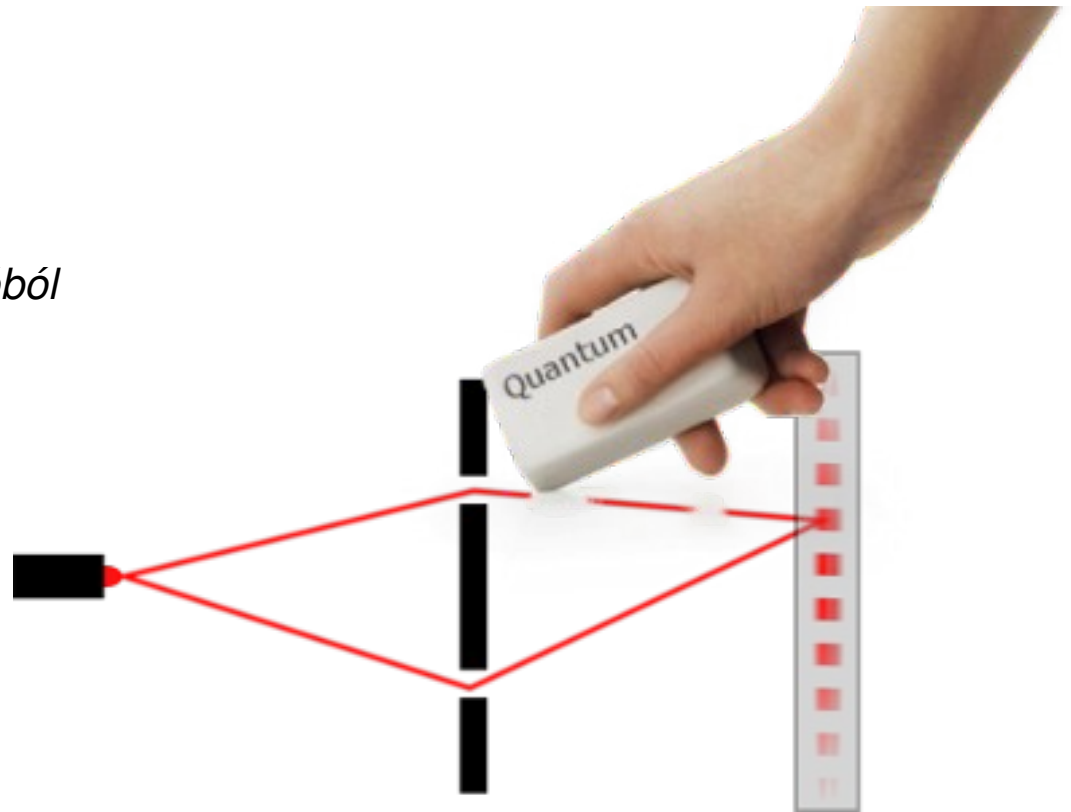


Egy kvantumradír-kísérlet

**"Részecske vagyok, vagy hullám,
Élek-e vagy ez a hullám?
Megmondanám, hogyha tudnám,
De mindent én sem tudhatok."**

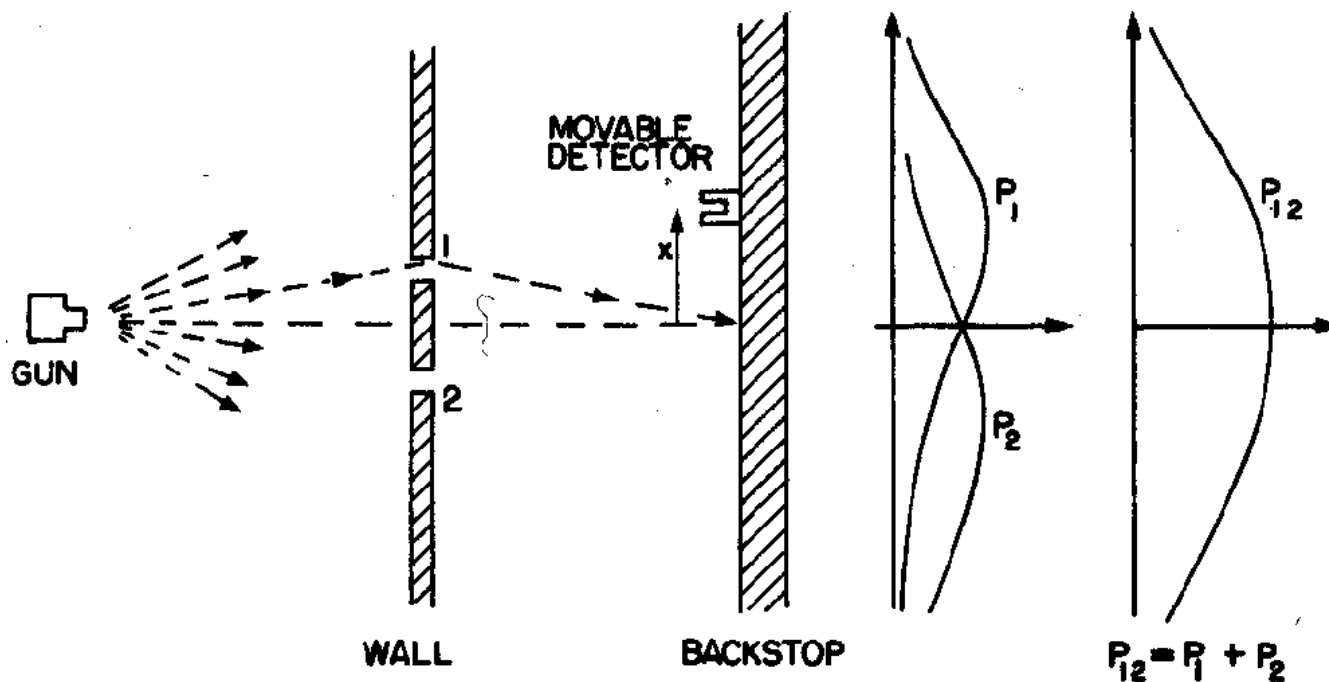
Részlet a Fizikus Indulóból



Tartalmi kivonat

- Bevezetés Feynman gondolkísérletével
- Optikai analógia a Mach-Zehnder kísérletben
- Kvantummechanika érintőlegesen
- Szimuláció/Kísérlet

Kétréses kísérlet géppuskával

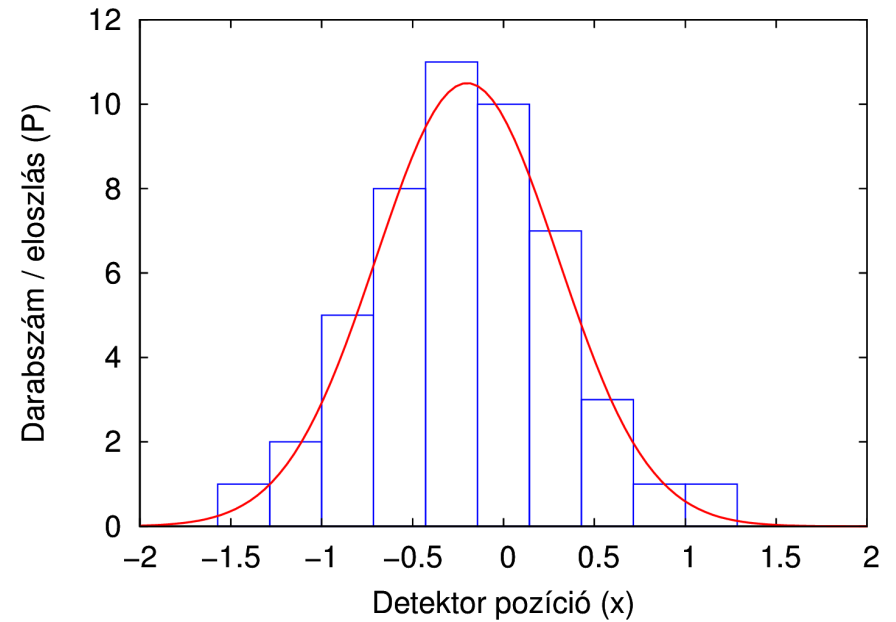
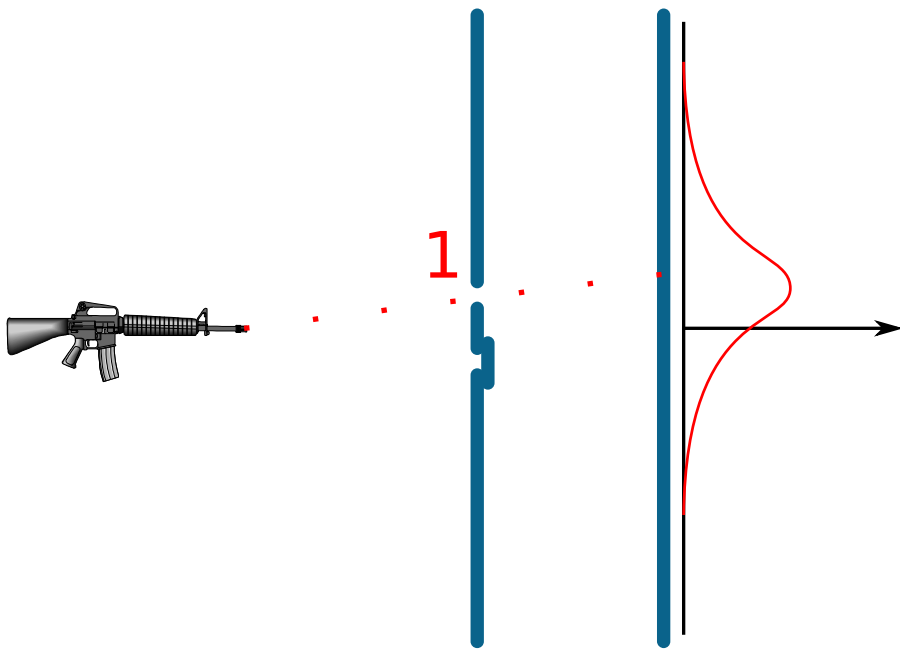


