A válasz egyszerű: maga a fény!

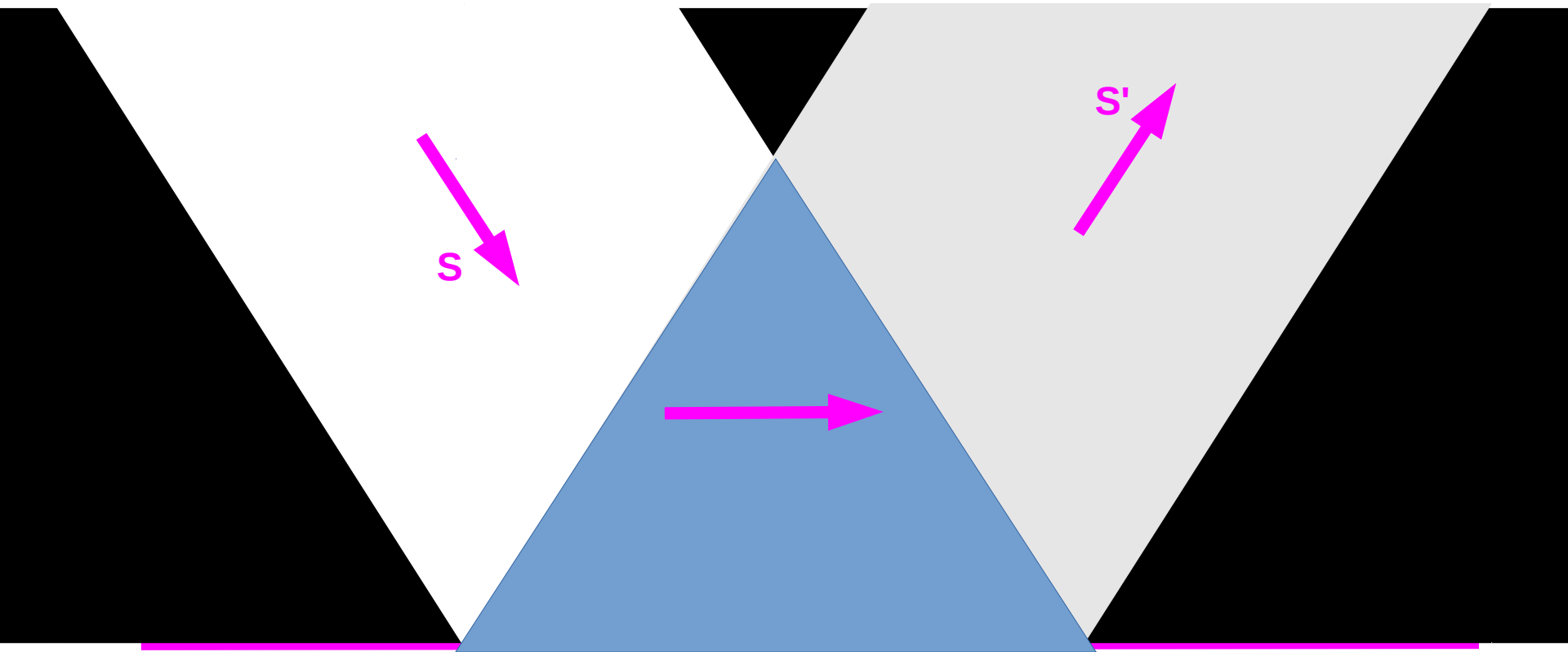
A válasz helyes, de az ördög a részletekben lakik

A fényt a szomszédban mozgó fény téríti el, a Maxwell-féle erők révén.
Így alakulnak ki a csatornák és a csatornafalak.

