Fény a kanyarban

Az atomoktól a csillagokig

Dávid Gyula
2017. 09. 14.

2015 – A FÉNY NEMZETKÖZI ÉVE

2015 – A FÉNY NEMZETKÖZI ÉVE

A fizika mindenkié

2015 – A FÉNY NEMZETKÖZI ÉVE

A FÉNY NEMZETKÖZI ÉVE 2015

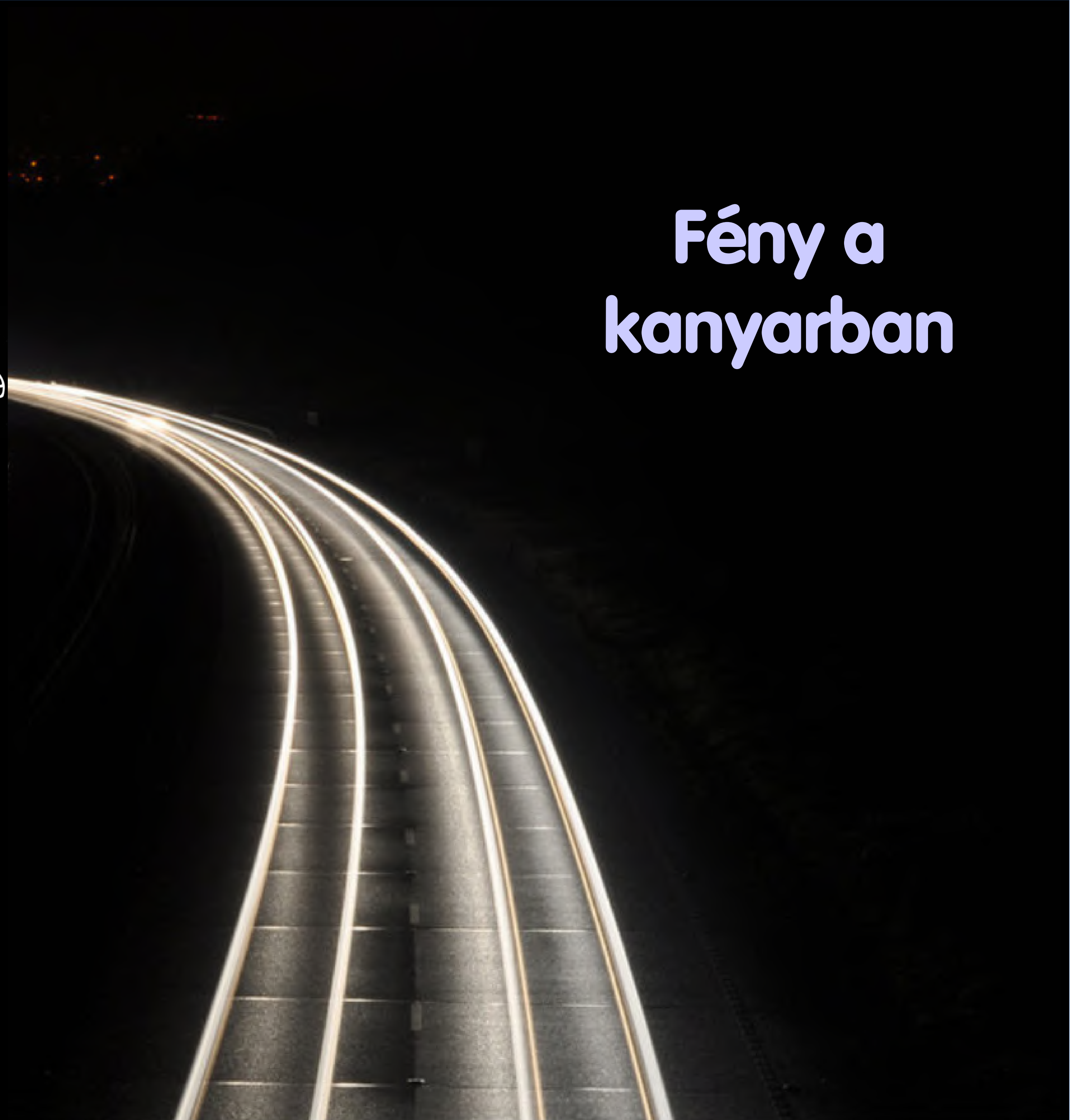
KOZMIKUS FÉNY

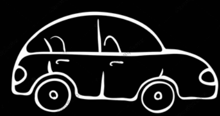
IAU

legyen világosság!

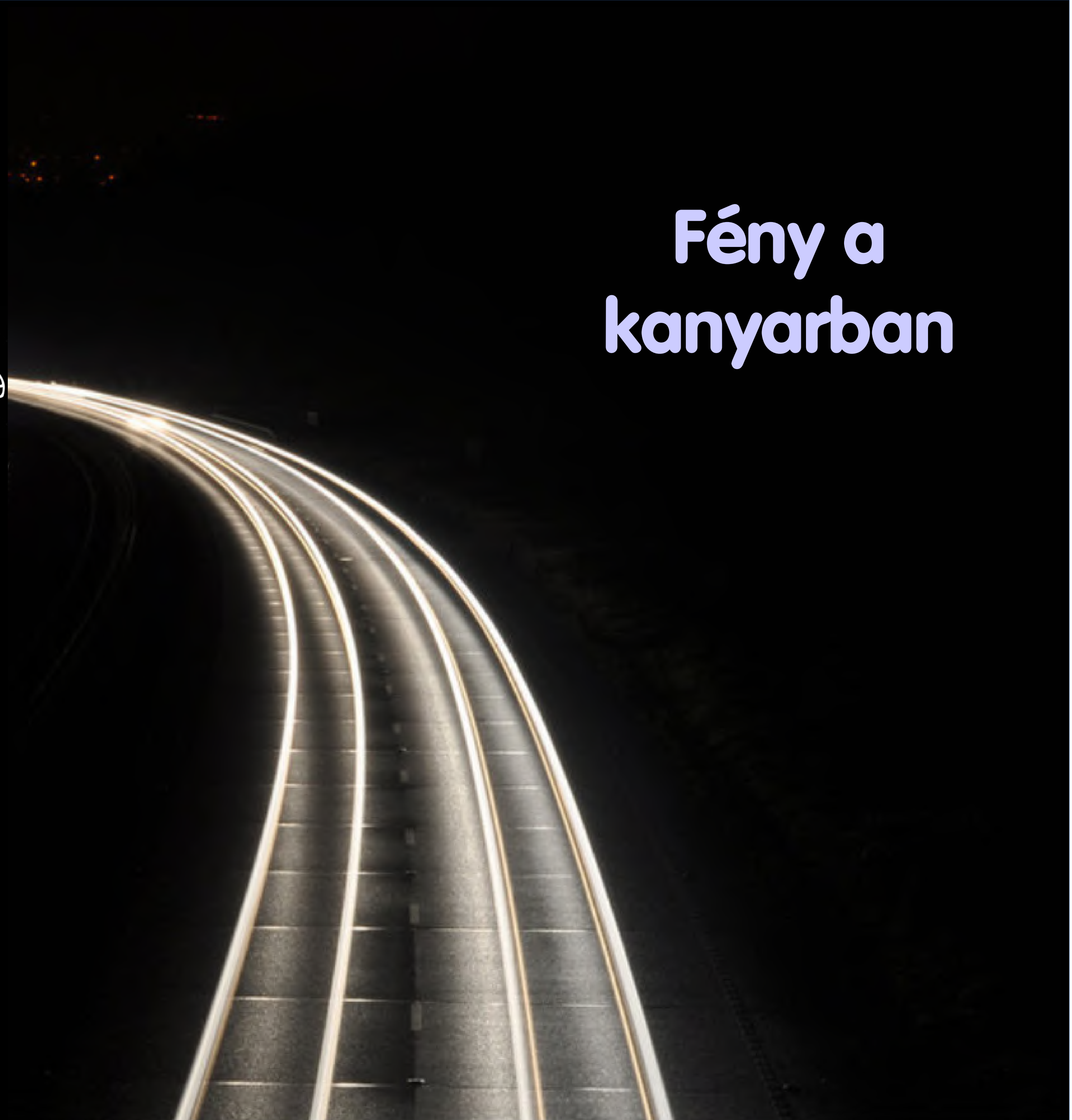
legyen világosság!

Fény a kanyarban

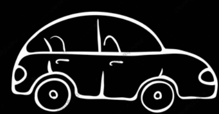




Fény a kanyarban

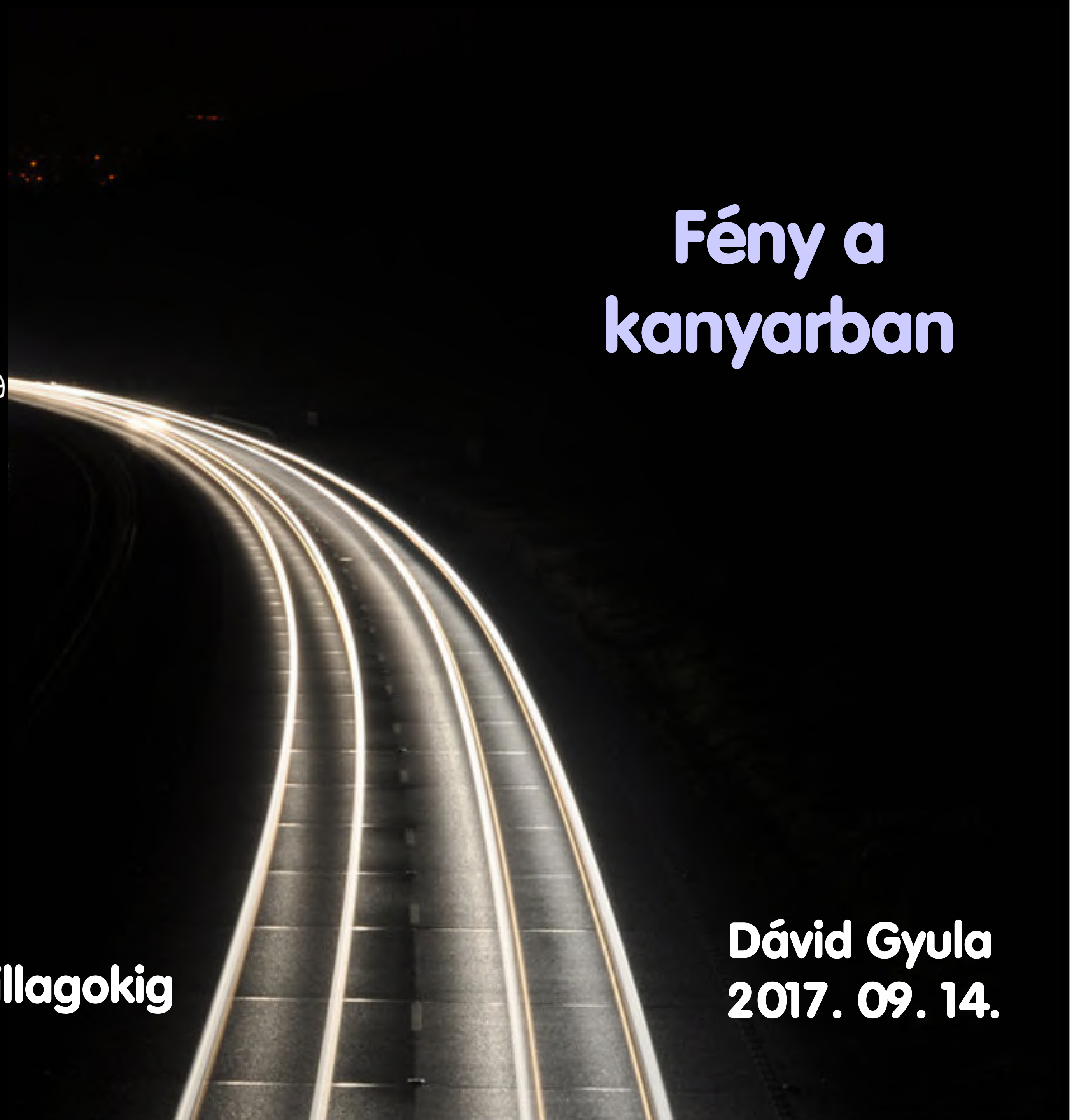


Fény a kanyarban



ELTE TTK
Fizikai Intézet

Az atomoktól a csillagokig



Fény a kanyarban

Az atomoktól a csillagokig

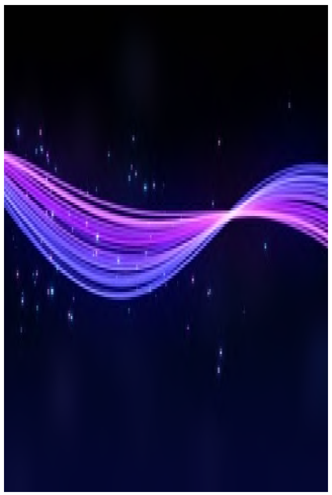
Dávid Gyula

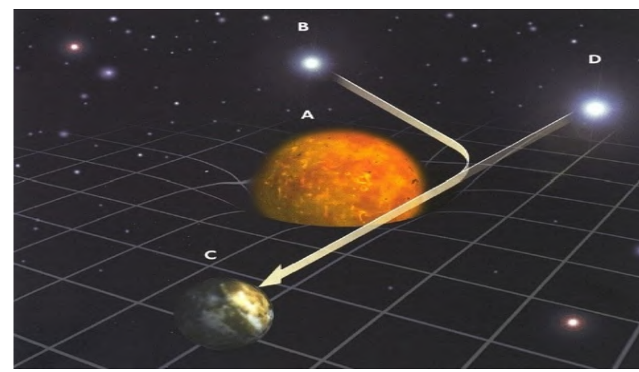
2017. 09. 14.

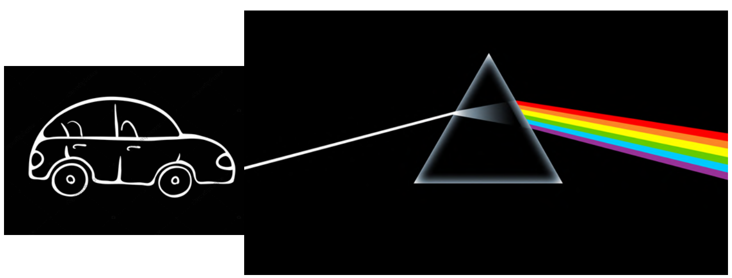
Hogyan lehet bekanyarítani a fényt?

Hogyan lehet bekanyarítani a fényt?

egyszerű
megoldások

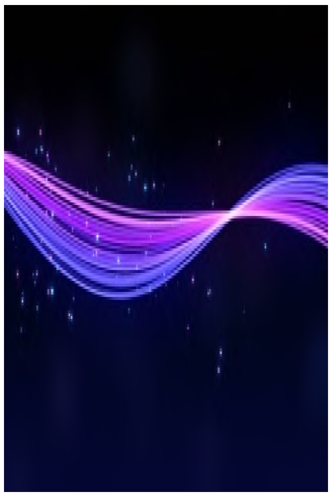


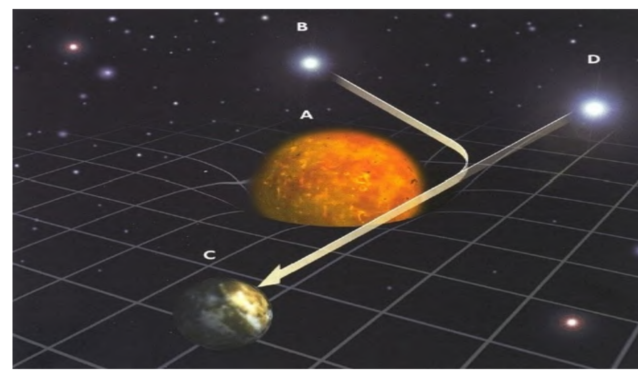


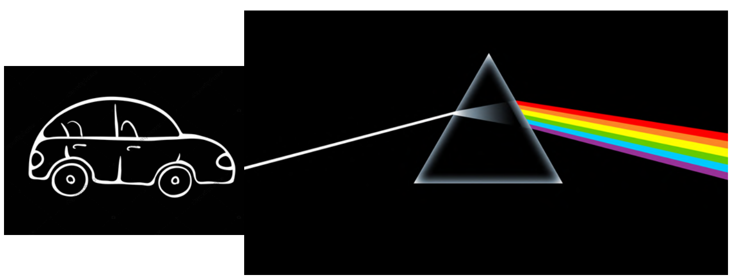


Hogyan lehet bekanyarítani a fényt?

egyszerű megoldások







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

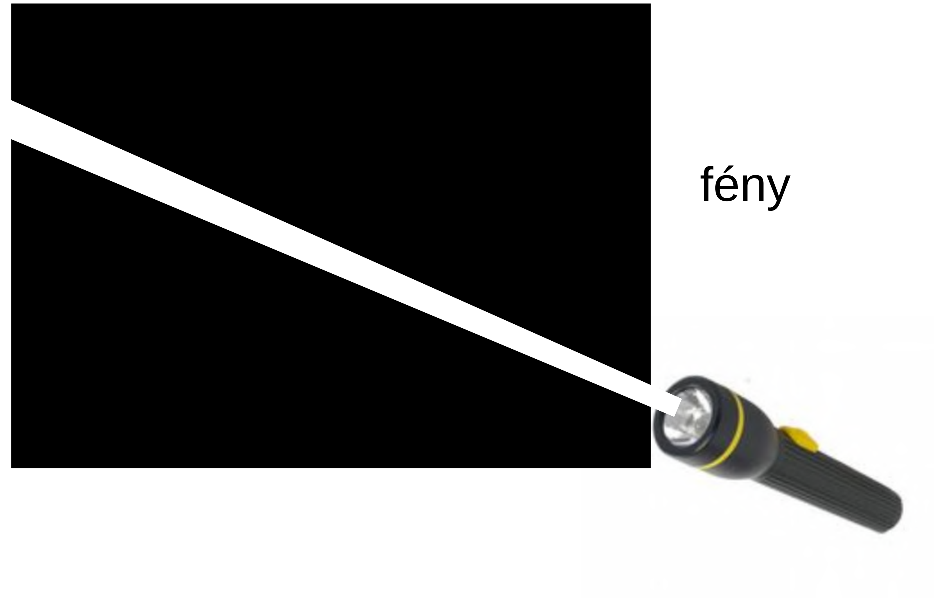
lézerkard

lézerkard

lézerkard

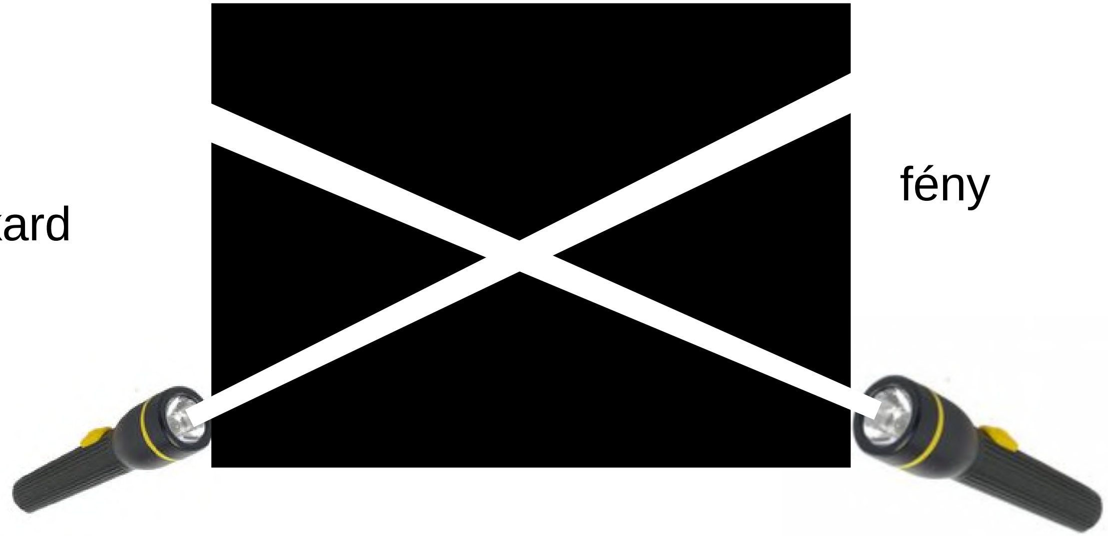
fény

lézerkard



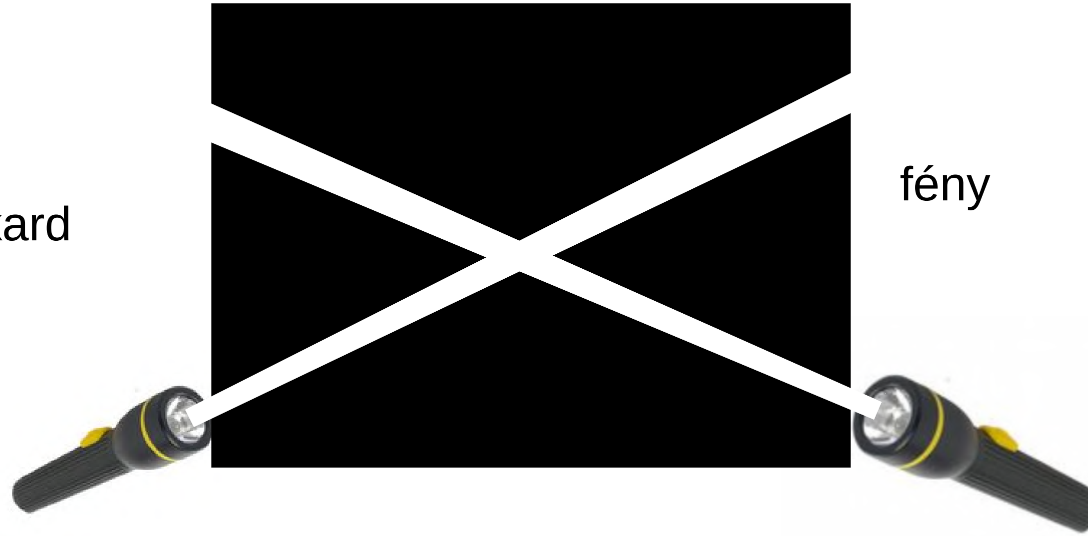
fény

lézerkard



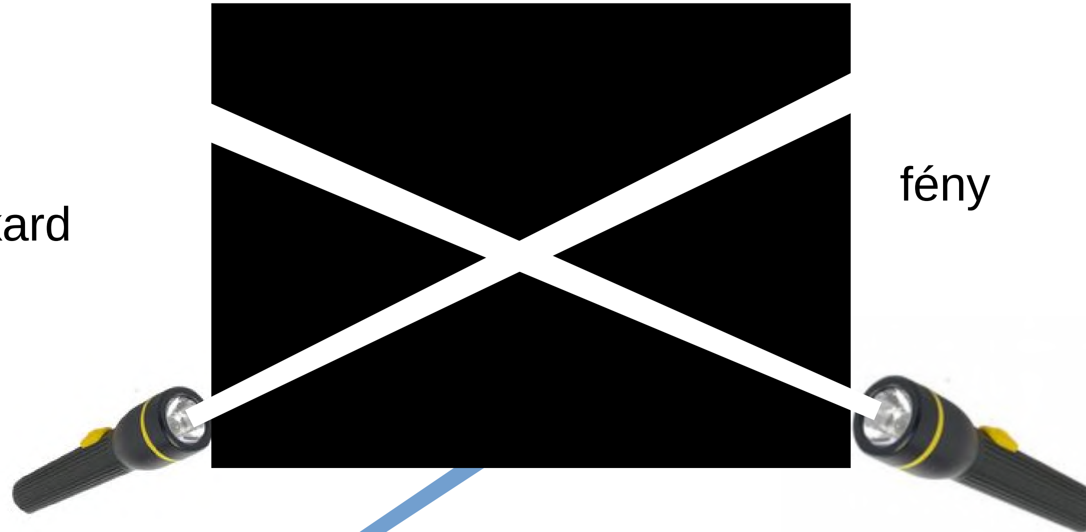
fény

lézerkard



fény

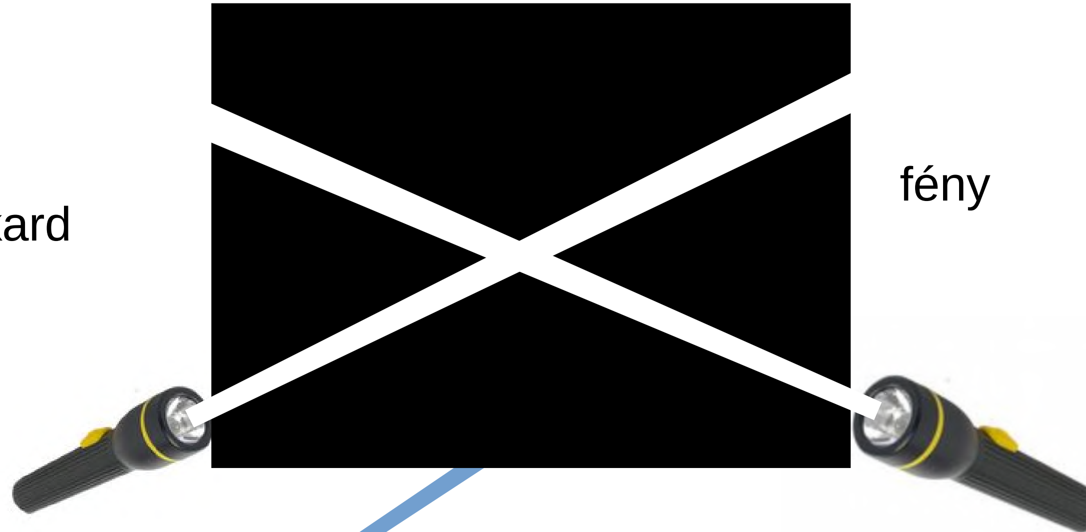
lézerkard



fény

folyadék

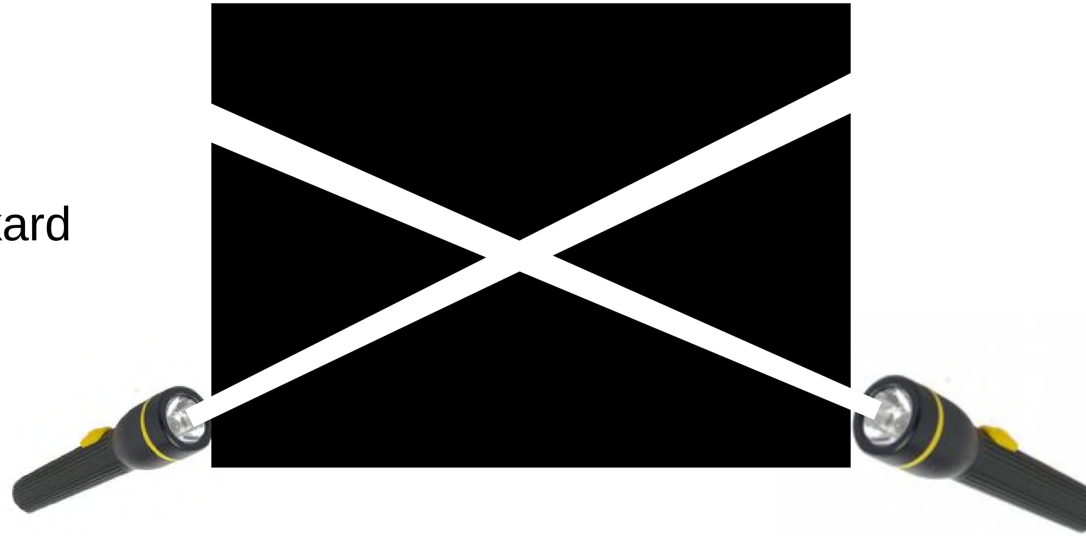
lézerkard



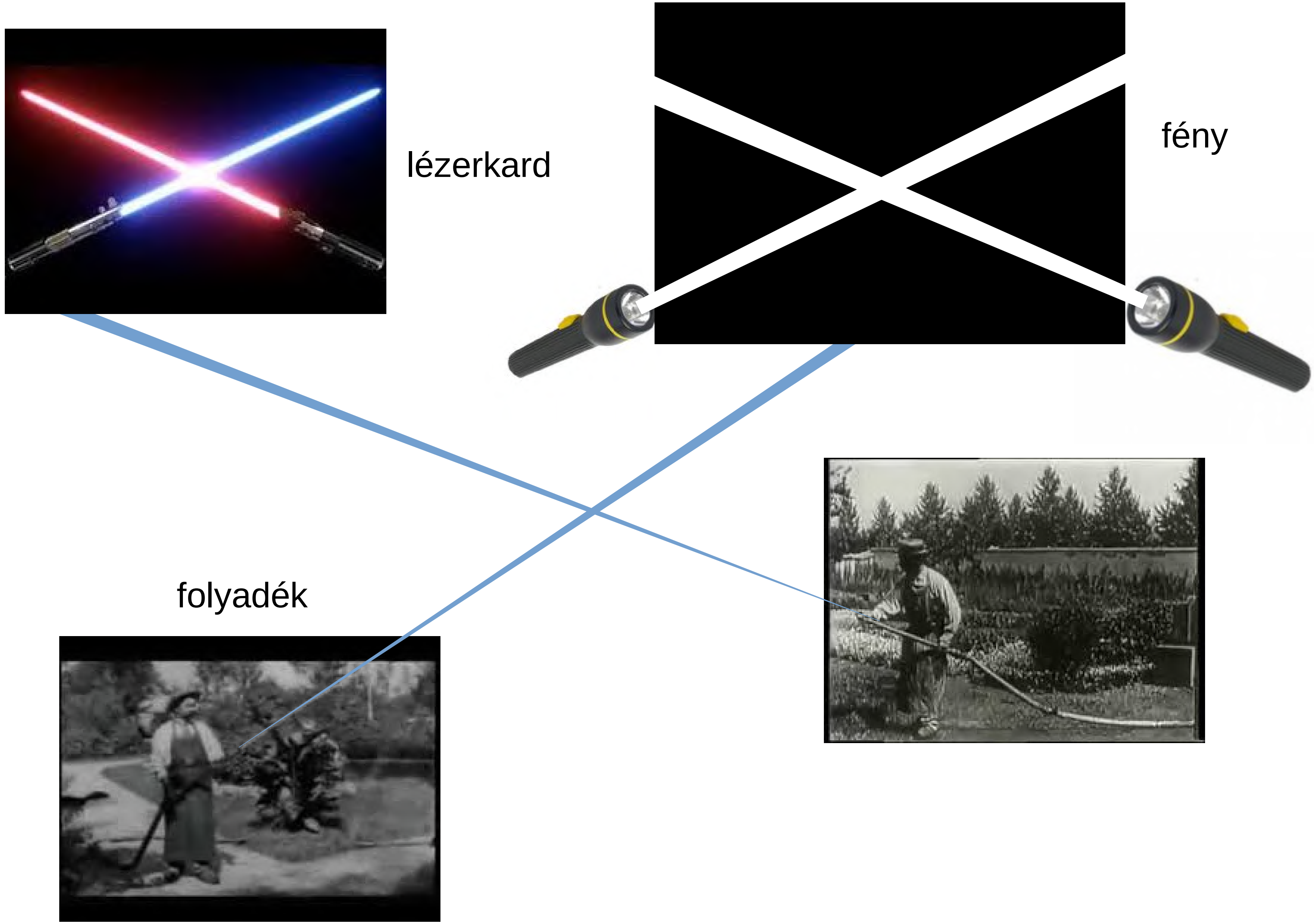
fény

folyadék

lézerkard

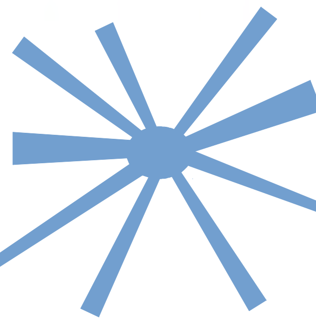


folyadék


lézerkard
fény
folyadék

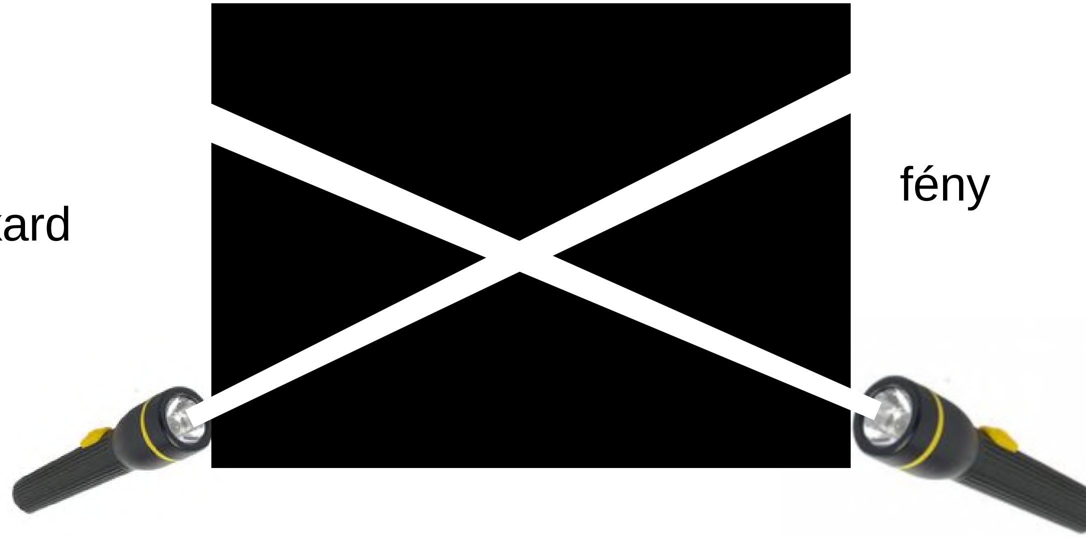
lézerkard

fény

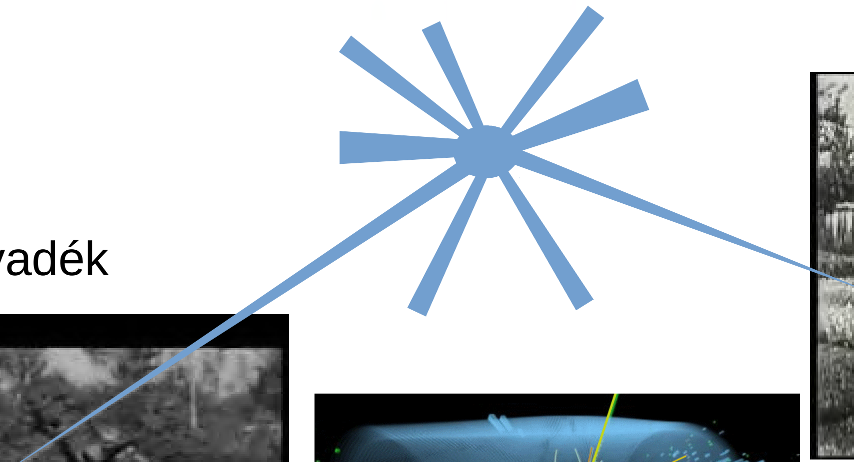


folyadék

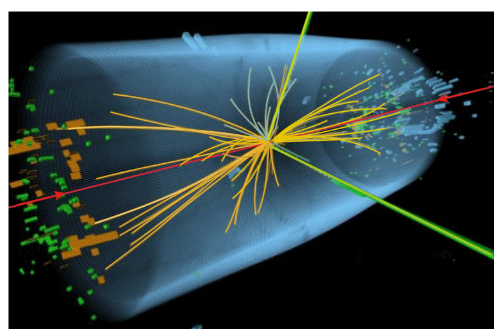
lézerkard



fény

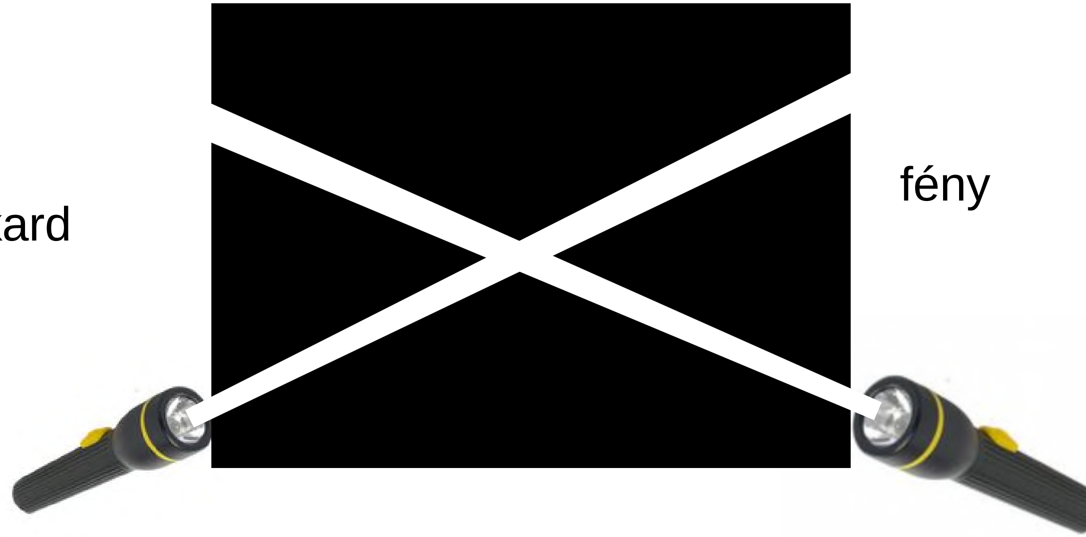


folyadék



elemi részecskék
ütközése a CERN-ben

lézerkard



fény

MI A KÜLÖNBSÉG?