Feynman, 1965
gondolatkísérlet

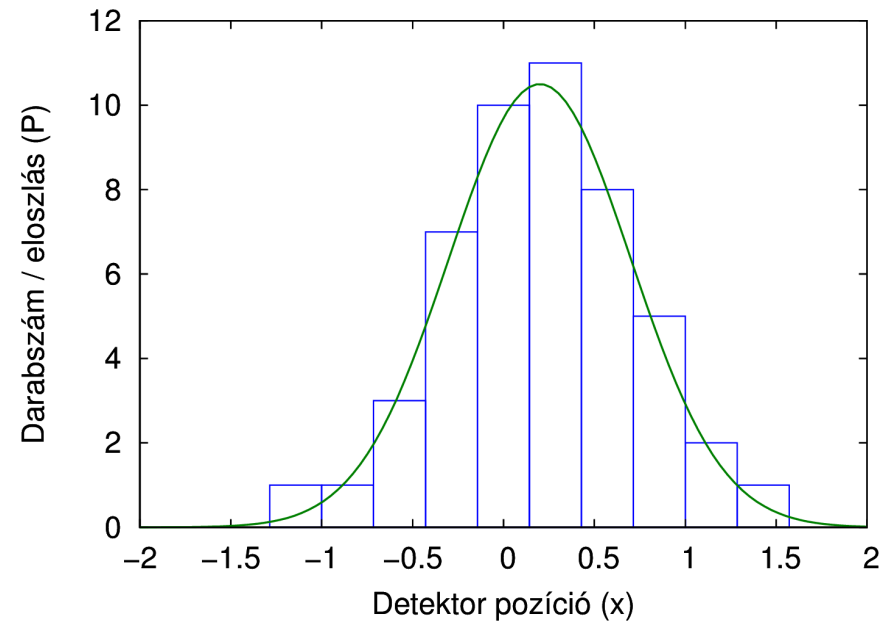
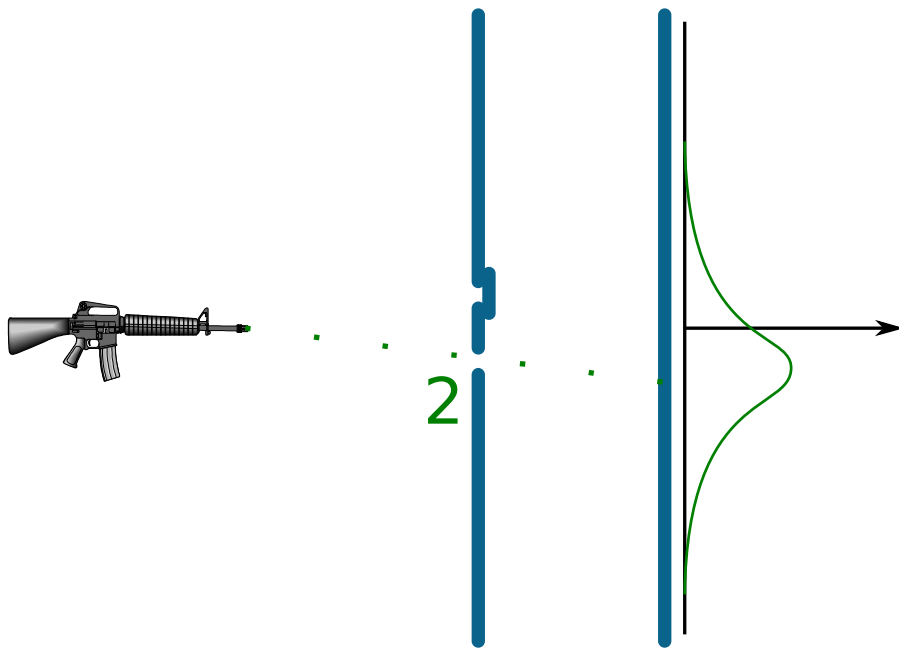
1.elrendezés

Otthon ne próbáljuk ki ☺!