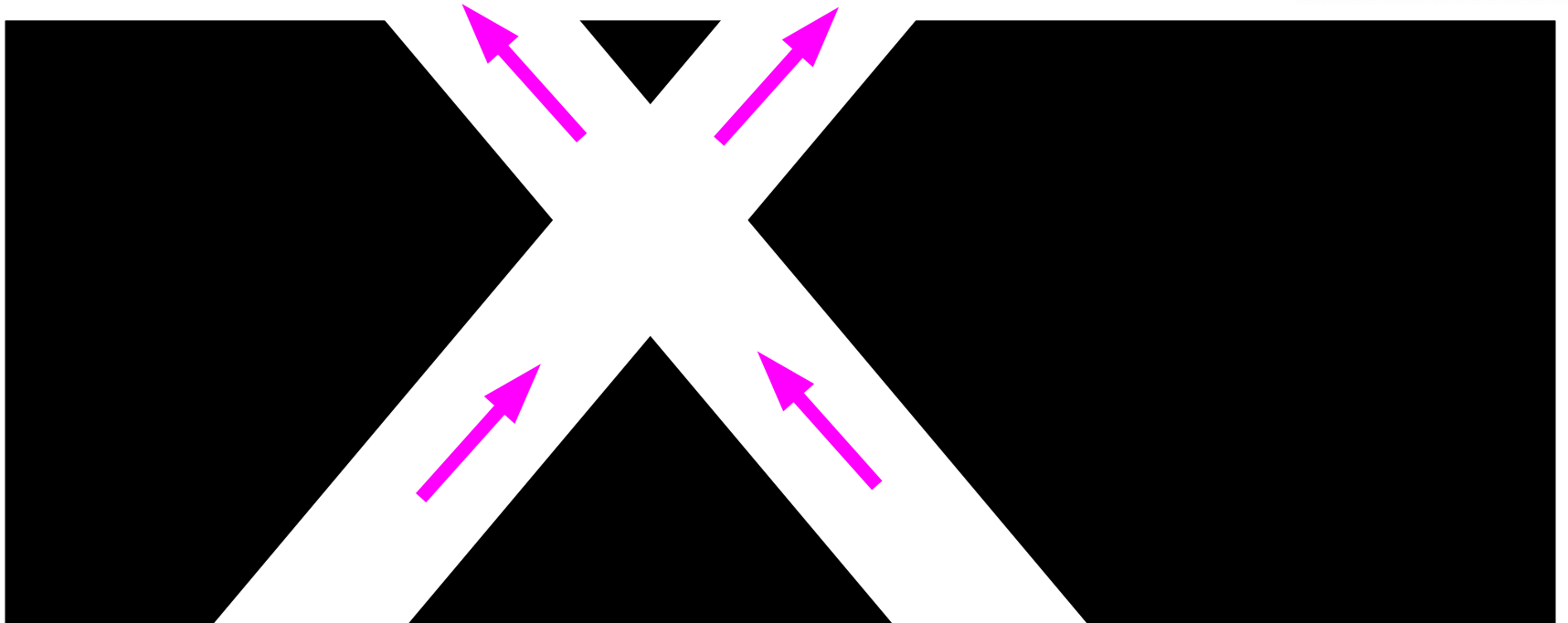
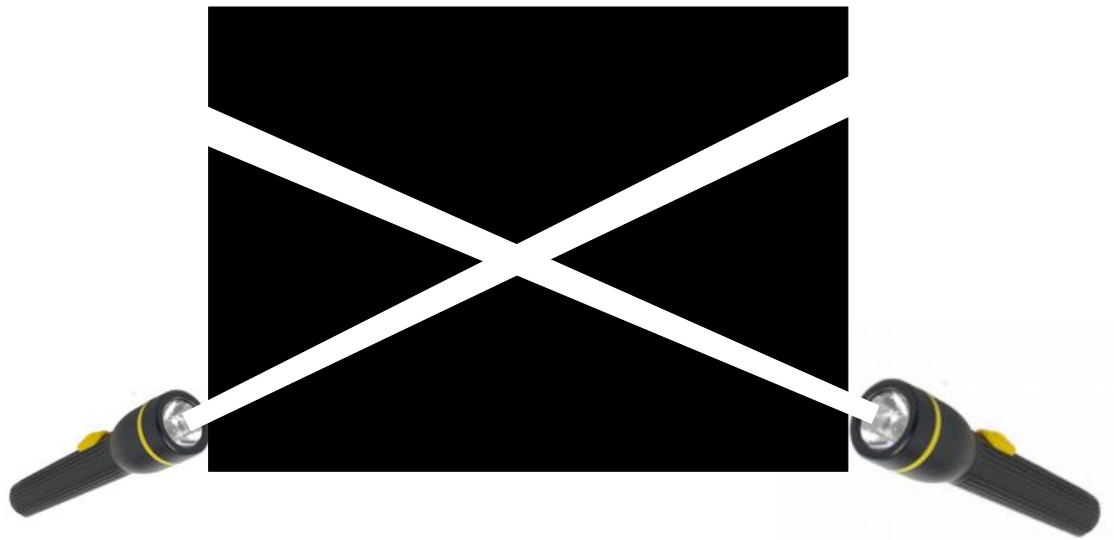