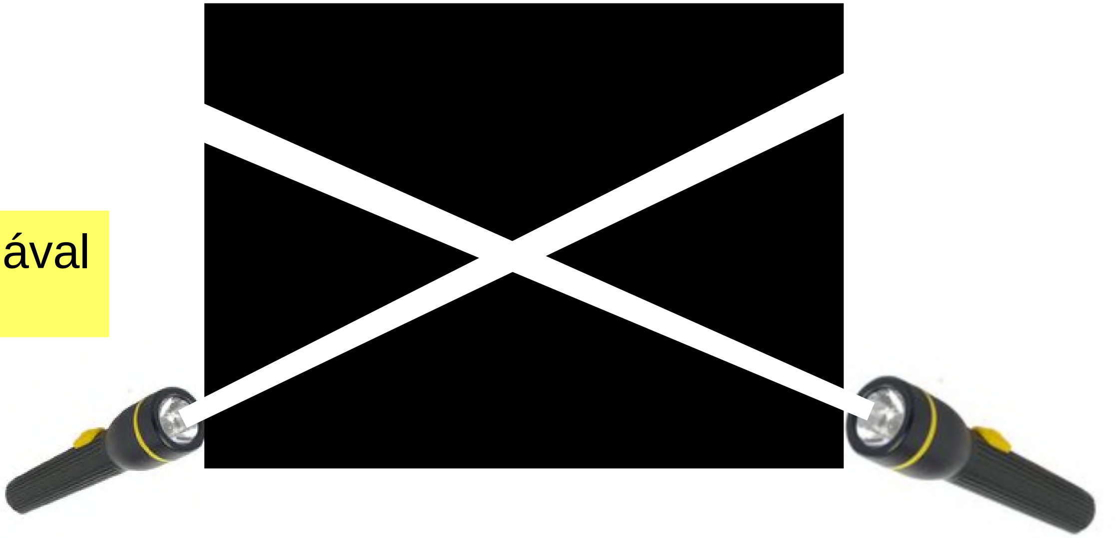
A fényt leíró egyenletek lineárisak, a megoldásaik összeadhatók

folyadék

A folyadékokat leíró egyenletek nemlineárisak, a megoldásaik nem adhatók össze

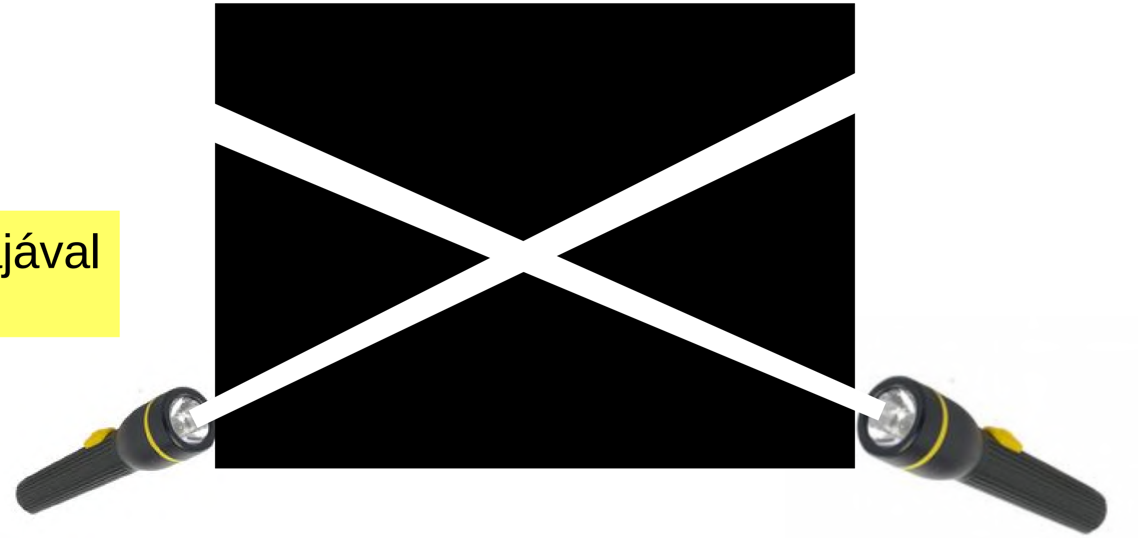
A fény energiát szállít.

Vajon mi történik a fény energiájával
a sugarak találkozásakor?

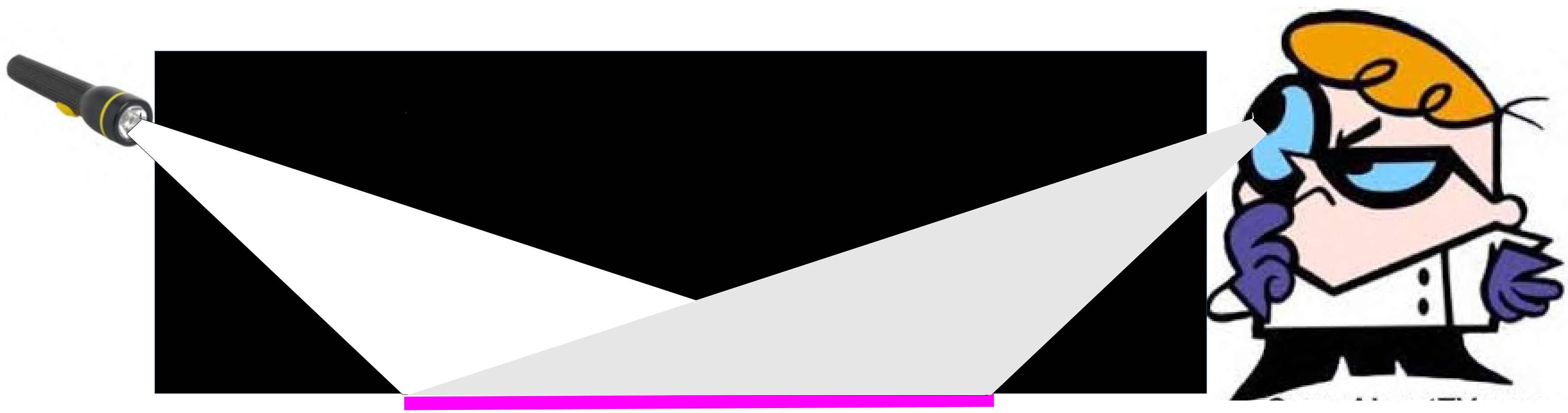


A fény energiát szállít.

Vajon mi történik a fény energiájával a sugarak találkozásakor?



Egyszerűbb szituáció: tükörről visszaverődő fény



tükör

A fény energiát szállít.

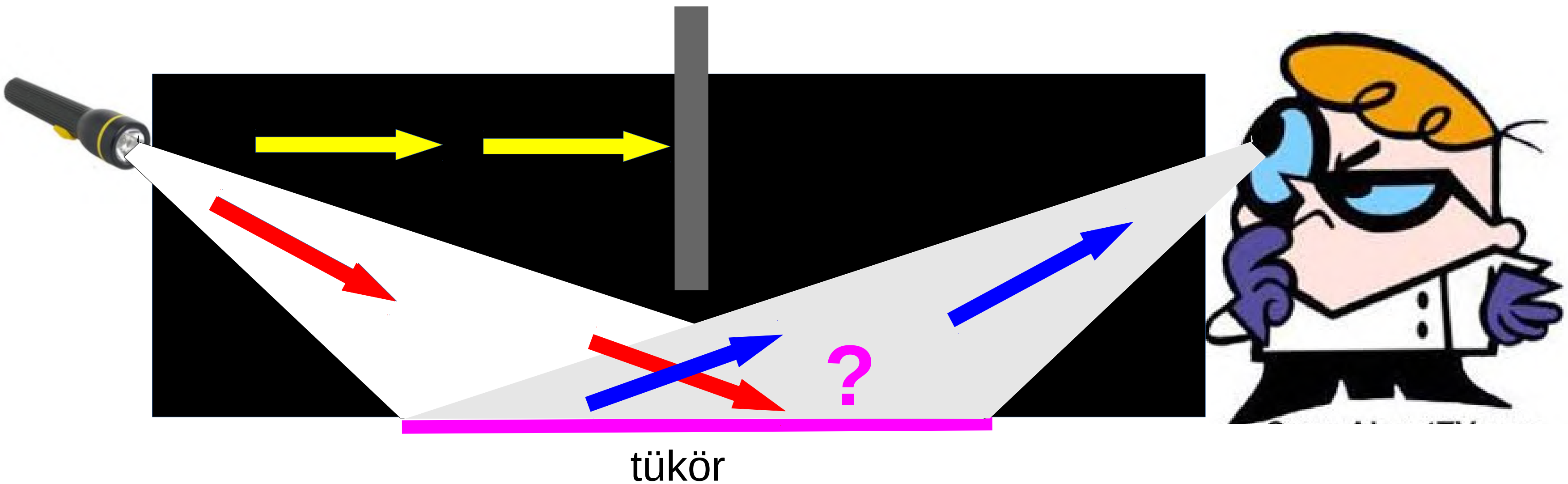
Az energia elindul a lámpából

A tükörről visszaverődve
a szemembe jut

A közvetlen fényenergiát
egy ernyővel kitakarjuk

De hogyan áramlik
az energia
a tükör közelében?

Egyszerre kétfelé mozog?



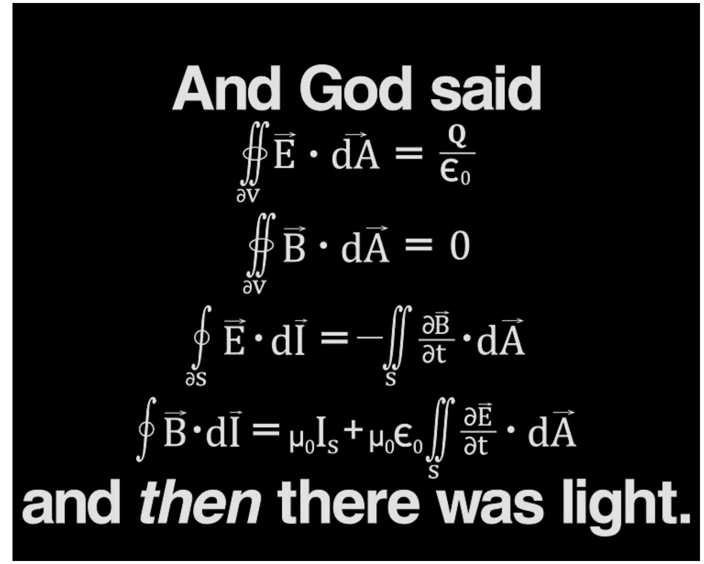
Mi a fény?

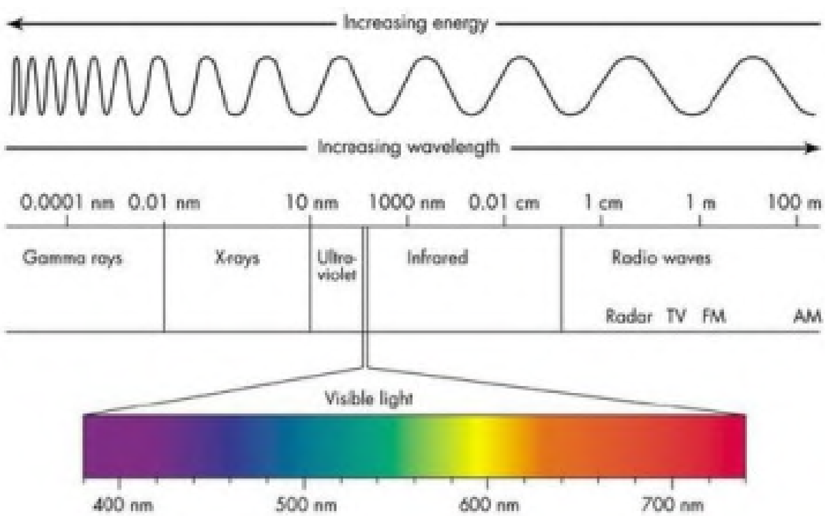
Elektromágneses hullám

Mi a fény?

Elektromágneses hullám

Az elektromos és a mágneses mező vektora:
E és **B** térben és időben változik





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

$$\oint\!\!\!\oint_{\partial V} \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

$$\oint\!\!\!\oint_{\partial V} \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

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

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

(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

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

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

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

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

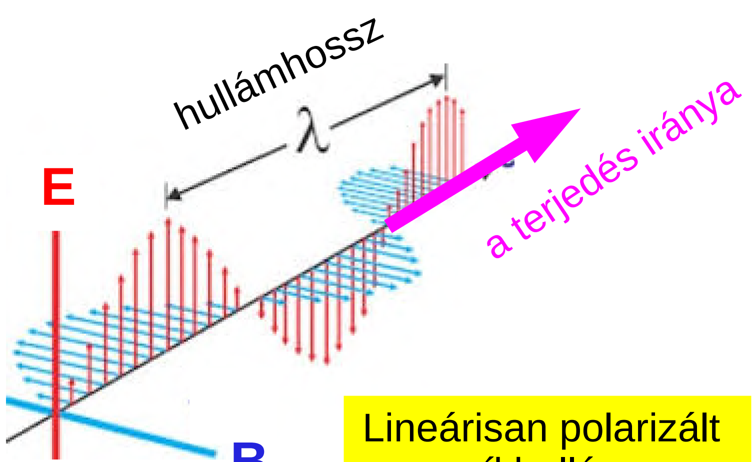
(csak ijesztésképpen :)

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



Lineárisan polarizált síkhullám

Maxwell egyenletei

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

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

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

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

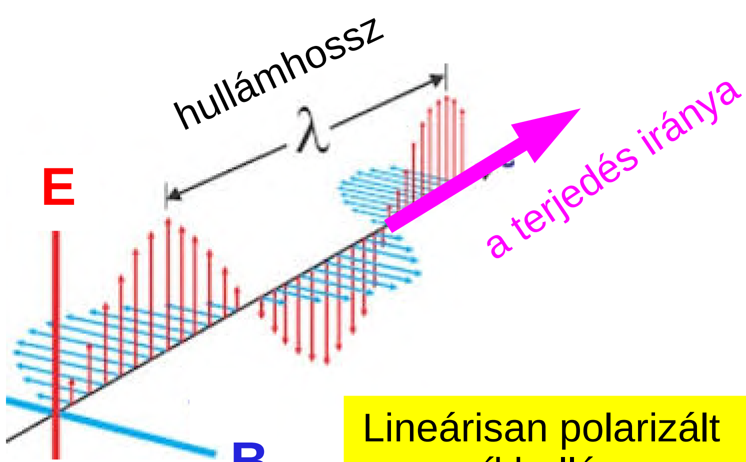
(csak ijesztésképpen :)

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



Lineárisan polarizált 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)

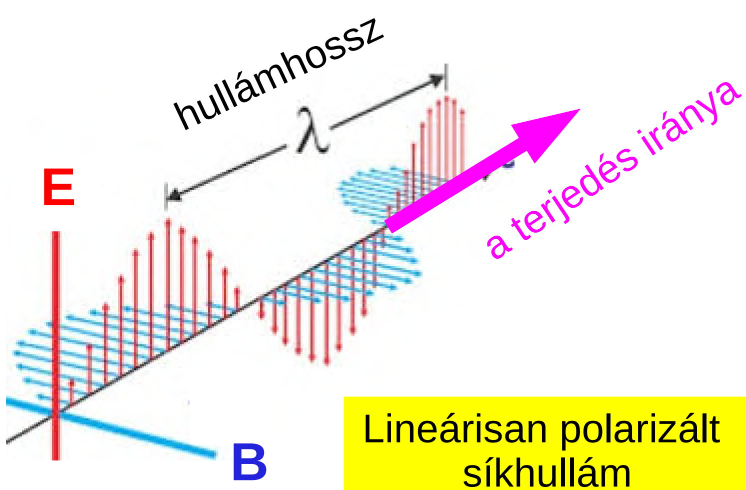
Érdekesség: vannak olyan helyek,
ahol **E** és **B** is nulla!

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



Lineárisan polarizált síkhullám

Maxwell egyenletei

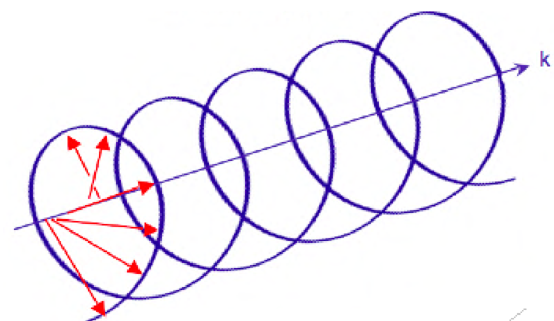
$$\oint\!\!\!\oint_{\partial V} \vec{E}\cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

$$\oint\!\!\!\oint_{\partial V} \vec{B}\cdot d\vec{A} = 0$$

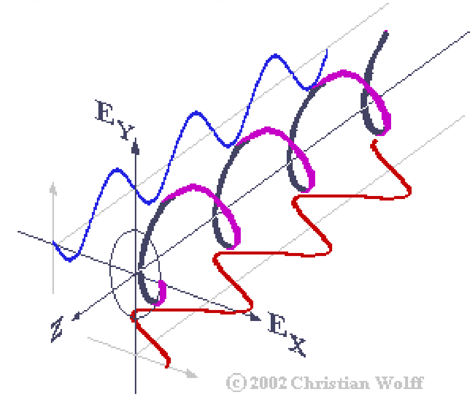
$$\oint_{\partial S} \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\cdot d\vec{A}$$

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

Cirkulárisan polarizált síkhullám



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



Mi hullámzik?

Az elektromágneses mező

Kitérő: mi az a MEZŐ?

Kitérő: mi az a MEZŐ?

fizikai mező: folytonos eloszlású anyag

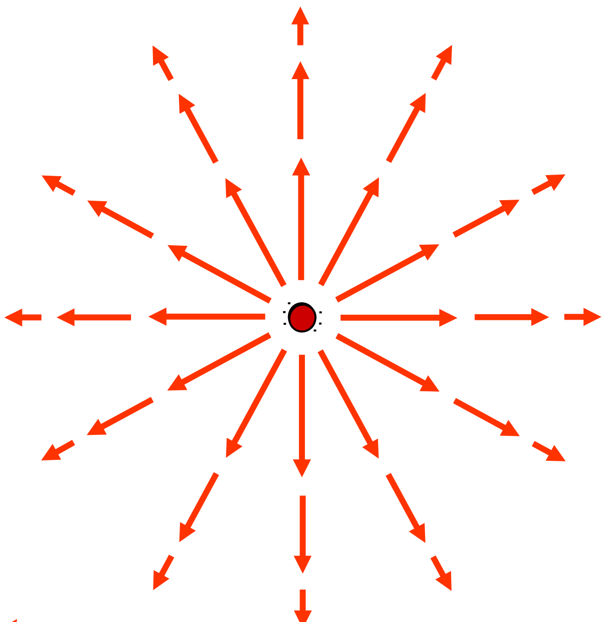
matematikai mező: a tér pontjaihoz rendelt mennyiségek

Kitérő: mi az a MEZŐ?

fizikai mező: folytonos eloszlású anyag

matematikai mező: a tér pontjaihoz rendelt mennyiségek

Példák: elektromos mező egy töltés körül



E az elektromos térerősség vektora

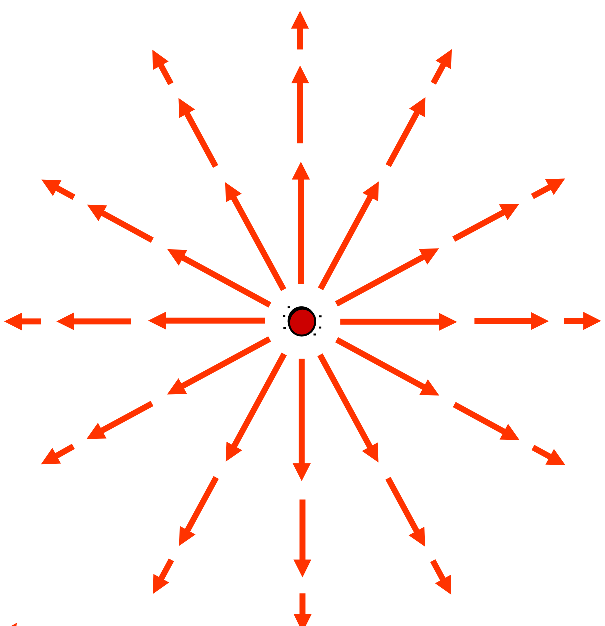
Kitérő: mi az a MEZŐ?

fizikai mező: folytonos eloszlású anyag

matematikai mező: a tér pontjaihoz rendelt mennyiségek

Példák:

elektromos mező
egy töltés körül



E

az elektromos térerősség
vektora

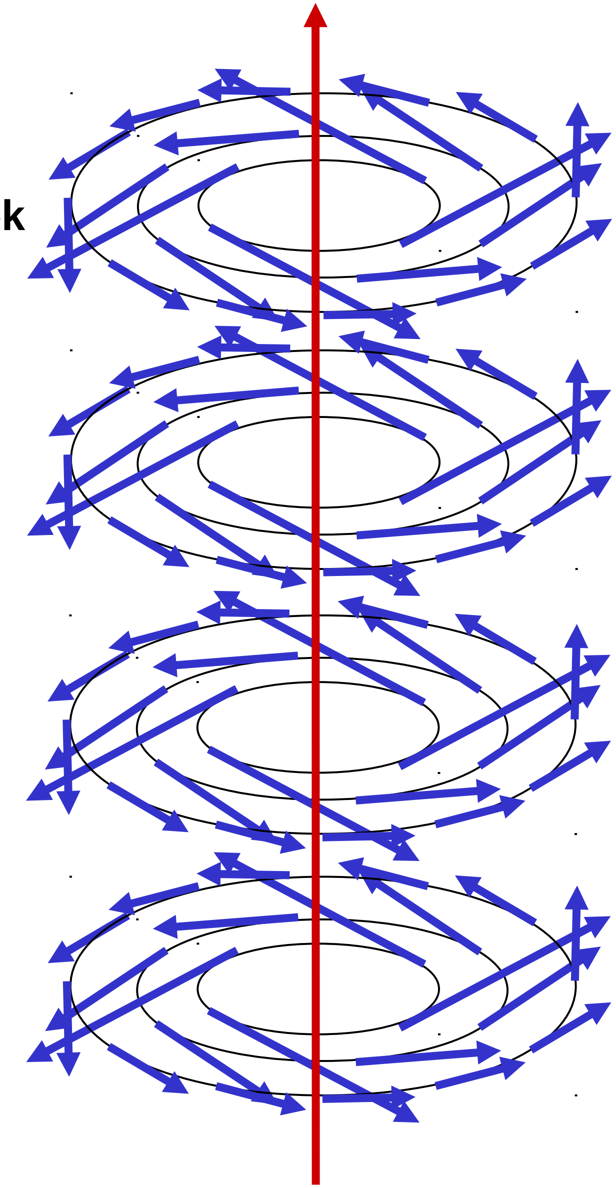
mágneses mező
egy áramjárta
drót körül

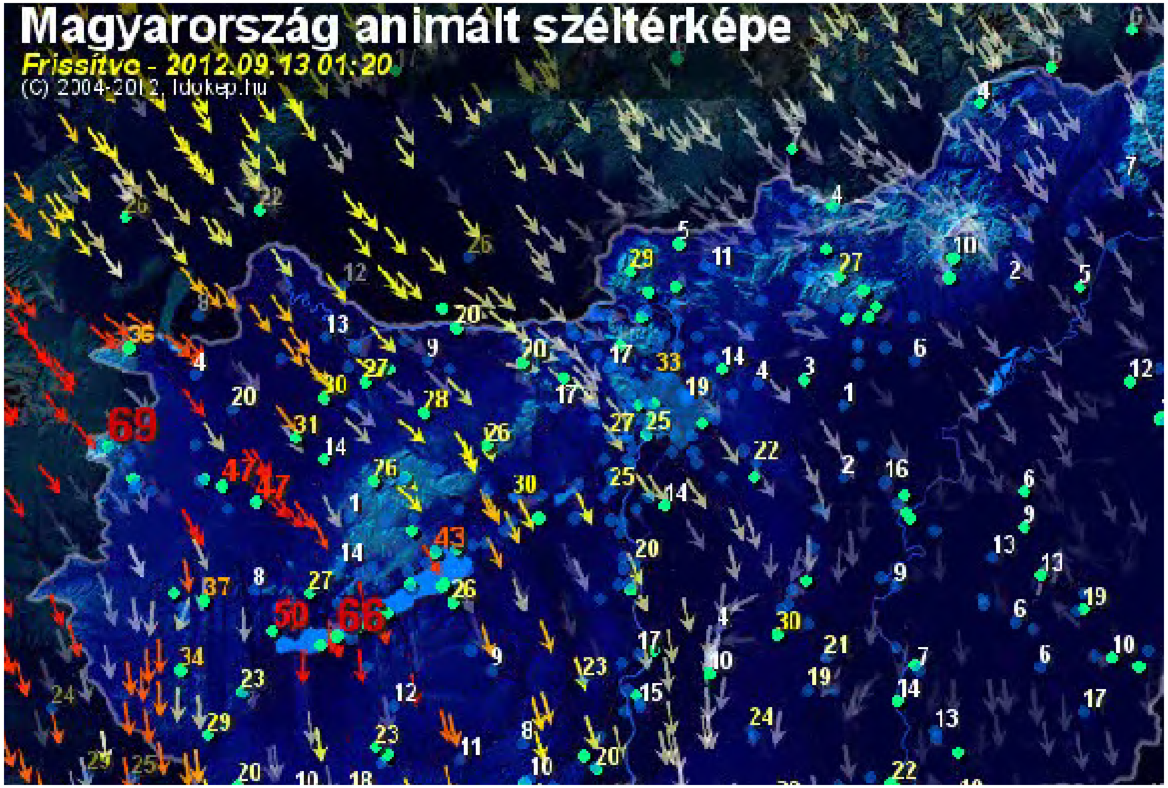
B

a mágneses
térerősség
vektora

a tér
minden
pontjában
van egy
vektor

ez a
VEKTORMEZŐ

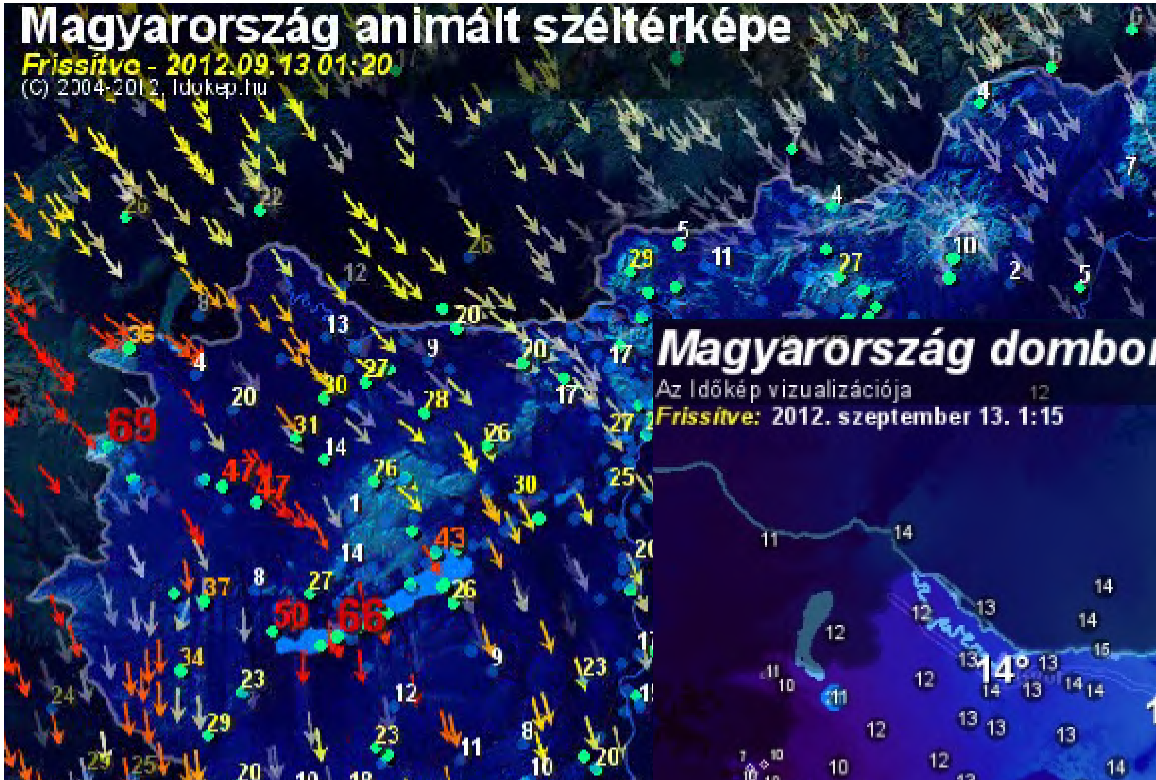




ez is vektormező:

minden pontban egy szélsebesség-vektor

köszönet az ábrákért az Időképnek



ez is vektormező:

minden pontban egy
szélsebesség-vektor

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 kölcsönható részecskékre

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

$$\mathbf{F} = Q\,(\mathbf{E} + (1/c)\,\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

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”:

$$\mathbf{F} = Q\,(\mathbf{E} + (1/c)\,\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Az elektromágneses mezőnek energiája van

Az energia sűrűsége (térfogategységben levő energia):

$$w = (½)\,(E^2+B^2)$$

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
kölcsönható részecskékre

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

$$\mathbf{F} = Q\,(\mathbf{E} + (1/c)\,\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Az elektromágneses mezőnek energiája van

Az energia sűrűsége
(térfogategységben levő energia):

$$w = (½)\,(\mathbf{E}^2+\mathbf{B}^2)$$

Az elektromágneses mező energiája áramlik

Az energiaáramlás erőssége
(felületegységen át
időegységenként átment energia):

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

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”:

$$\mathbf{F} = Q\,(\mathbf{E} + (1/c)\,\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Az elektromágneses mezőnek energiája van

Az energia sűrűsége
(térfogategységben levő energia):

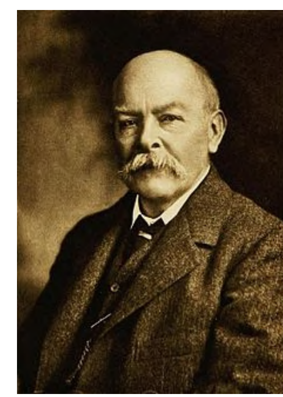
$$w = (½)\,(\mathbf{E}^2+\mathbf{B}^2)$$

Az elektromágneses mező energiája áramlik

Az energiaáramlás erőssége
(felületegységen át
időegységenként átment energia):

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

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



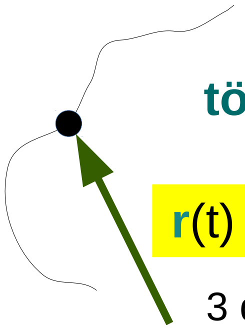
John Henry Poynting
(1852–1914)

Fizikai rendszerek dinamikája

Fizikai rendszerek dinamikája

tömegpont **mező**

Fizikai rendszerek dinamikája

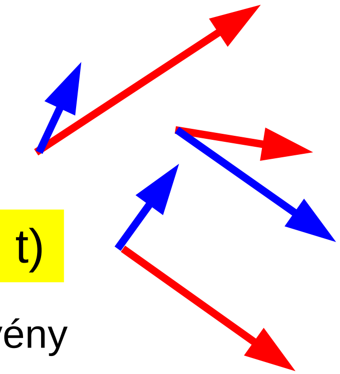


tömegpont

r(t)

3 db egyváltozós függvény

a rendszer dinamikáját
leíró függvény(ek)

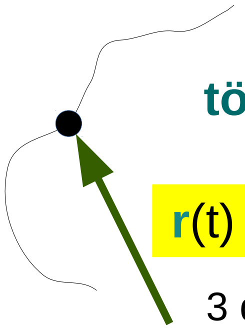


mező

E(**r**, t), **B**(**r**, t)

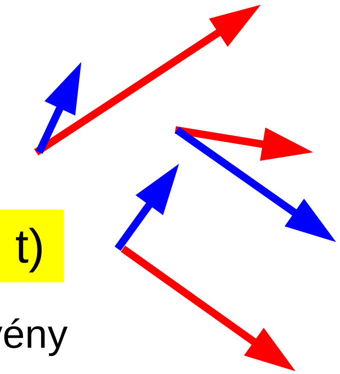
6 db négyváltozós függvény

Fizikai rendszerek dinamikája



tömegpont

mező



$\mathbf{r}(t)$

a rendszer dinamikáját leíró függvény(ek)

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

3 db egyváltozós függvény

6 db négyváltozós függvény

$m\mathbf{a} = \mathbf{F}$

Newton-törvény

a dinamikát meghatározó egyenletek

Maxwell-egyenletek

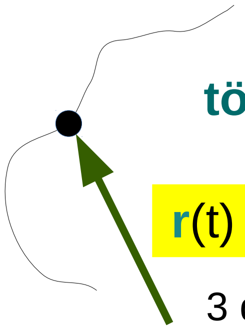
$$\oiint_{\partial V} \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

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

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

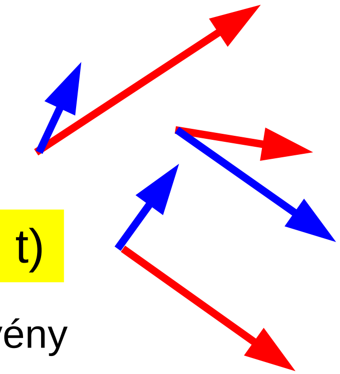
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_S + \mu_0 \epsilon_0 \iint_S \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{A}$$

Fizikai rendszerek dinamikája



tömegpont

mező



$\mathbf{r}(t)$

a rendszer dinamikáját leíró függvény(ek)

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

3 db egyváltozós függvény

6 db négyváltozós függvény

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

a dinamikát meghatározó egyenletek

Maxwell-egyenletek

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

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

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

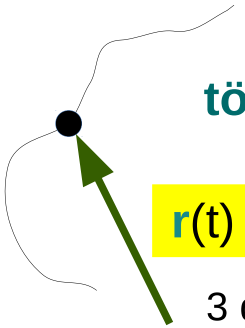
$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_0 I_S + \mu_0 \epsilon_0 \iint_S \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\cdot d\vec{A}$$

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

energiaviszonyok

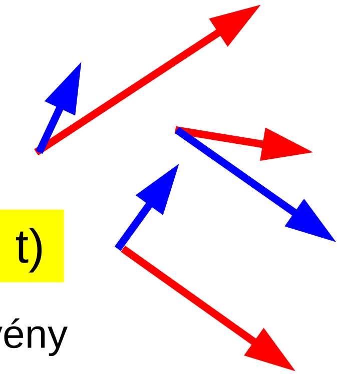
a dinamikai egyenletek következményei!