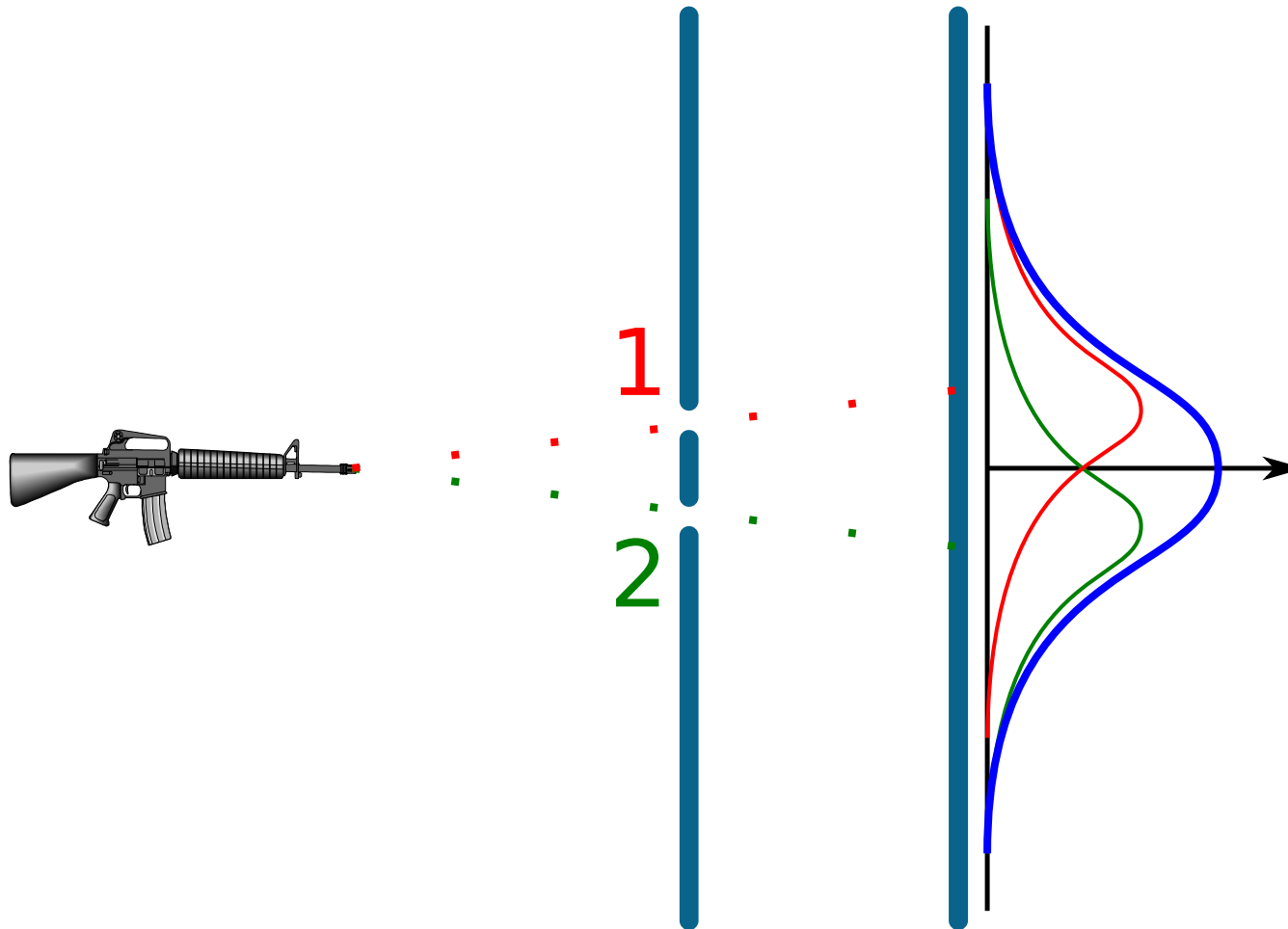
Egy rés esete



A másik se különb



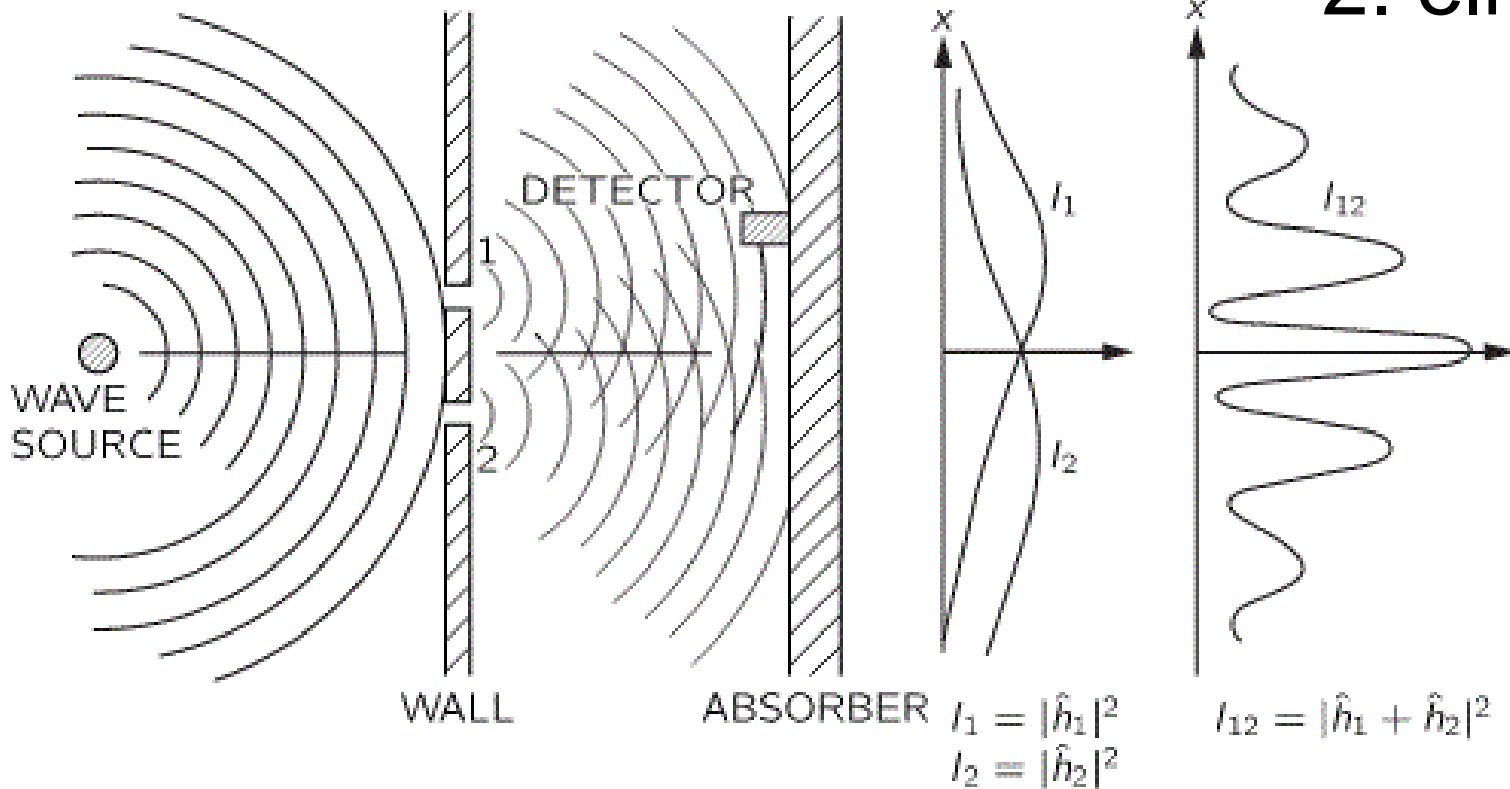
Részecskeeszköz viselkedés



$$P_{12} = P_1 + P_2$$

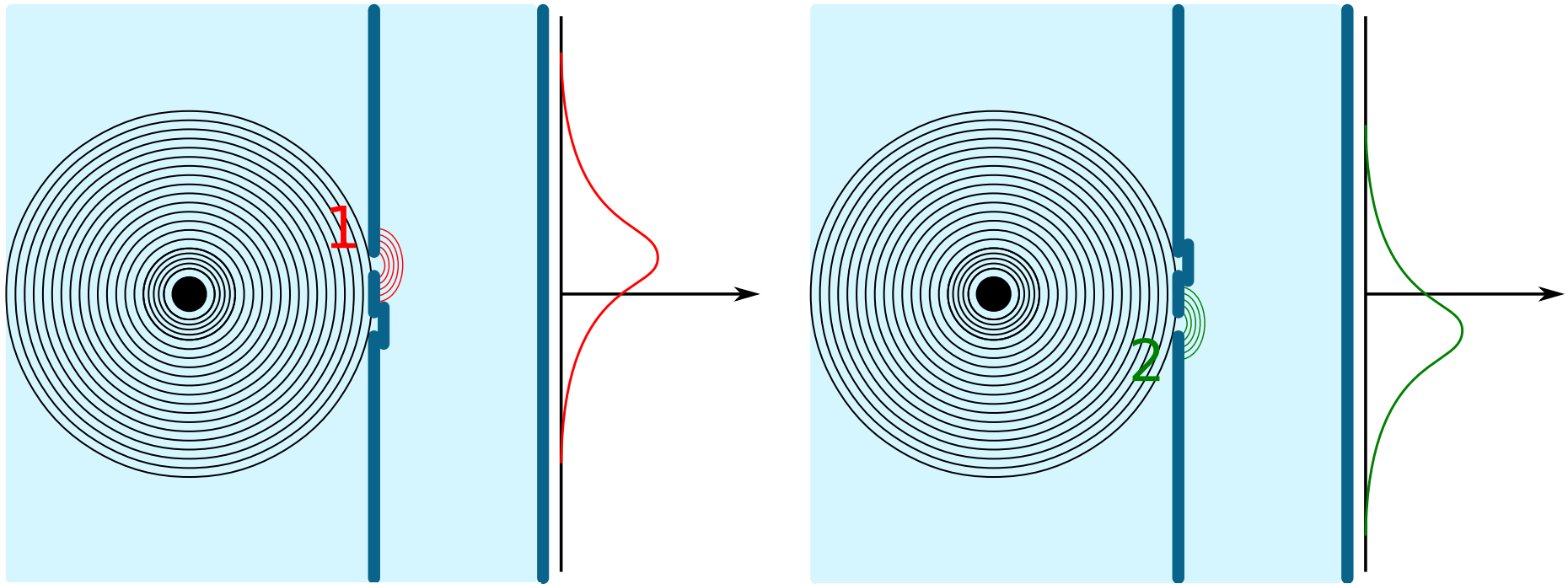
Békésebb vizekre evezve

2. elrendezés



Víz hullámokkal ismételjük meg!

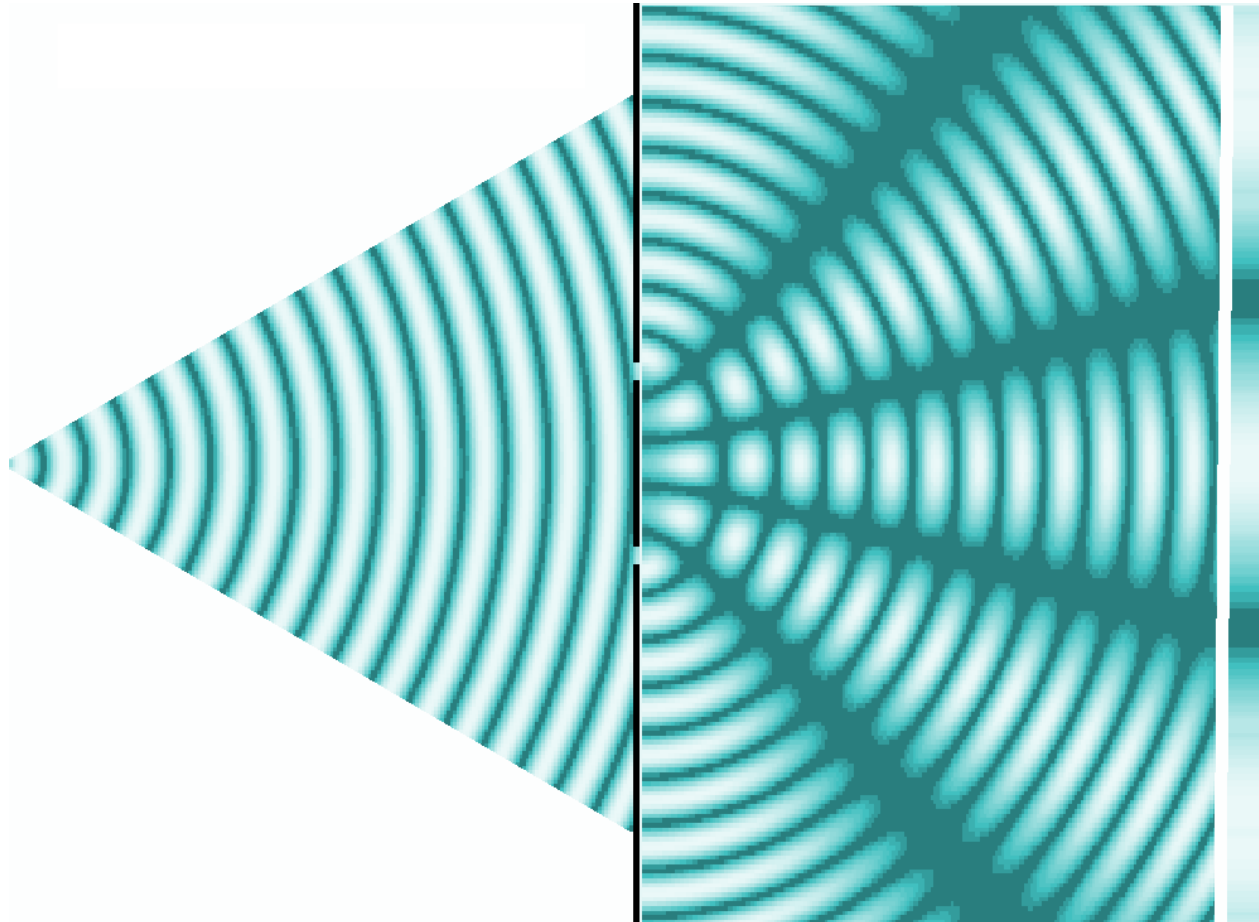
Egy-egy rés letakarva



$$I_1 = \langle h_1(t)^2 \rangle = |A_1|^2$$

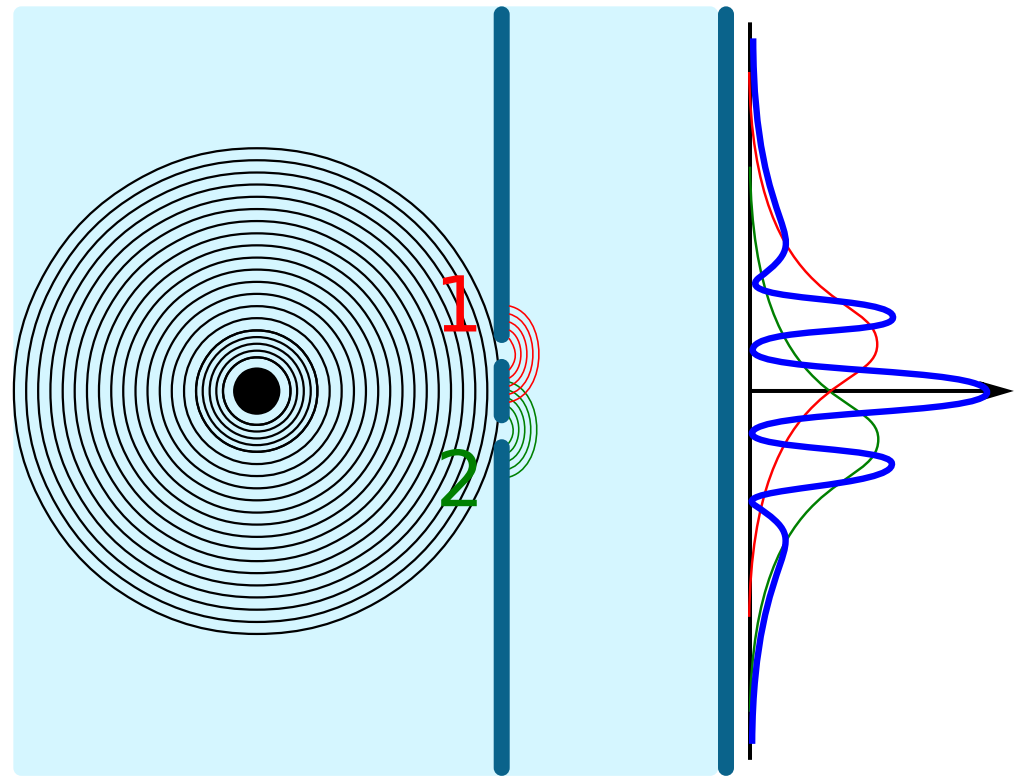
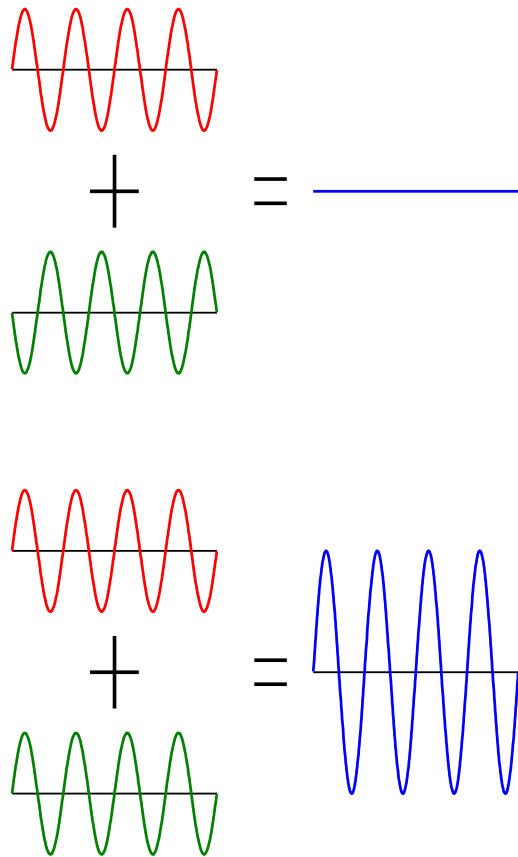
$$I_2 = \langle h_2(t)^2 \rangle = |A_2|^2$$