Gyakorlati közelítés: **energiaprizma**

Ezzel elég jó pontossággal, a finom részletektől eltekintve
el lehet képzelni az energia áramlását

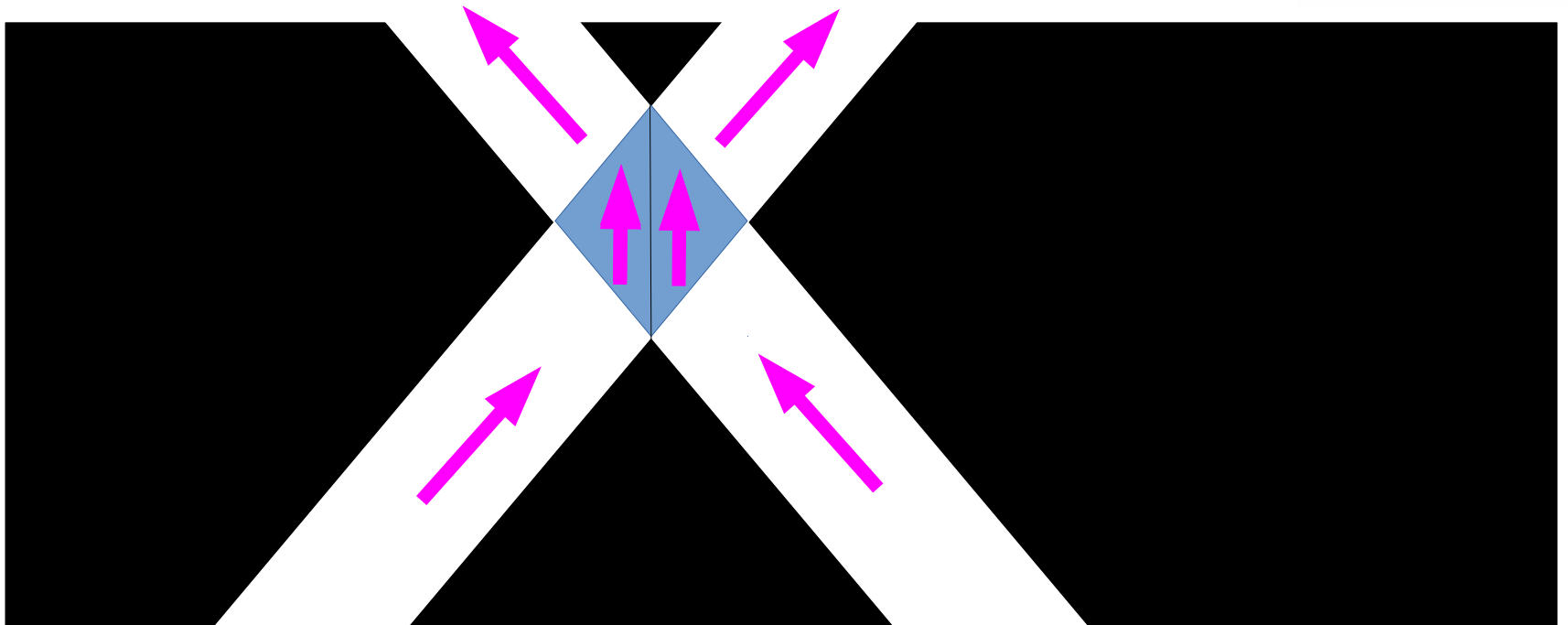
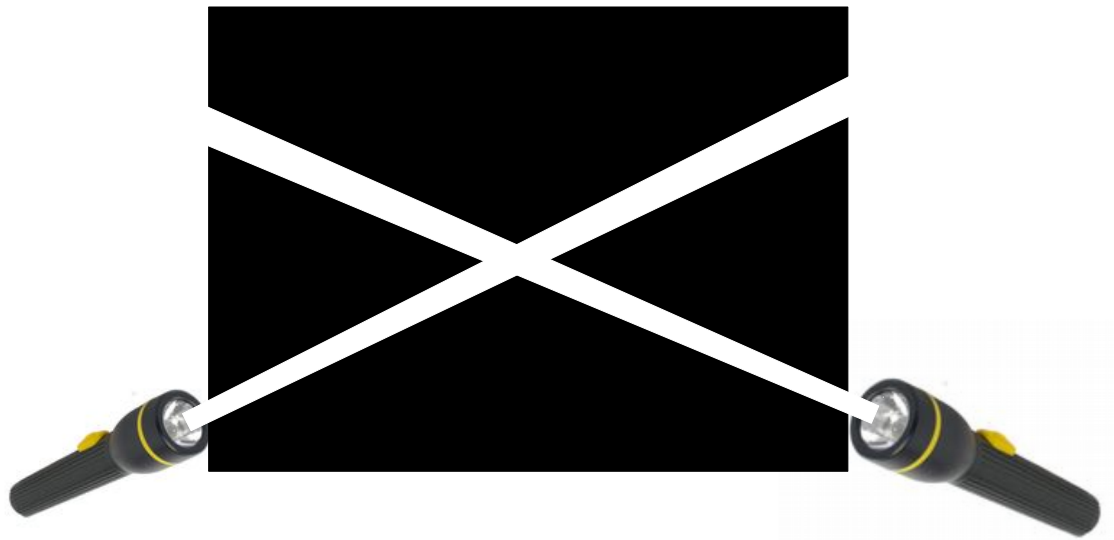