Fizikai rendszerek dinamikája



tömegpont

mező



$\mathbf{r}(t)$

a rendszer dinamikáját leíró függvény(ek)

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

3 db egyváltozós függvény

6 db négyváltozós függvény

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

a dinamikát meghatározó egyenletek

Maxwell-egyenletek

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

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

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

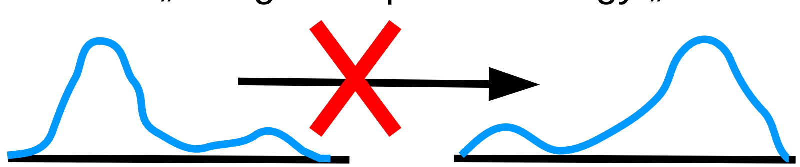
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_S + \mu_0 \epsilon_0 \iint_S \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{A}$$

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

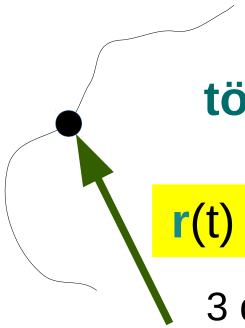
energiaviszonyok

a dinamikai egyenletek következményei!

Nincs „energia-teleportáció” vagy „átutalás”



Fizikai rendszerek dinamikája

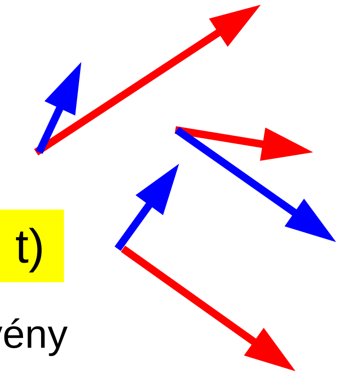


tömegpont

$\mathbf{r}(t)$

3 db egyváltozós függvény

mező



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

6 db négyváltozós függvény

a rendszer dinamikáját leíró függvény(ek)

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

a dinamikát meghatározó egyenletek

Maxwell-egyenletek

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

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

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

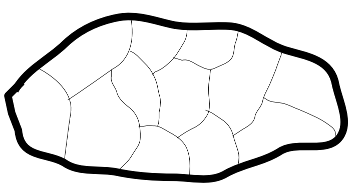
$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_0 I_S + \mu_0\epsilon_0 \iint_S \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\cdot d\vec{A}$$

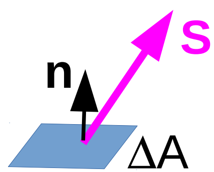
$E = K + V =$
$= \frac{1}{2} m \mathbf{v}^2 + V(\mathbf{r})$

energiaviszonyok

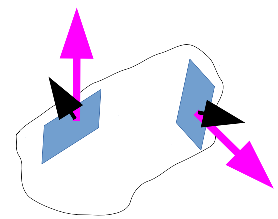
a dinamikai egyenletek következményei!

$E = \Sigma\, \mathbf{w}(\mathbf{r})\, \Delta V$





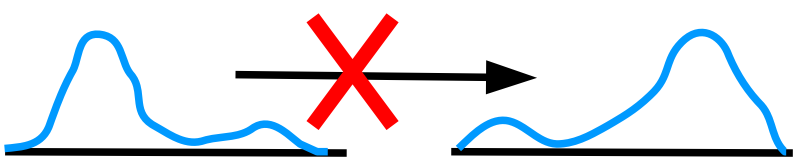
$\Delta E = (\mathbf{Sn})\, \Delta A\, \Delta t$



$\Delta E = -\Sigma\, (\mathbf{Sn})\, \Delta A\, \Delta t$

ami kifolyik...

Nincs „energia-teleportáció” vagy „átutalás”



Az energia lokális megmaradása:

$$\Delta\left(\Sigma\, \mathbf{w}(\mathbf{r})\, \Delta V\right) = -\Sigma\, (\mathbf{Sn})\, \Delta A\, \Delta t$$

Az elektromágneses mezőnek **energiája van**

Az energia sűrűsége
(térfogategységben levő energia):

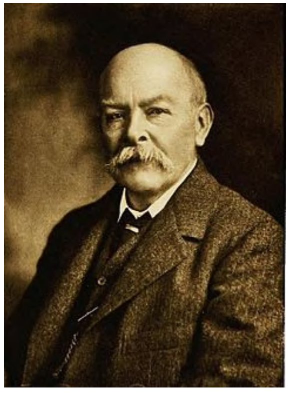
$$w = (½)(\mathbf{E}^2+\mathbf{B}^2)$$

Az elektromágneses mező **energiája áramlik**

Az energiaáramlás erőssége
(felületegységen át
időegységenként átment energia):

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

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



John Henry Poynting
(1852–1914)

Az elektromágneses mezőnek energiája van

Az energia sűrűsége (térfogategységben levő energia):

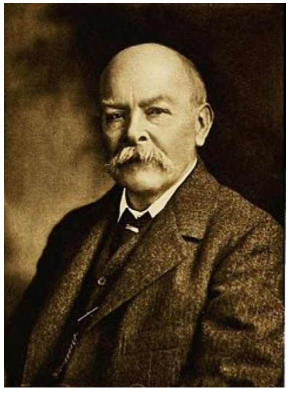
$$w = (½)\,(E^2 + B^2)$$

Az elektromágneses mező energiája áramlik

Az energiaáramlás erőssége (felületegységen át időegységenként átment energia):

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

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



John Henry Poynting (1852–1914)

Poynting-vektor

(az energiaáram-sűrűség vektora)

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

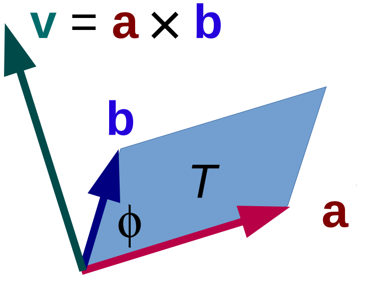
vektoriális szorzás $\mathbf{a} \times \mathbf{b} = \mathbf{v}$

a **v** vektor merőleges **a** és **b** síkjára

$|\mathbf{v}| = T$

T a paralelogramma területe

$T = |\mathbf{a}|\,|\mathbf{b}| \sin\phi$



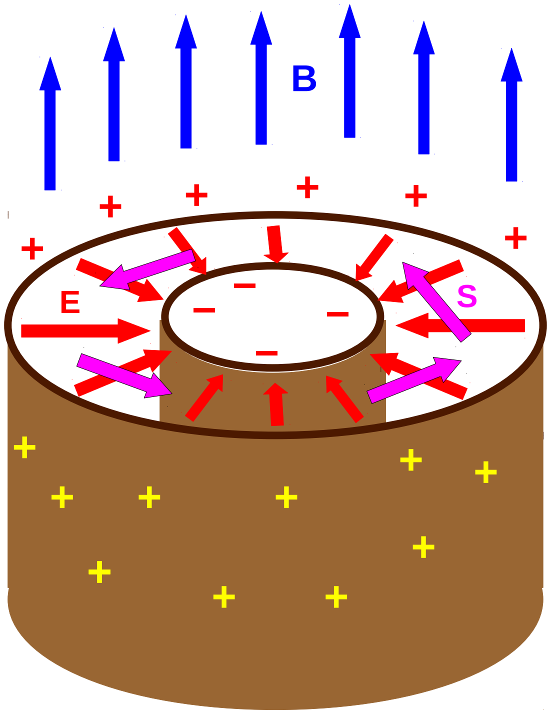
$T = 0$, ha **a** és **b** párhuzamos

$T = \max$, ha **a** és **b** merőleges

Energiaáramlás sztatikus rendszerben ? !!!

Energiaáramlás sztatikus rendszerben ? !!!

Feltöltött hengerkondenzátor
mágneses mezőben

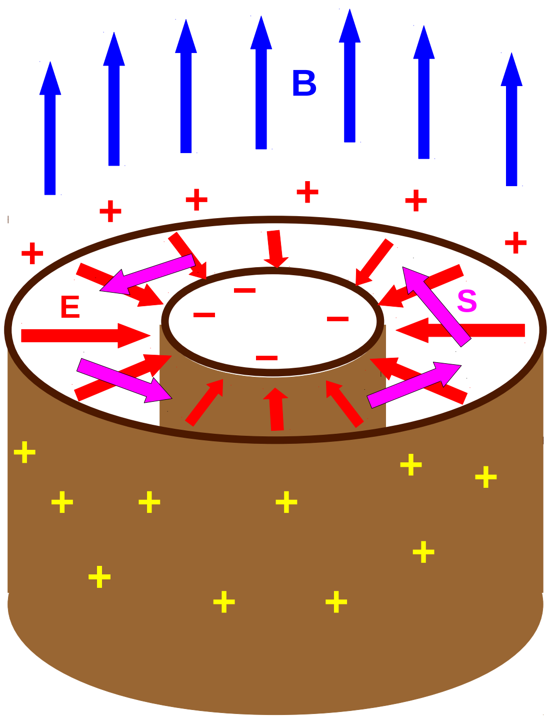


A Poynting-vektor körbejár!

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

Energiaáramlás sztatikus rendszerben ? !!!

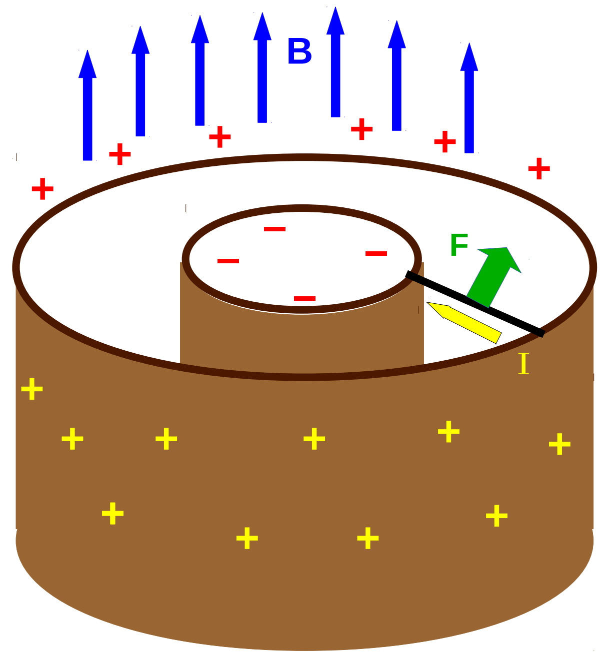
Feltöltött hengerkondenzátor
mágneses mezőben



A Poynting-vektor körbejár!

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

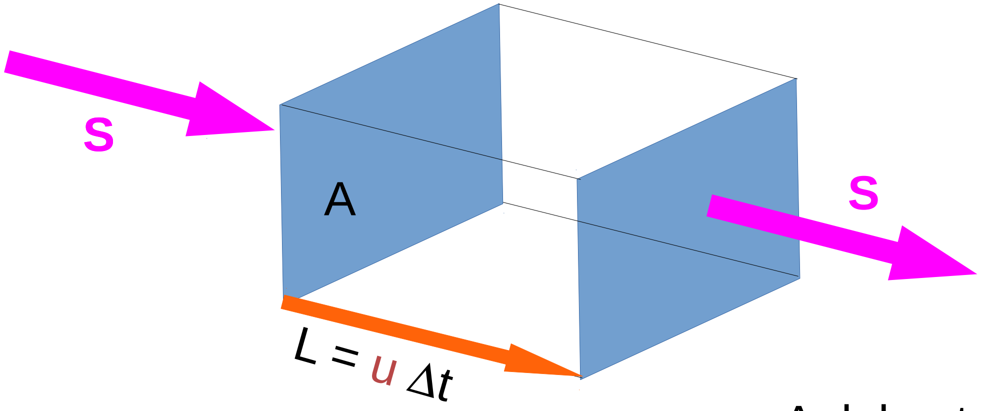
A rendszer **perdülete**
a kondenzátor rövidre zárásával
forgássá alakítható



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

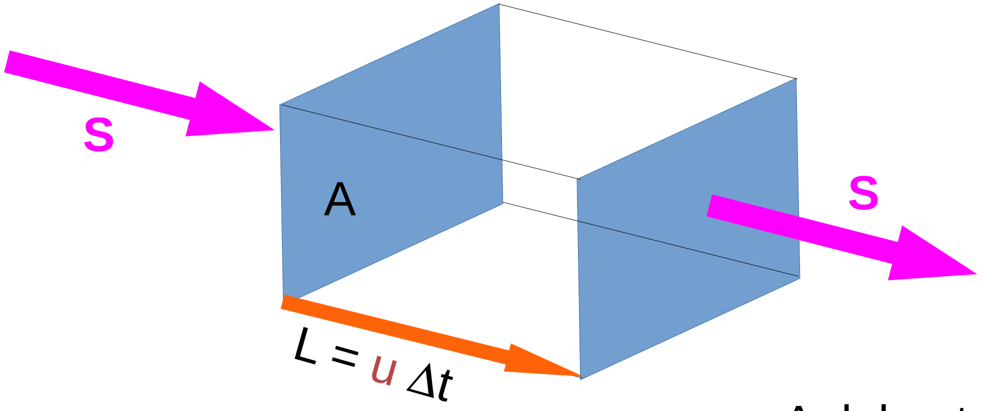
$\Delta E = S\,A\,\Delta t$ energia.

Ez az energia u sebességgel
$L = u\,\Delta t$ 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

$\Delta E = S\,A\,\Delta t$ energia.

Ez az energia u sebességgel
$L = u\,\Delta t$ távolságra jutott el.

A dobozt w sűrűséggel kitöltő összes energia:

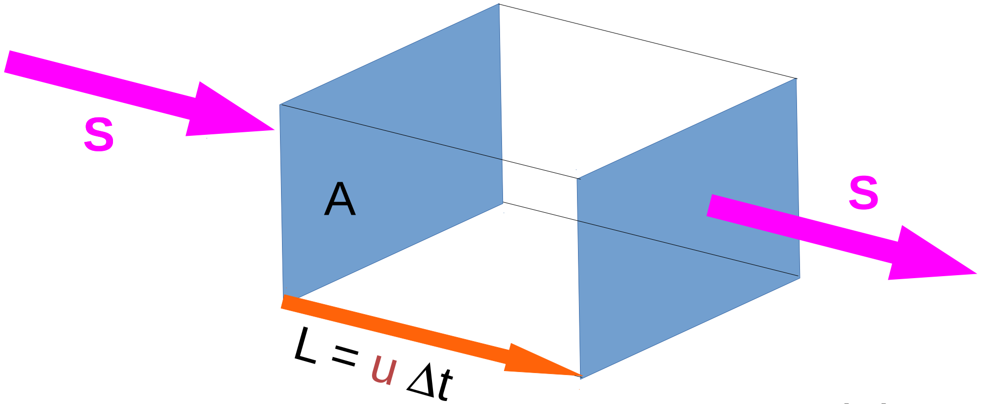
$$E = w\,V = w\,A\,L = w\,A\,u\,\Delta t$$

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

$\Delta E = S\,A\,\Delta t$ energia.

Ez az energia u sebességgel
$L = u\,\Delta t$ 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:

$$\boxed{u = S / w}$$

Mekkora az energia áramlási sebessége?

$$u = S / w$$

Mekkora az energia áramlási sebessége?

$$u = S / w$$

Alkalmazzuk ezt az eredményt az elektromágneses mezőre:

$\mathbf{S} = c\,(\mathbf{E} \times \mathbf{B})$ $\quad\quad$ $w = (½)\,(\mathbf{E}^2+\mathbf{B}^2)$

Ezért az elektromágneses energia **u** áramlási sebessége:

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

Mekkora az energia áramlási sebessége?

$u = S / w$

Alkalmazzuk ezt az eredményt az elektromágneses mezőre:

$\mathbf{S} = c\,(\mathbf{E} \times \mathbf{B}) \qquad w = (½)\,(\mathbf{E}^2+\mathbf{B}^2)$

Ezért az elektromágneses energia u áramlási sebessége:

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

Emlékezető:

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

$\sin\phi \leq 1$

Becsüljük meg a sebesség nagyságát!

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

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

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

számtani és mértani közép

Mekkora az energia áramlási sebessége?

$$u = S / w$$

Alkalmazzuk ezt az eredményt az elektromágneses mezőre:

$\mathbf{S} = c\,(\mathbf{E} \times \mathbf{B})$ $\qquad$ $w = (½)\,(\mathbf{E}^2+\mathbf{B}^2)$

Ezért az elektromágneses energia **u** áramlási sebessége:

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

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

Becsüljük meg a sebesség nagyságát!

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

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

$$\sqrt{x\,y} \leq \frac{x+y}{2}$$
számtani és mértani közép

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

$$|\mathbf{u}| \leq c$$

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?

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

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

Emlékezető:

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

$\sin\phi \leq 1$

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

számtani és mértani közép

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

Mikor lesz az egyenlőtlenség helyett egyenlőség?

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

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

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

Mekkora az energia áramlási sebessége?

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

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

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

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

számtani és mértani közép

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

Mikor lesz az egyenlőtlenség helyett egyenlőség?

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

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

Ha tehát a téridő egy pontjában **E** és **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: $w = ½\,(\mathbf{E}^2 + \mathbf{E}^2) = A^2$

Ezért az energia terjedési sebessége: $u = S / w = c\,A^2 / A^2 = c$

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: $w = ½\,(\mathbf{E}^2 + \mathbf{E}^2) = A^2$

Ezért az energia terjedési sebessége: $u = S / w = c\,A^2 / A^2 = c$

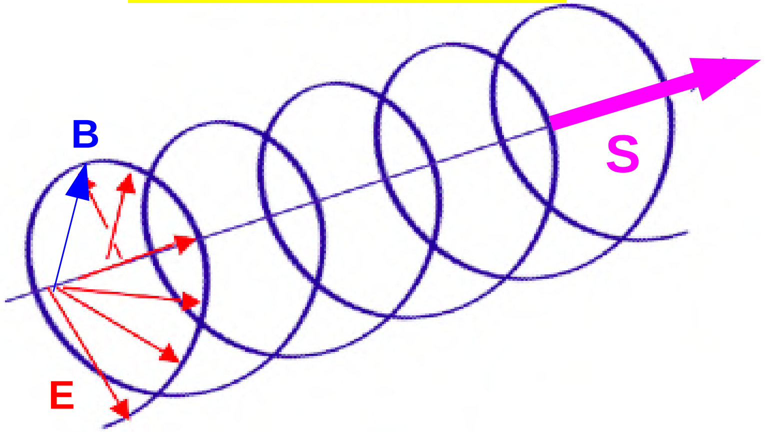
ahogy várható volt.

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

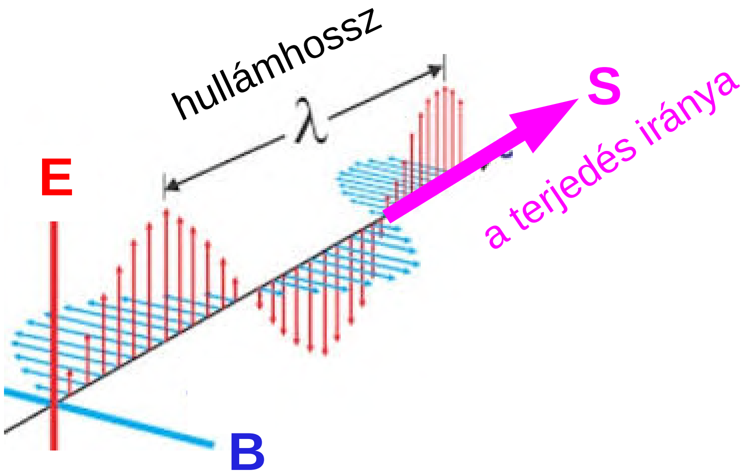
$$\mathbf{S} = c\,(\mathbf{E} \times \mathbf{B})$$

mindenütt és mindig ugyanakkora

Homogén energiaterjedés

Elektromágneses síkhullám energiaviszonyai

Lineárisan polarizált síkhullám



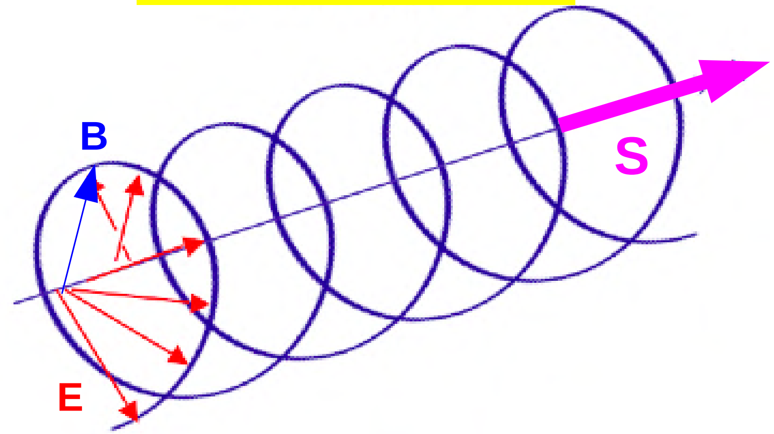
Csomópontok: **E** és **B** is nulla

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: $T = 2\pi / \omega$

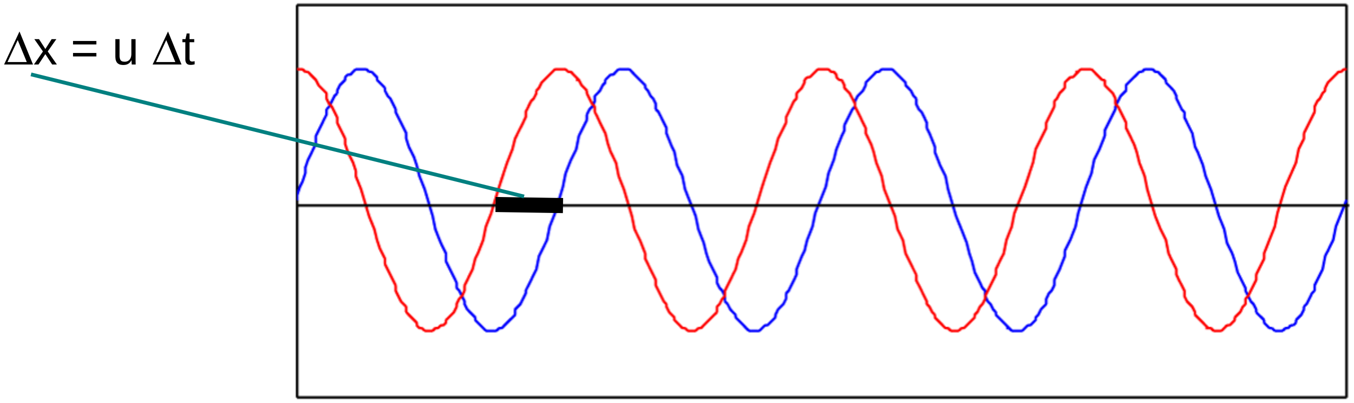
A $t=0$ időpontban: $\Phi(x, 0) = A \cos(kx)$ hullámhossz: $\lambda = 2\pi / k$

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

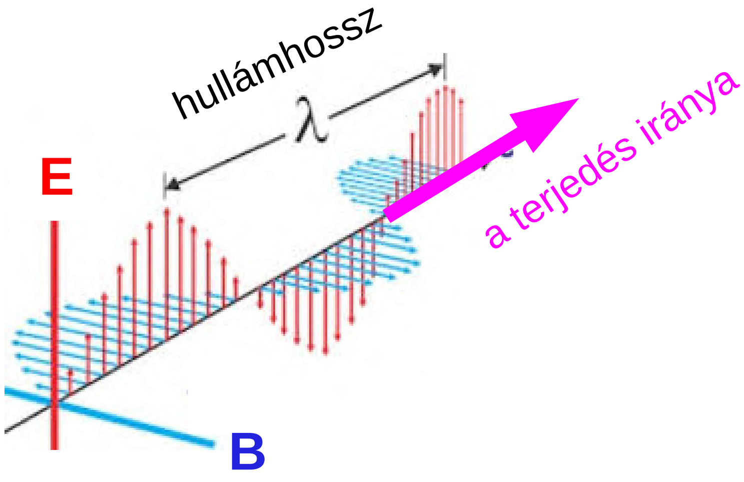
De ez a függvény így is írható: $\Phi(x, t) = A \cos[k(x - u t)]$ $u = \omega/k$

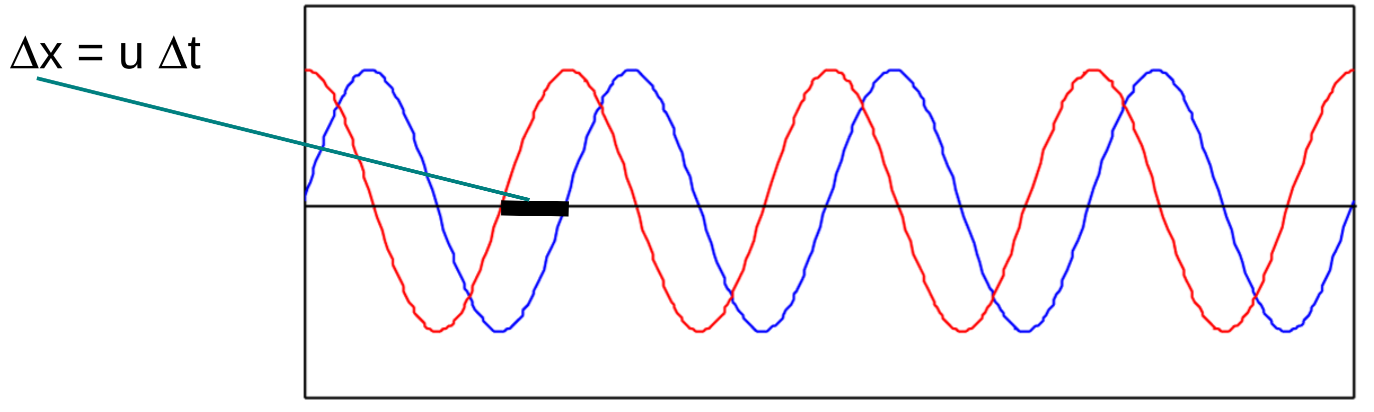
A hullám u sebességgel halad x irányban: **a csomópontok is eltolódnak**!

$\Delta x = u \Delta t$

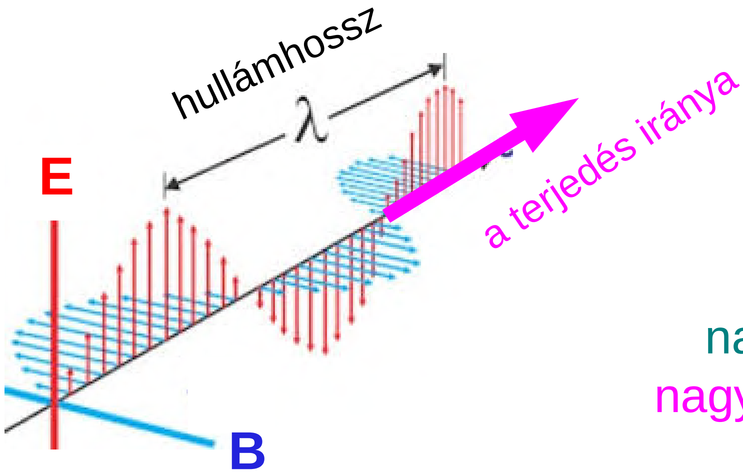


Hogyan megy át az energia a csomópontokon?

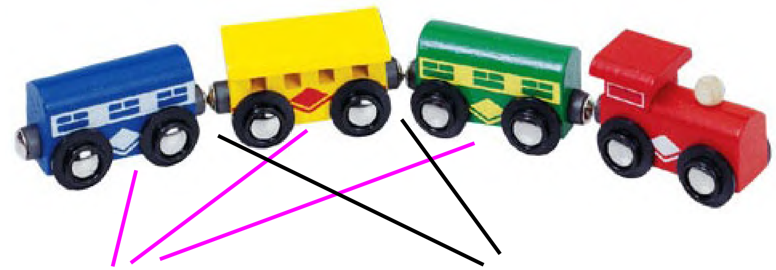




Hogyan megy át az energia a csomópontokon?



A lineárisan polarizált hullám olyan, mint a vonat



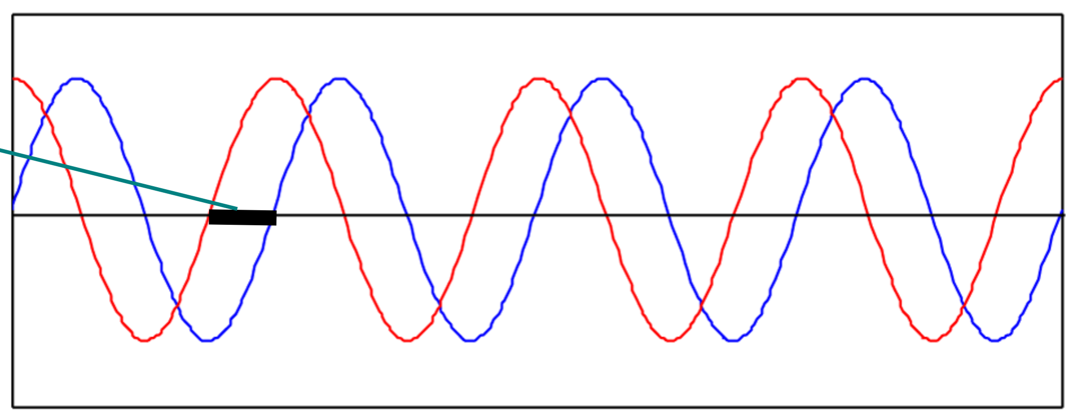
nagy utassűrűség
nagy utasáram-sűrűség

nulla utassűrűség
nulla utasáram-sűrűség

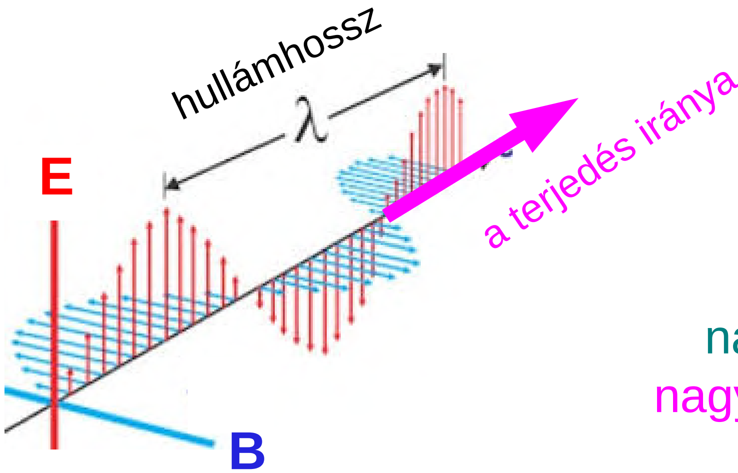
csomópontok:
ezek is eltolódnak!

de az egész vonat halad!

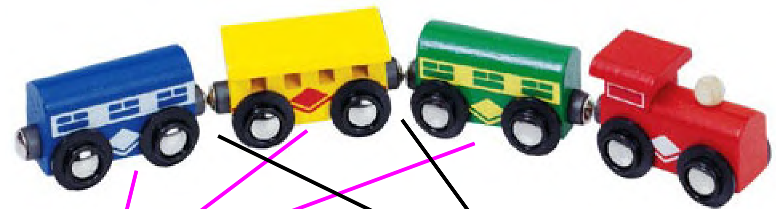
$\Delta x = u\ \Delta t$



Hogyan megy át az energia a csomópontokon?