$$h(t) = A \cos(kx - \omega t)$$

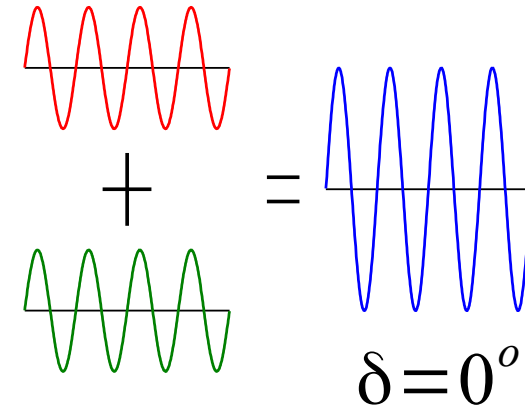
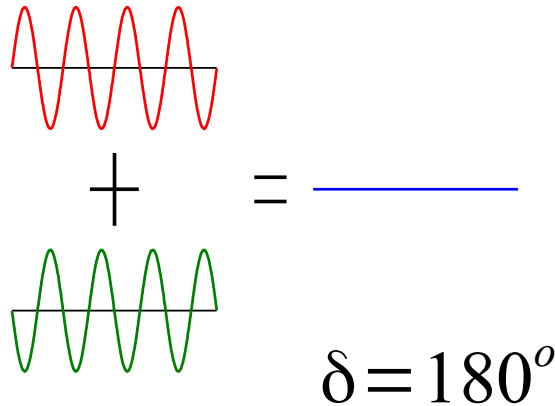


Franz Embacher animációja

Hullámszerű viselkedés



Hullámszerű viselkedés



$$I_{12} = \langle (h_1(t) + h_2(t))^2 \rangle = \langle h_1^2 \rangle + \langle h_2^2 \rangle + 2 \langle h_1 \cdot h_2 \rangle$$

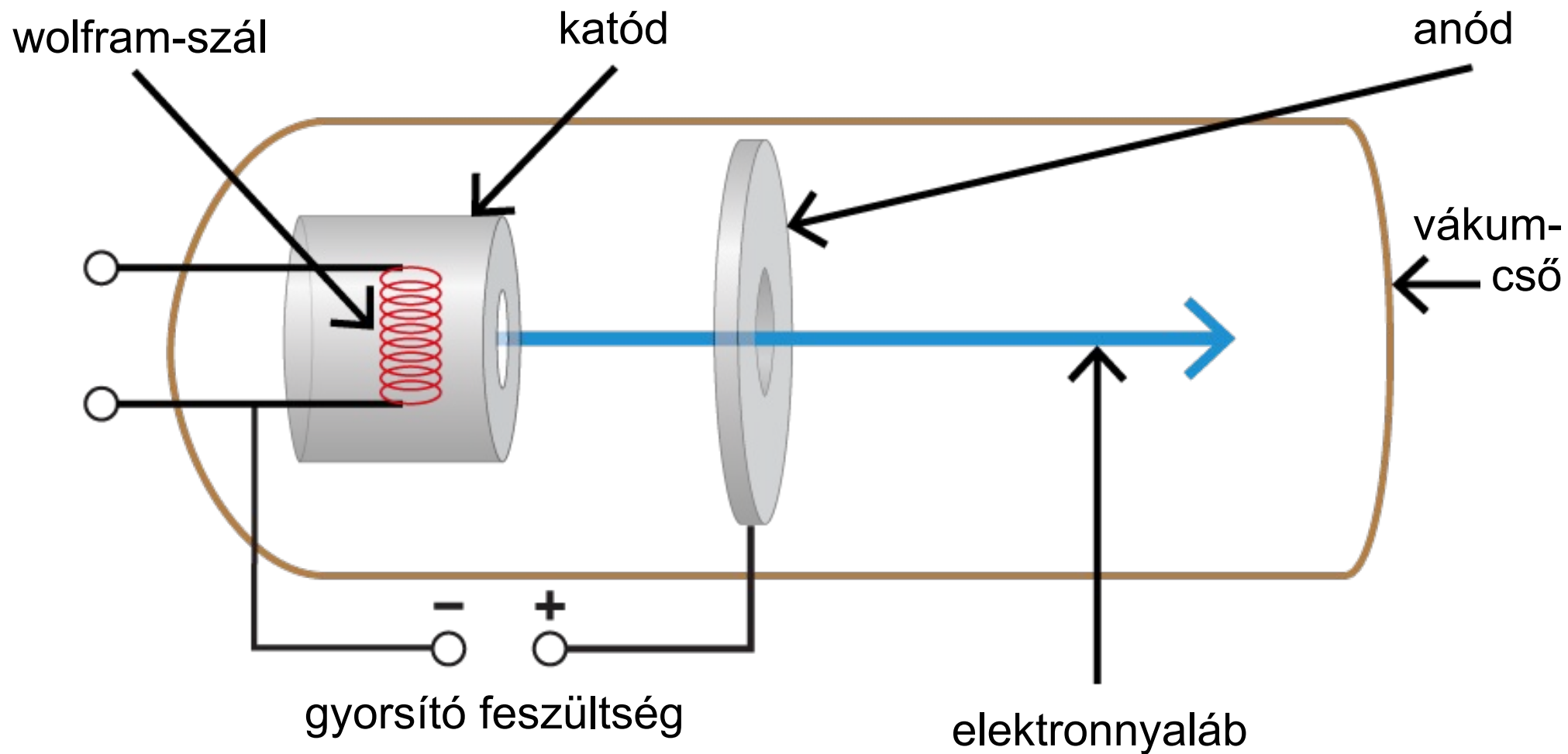
$$I_1 = \langle h_1(t)^2 \rangle = |A_1|^2$$

$$I_2 = \langle h_2(t)^2 \rangle = |A_2|^2$$

$$I_{12} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta$$

Az interferencia a vegyszorzat tagban van!

Elektronágyú

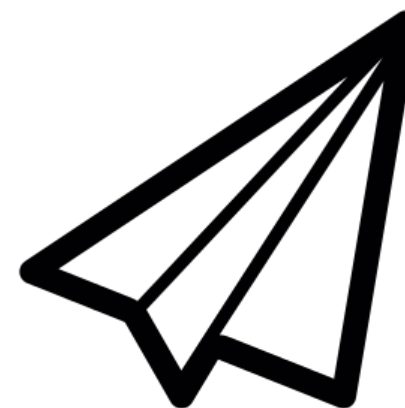
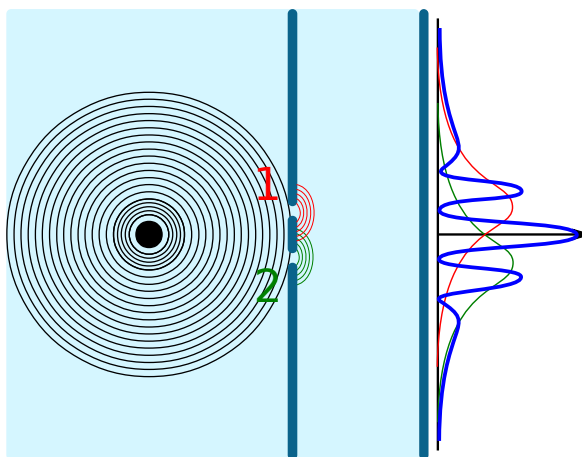
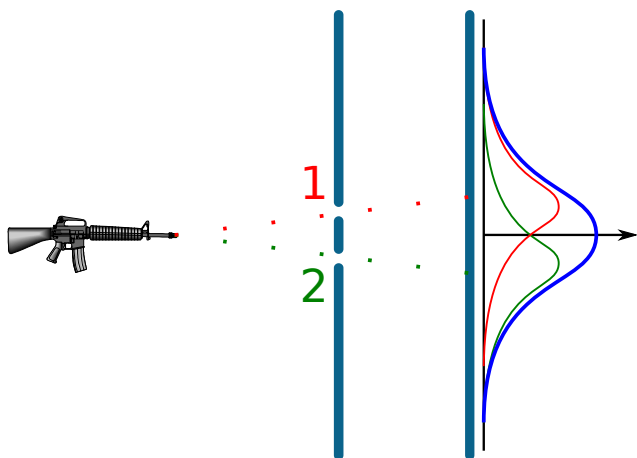