Alkalmazzuk a modellt
a két lámpa fényére!

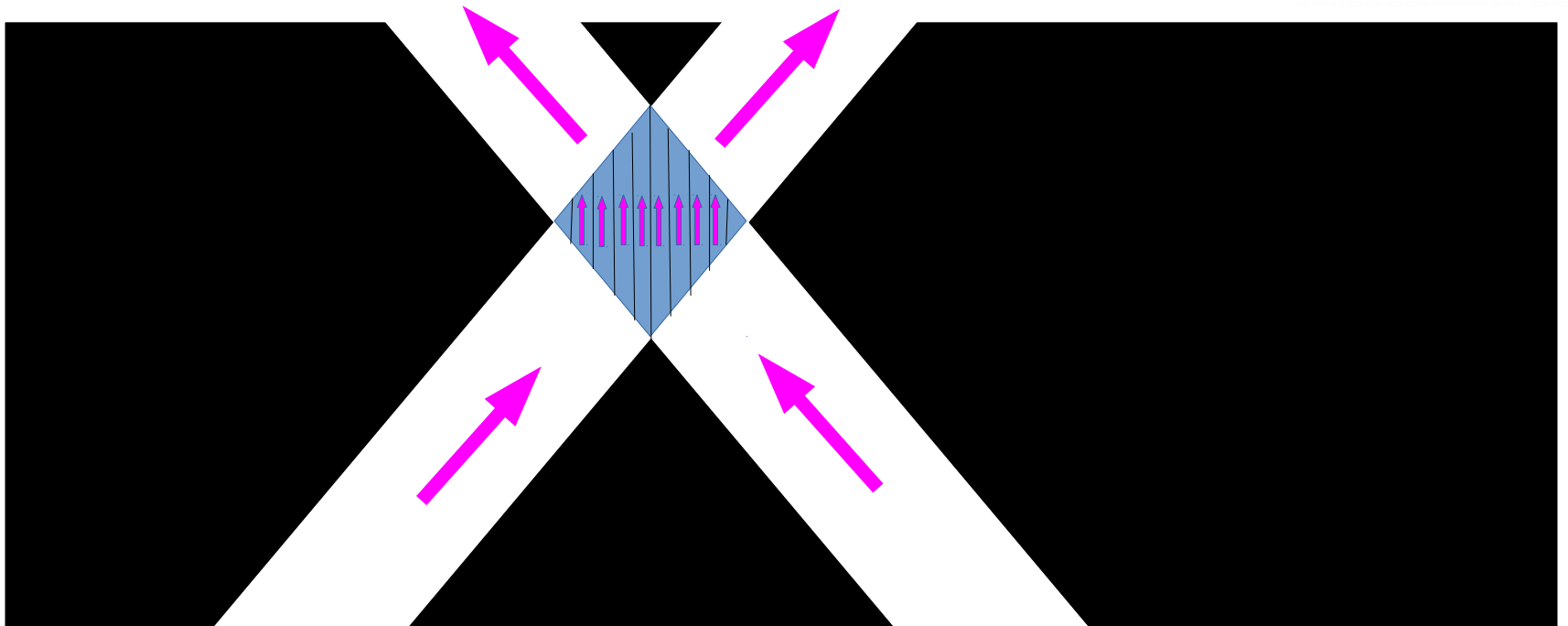
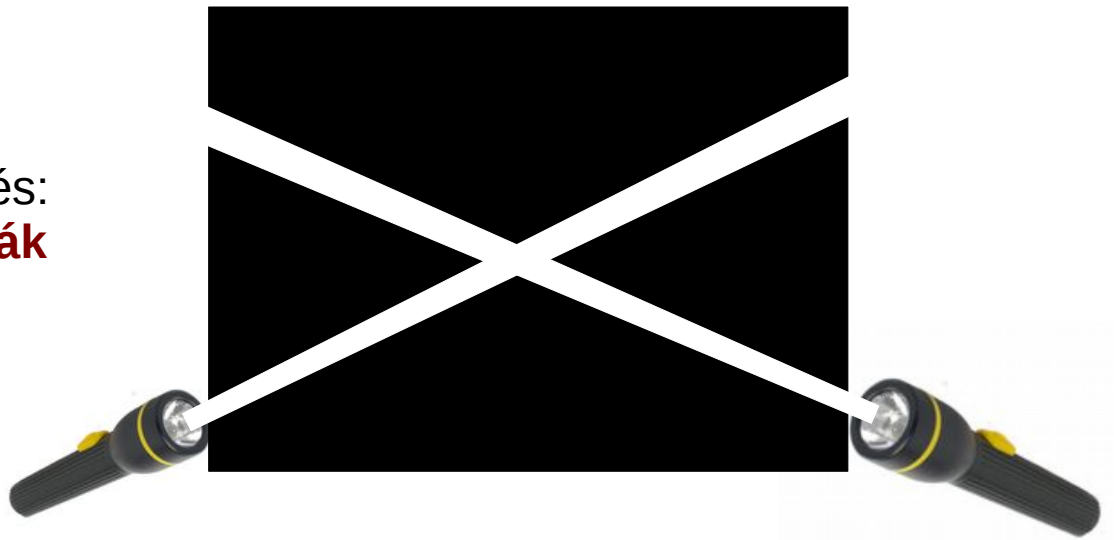


Alkalmazzuk a modellt
a két lámpa fényére!