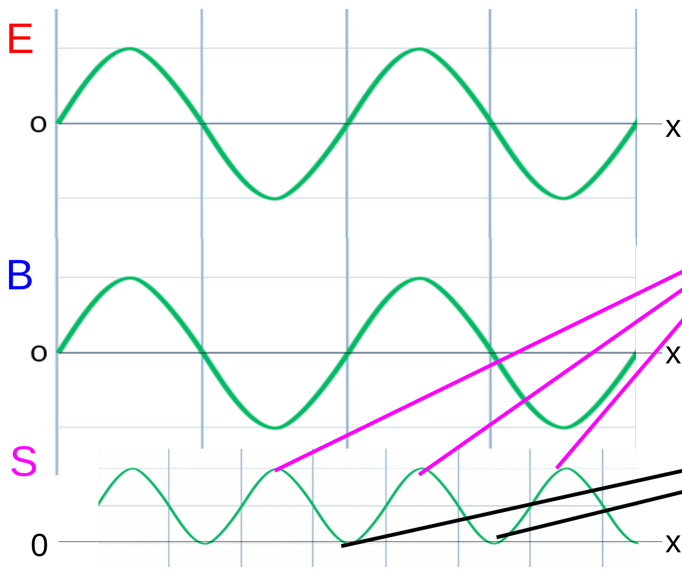
A lineárisan polarizált hullám olyan, mint a vonat



nagy utassűrűség
nagy utasáram-sűrűség

nulla utassűrűség
nulla utasáram-sűrűség

csomópontok:
ezek is eltolódnak!



nagy energiasűrűség
nagy energiaáram-sűrűség

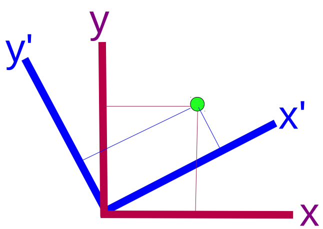
nulla energiasűrűség
nulla energiaáram-sűrűség

u= ω/k = c

Kis kitérő a relativitáselméletről

Kis kitérő a relativitáselméletről

Hagyományos
koordináta-transzformáció:
forgatás

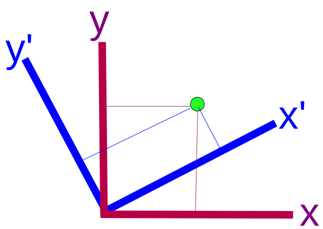


$(x, y) \Longleftrightarrow (x', y')$

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**

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

$x'^2 – c^2 t'^2 = x^2 – c^2 t^2$

$(\mathbf{E}, \mathbf{B}) \Longleftrightarrow (\mathbf{E}', \mathbf{B}')$

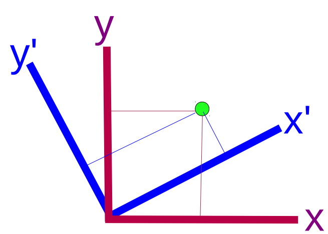
$\mathbf{E}'\mathbf{B}' = \mathbf{EB}$

$\mathbf{E}'^2 – \mathbf{B}'^2 = \mathbf{E}^2 – \mathbf{B}^2$

Kis kitérő a relativitáselméletről

Hagyományos koordináta-transzformáció: **forgatás**

Inerciarendszerek közti koordináta-transzformáció: **Lorentz-transzformáció**



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

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

$(\mathbf{E}, \mathbf{B}) \Longleftrightarrow (\mathbf{E}', \mathbf{B}')$

Invariáns mennyiség:

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

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

$\mathbf{E}'\mathbf{B}' = \mathbf{E}\mathbf{B}$

$\mathbf{E}'^2 - \mathbf{B}'^2 = \mathbf{E}^2 - \mathbf{B}^2$

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**.

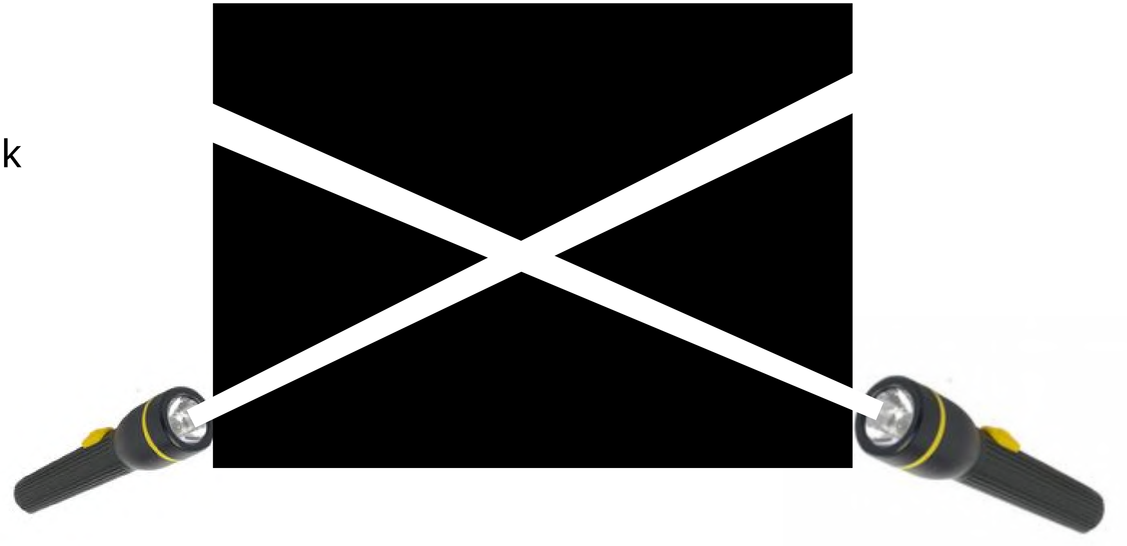
A fény – speciálisan az elektromágneses síkhullám – minden inerciális megfigyelő számára fény.

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 ~~=~~ FÉNY

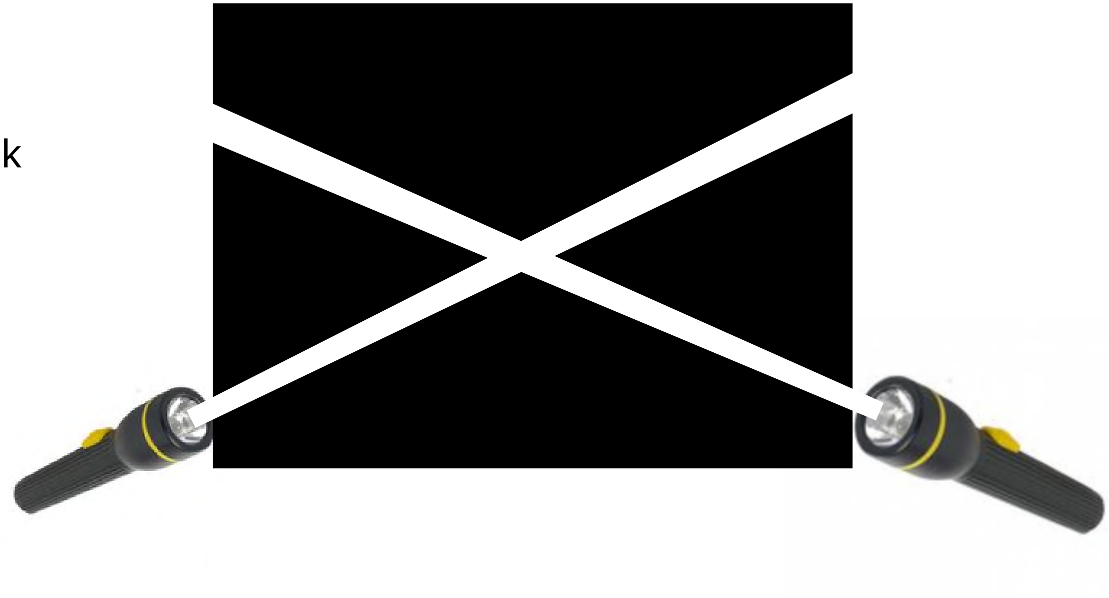
Adjunk össze két fényt!

A Maxwell-egyenletek ezt megengedik

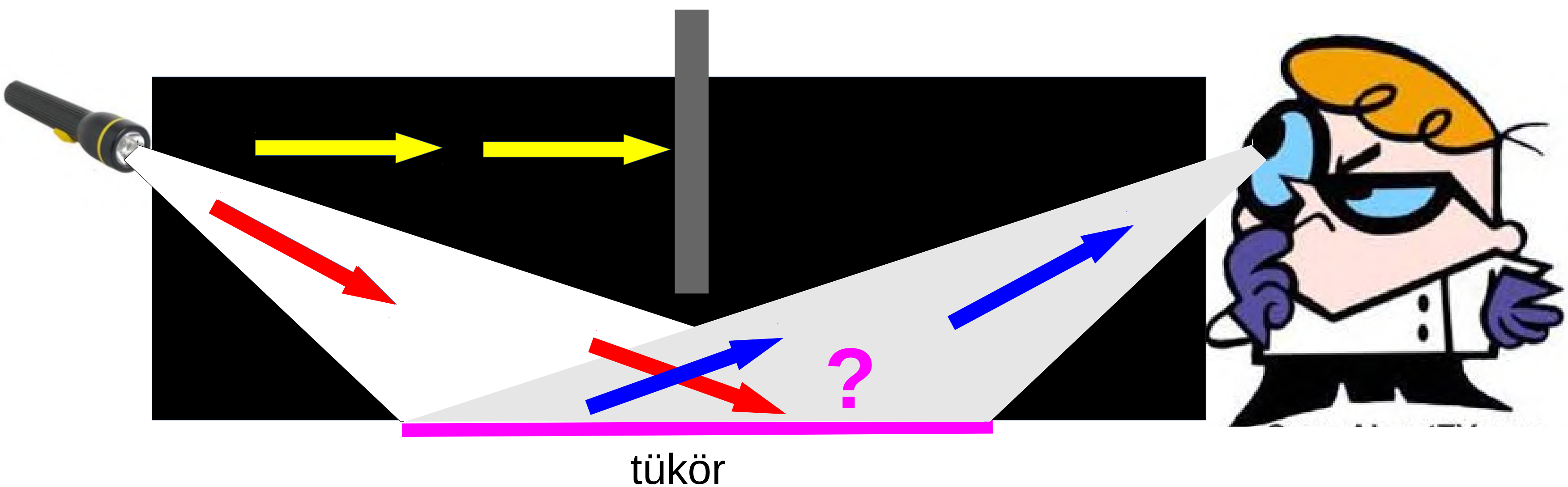
De vajon továbbra is igaz lesz,
hogy **E** és **B** merőlegesek
és egyforma nagyságúak?

Általában NEM!

FÉNY + FÉNY ~~=~~ FÉNY

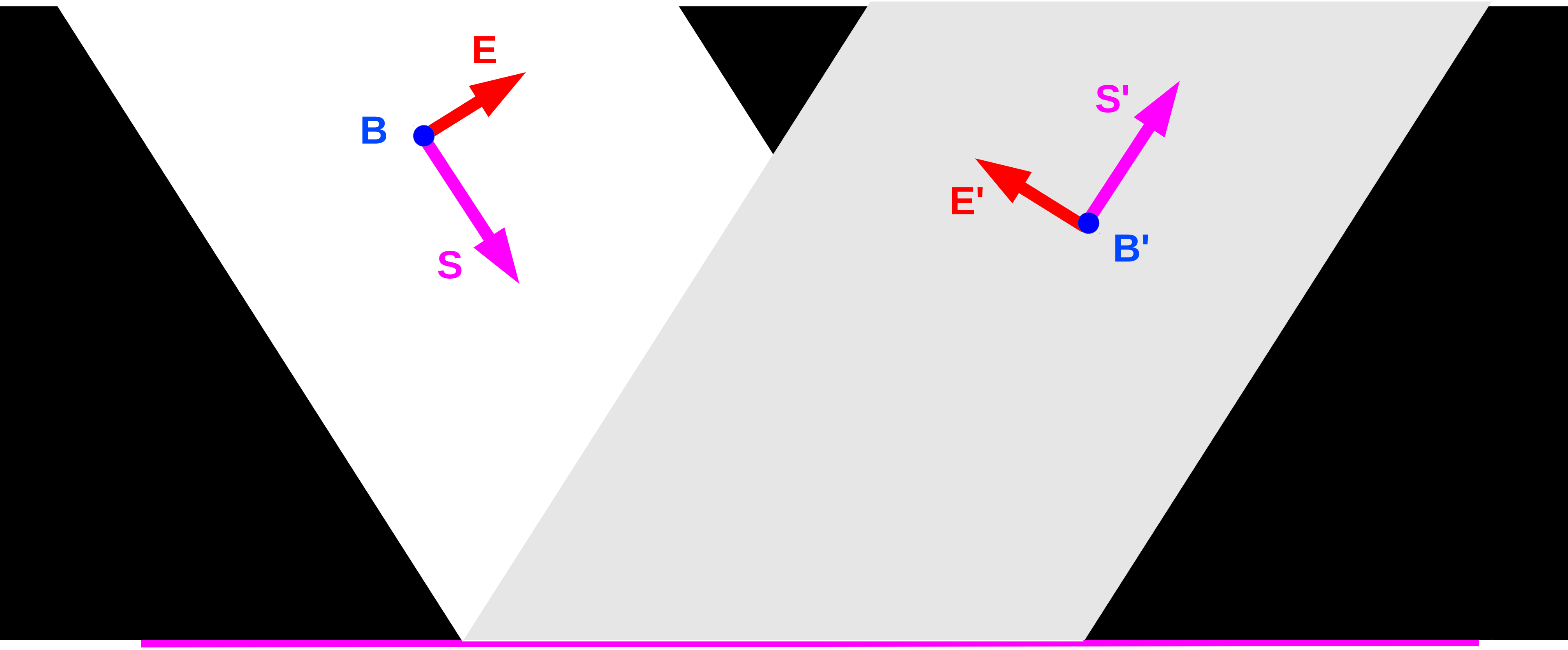


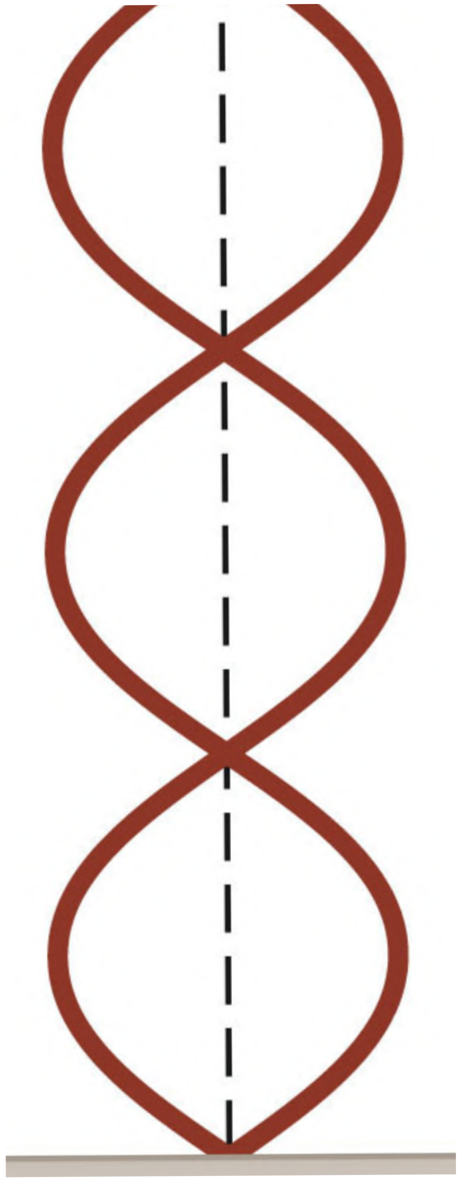
Vizsgáljuk meg részletesen a tükörről visszaverődő fény esetét!



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

De mi a helyzet az átfedési tartományban?

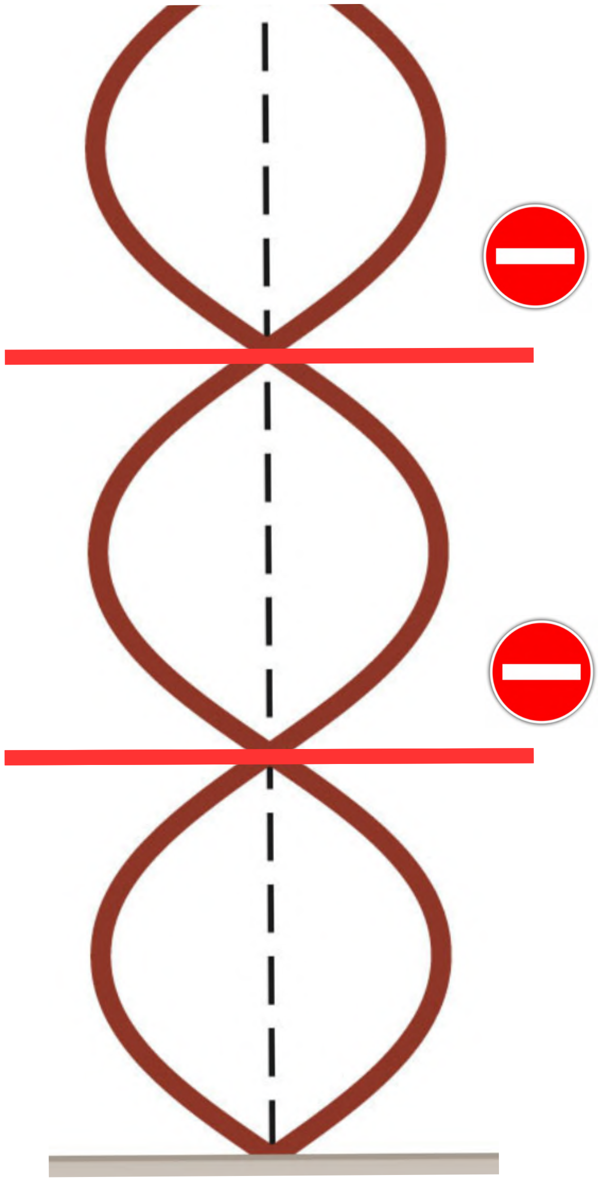




Az eredeti és a visszavert hullám interferenciájának következtében

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.

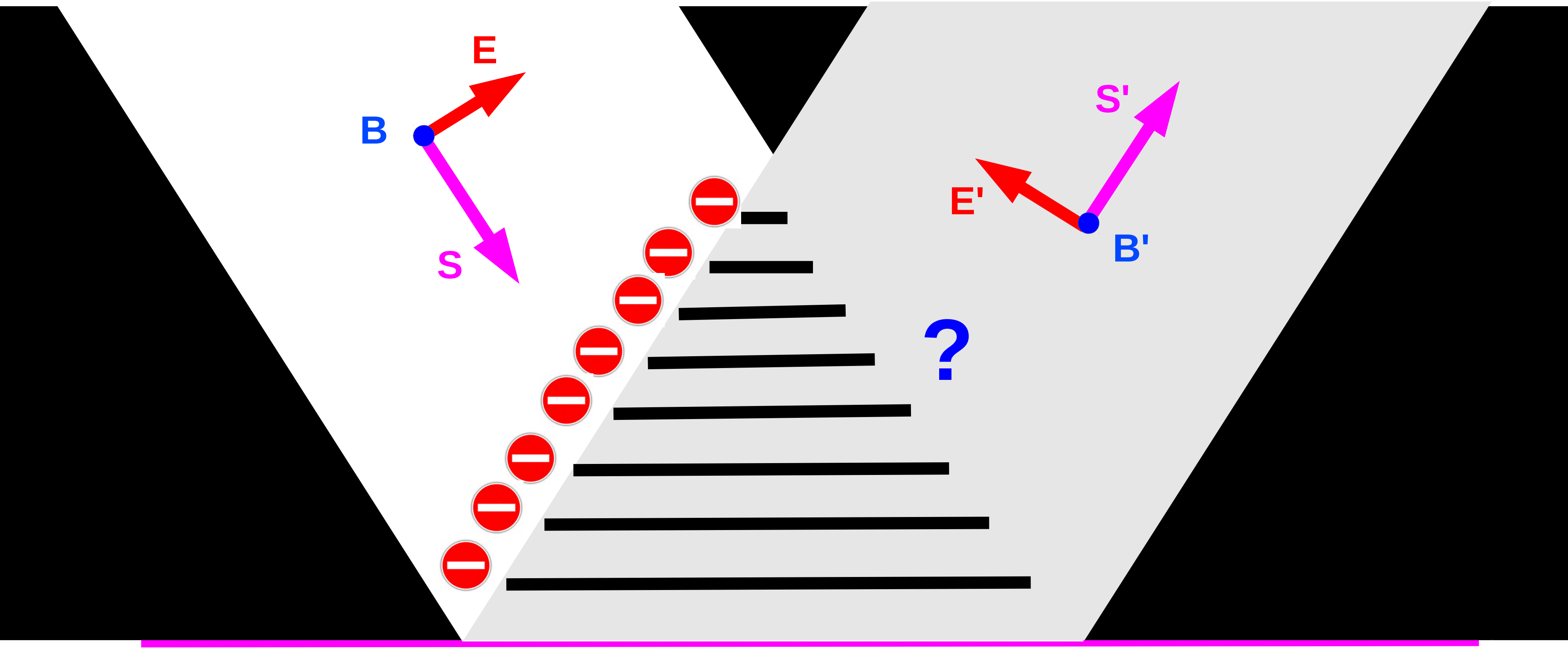
E tiltott síkokon tehát **NEM ÁRAMLIK ÁT** az energia.

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

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

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

Itt nem haladhat át az energia.



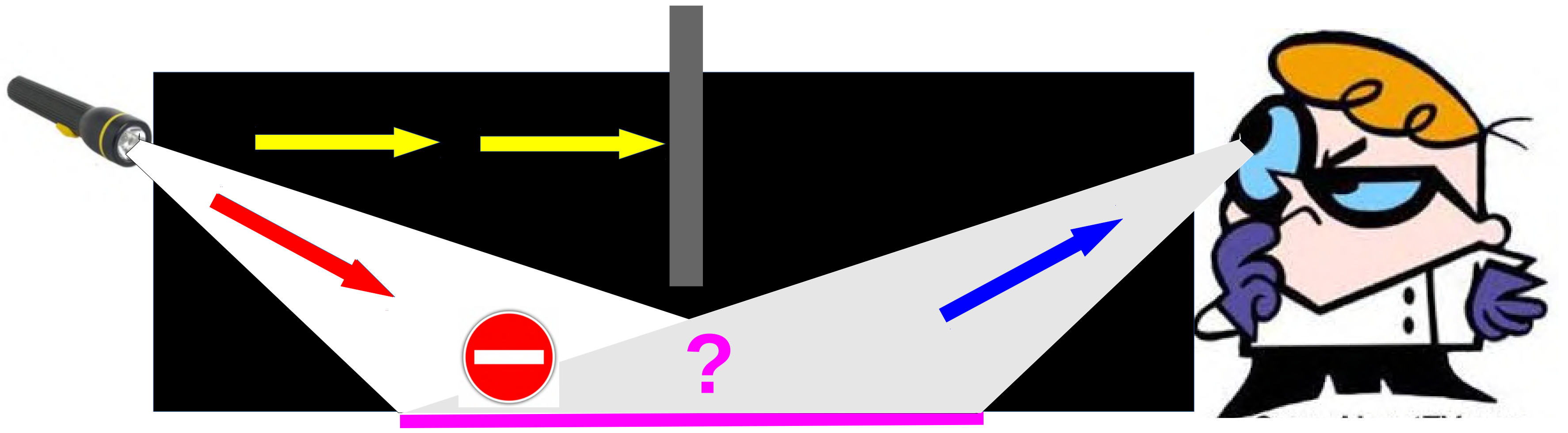
A két fénynyaláb átfedési tartományban tiltott síkok alakulnak ki,
ahol az **S** Poynting-vektor tartósan nulla

Itt nem haladhat át az energia.

Pedig mégis a szemünkbe jut valahogy...

A közvetlen utat pedig kitakartuk

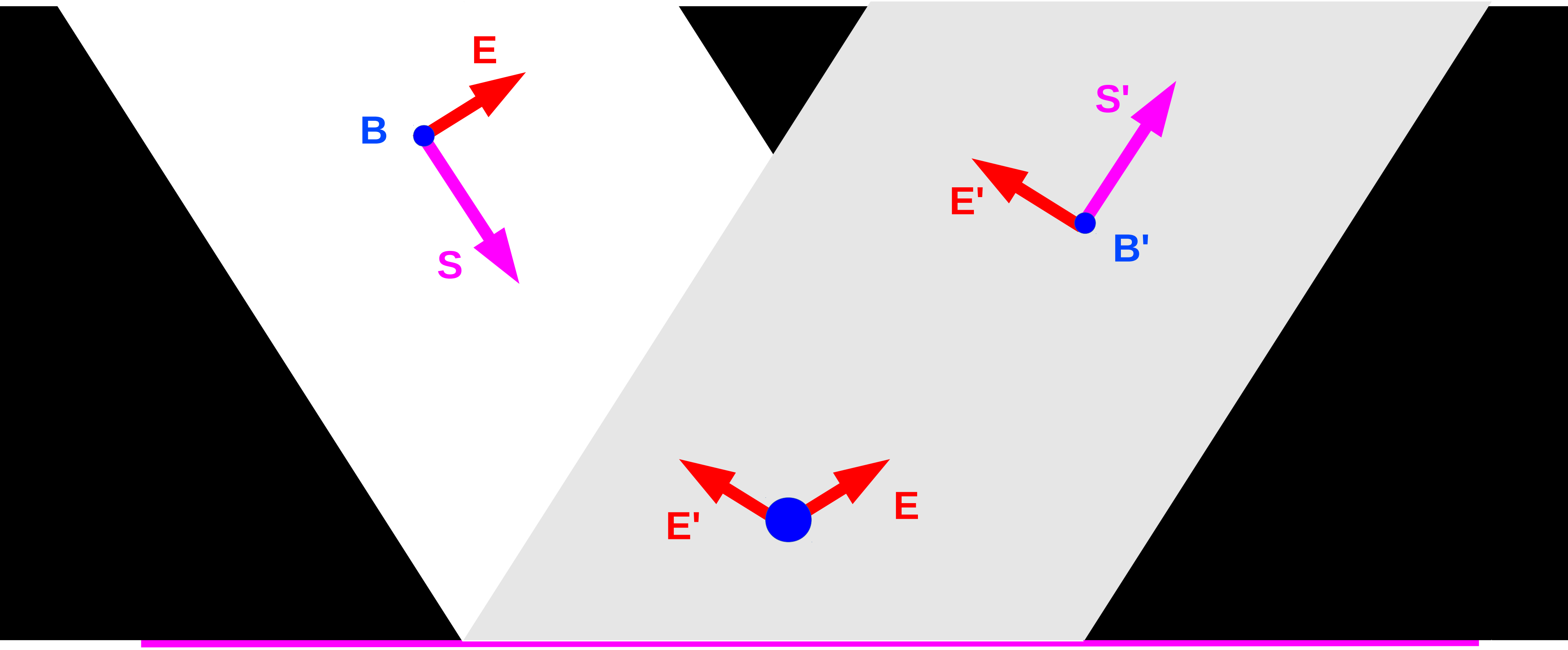
Ez az asztali tükör paradoxona



tükör

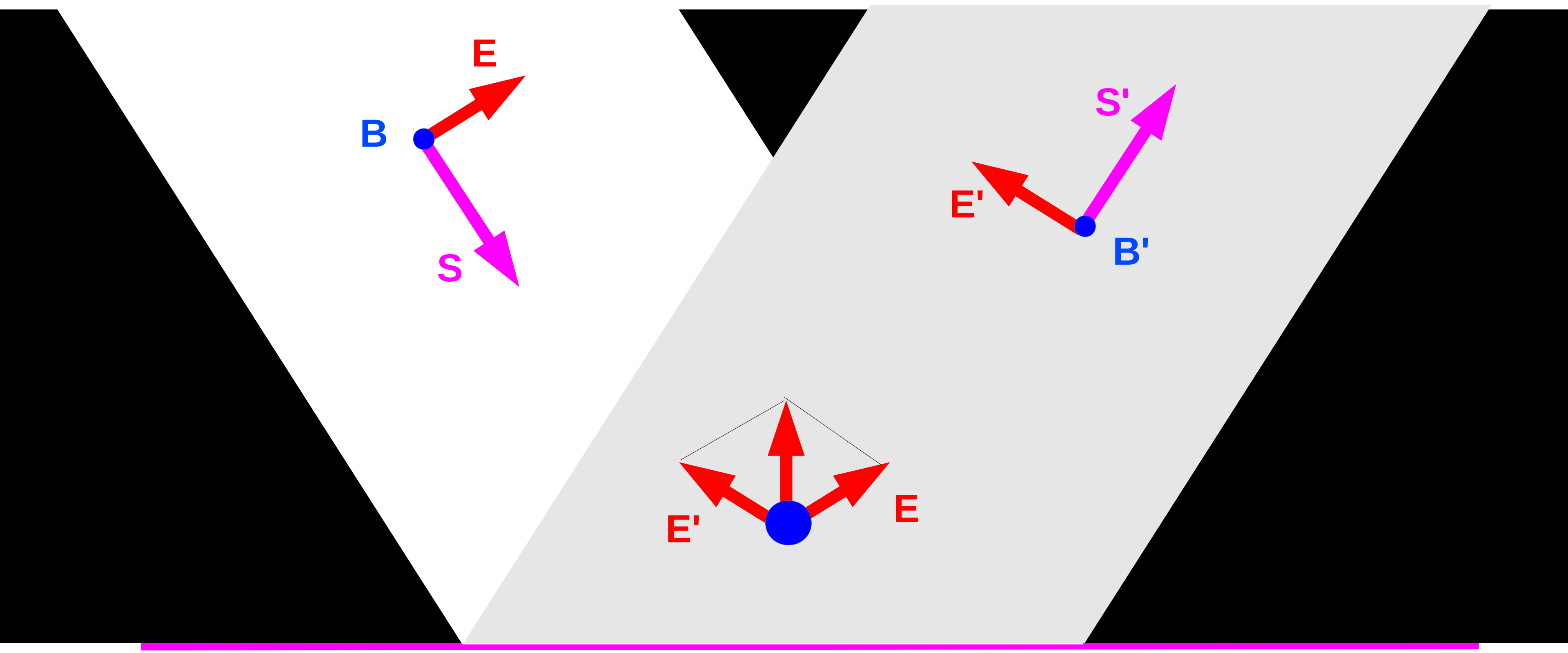
A megoldás kézenfekvő.
A Maxwell-egyenletek lineárisak, a megoldásaikat össze lehet adni.

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



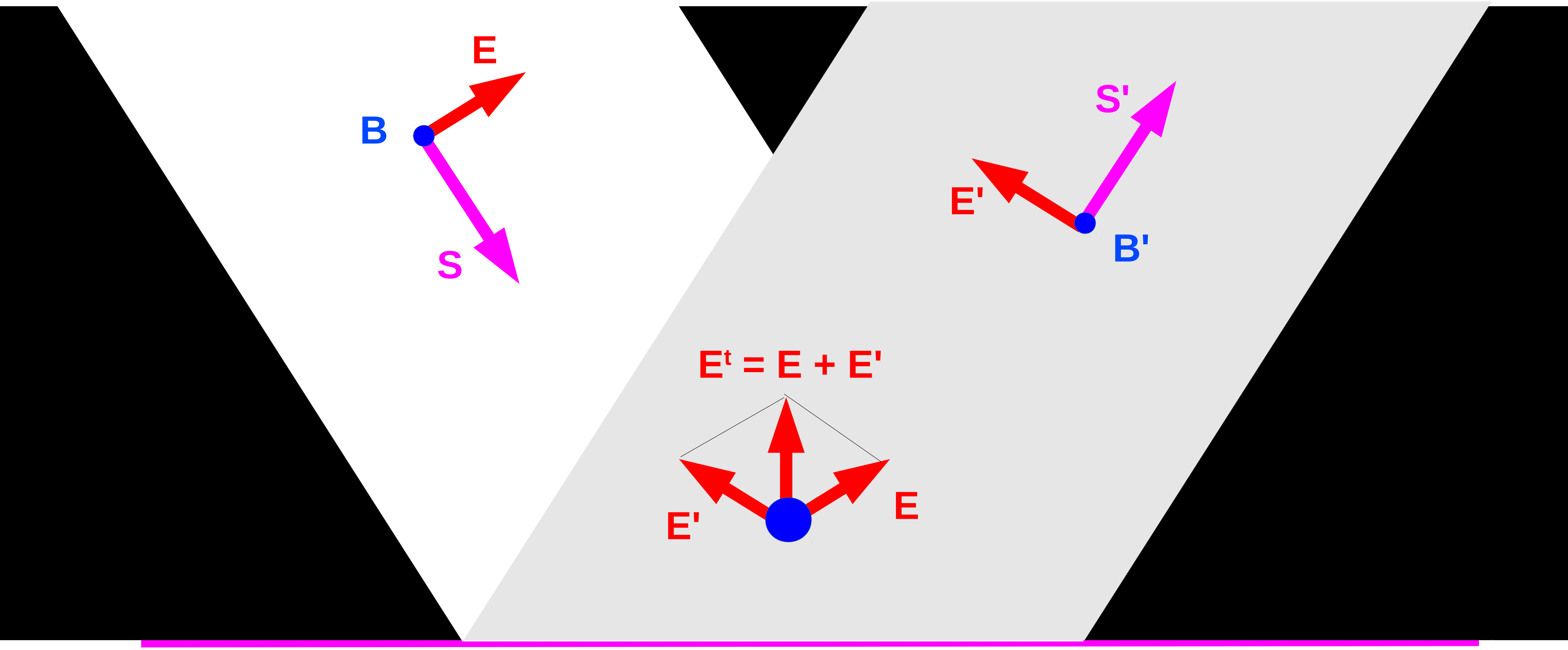
A megoldás kézenfekvő.
A Maxwell-egyenletek lineárisak, a megoldásaikat össze lehet adni.

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



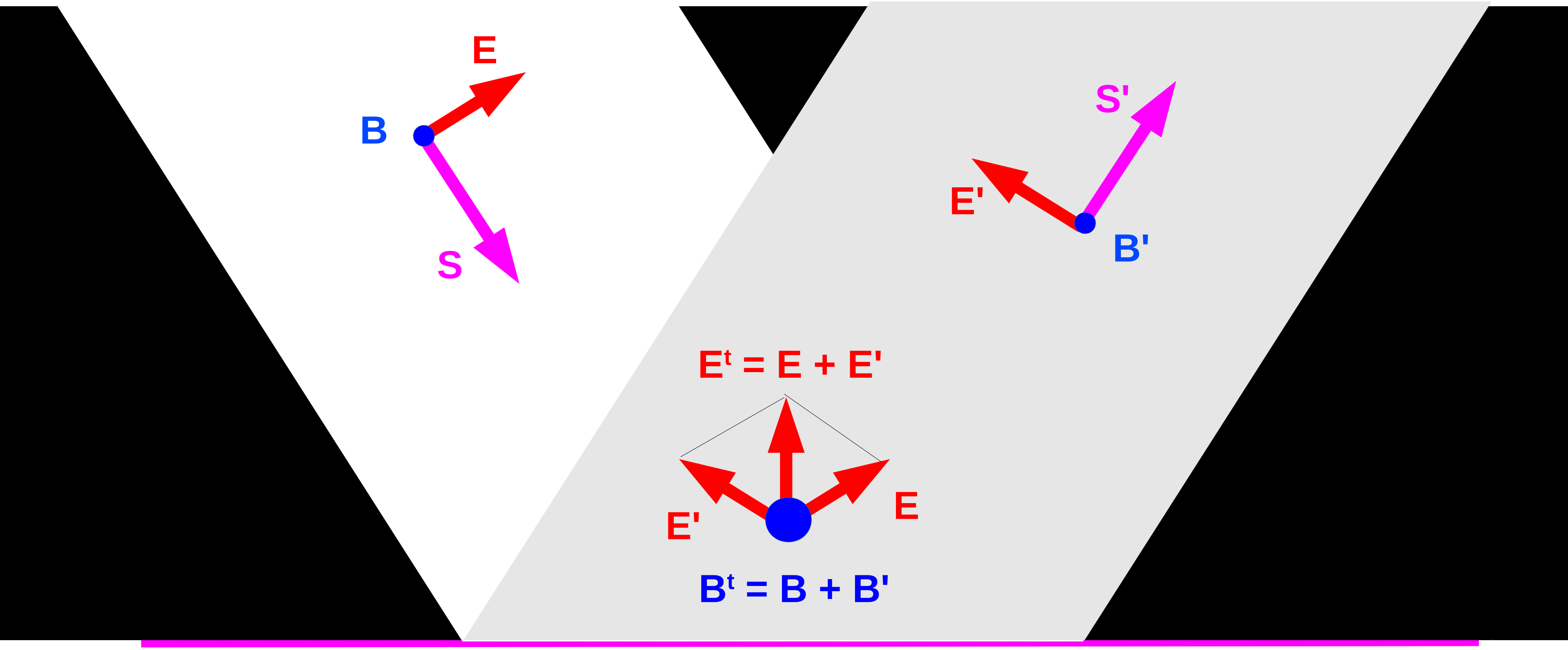
A megoldás kézenfekvő.
A Maxwell-egyenletek lineárisak, a megoldásaikat össze lehet adni.