Szavazás

Tűz

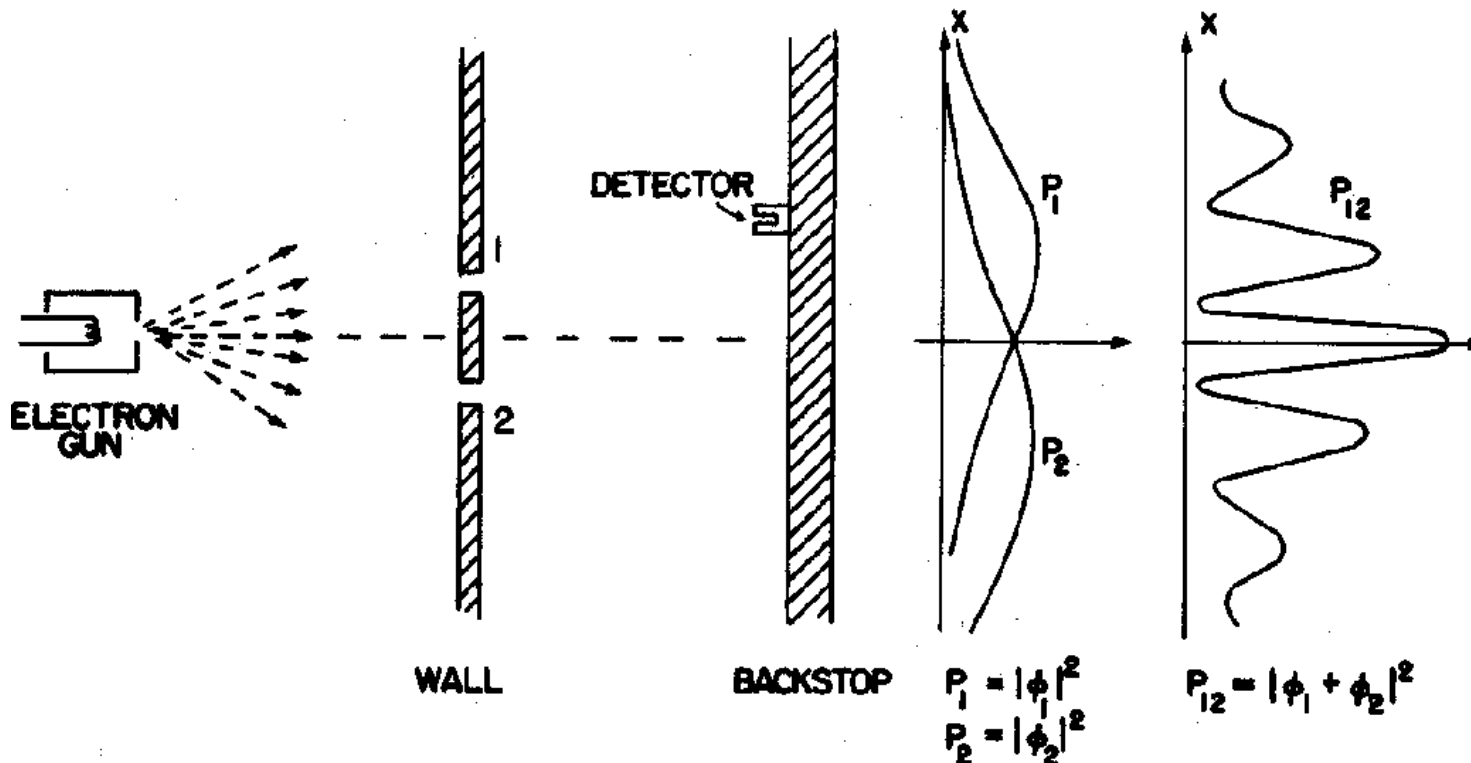
Víz

Repülő



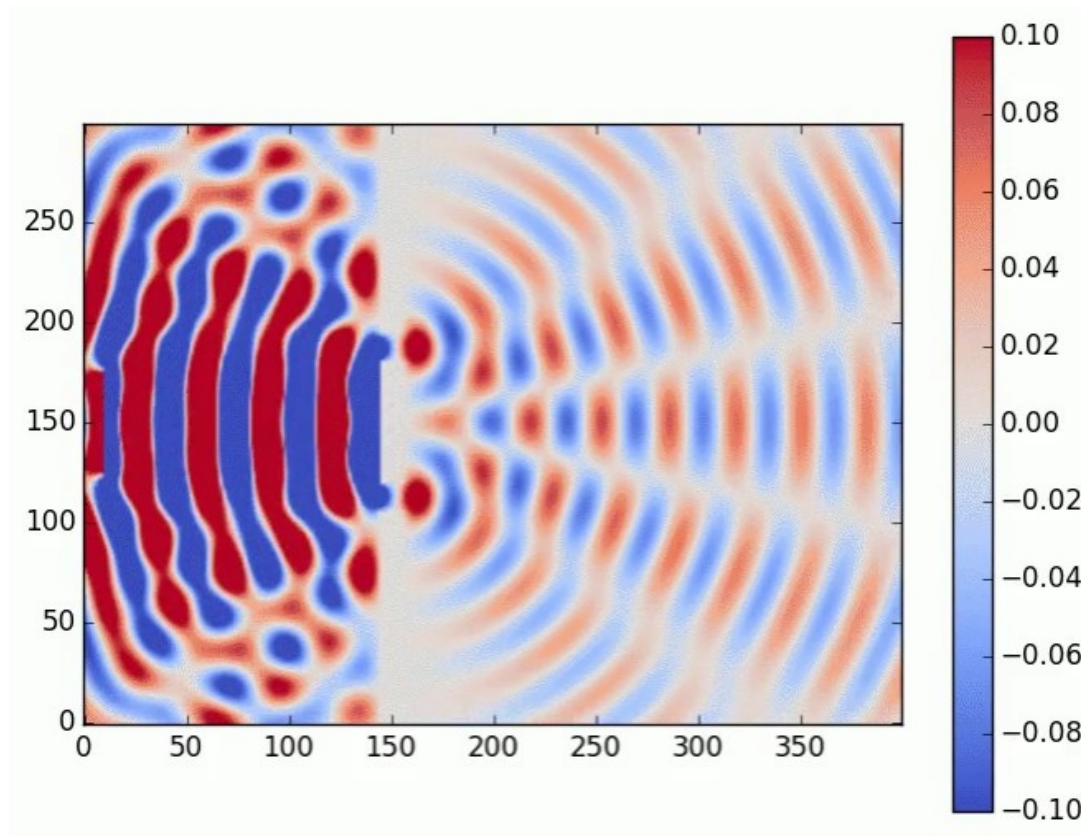
Elektronhullámok interferenciája

3. elrendezés



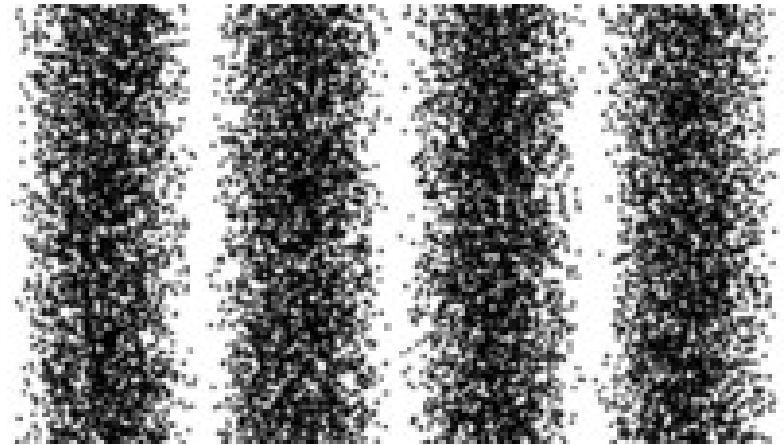
$$P_{12} \neq P_1 + P_2$$

Hullámszimuláció



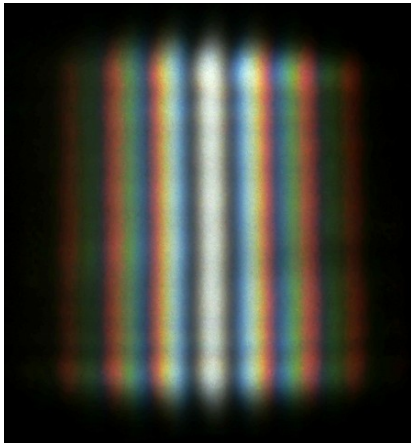
Egyesével lőtt elektronok

- Detektáljuk az ernyőn
- Sokszor ismétéljük meg
- Interferenciamintázatot rajzol

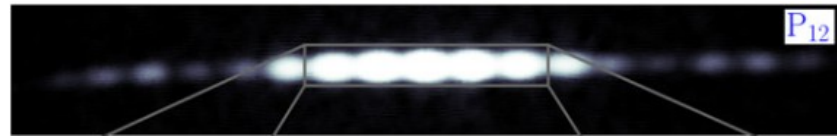


- ? Melyik résen ment ?
- ? Mivel interferált, ha csak egymaga van ?