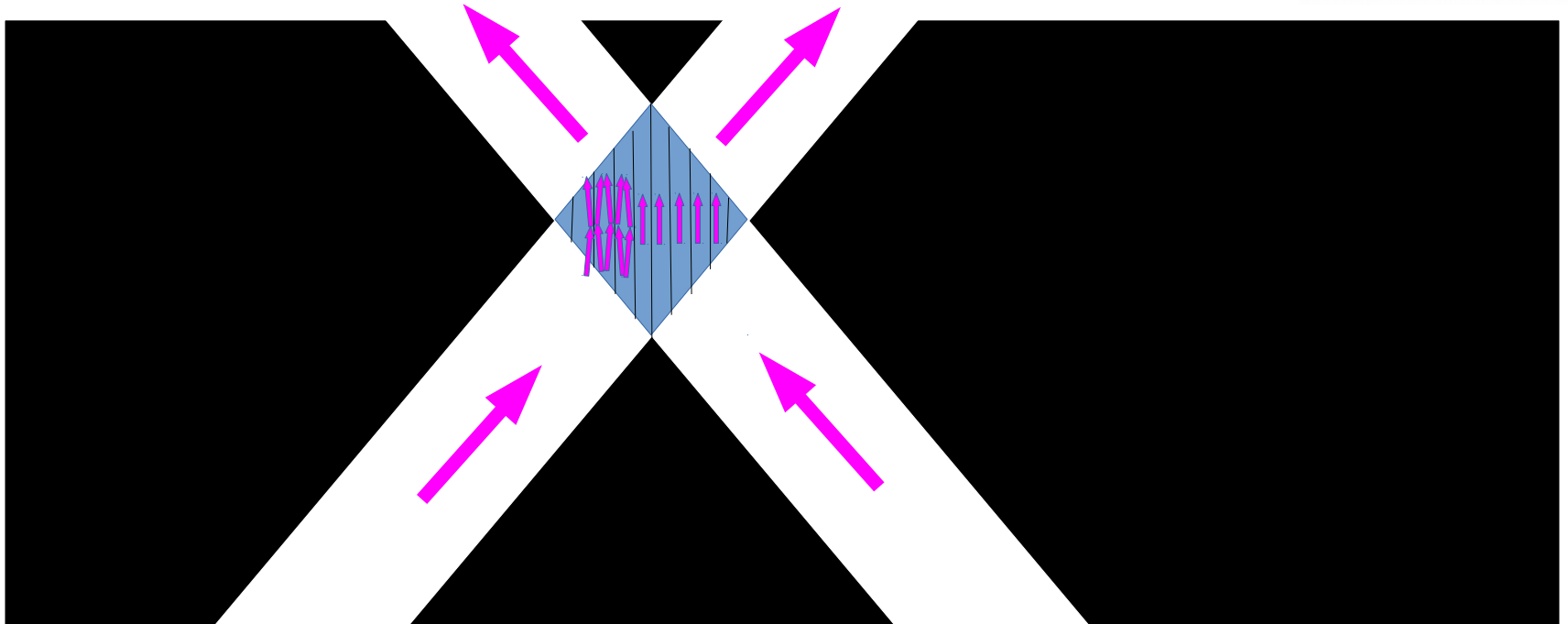
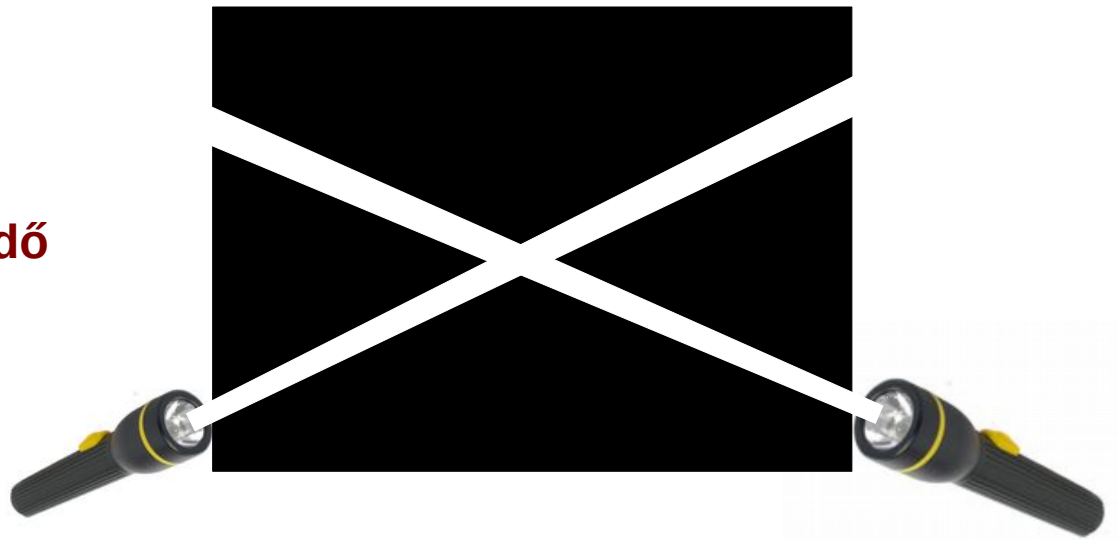
Első közelítés:
energiaprizma