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



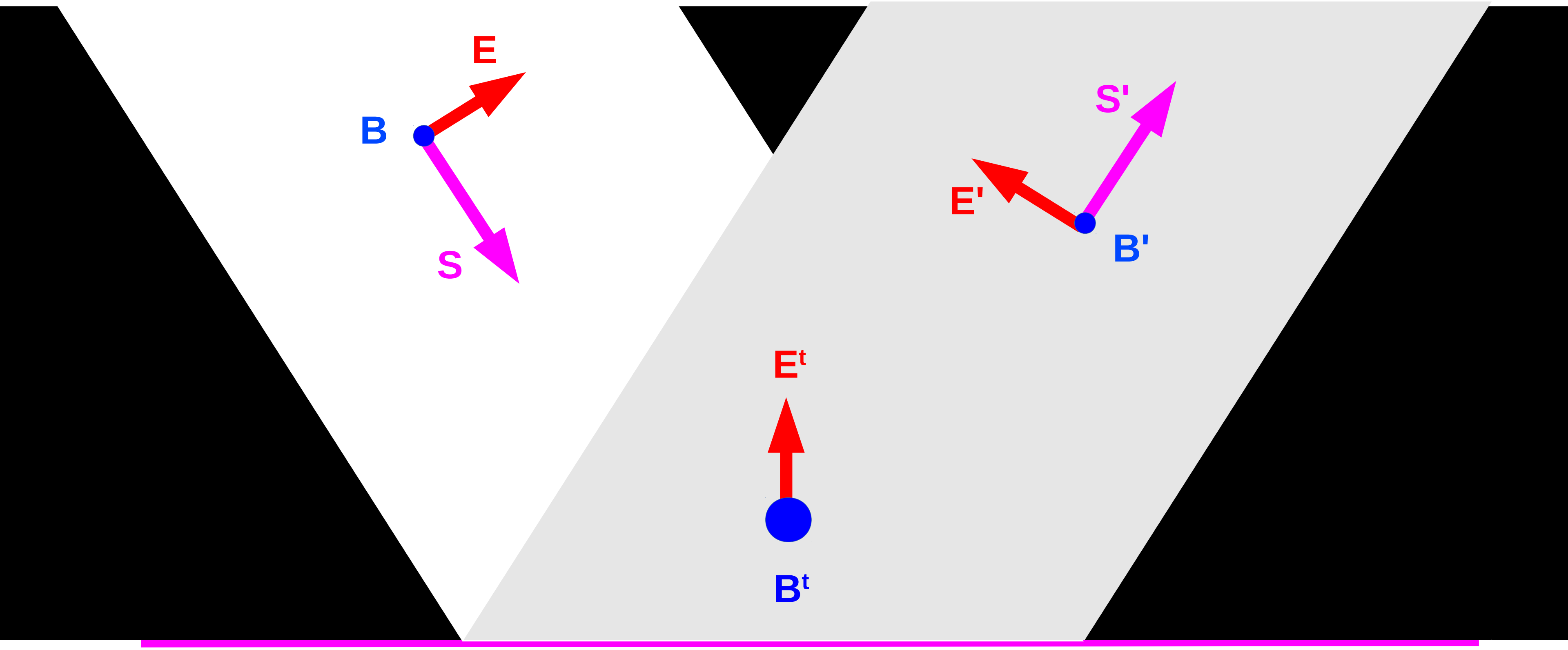
A megoldás kézenfekvő.
A Maxwell-egyenletek lineárisak, a megoldásaikat össze lehet adni.

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



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

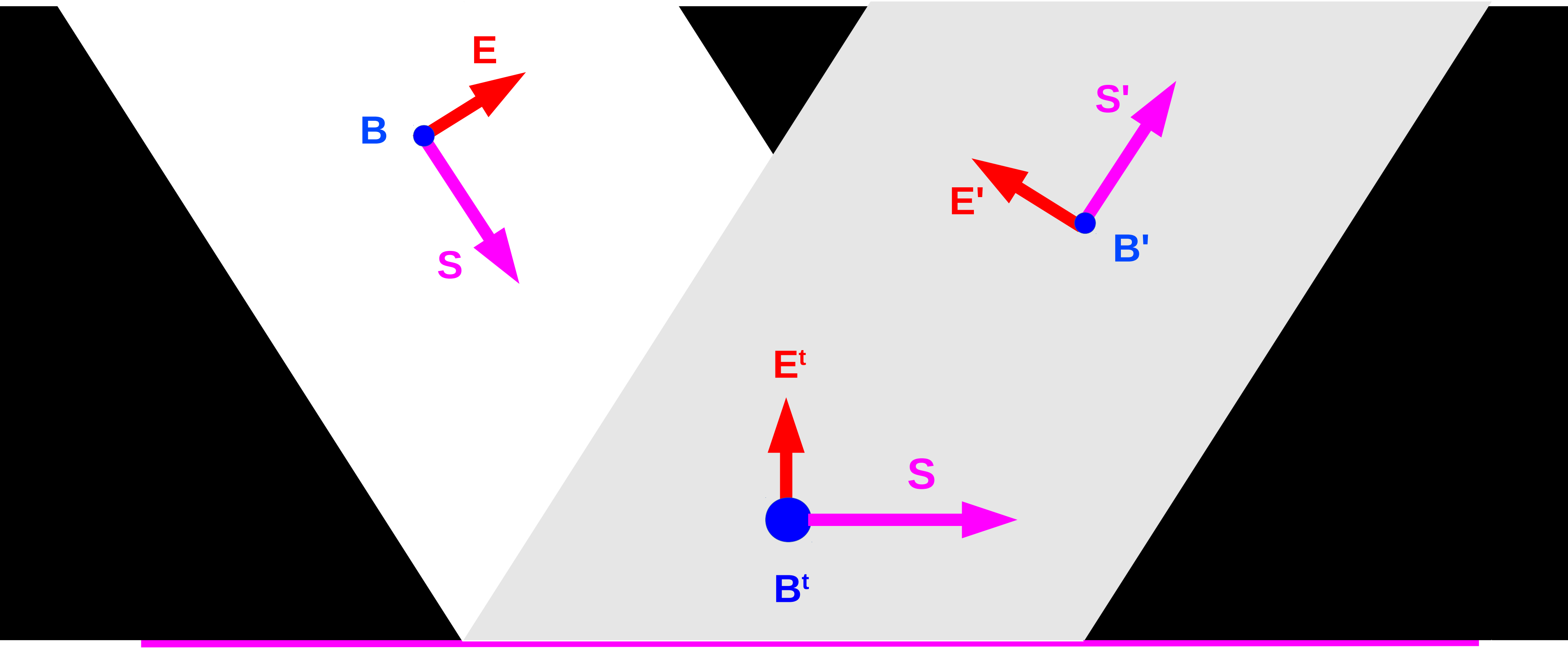
Nem az energiát, nem a Poynting-vektort, hanem a térerősségeket!



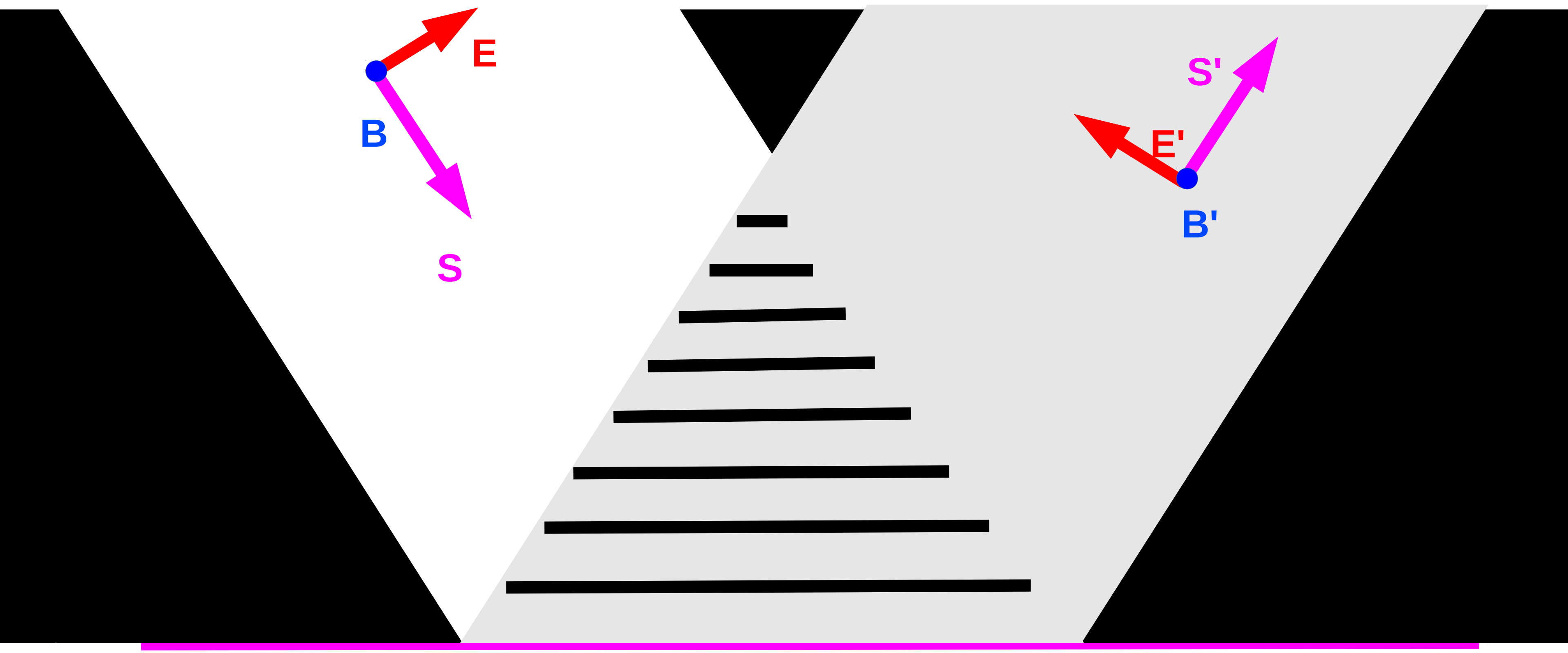
A megoldás kézenfekvő.
A Maxwell-egyenletek lineárisak, a megoldásaikat össze lehet adni.

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

Az eredő térerősségekből kell kiszámítani az eredő Poynting-vektort!

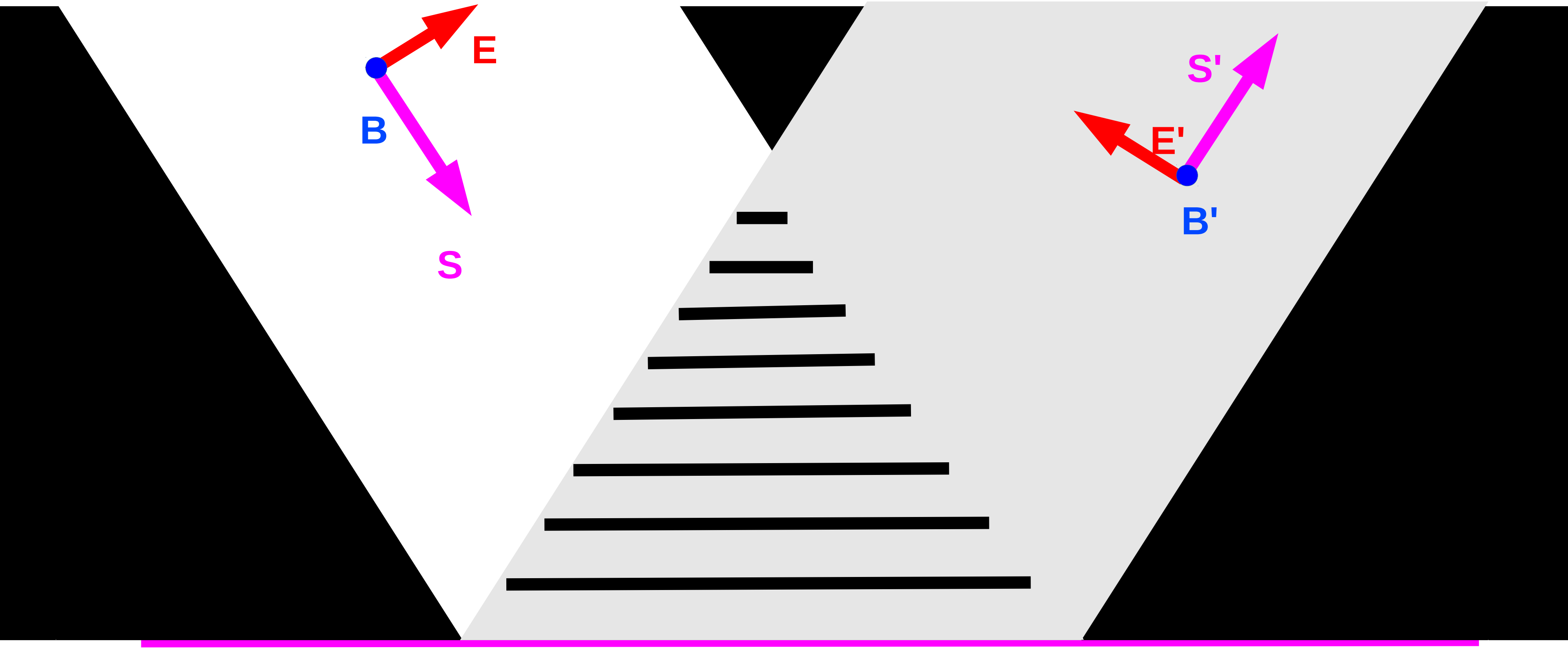


A megoldás kézenfekvő.



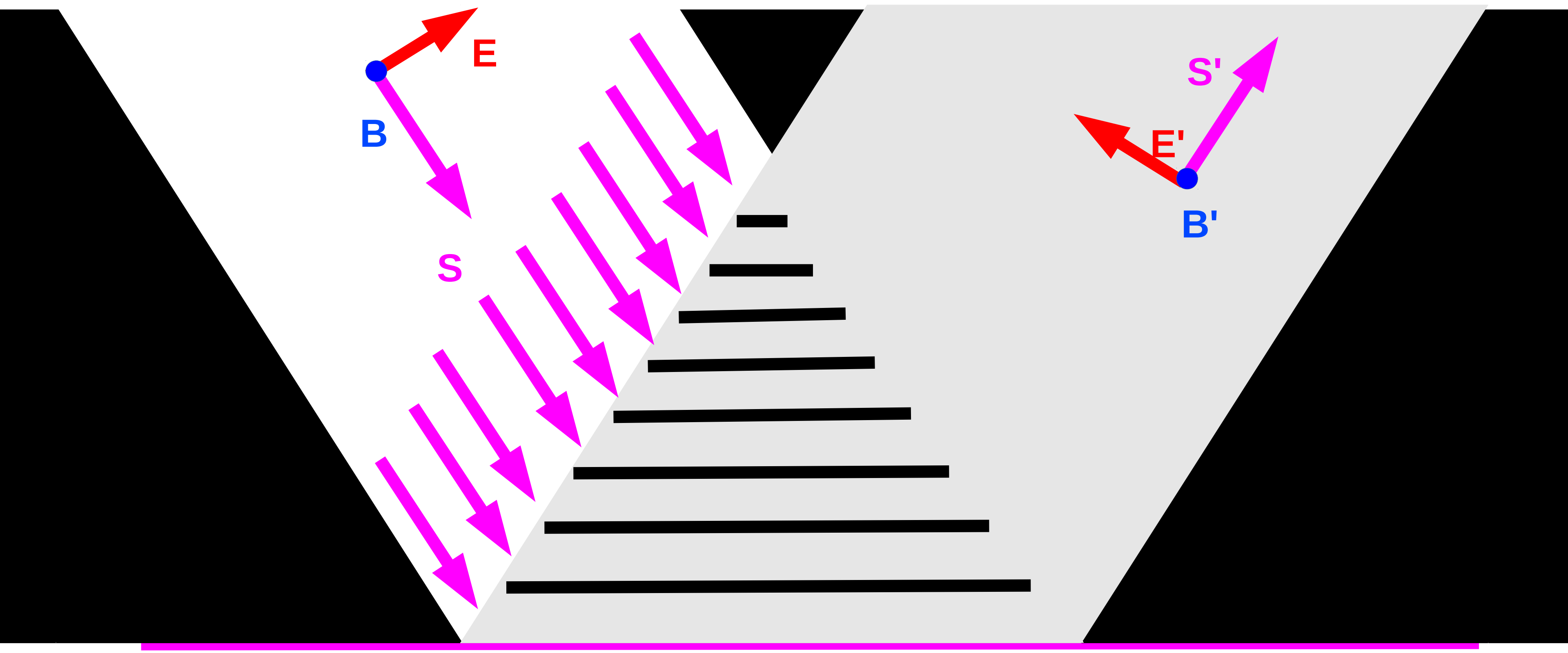
A megoldás kézenfekvő.

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



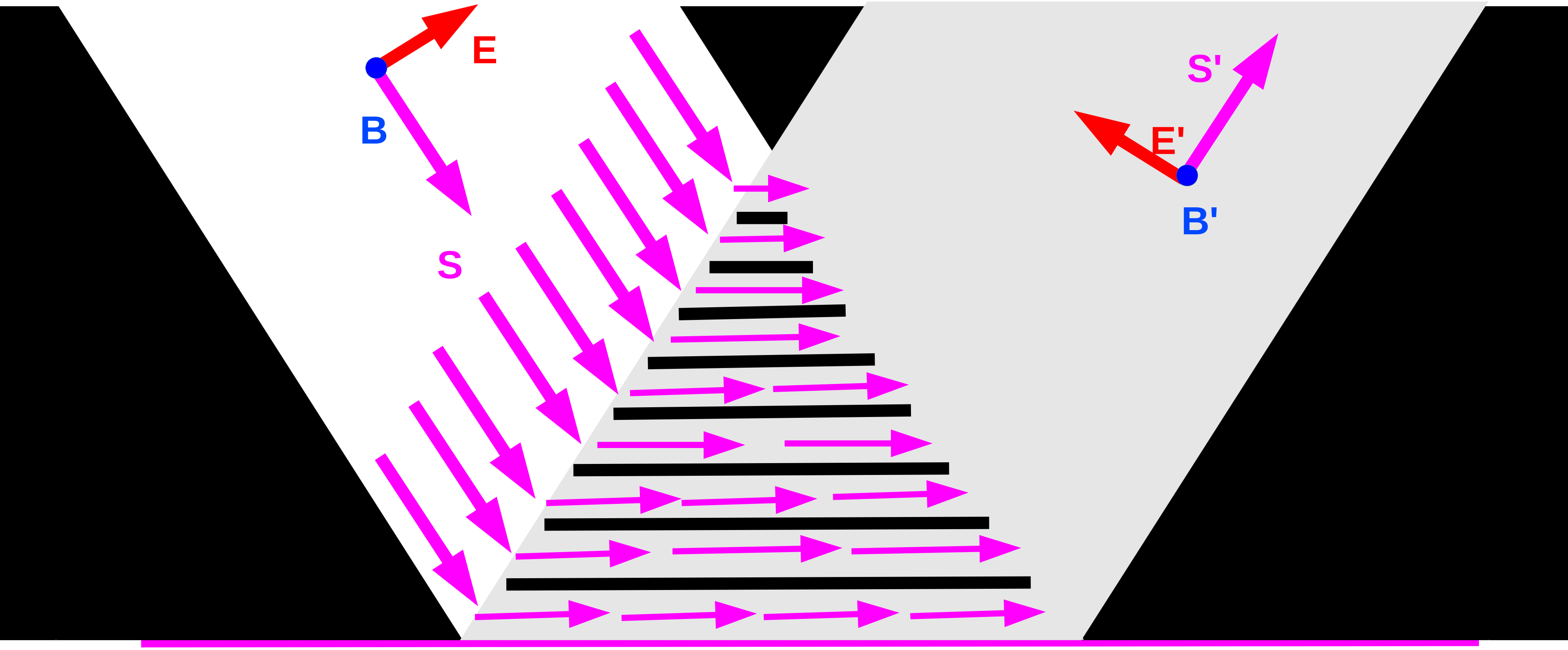
A megoldás kézenfekvő.

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



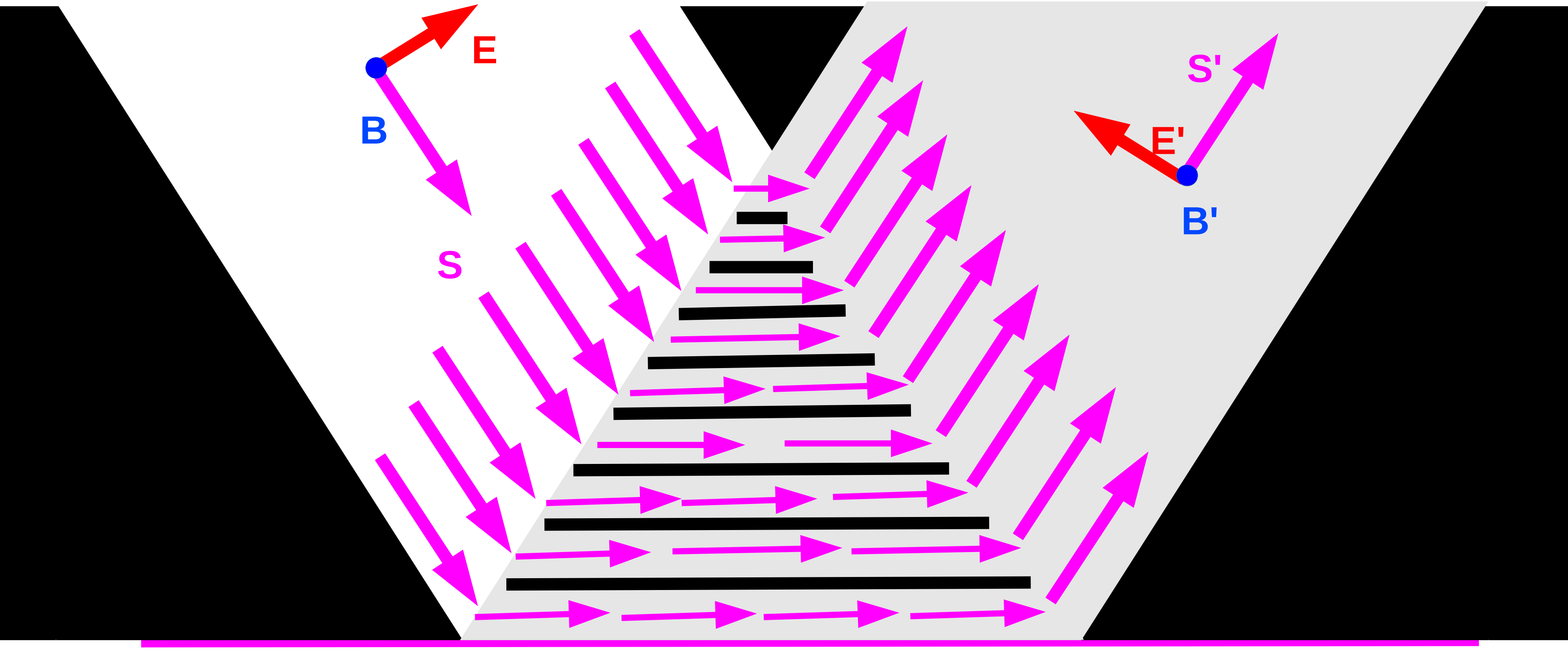
A megoldás kézenfekvő.

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.

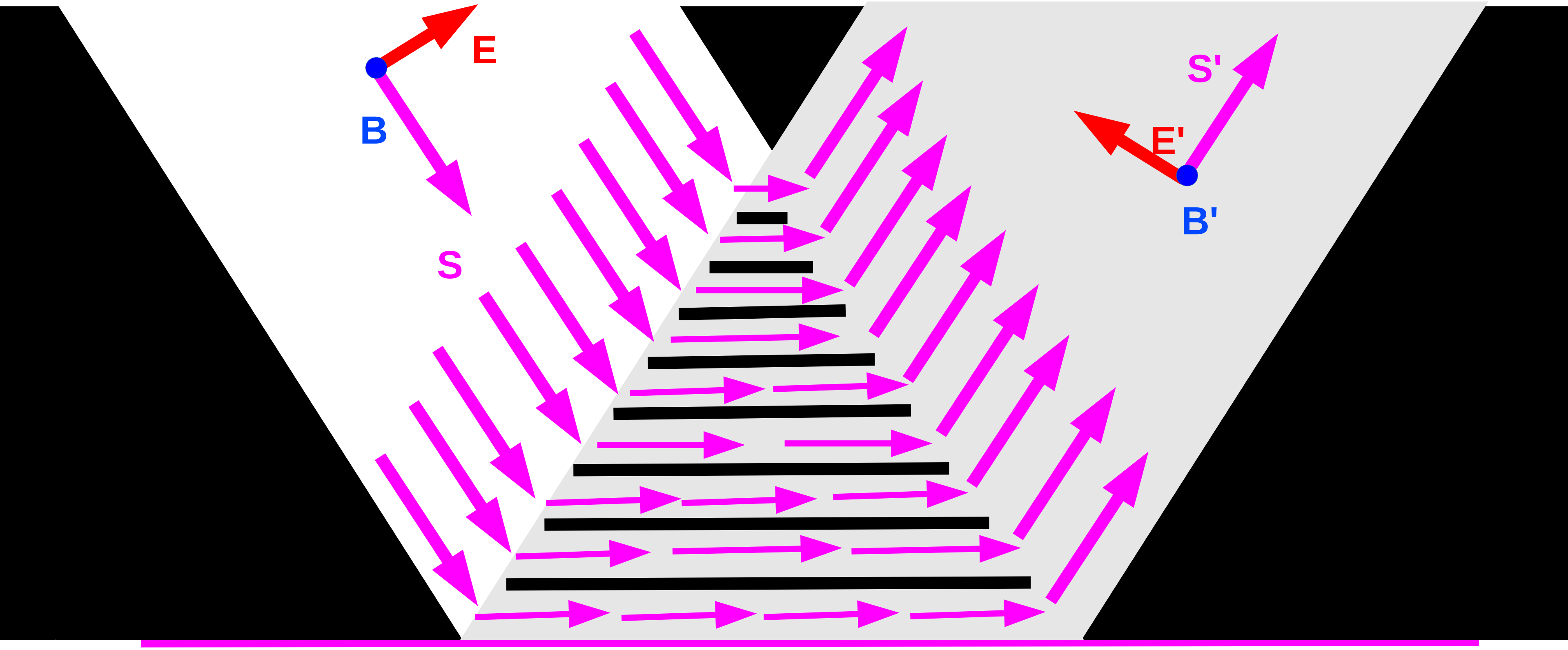
A „tiltott síkok” nem hogy akadályoznák az energia mozgását,
hanem éppen segítenek neki, az energia a kialakított **csatornákon** át halad,
és így tud irányt változtatni.



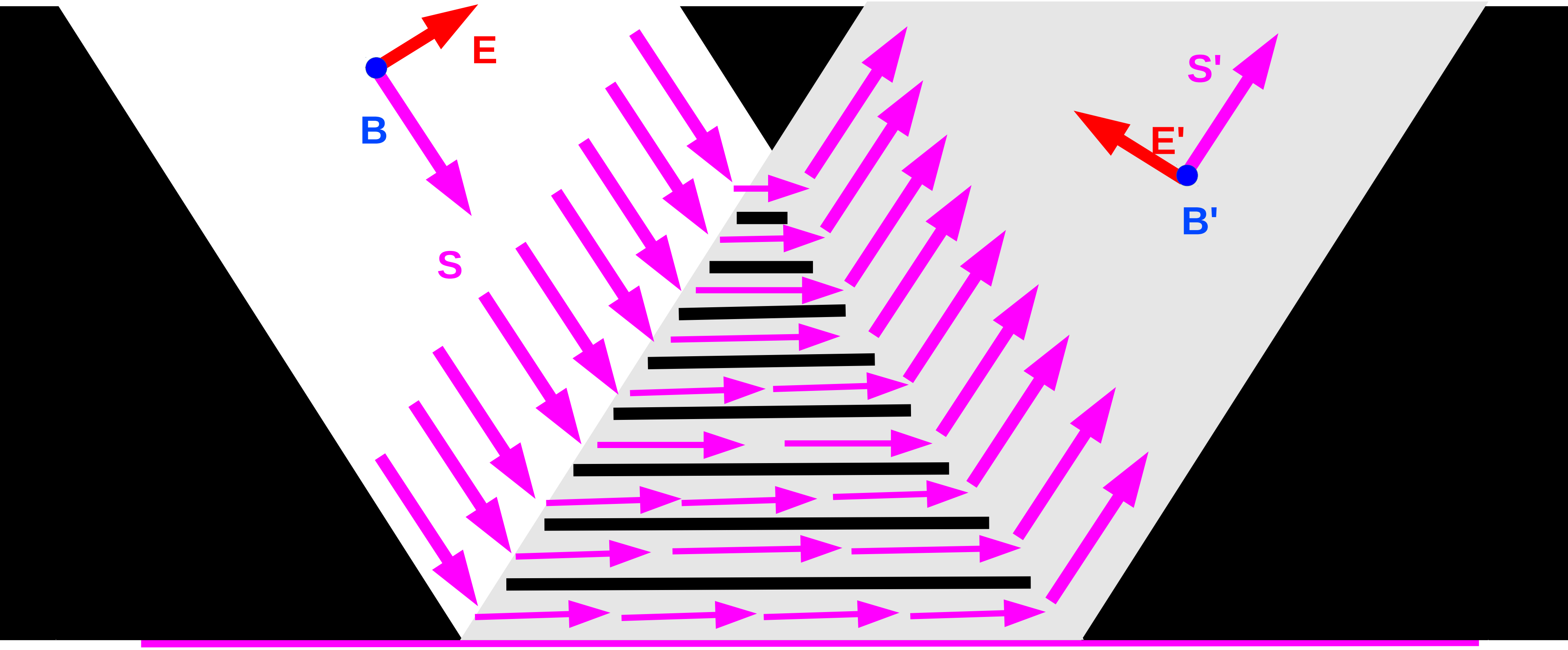
A megoldás kézenfekvő?

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?

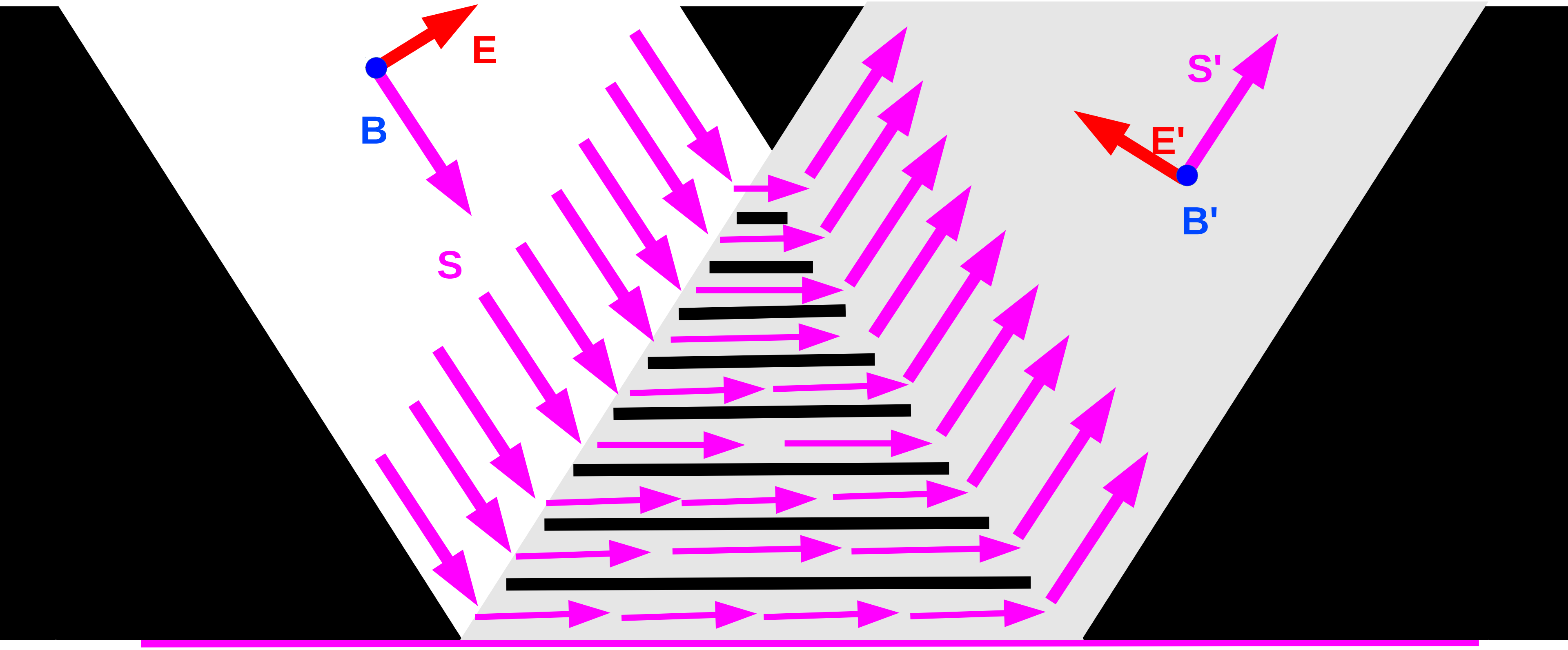


Eljutottunk a fő kérdésig:
milyen hatás, milyen erő kanyarítja be a fényanyag útját vákuumban?

Nem a tükör, mert odáig el sem jut a fény...