Kétréses kísérletek



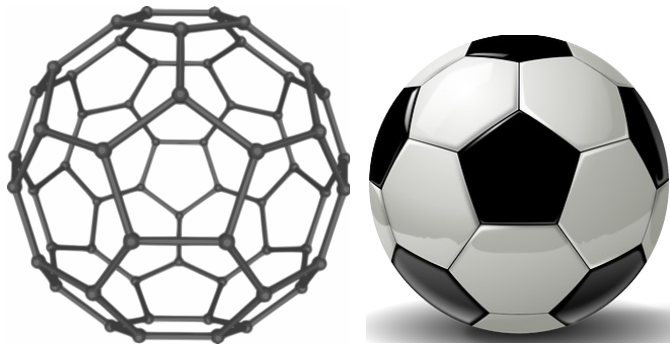
Fény, 1801, Young-kísérlet



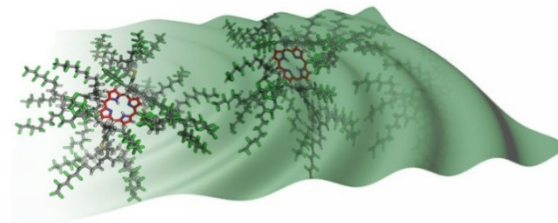
Elektron, 2013



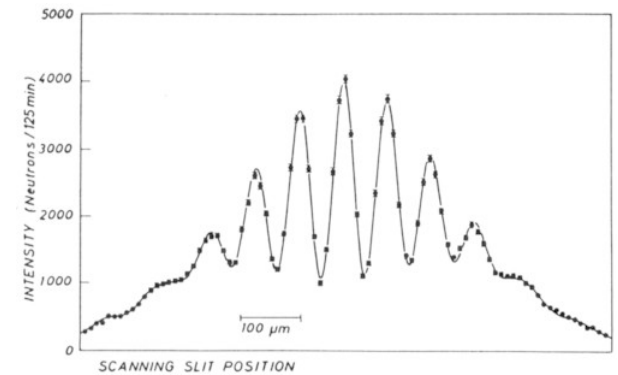
Hélium, 1991



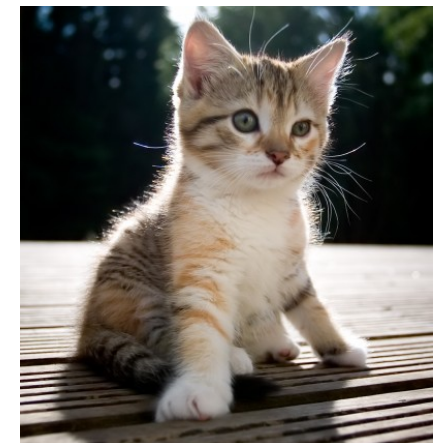
Buckminster fullerén (C_{60}),
1999



Flourizált porfirinek családja
($C_{284}H_{190}F_{320}N_4S_{12}$), 2013

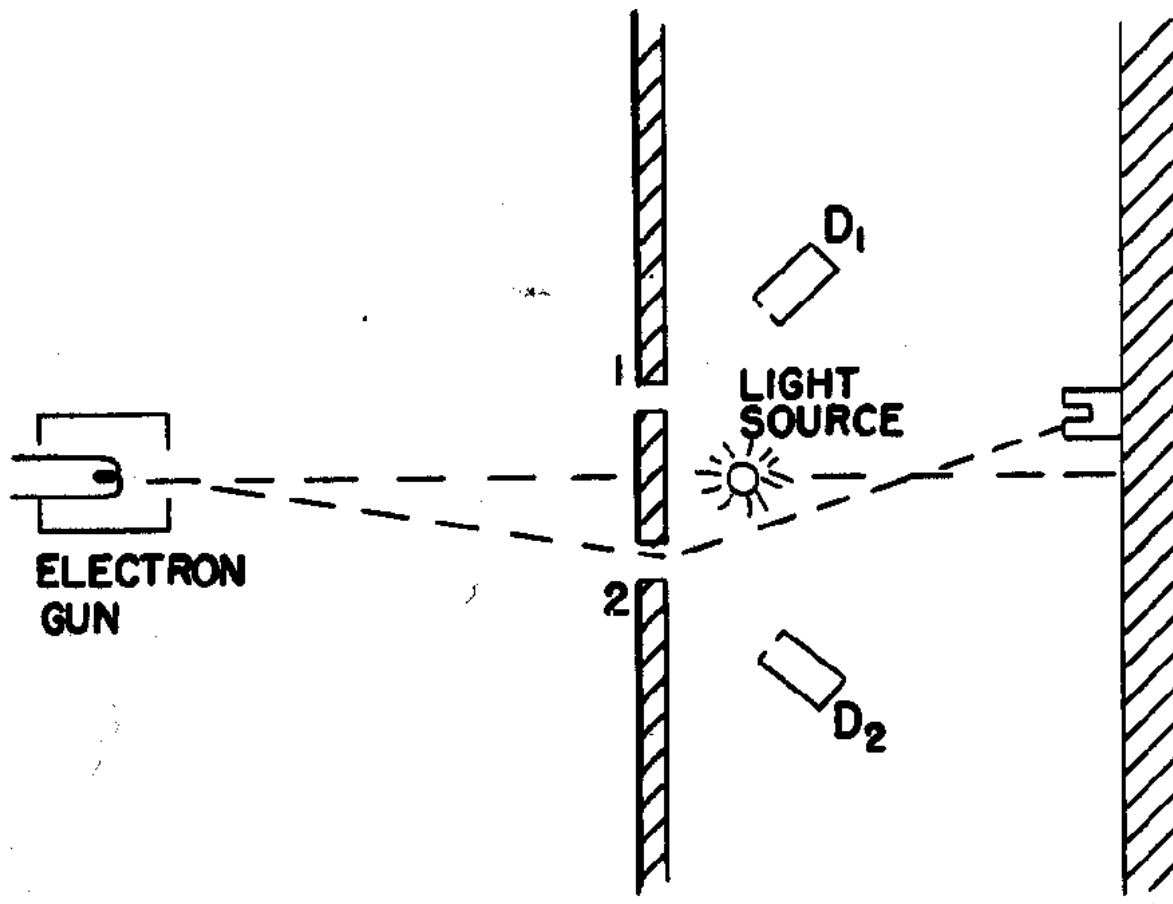


Neutron, 1988



<http://www.askamathematician.com/2010/12/q-can-you-do-the-double-slit-experiment-with-a-cat-cannon/>

Leselkedjünk!



4. elrendezés

- D_1 és D_2 sosem jelez egyszerre
- Interferencia eltűnik!

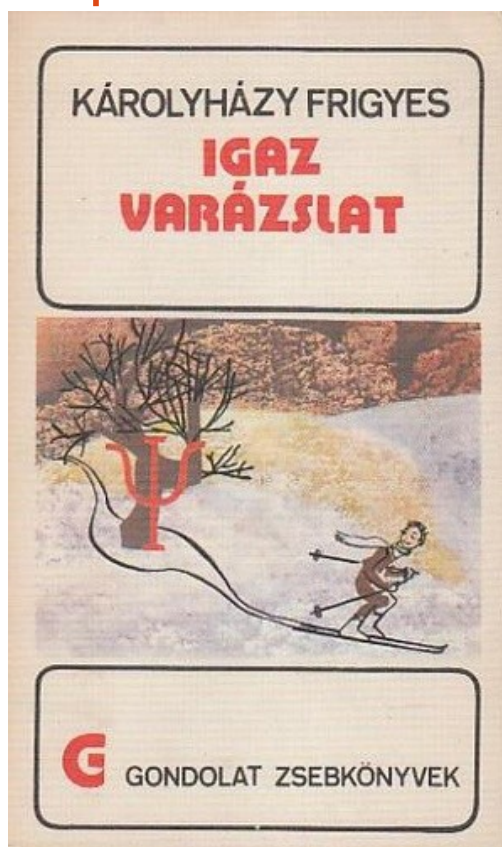
$$P'_{12} = P'_1 + P'_2$$

Részecske-hullám kettőstermészet

Előadó: Cserti József (ELTE TTK, Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék)

Cím: Az optika — a kvantummechanika előszobája

<http://www.atomcsill.elte.hu/program/kivonat/2012-2013/5>



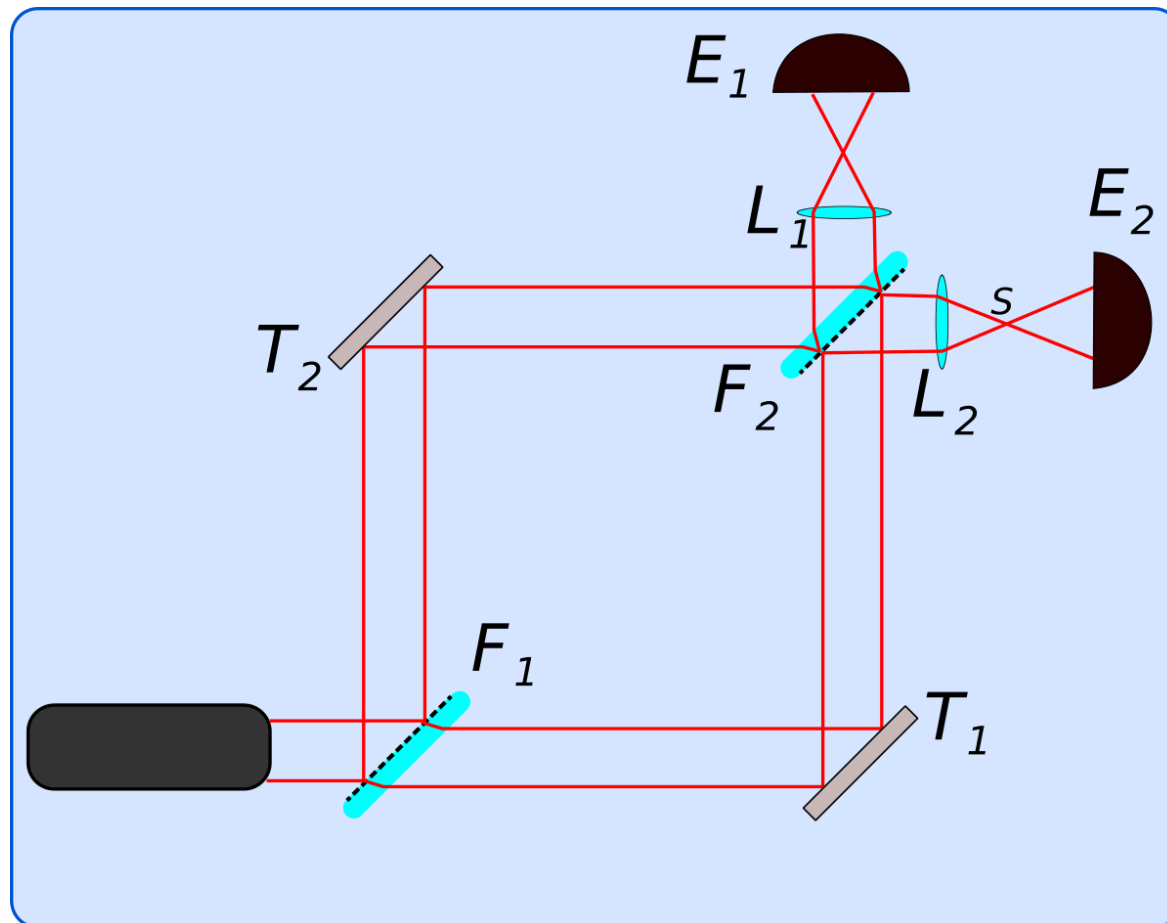
„A kvantummechanikáról szólni száz oldalon olyan feladat, mint egy induló vonat ablakából szerelmet vallani.”