Eggyel pontosabb közelítés:
fényvezető csatornácskák

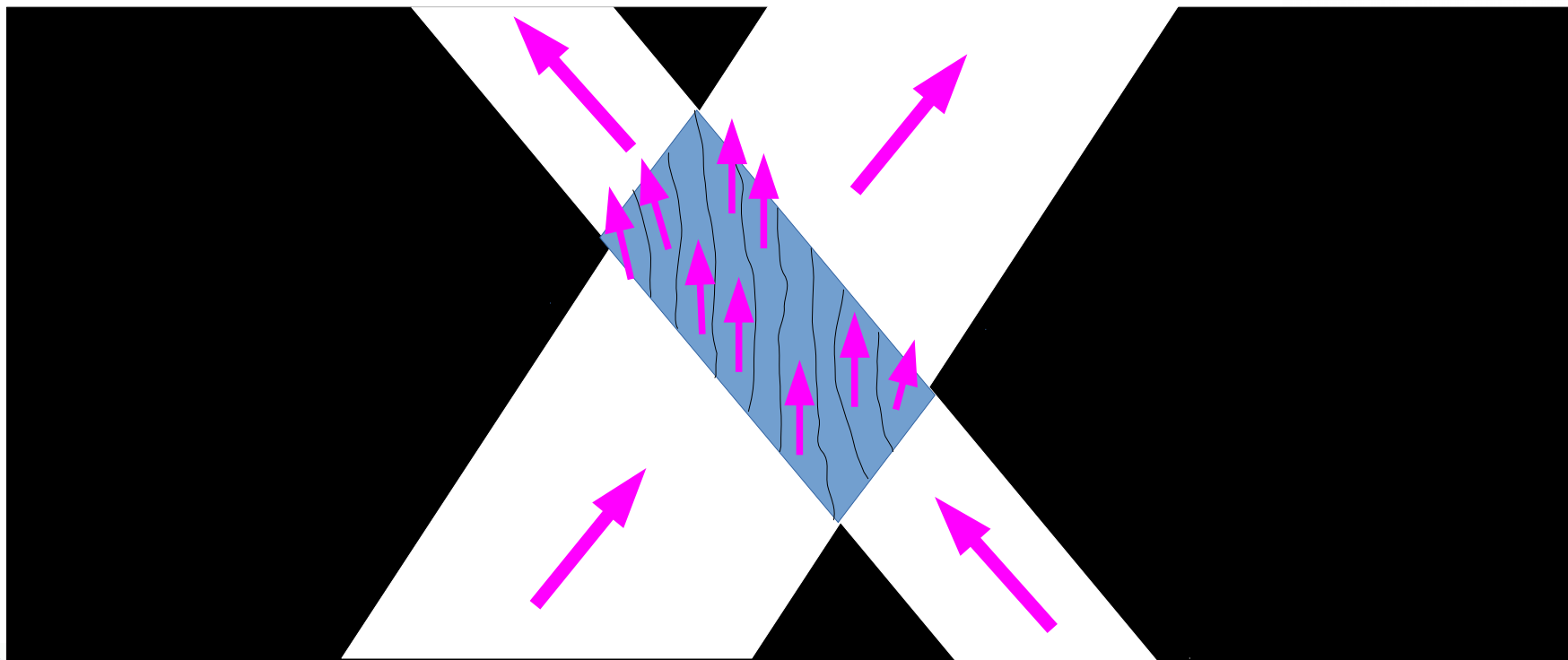
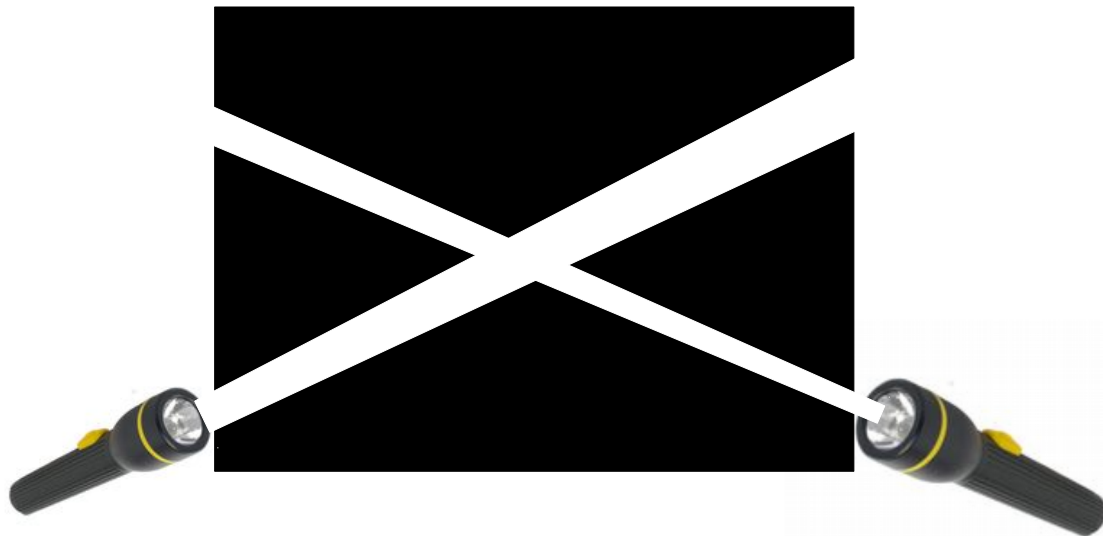