A válasz egyszerű: **maga a fény!**

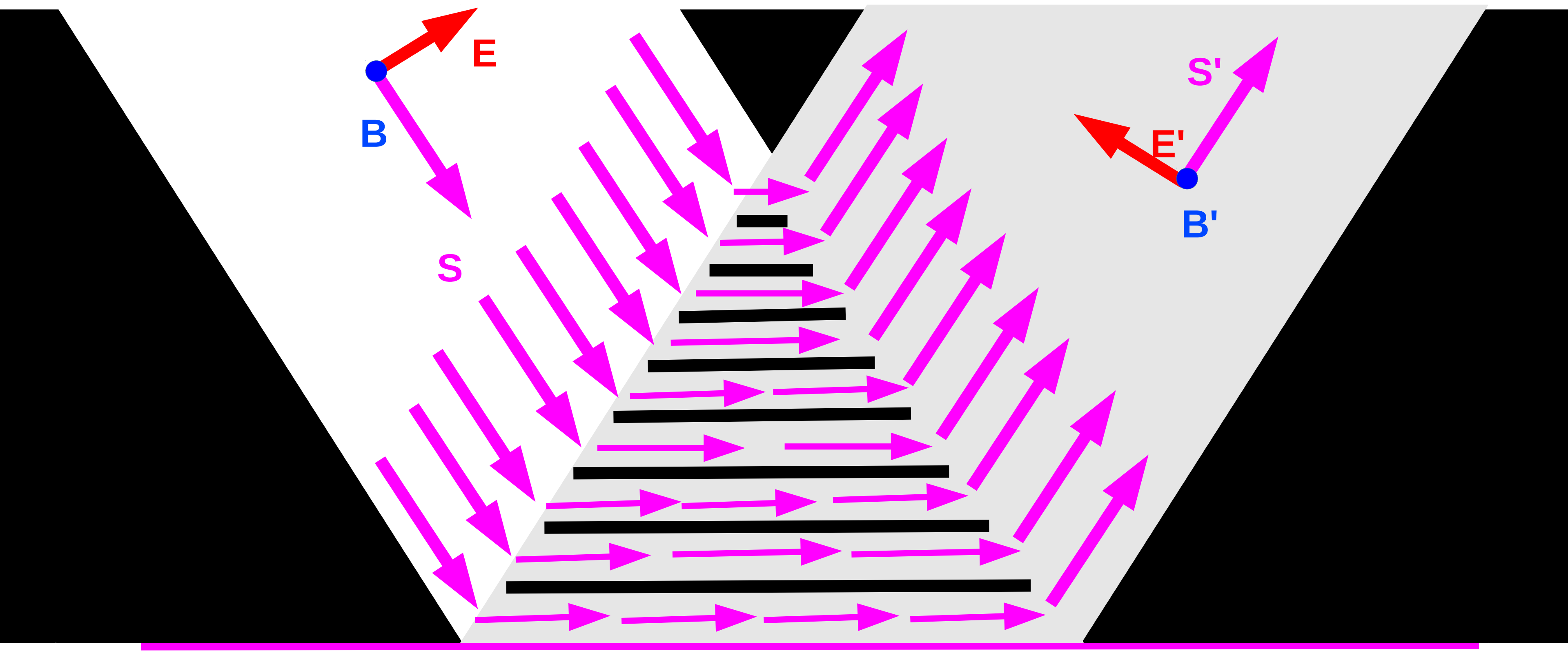
A tükör közelében kialakult elektromágneses mezőkonfiguráció gyakorol erőhatást az érkező fényanyagra



A válasz egyszerű: **maga a fény!**

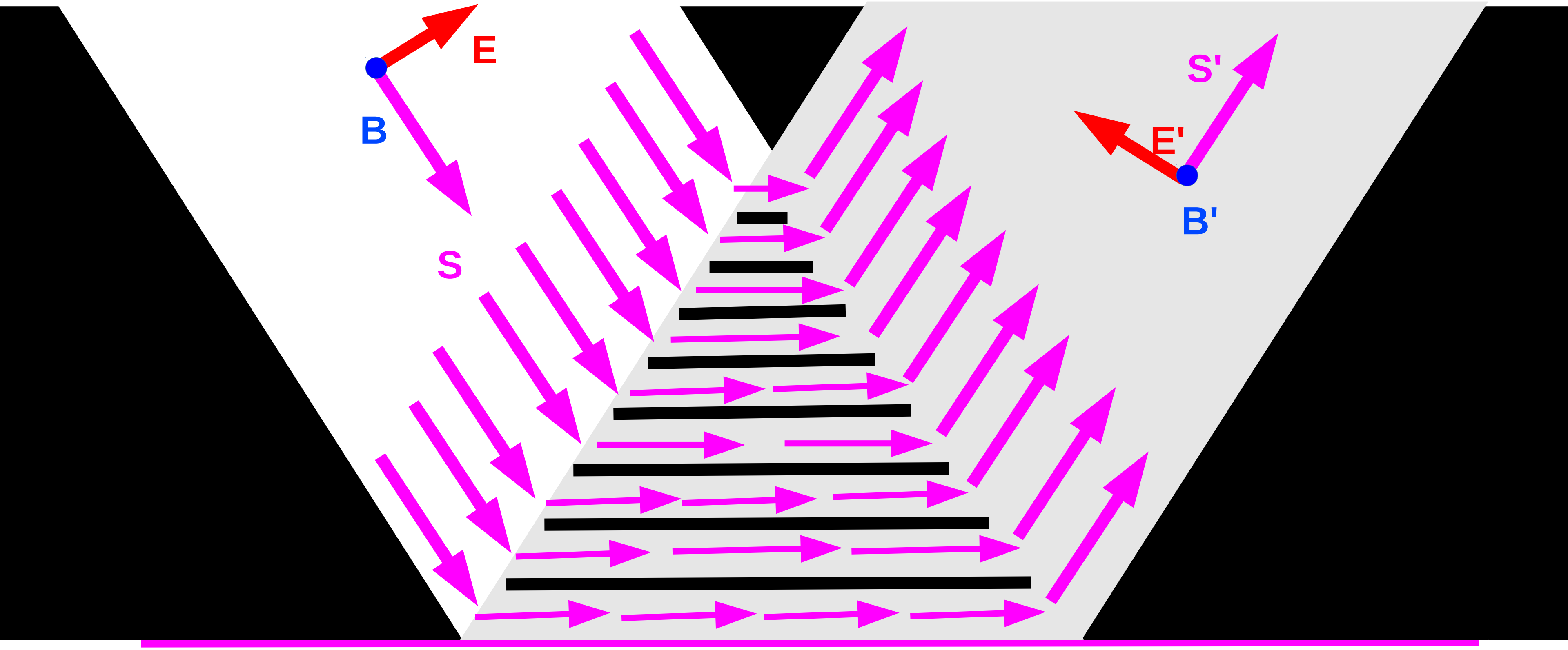
Utászelmélet: a fény bekapcsolásakor az első utász fénykatonák megépítik azokat az utakat, amiken a később érkezők mozoghatnak

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

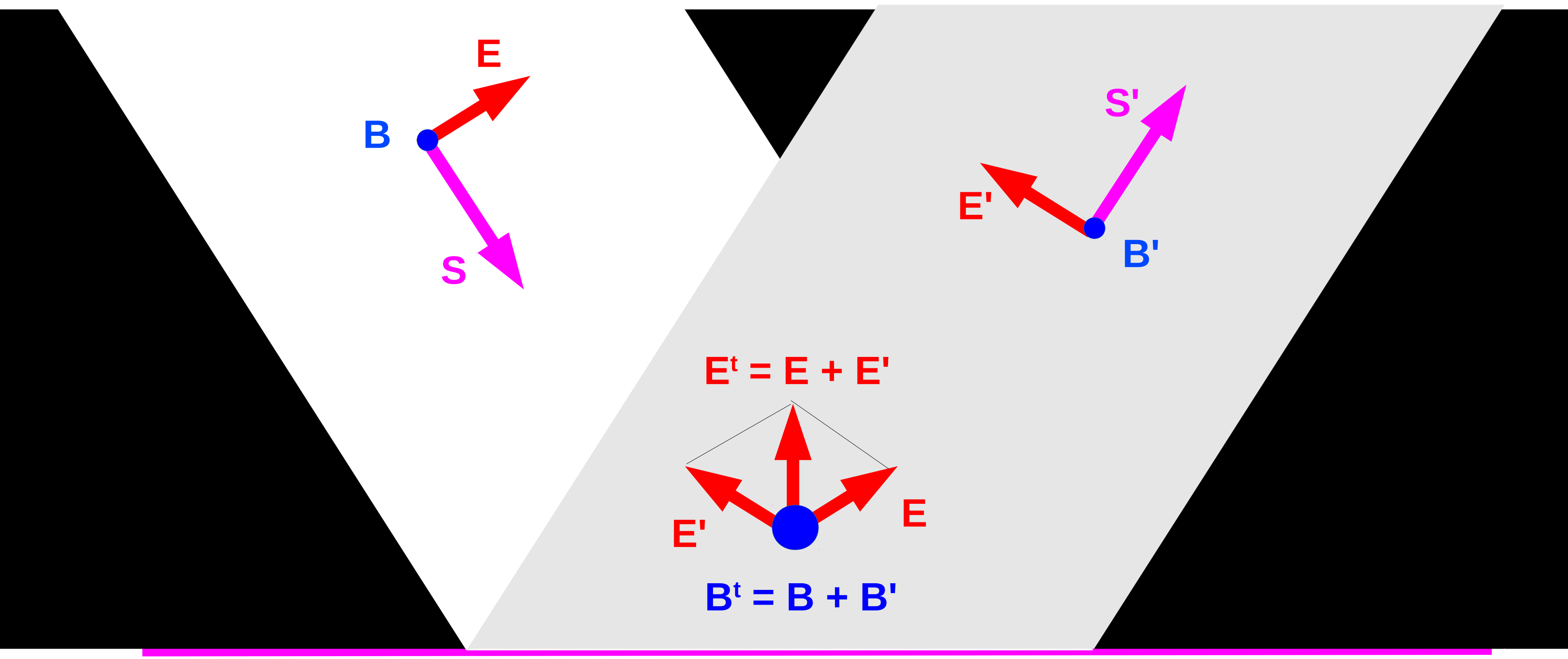


A válasz egyszerű: **maga a fény!**

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!

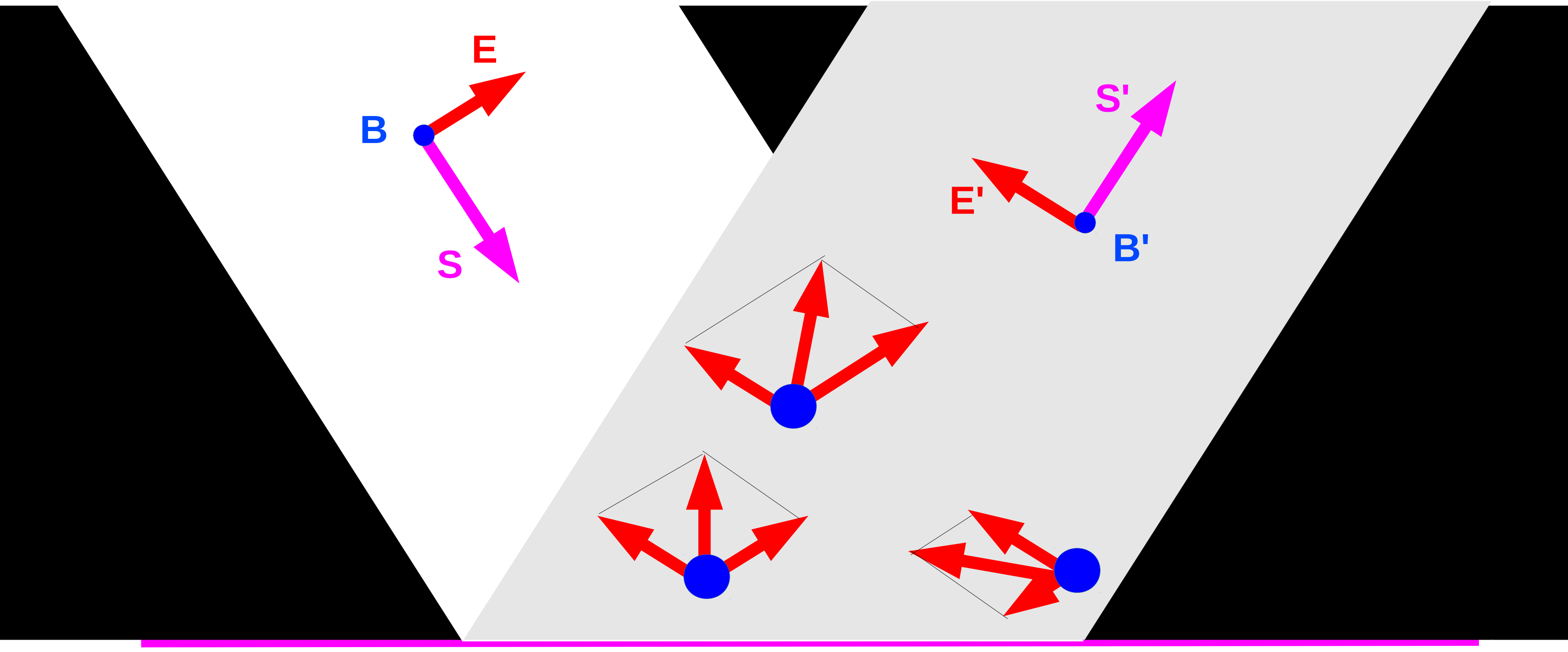


A válasz egyszerű: **maga a fény!**

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!

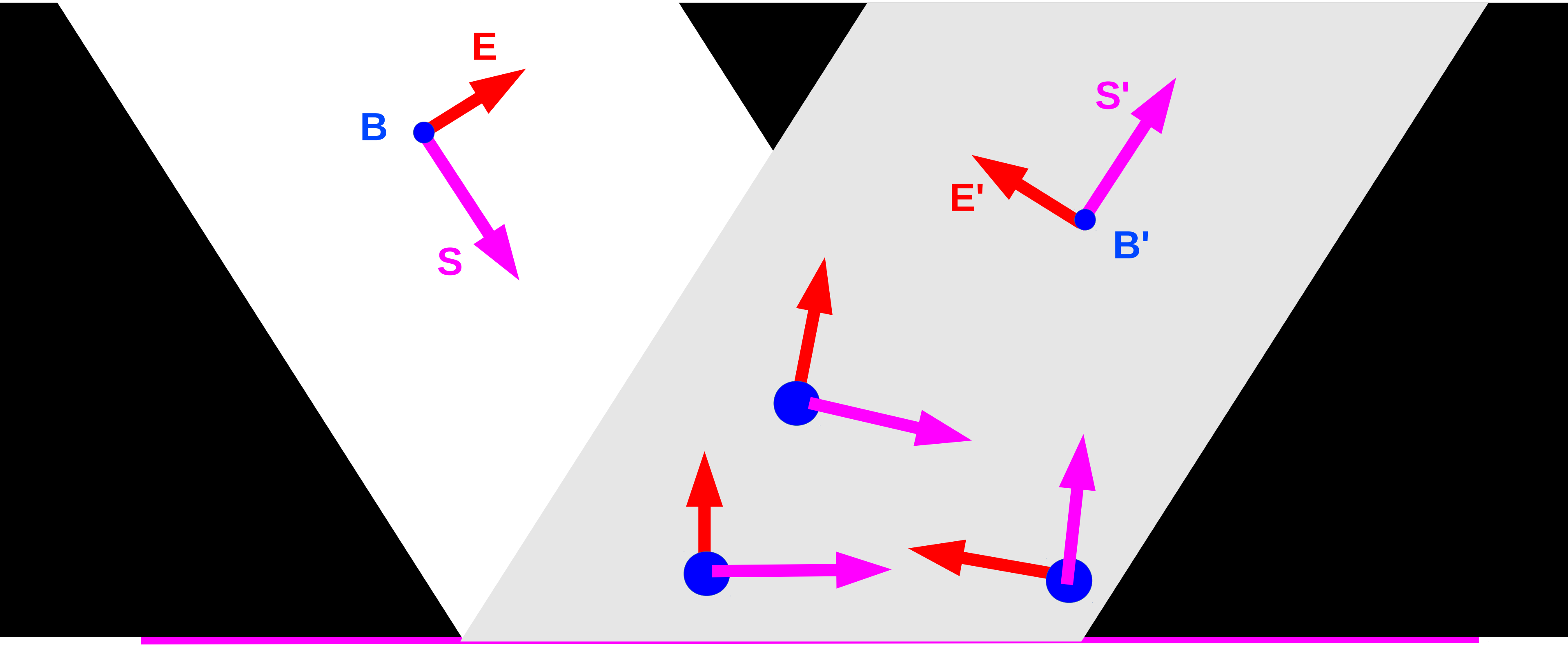


A válasz egyszerű: **maga a fény!**

A válasz helyes, de az ördög a részletekben lakik

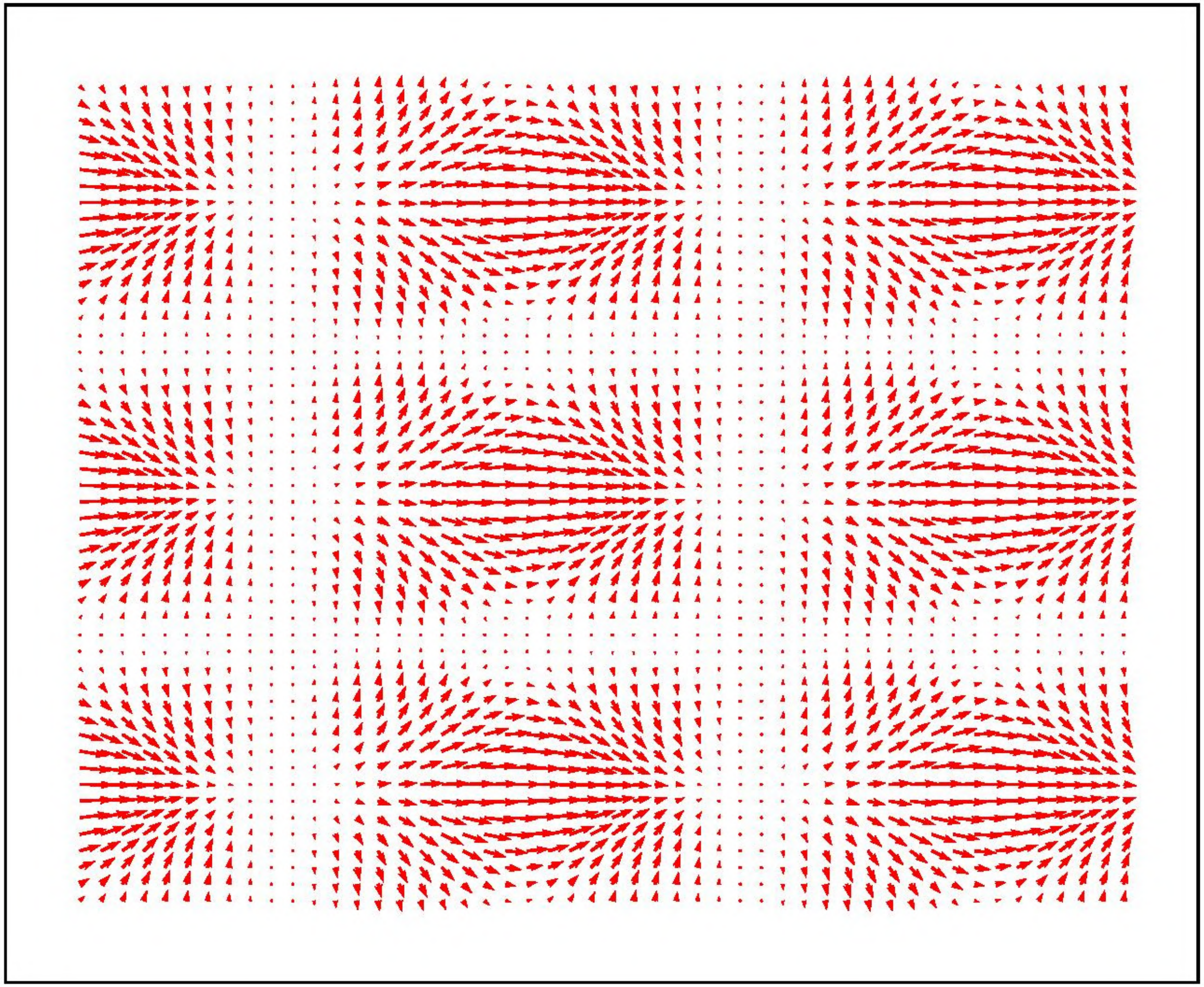
Az eredő **E** vektor általában nem felfelé mutat!

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



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

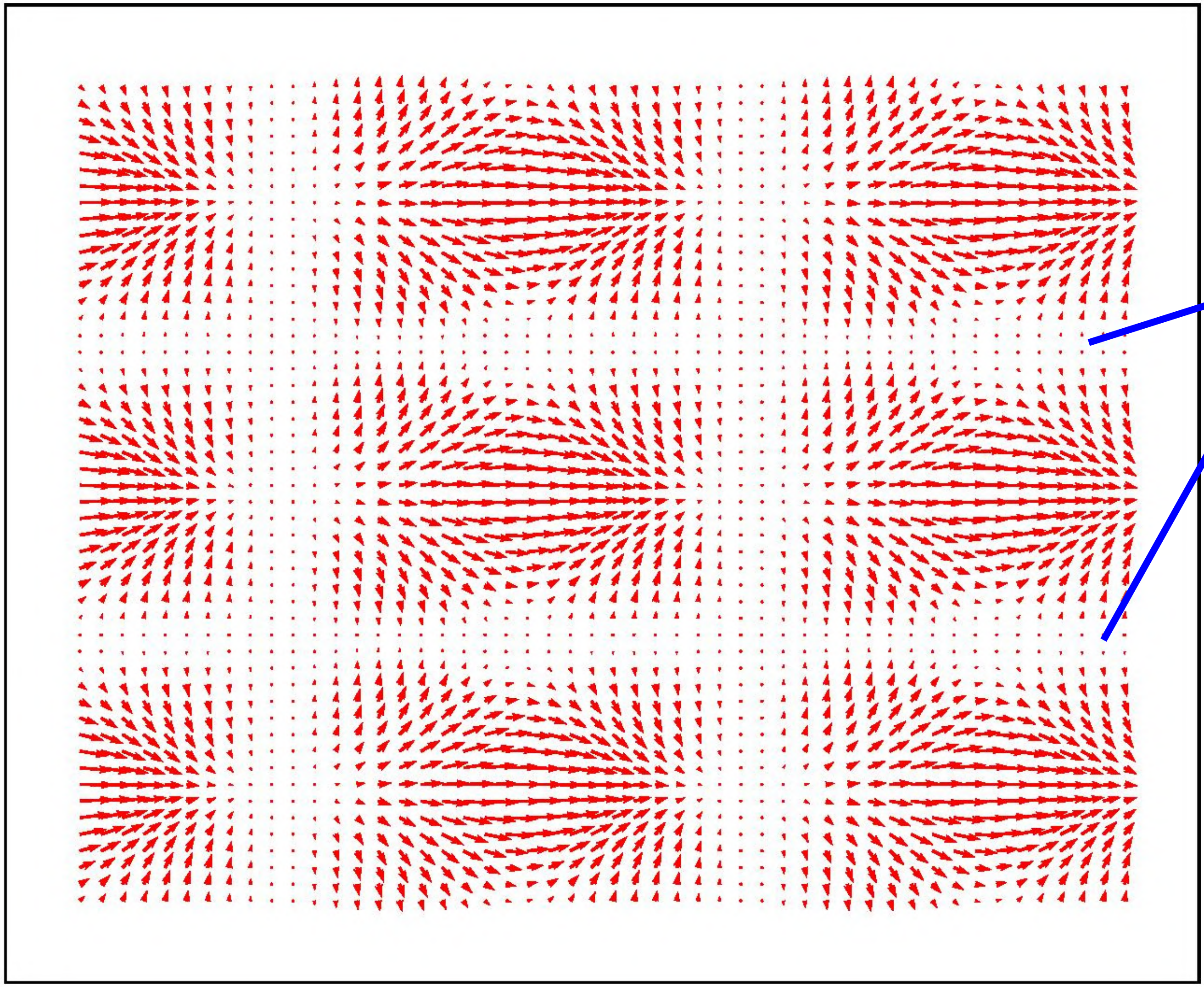
Íme a részletek, Python programmal ábrázolva – köszönet Cserti Józsefnek!



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!



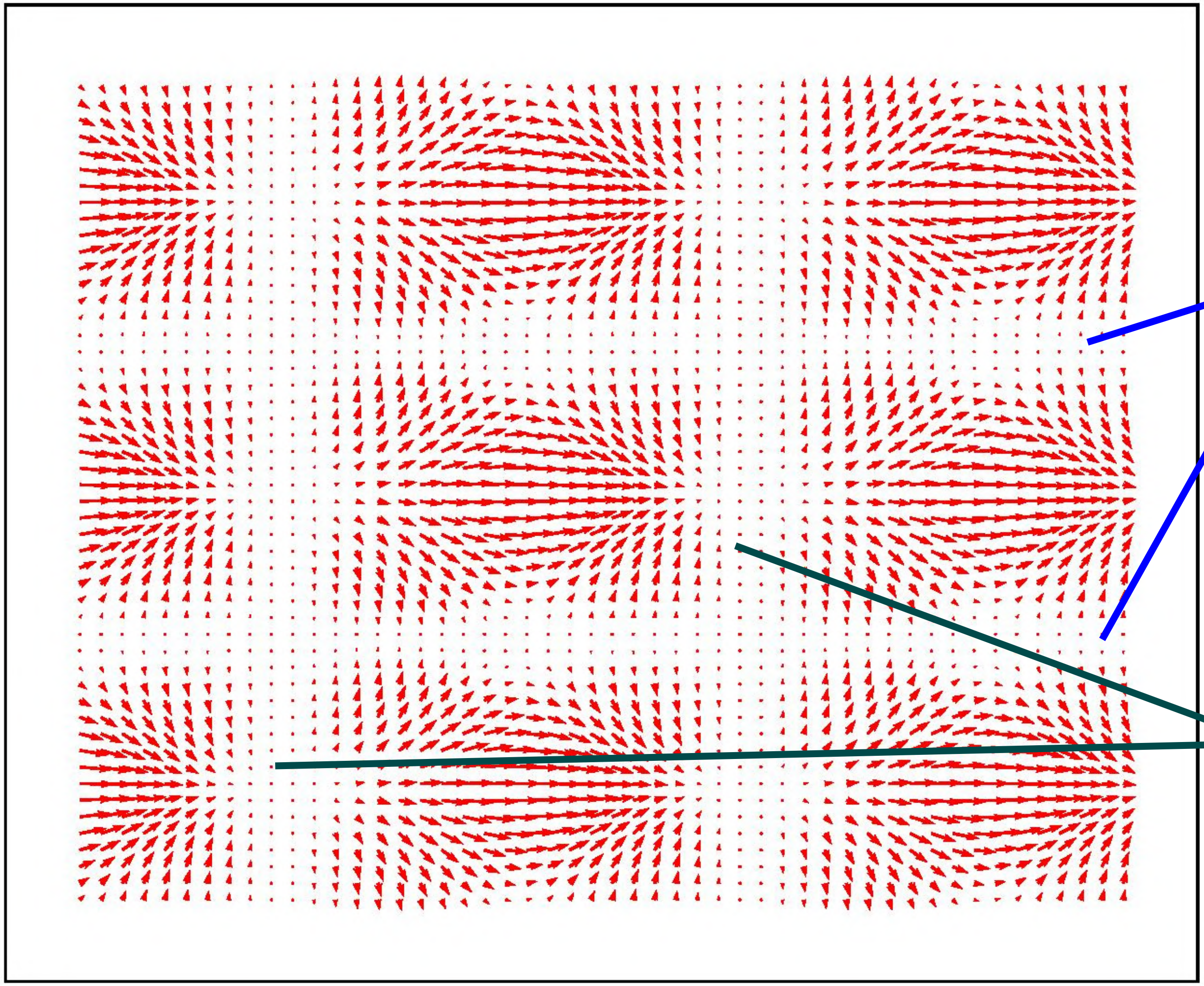
ez egy piciny részlet **a Poynting-vektorok eloszlásából**

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

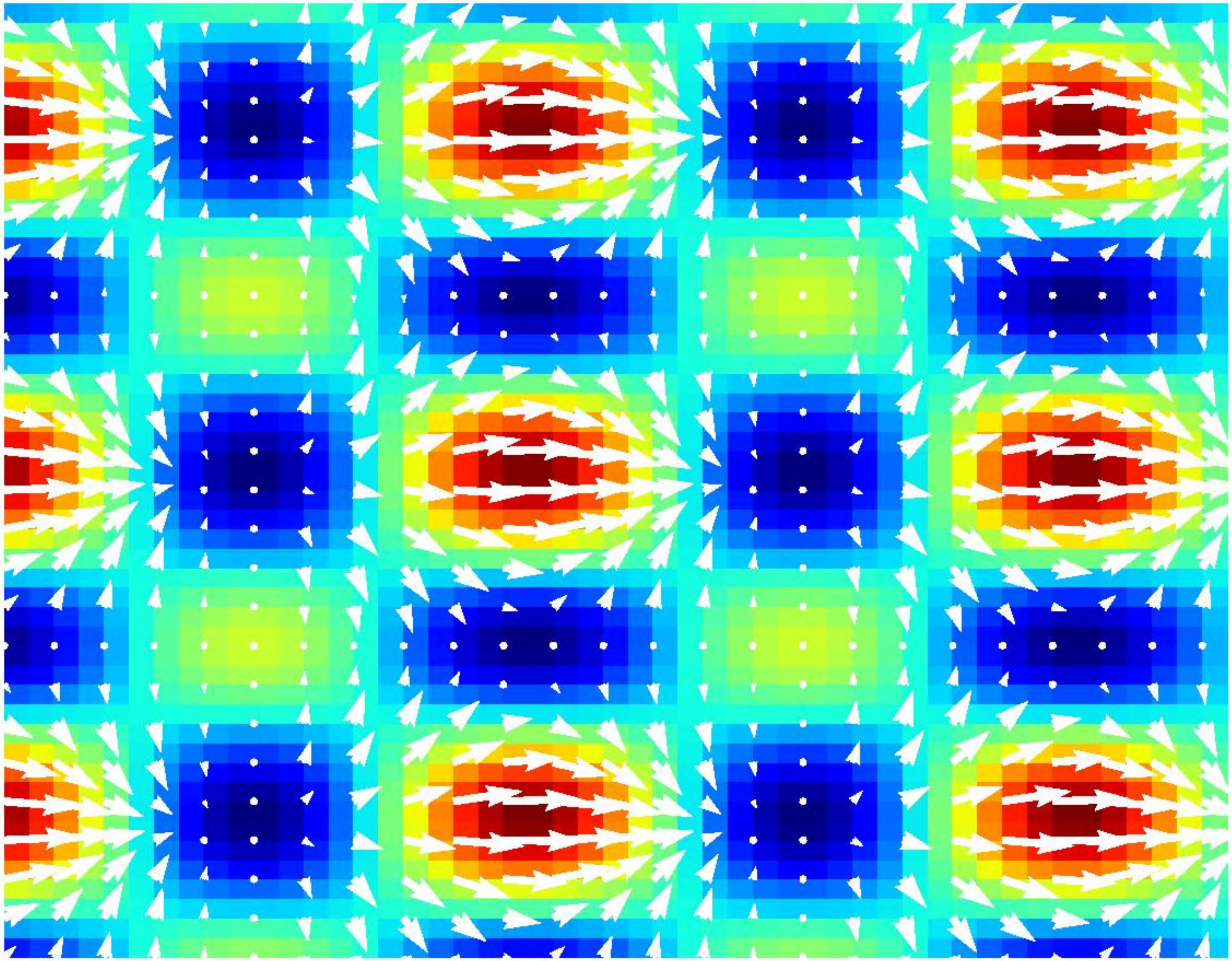
a tiltott síkok

tartósan energiaáram-mentes tartományok

hát ezek a sávok micsodák?

ezek a mozgó vonatperonok!