Károlyházi Frigyes: Igaz varázslat

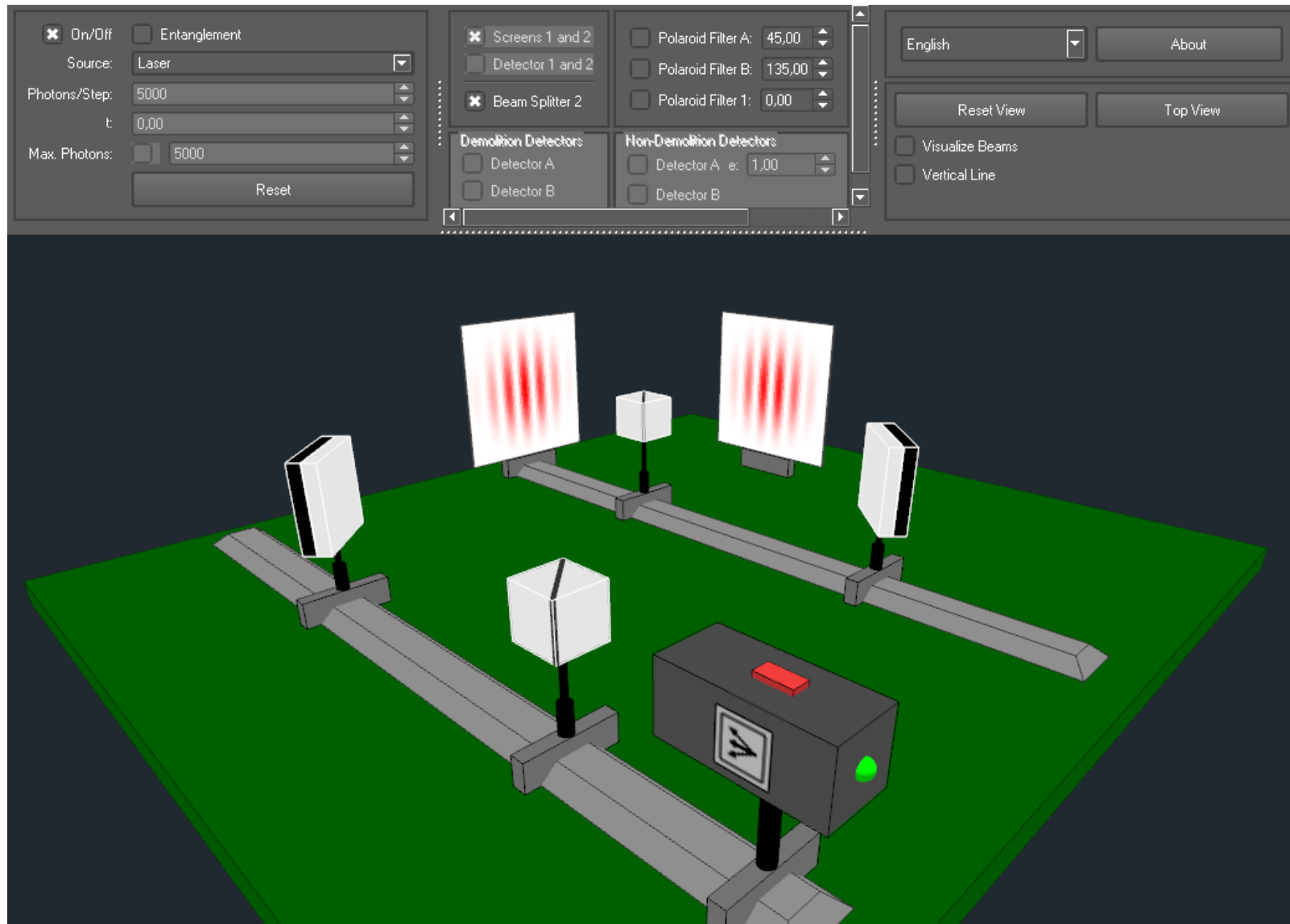
"I think I can safely say that nobody understands Quantum Mechanics"

Richard P. Feynman

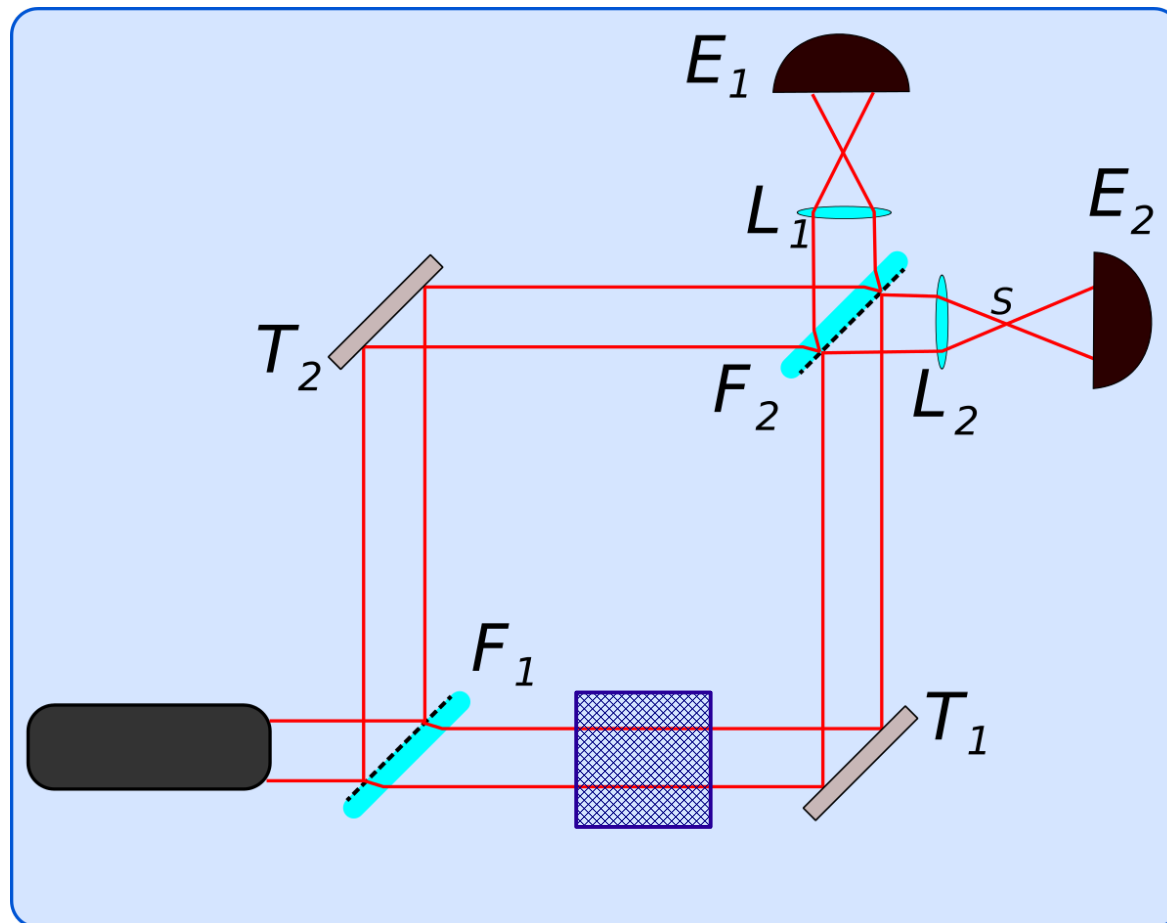
Mach-Zehnder interferometer



Szimulátor I.

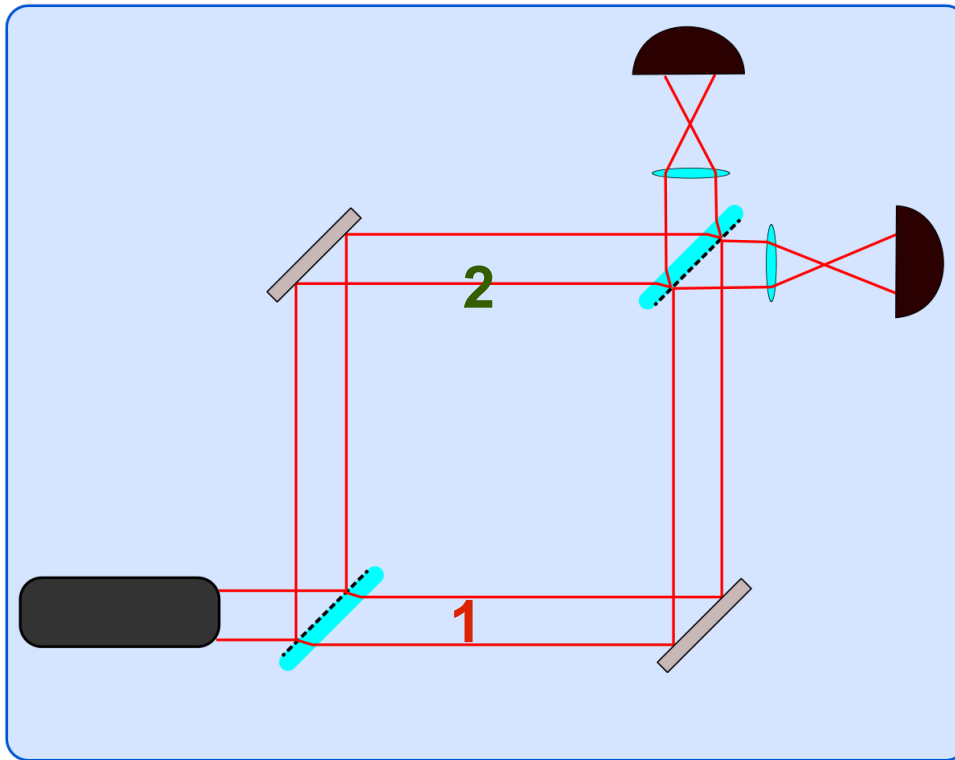


Mérések MZ-interferométerrel



Átlátszó anyagok törésmutatójának nyomás- vagy hőmérsékletfüggése

Egy kis matek



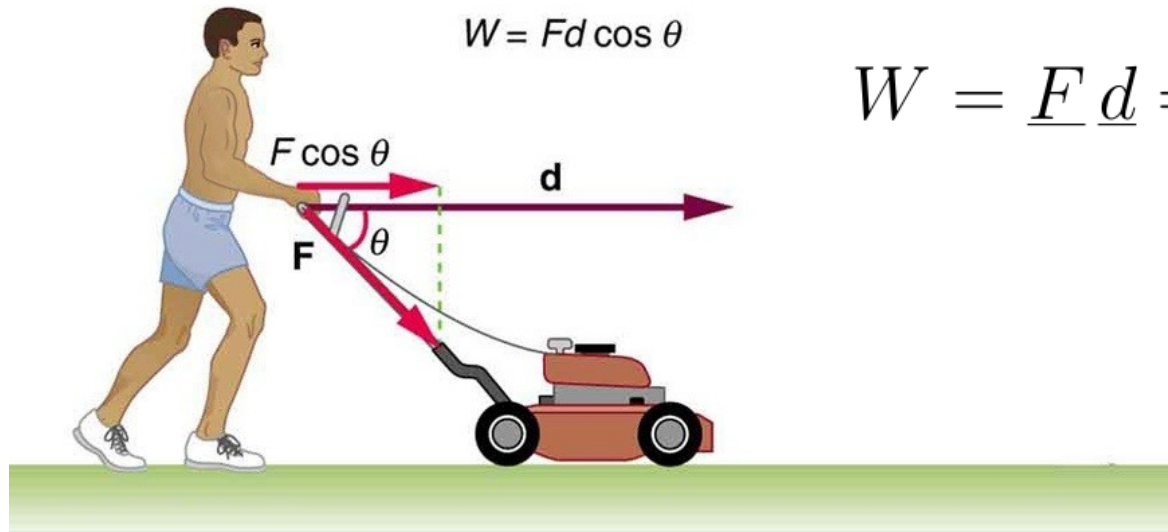
$$I_1 = \langle \underline{E}_1(t)^2 \rangle$$