Még pontosabb leírás:
**az önmagán visszaverődő
fényenergia**



Különböző erősségű
fénynyalábok esete

Második közelítés:
energiacsatornák



Tanulság:

A legegyszerűbb fizikai jelenségek leírása ugyan lehetséges, de mérhetetlenül bonyolult lesz, ha az általános, mindenütt használt fizikai fogalmak (energia, impulzus, erő, perdület stb) felől próbálkozunk.

Az adott jelenségkörhöz illeszkedő speciális fogalmak (spin, térerősség, paritás stb) bevezetése és használata megkönnyítik a megértést, a modellezést és a számolást.

Az emberiség hatalmas szerencséjére a második technikai forradalmat lehetővé tevő fizikai ismereteknek létezik olyan matematikai megfogalmazása, amely lineáris, ezért sokak által kezelhető és megoldható matematikai feladattá tette az elektrodinamikai problémák tanulmányozását.

Még nagyobb szerencse, hogy Maxwell és társai megtalálták ezt a matematikailag kezelhető megfogalmazást.



Kóda:

**Ennyit lehet kihozni egy monokromatikus fénynyalábból,
egy egyszerű tükörből és két zseblámpából
– a klasszikus fizikán belül!**

**Elő se vettük a klasszikus optikai eszközöket, a gömbtükröket,
prizmákat és lencsét.**

**És még nem beszéltünk a diffrakcióról, a polarizációs jelenségekről,
valamint a kvantumoptikai effektusokról!**

**A valódi fizika gazdagságához képest a jedik fénykardja
csupán gyenge utánérzés :)**



Kóda:

**Ennyit lehet kihozni egy monokromatikus fénynyalábból,
egy egyszerű tükörből és két zseblámpából
– a klasszikus fizikán belül!**

**Elő se vettük a klasszikus optikai eszközöket, a gömbtükröket,
prizmákat és lencséket.**

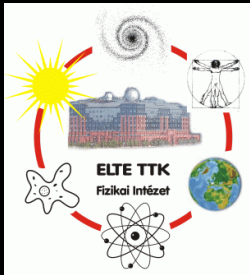
**És még nem beszéltünk a diffrakcióról, a polarizációs jelenségekről,
valamint a kvantumoptikai effektusokról!**

**A valódi fizika gazdagságához képest a jedik fénykardja
csupán gyenge utánérzés :)**

Köszönöm a figyelmet!



Fény a kanyarban



Az atomoktól a csillagokig

**Dávid Gyula
2017. 09. 14.**