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

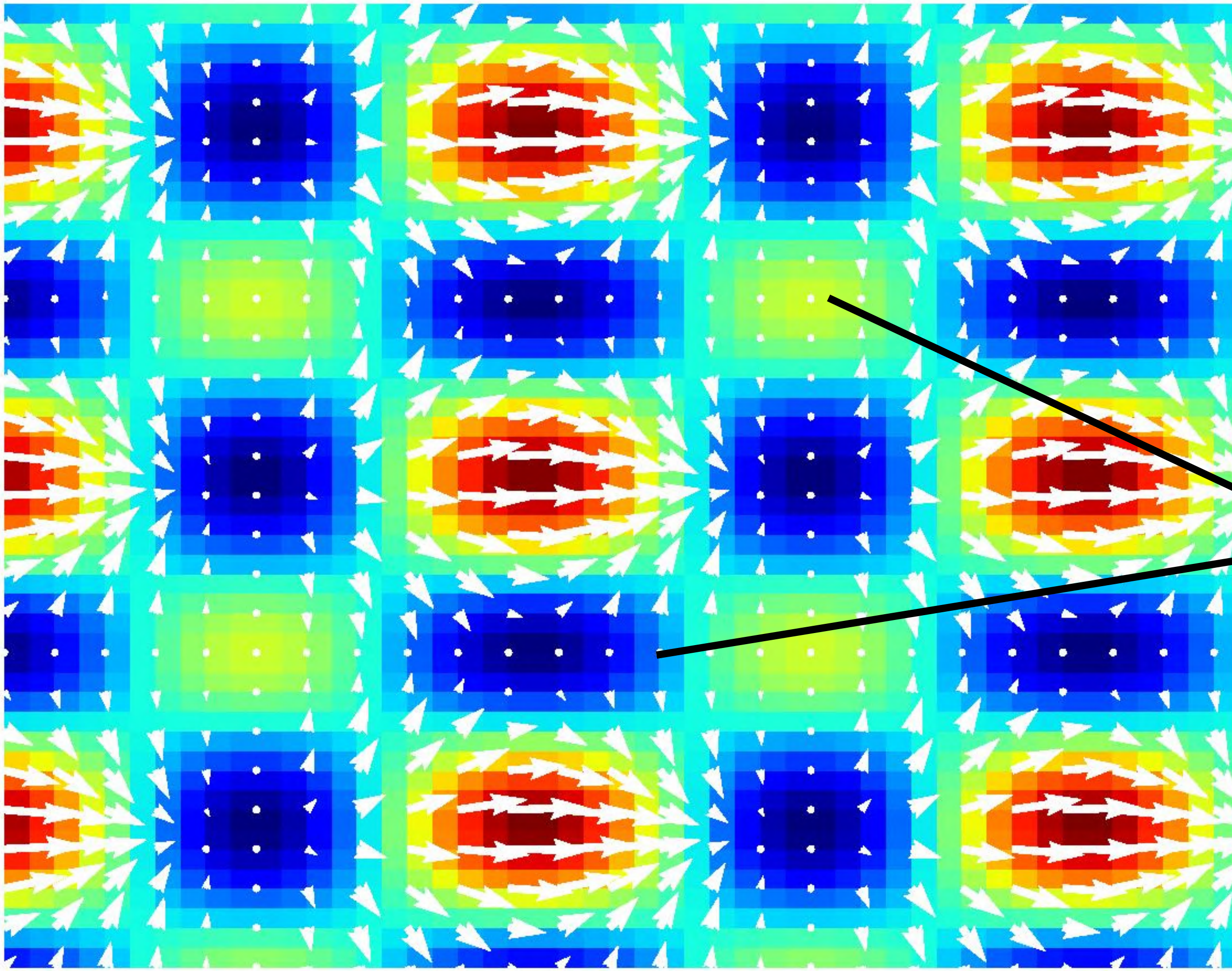


a színek a w energiasűrűséget ábrázolják

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

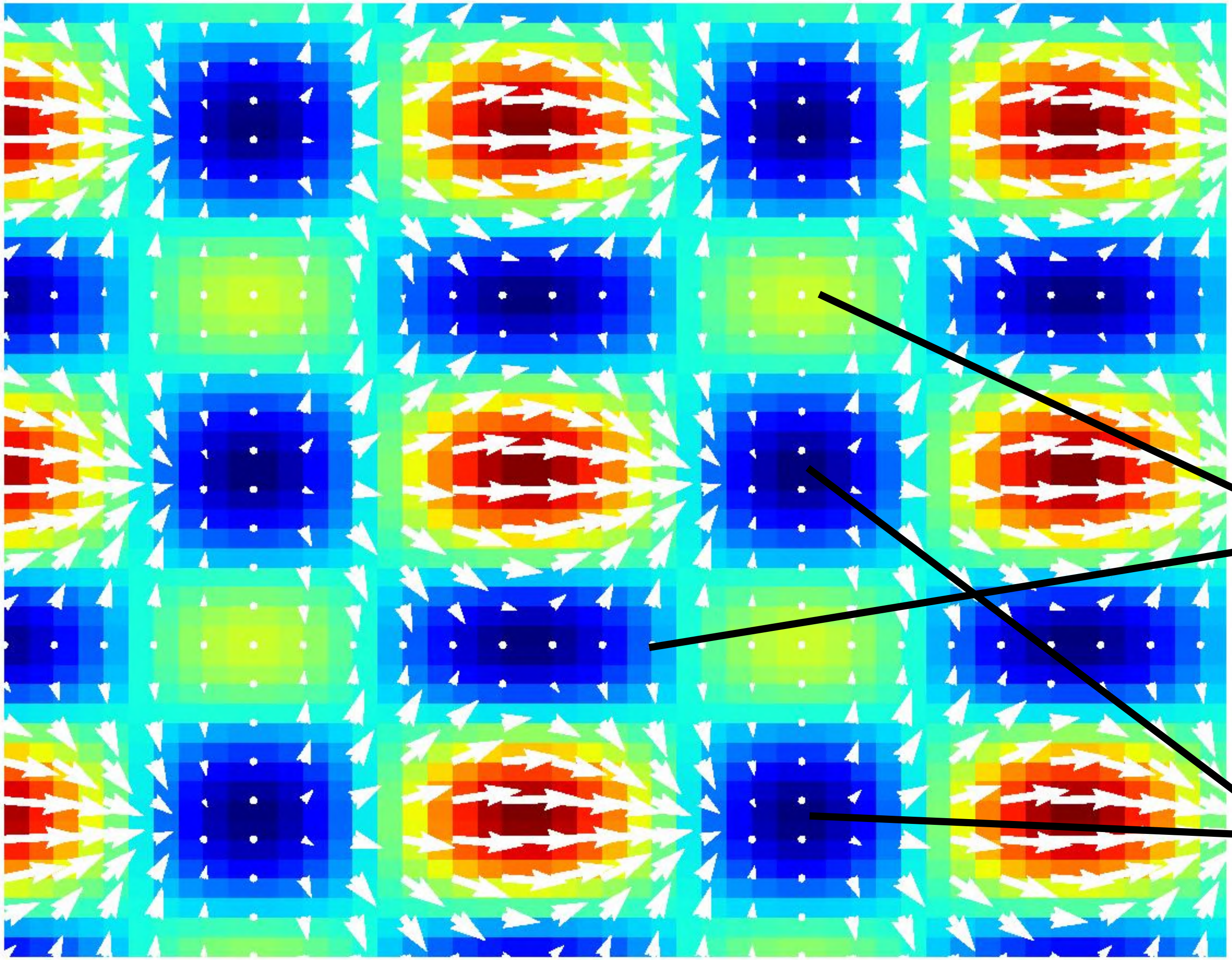
sötétkék a kicsi, bordó a nagy sűrűség

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

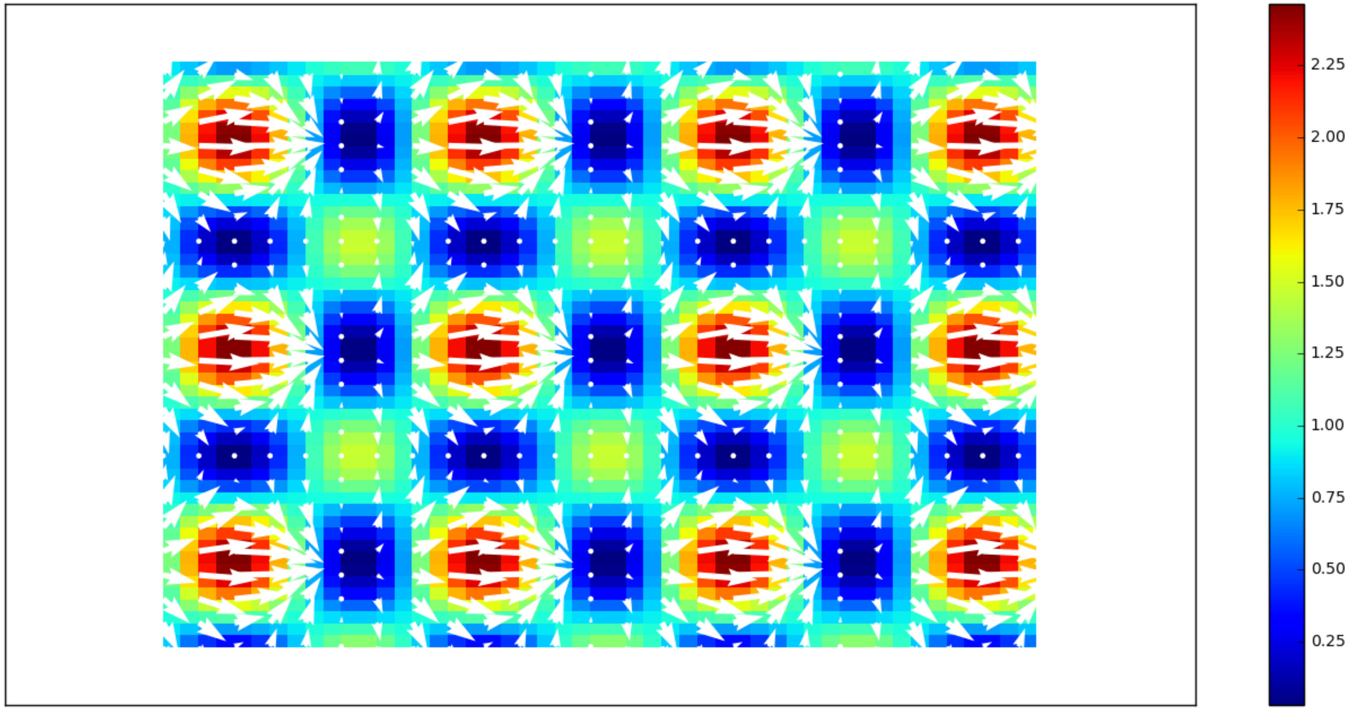
a fehér nyilak a Poynting-vektorokat mutatják

a tiltott síkok

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

mozgó vonatperon

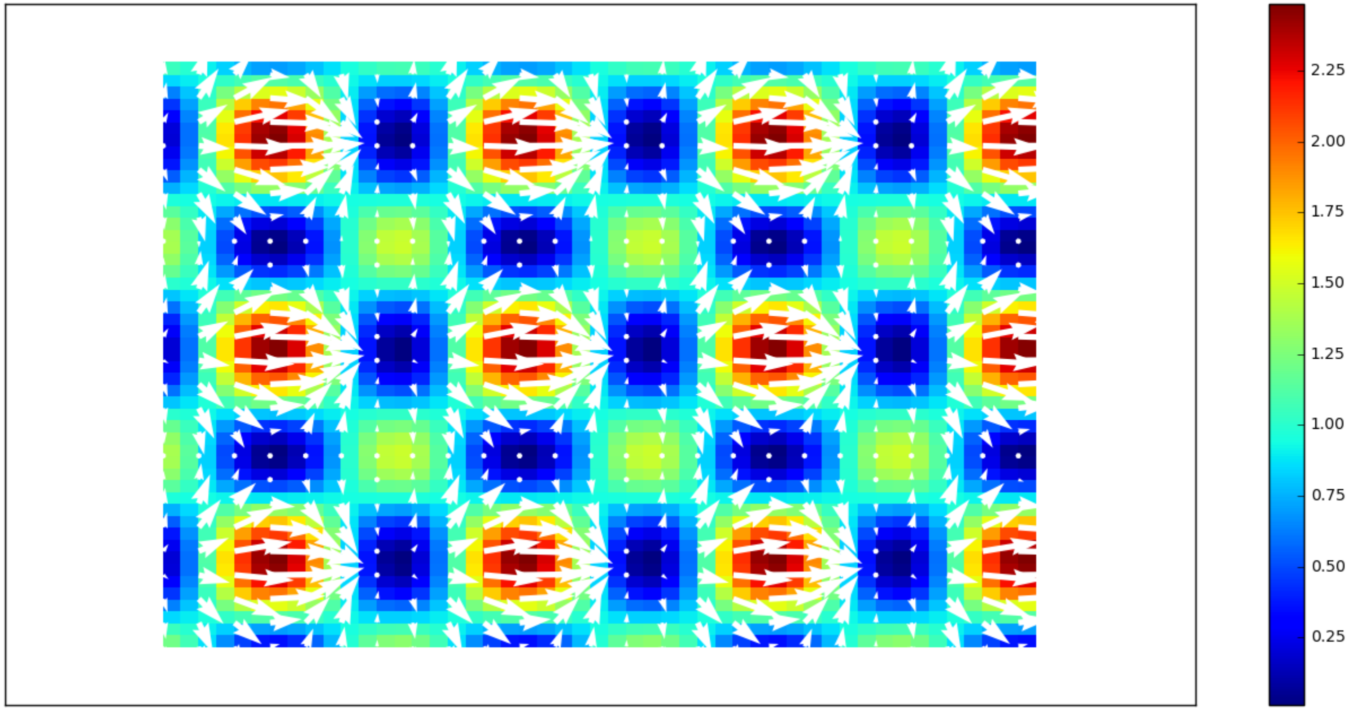
itt **S** és w is nulla



Az energiasűrűség és a Poynting-mező időbeli változása

Némi hullámtan + középiskolás trigonometria

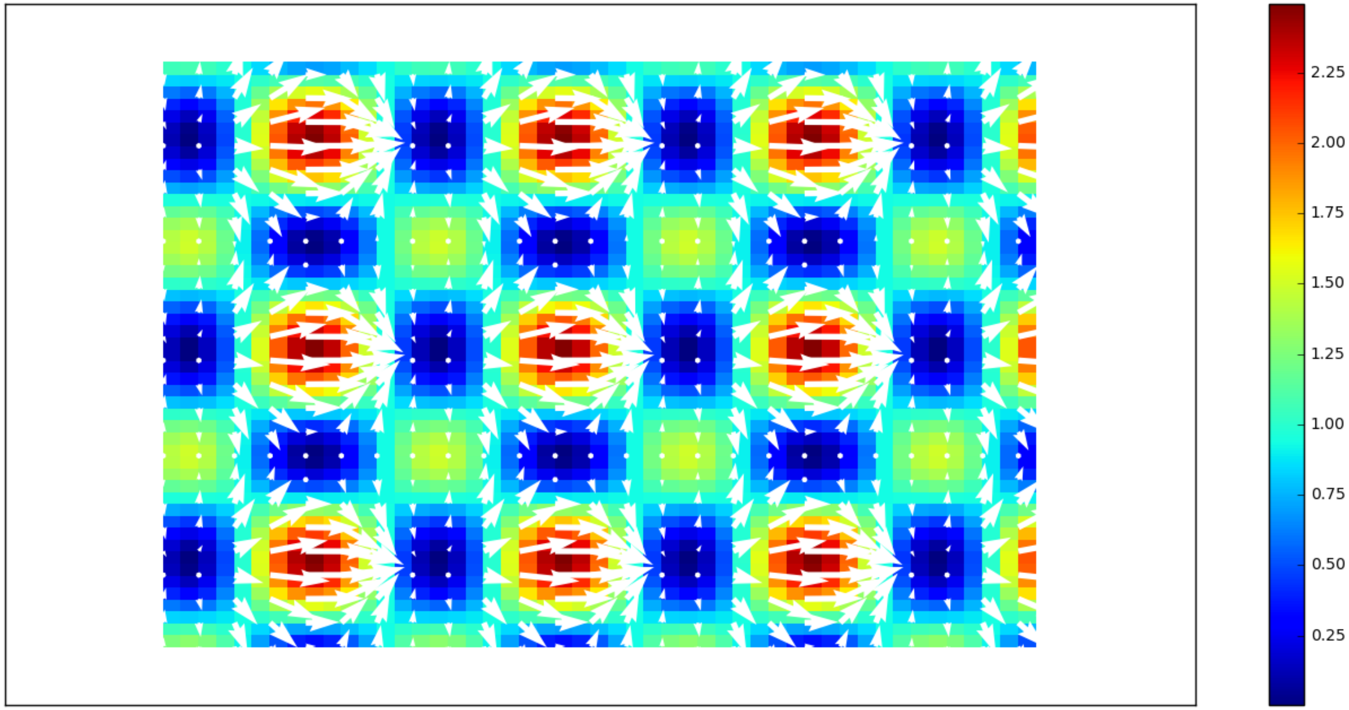
A megjelenítésért köszönet Cserti Józsefnek.



Az energiasűrűség és a Poynting-mező időbeli változása

Némi hullámtan + középiskolás trigonometria

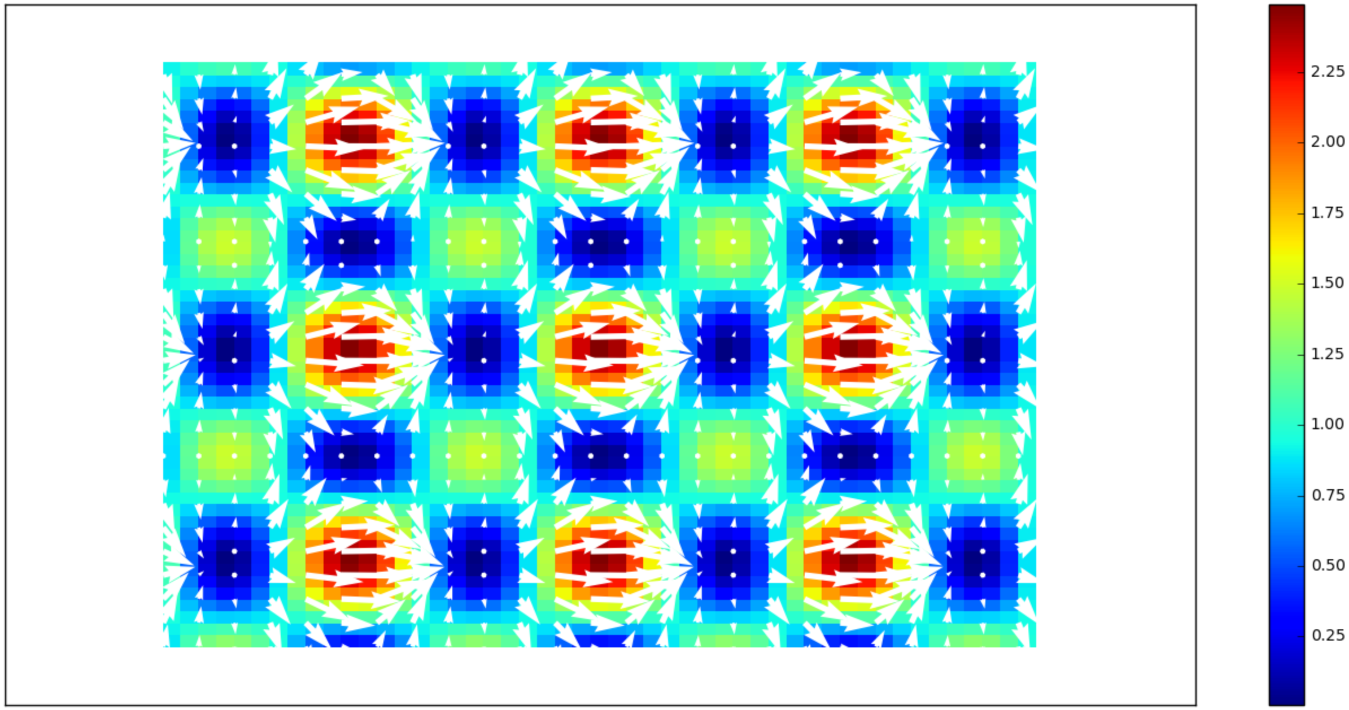
A megjelenítésért köszönet Cserti Józsefnek.



Az energiasűrűség és a Poynting-mező időbeli változása

Némi hullámtan + középiskolás trigonometria

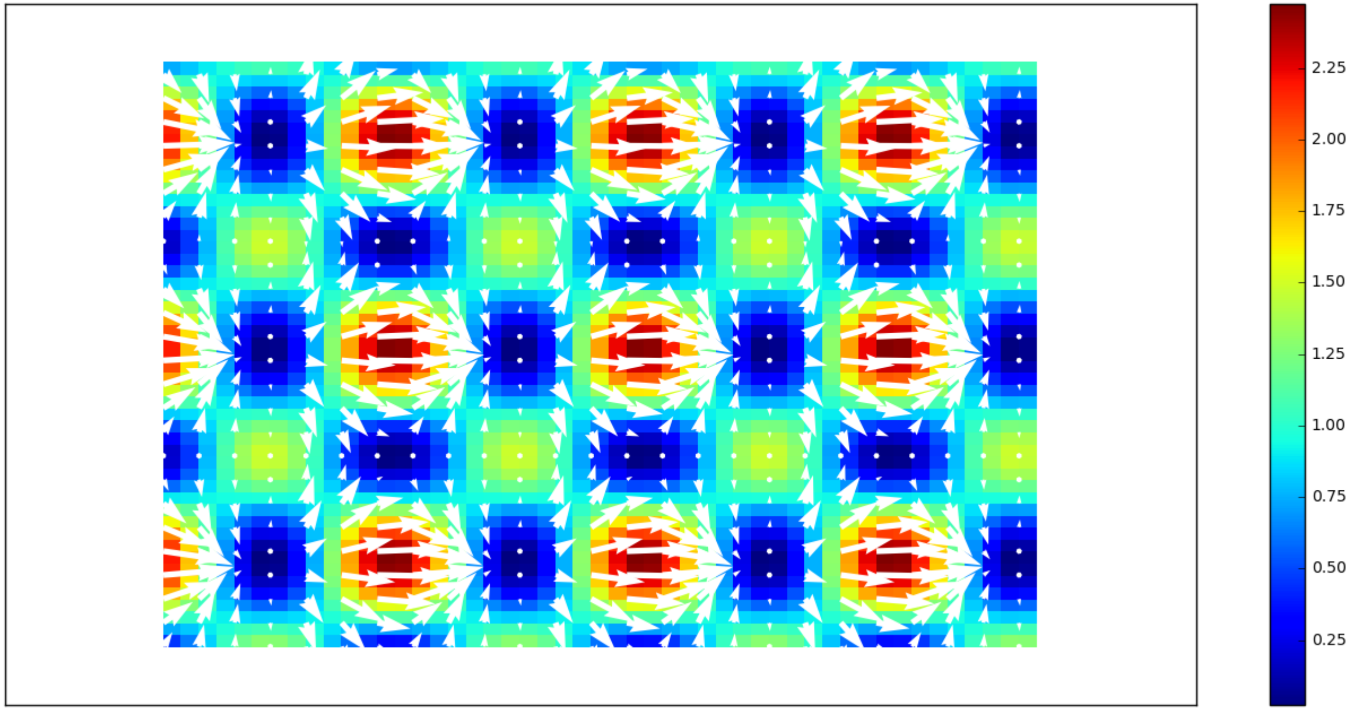
A megjelenítésért köszönet Cserti Józsefnek.



Az energiasűrűség és a Poynting-mező időbeli változása

Némi hullámtan + középiskolás trigonometria

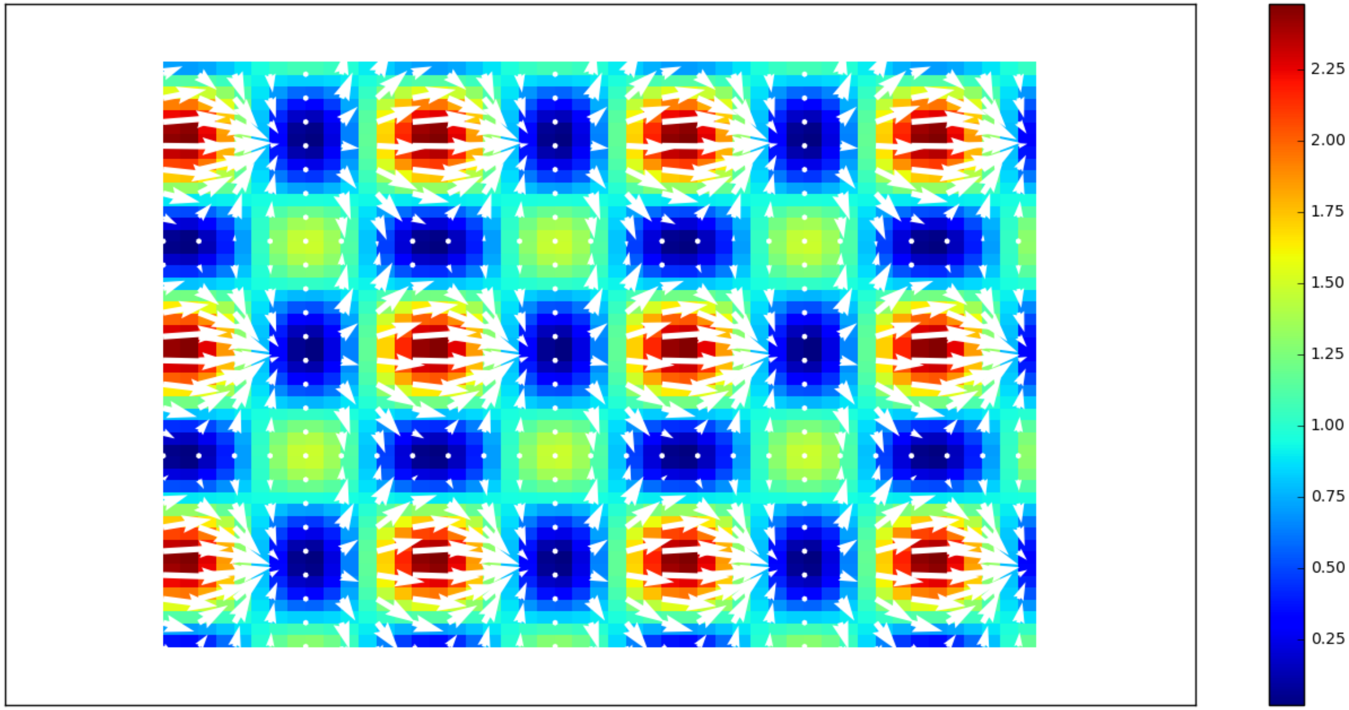
A megjelenítésért köszönet Cserti Józsefnek.



Az energiasűrűség és a Poynting-mező időbeli változása

Némi hullámtan + középiskolás trigonometria

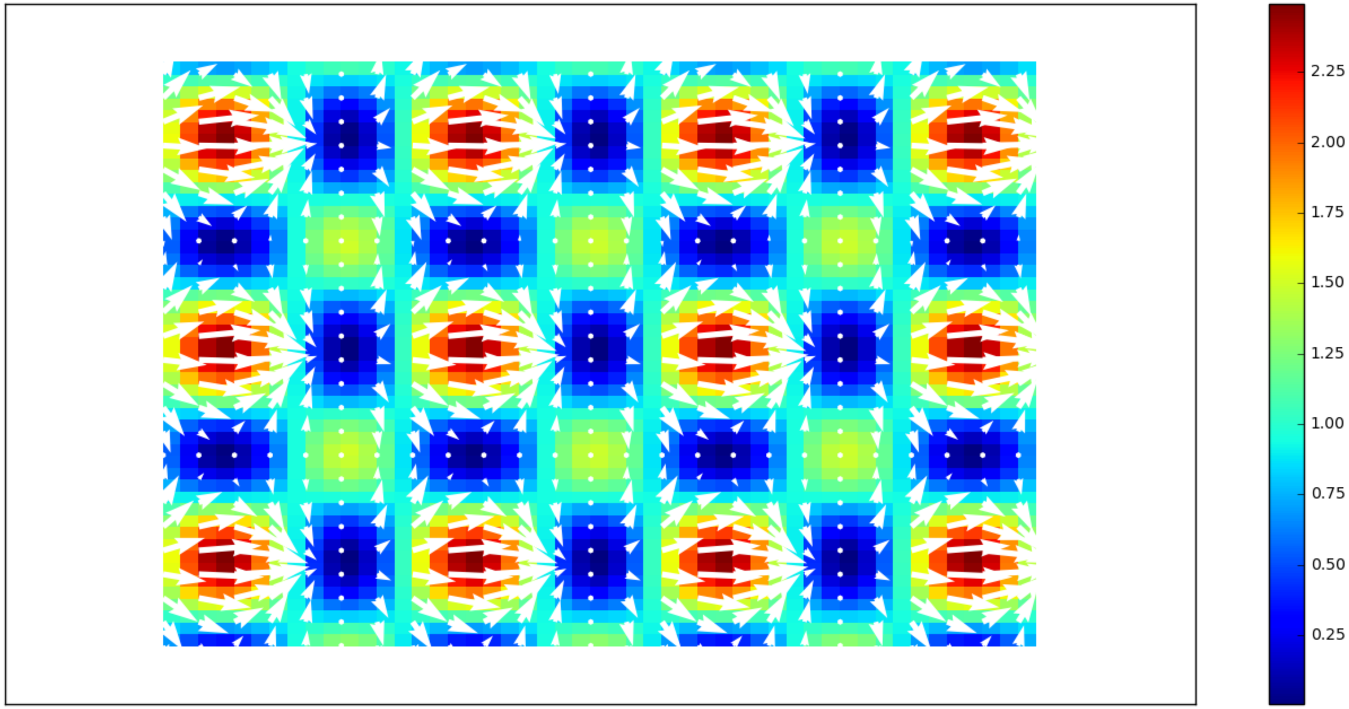
A megjelenítésért köszönet Cserti Józsefnek.



Az energiasűrűség és a Poynting-mező időbeli változása

Némi hullámtan + középiskolás trigonometria

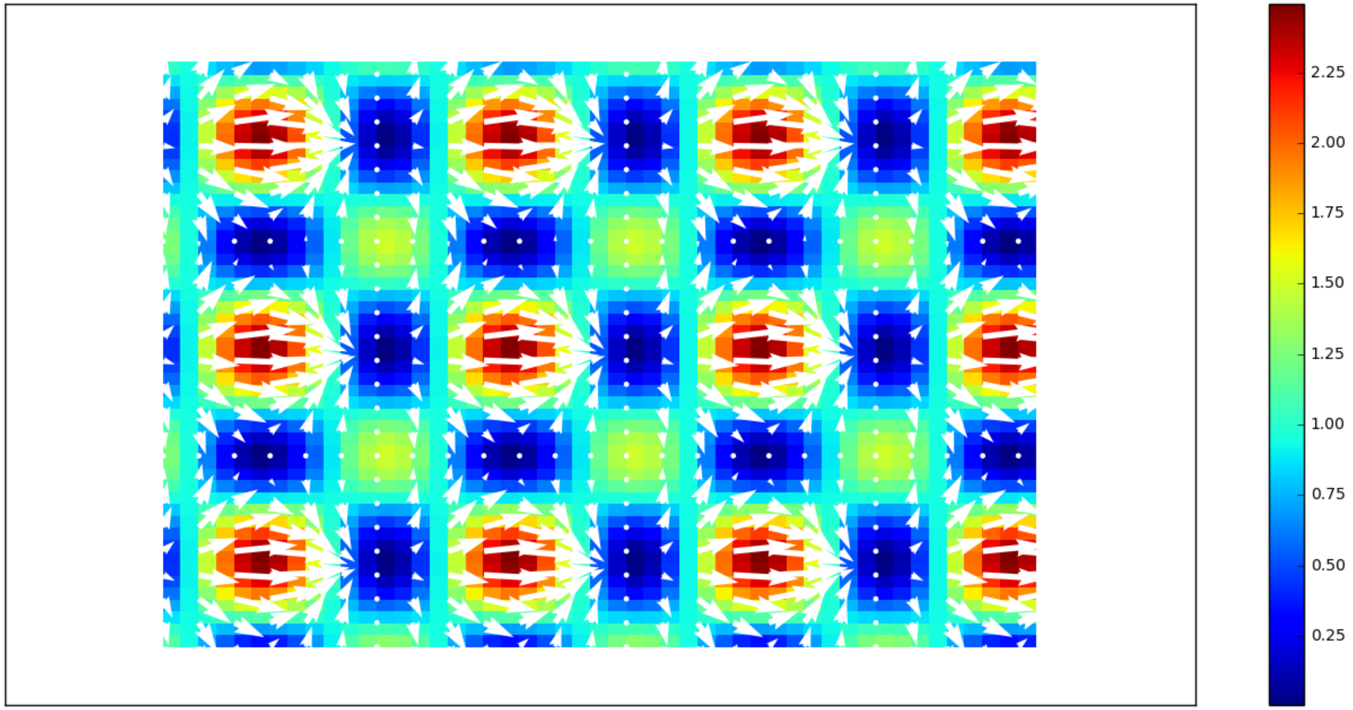
A megjelenítésért köszönet Cserti Józsefnek.



Az energiasűrűség és a Poynting-mező időbeli változása

Némi hullámtan + középiskolás trigonometria

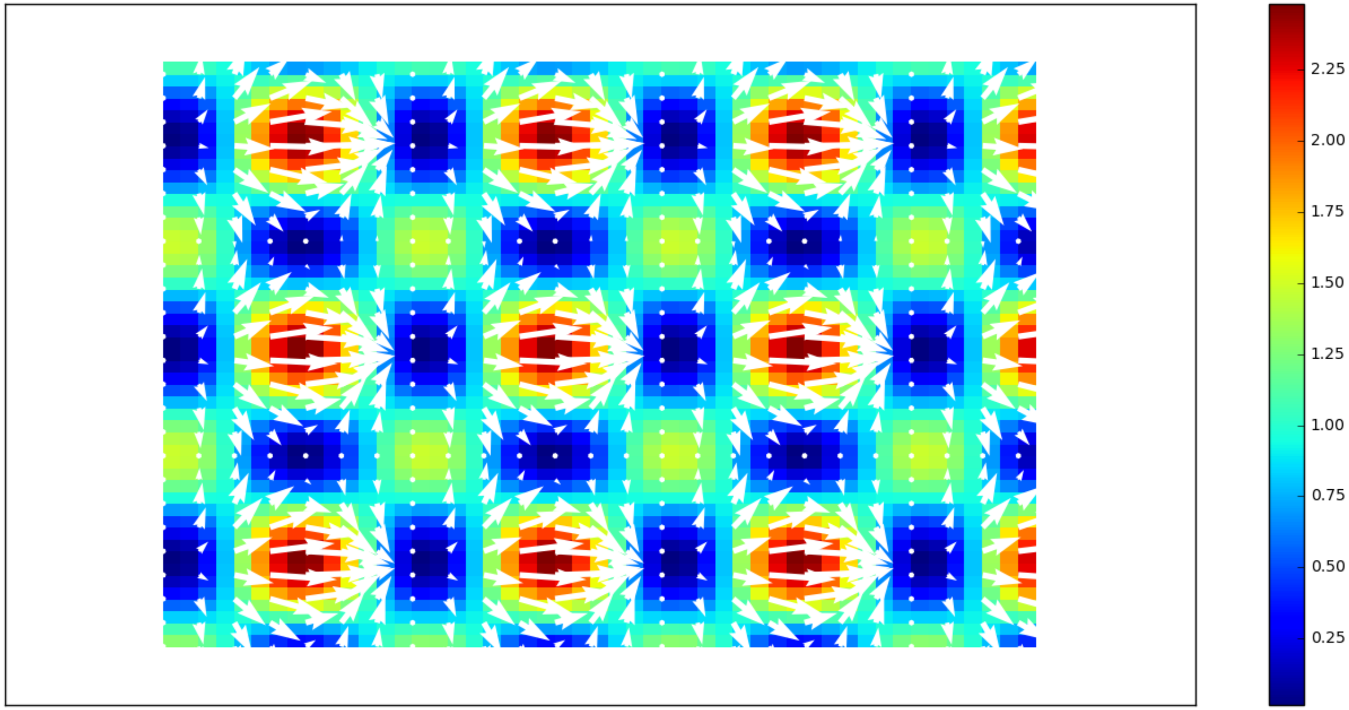
A megjelenítésért köszönet Cserti Józsefnek.



Az energiasűrűség és a Poynting-mező időbeli változása

Némi hullámtan + középiskolás trigonometria

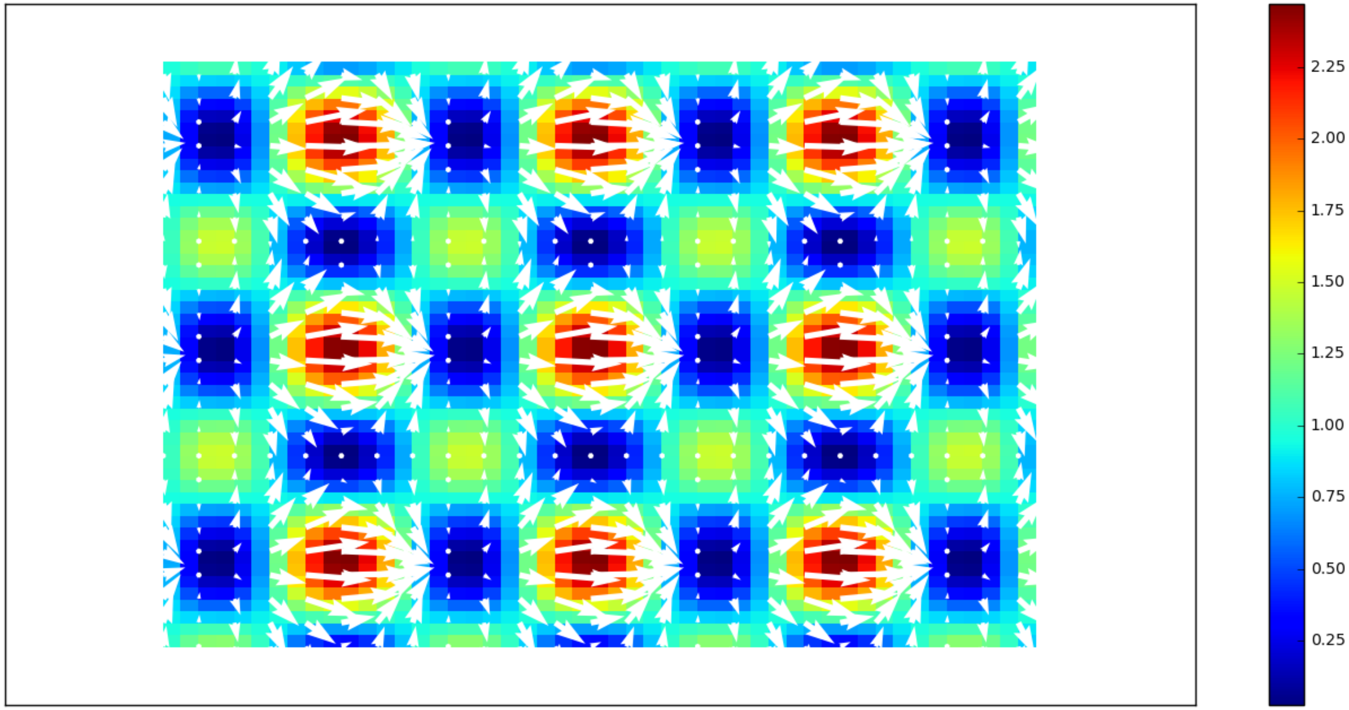
A megjelenítésért köszönet Cserti Józsefnek.



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

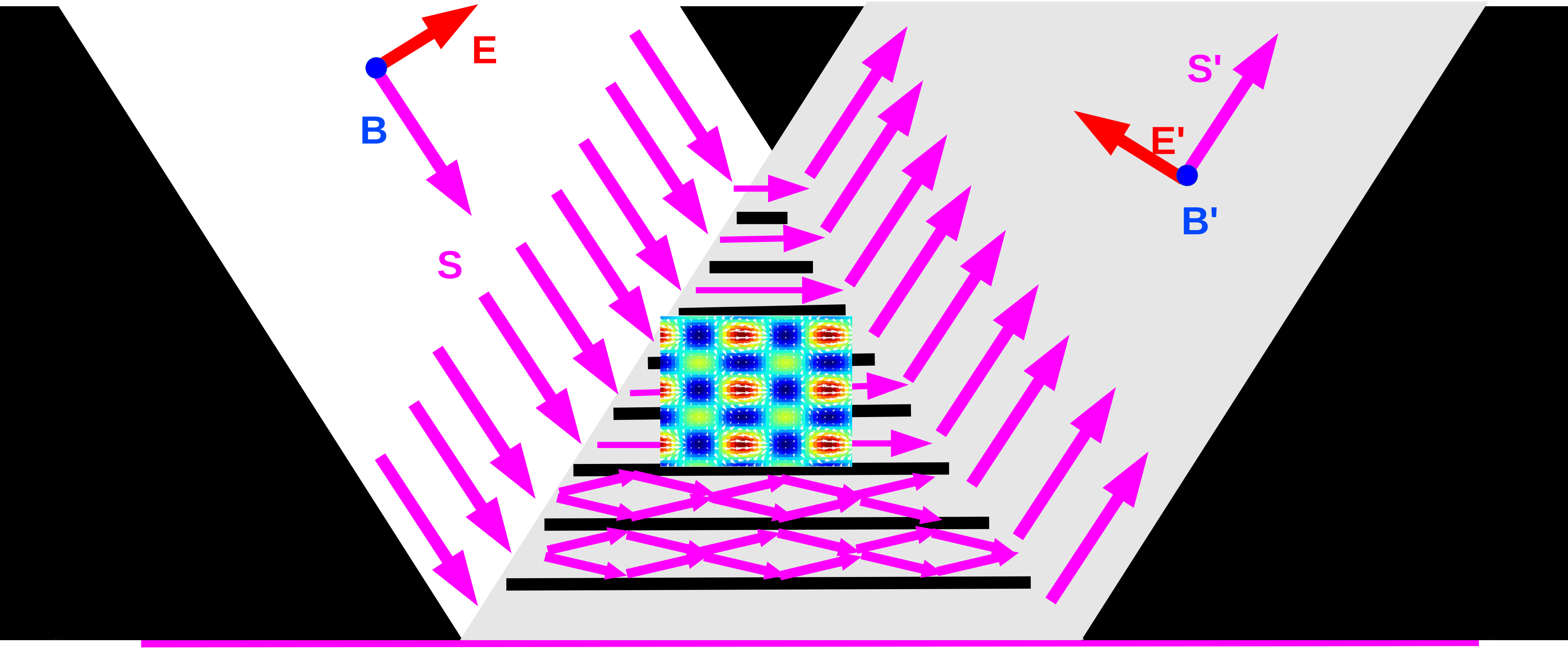
Némi hullámtan + középiskolás trigonometria

A megjelenítésért köszönet Cserti Józsefnek.

A válasz egyszerű: **maga a fény!**

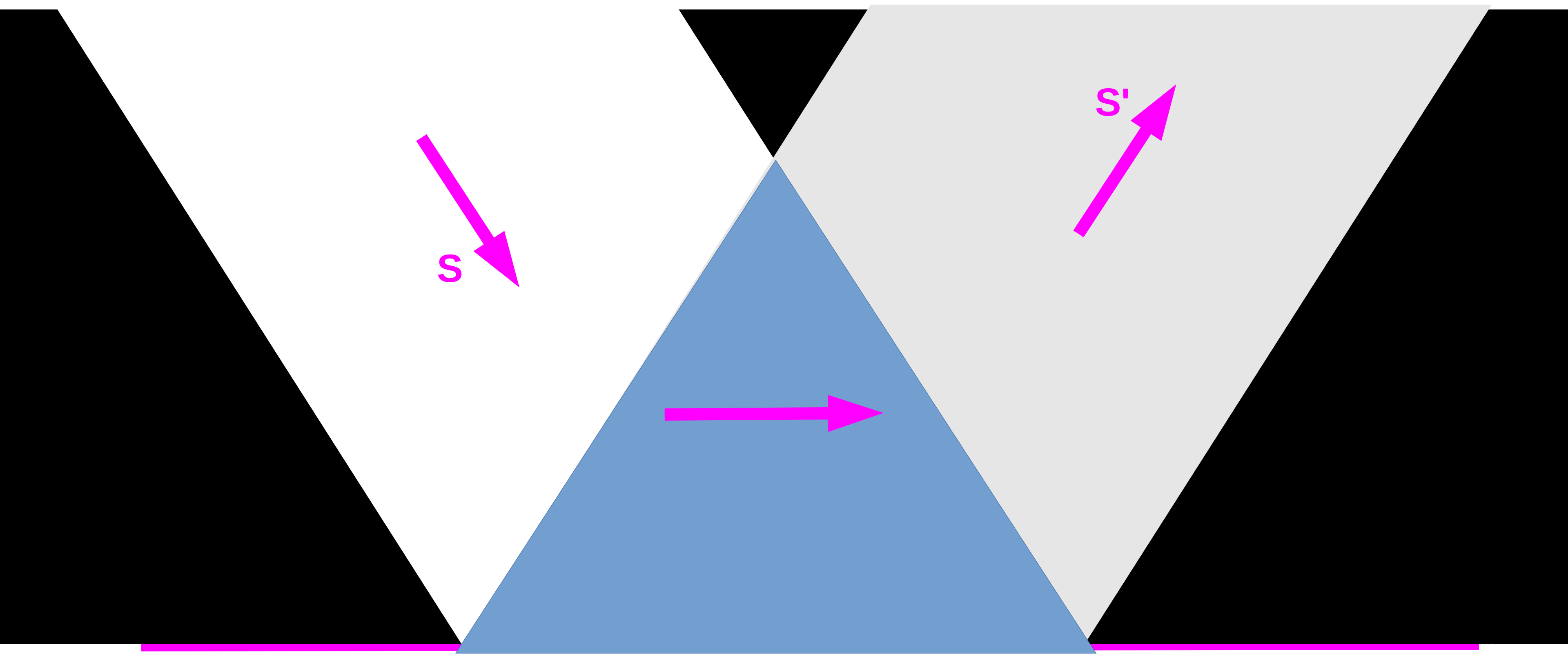
A válasz helyes, de az ördög a részletekben lakik

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

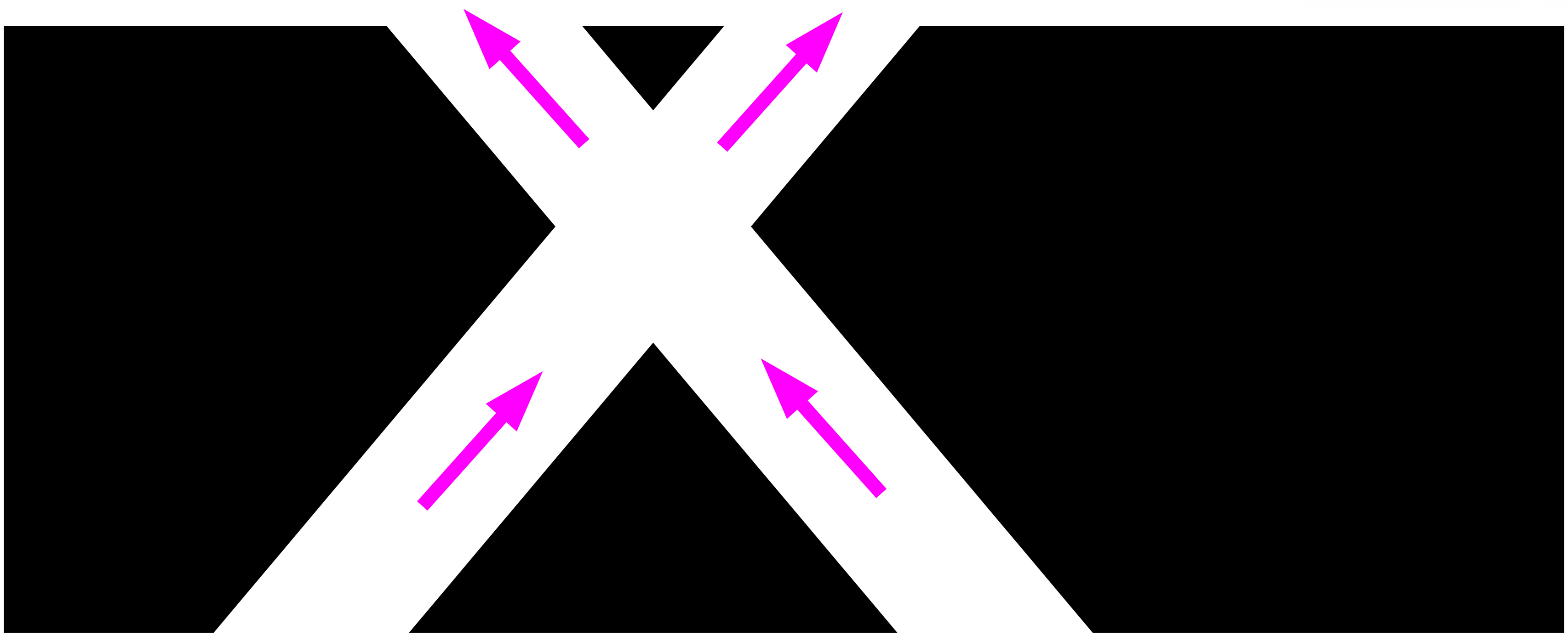


Gyakorlati közelítés: **energiaprizma**

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

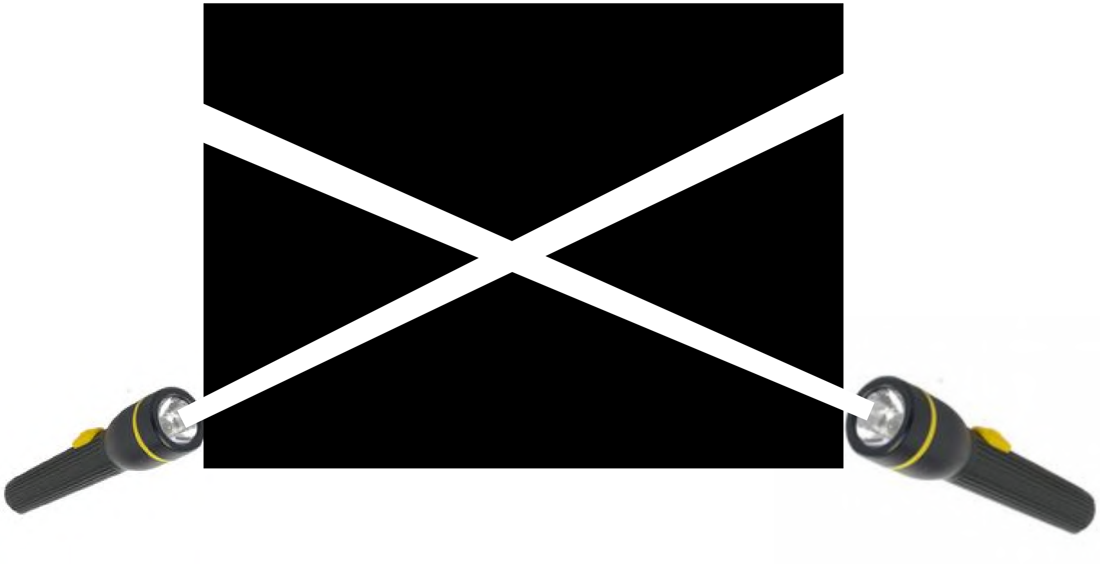


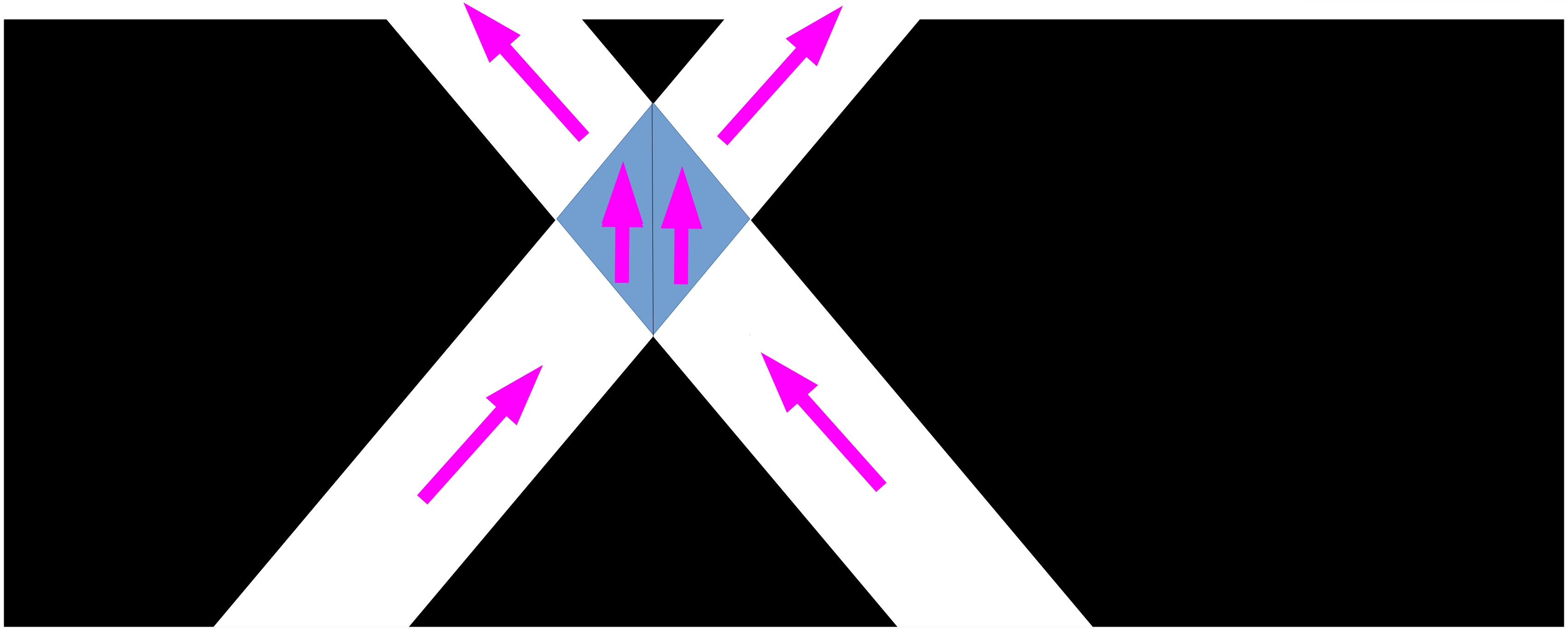
Alkalmazzuk a modellt
a két lámpa fényére!



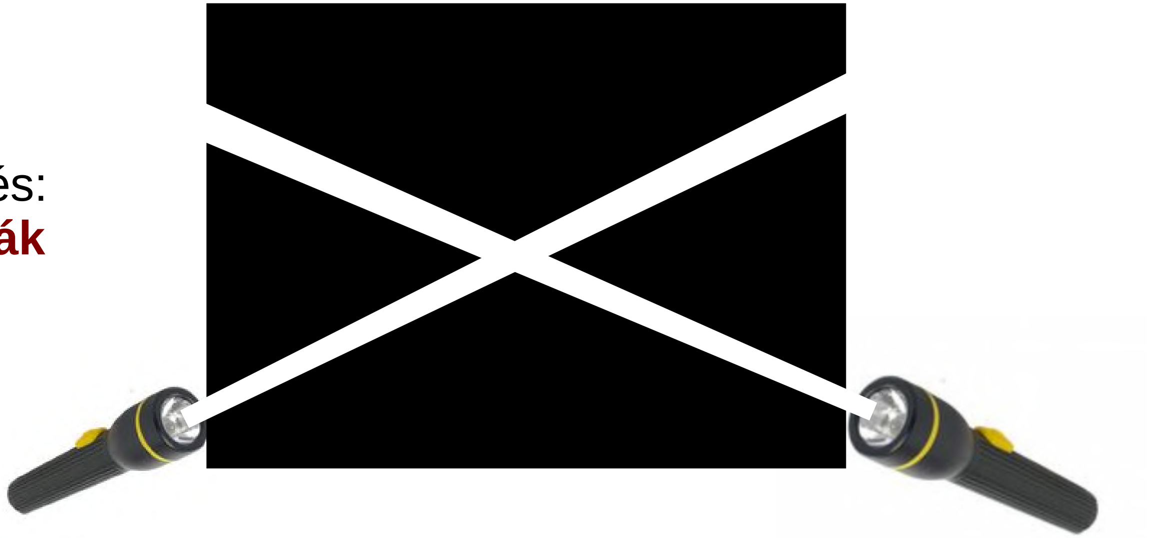
Alkalmazzuk a modellt
a két lámpa fényére!

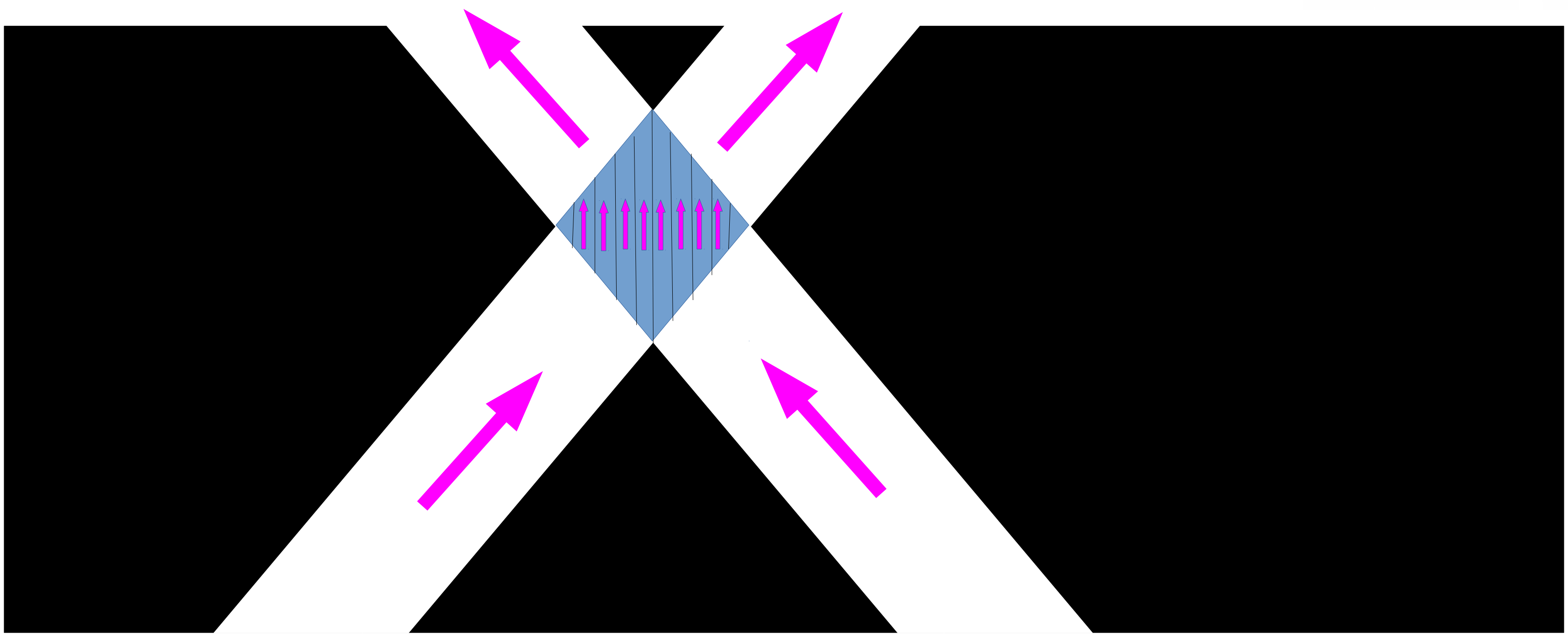
Első közelítés:
energiaprizma



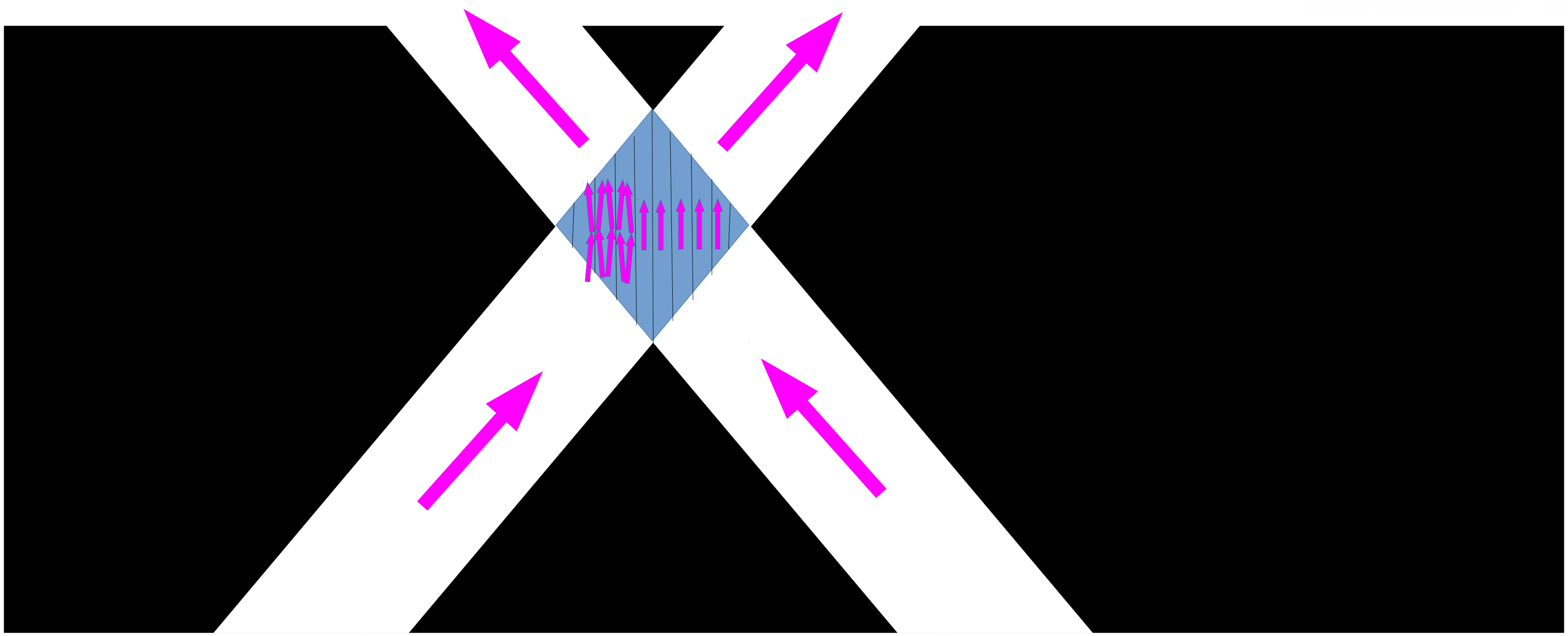


Eggyel pontosabb közelítés:
fényvezető csatornácskák



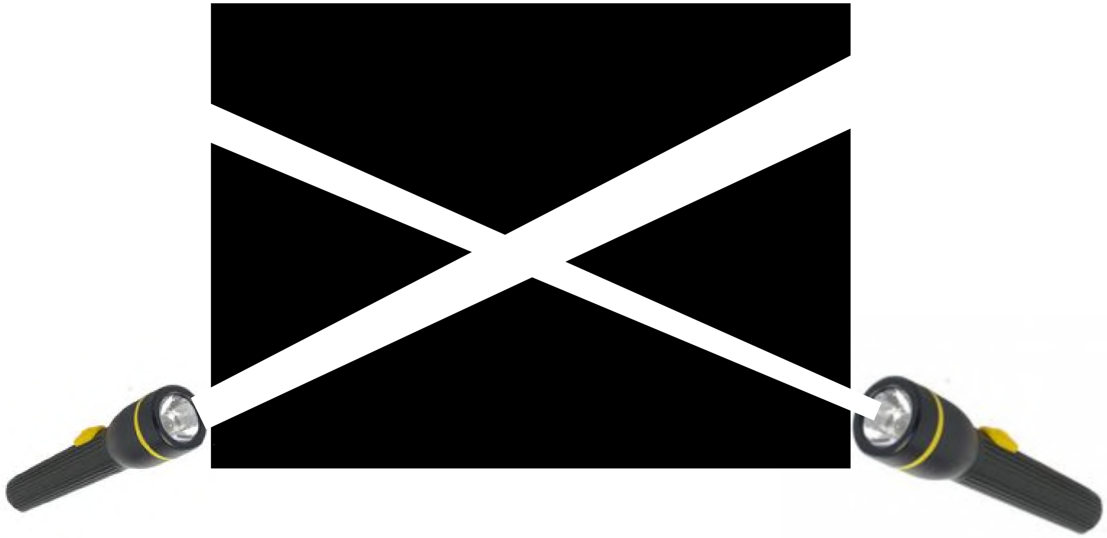


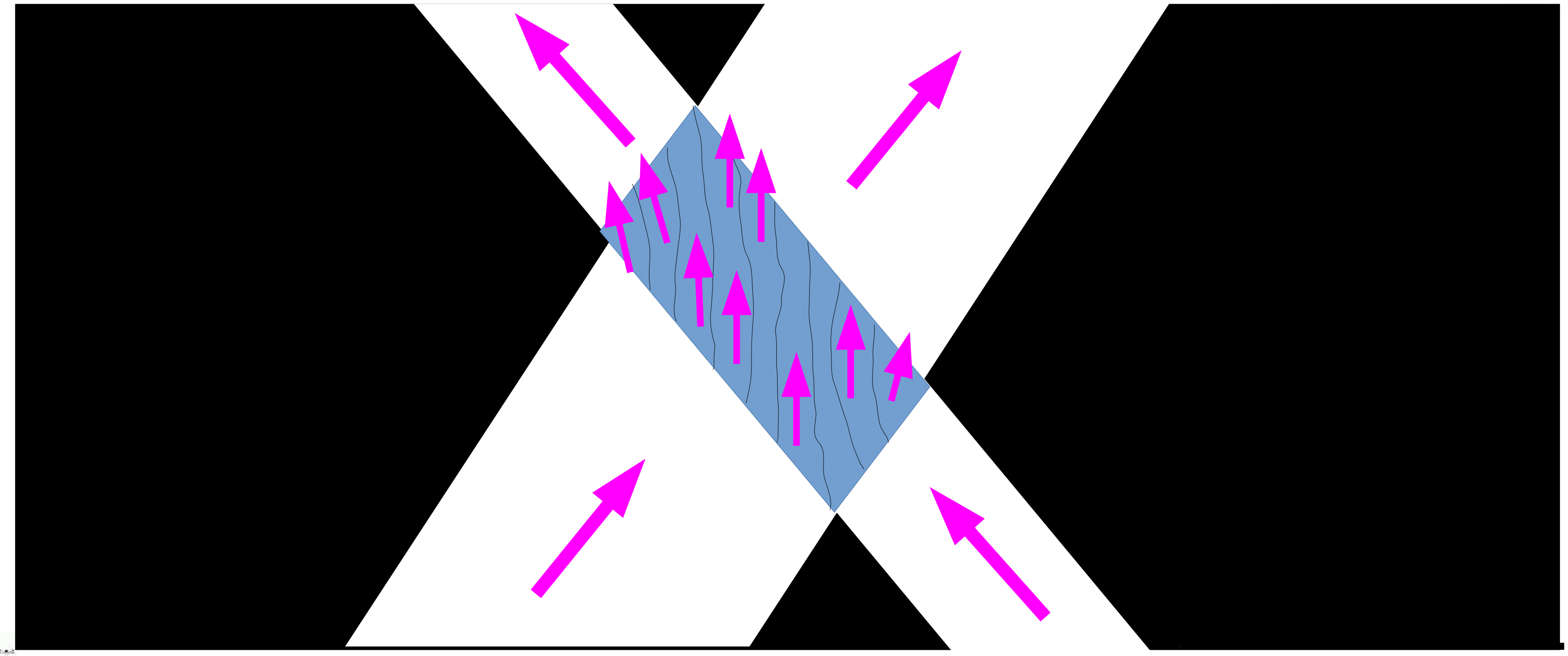
Még pontosabb leírás:
az önmagán visszaverődő fényenergia



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 lencséket.

És még nem beszéltünk a diffrakcióról, a polarizációs jelenségekről, valamint a kvantumos optikai 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!

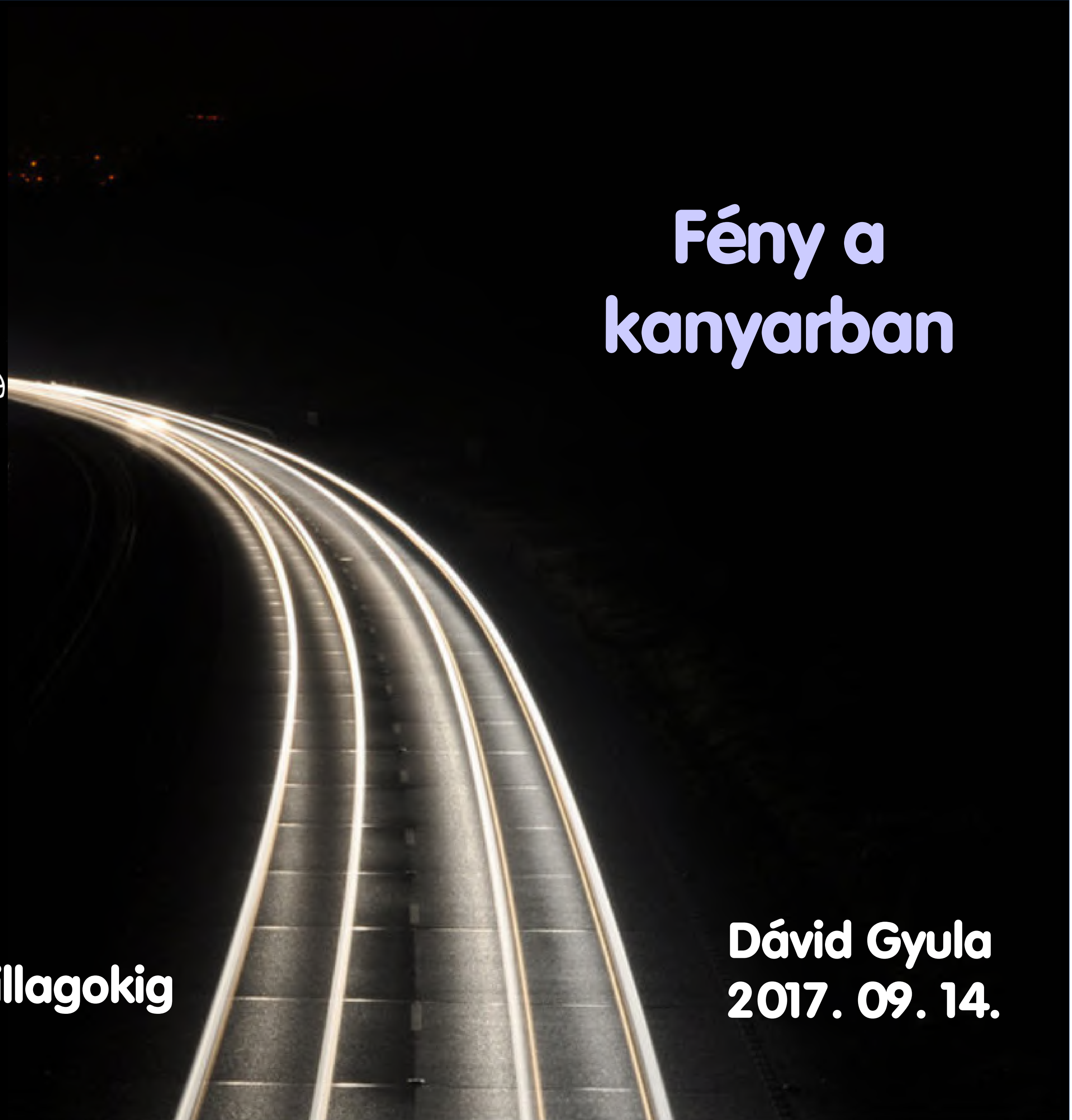
Elő se vettük a klasszikus optikai eszközöket, a gömbtükröket, prizmákat és lencséket.

És még nem beszéltünk a diffrakcióról, a polarizációs jelenségekről, valamint a kvantumos optikai effektusokról!

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

Köszönöm a figyelmet!

Fény a kanyarban



ELTE TTK
Fizikai Intézet

Az atomoktól a csillagokig

Dávid Gyula

2017. 09. 14.