$$\underline{E}_1(t)^2 = \underline{E}_1(t) \cdot \underline{E}_1(t)$$

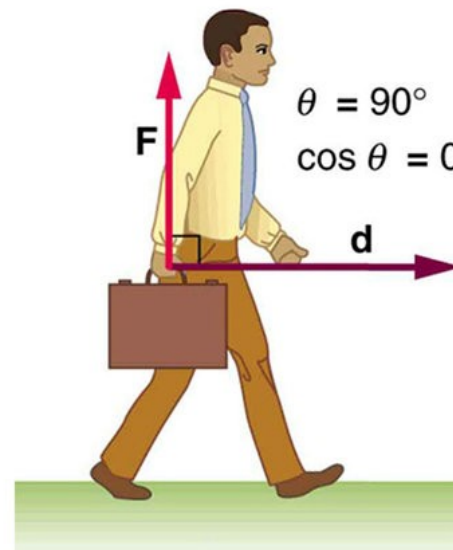
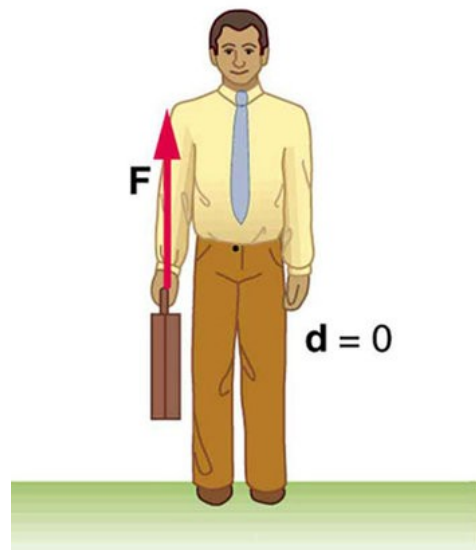
Skalárszorzat

$$\underline{E}(t) = \underline{E} \cos(kx - \omega t)$$

Skalárszorzat – munka



$$W = \underline{F} \underline{d} = F_x d_x + F_y d_y + F_z d_z$$

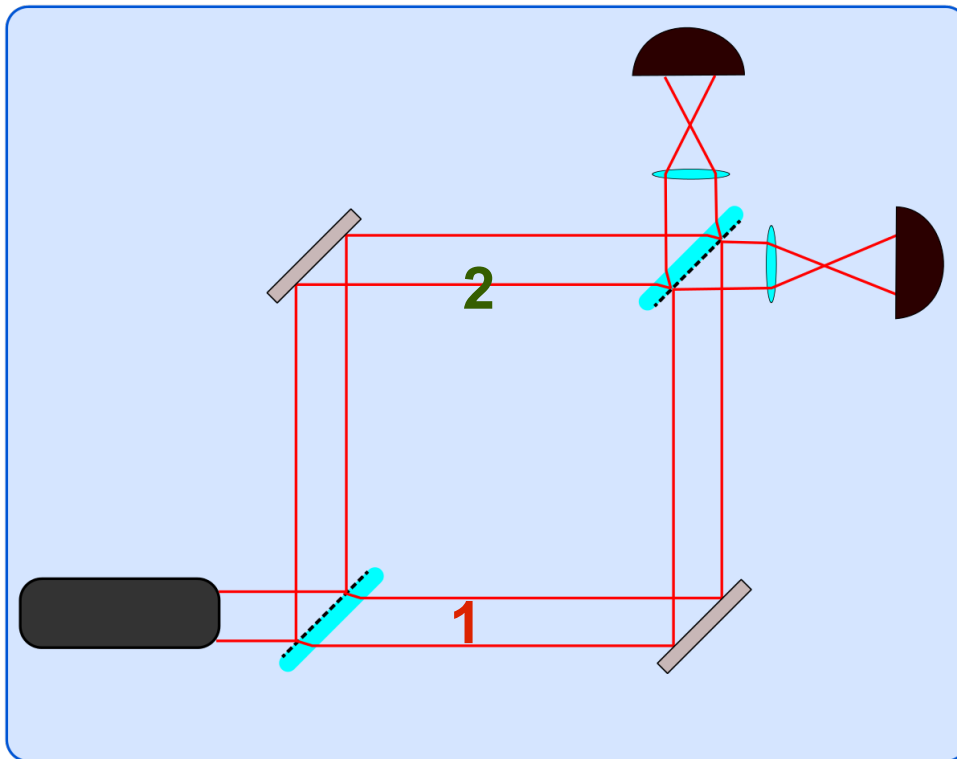


$$W = 0$$



$$\underline{F} \perp \underline{d}$$

Egy kis matek



$$I_1 = \langle \underline{E}_1(t)^2 \rangle$$

$$\underline{E}_1(t)^2 = \underline{E}_1(t) \cdot \underline{E}_1(t)$$

Skalárszorzat

$$I_1 = \langle \underline{E}_1(t)^2 \rangle = |\underline{E}_1|^2$$

Hasonlóan

$$I_2 = \langle \underline{E}_2(t)^2 \rangle = |\underline{E}_2|^2$$

$$\underline{E}(t) = \underline{E} \cos(kx - \omega t)$$

Interferencia a keresztmetszetben

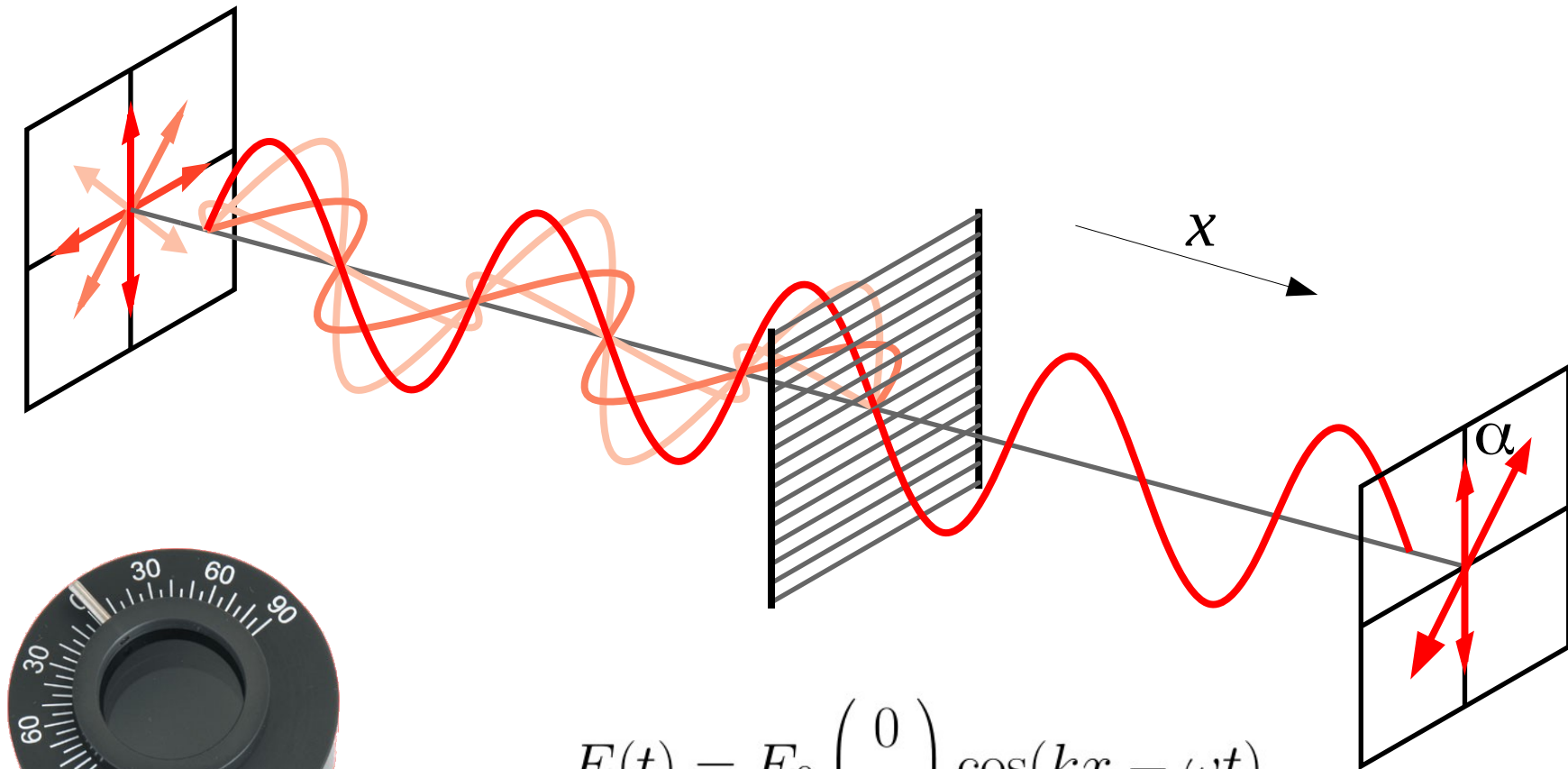
$$I_{12} = \langle (\underline{E}_1(t) + \underline{E}_2(t))^2 \rangle = \langle \underline{E}_1^2 \rangle + \langle \underline{E}_2^2 \rangle + 2 \langle \underline{E}_1 \cdot \underline{E}_2 \rangle$$

$$I_1 = \langle \underline{E}_1(t)^2 \rangle = |\underline{E}_1|^2 \quad I_2 = \langle \underline{E}_2(t)^2 \rangle = |\underline{E}_2|^2$$

$$I_{12} = I_1 + I_2 + 2\underline{E}_1\underline{E}_2 \cos \delta$$

$\underline{E}_1 \perp \underline{E}_2$ Interferencia eltűnik!

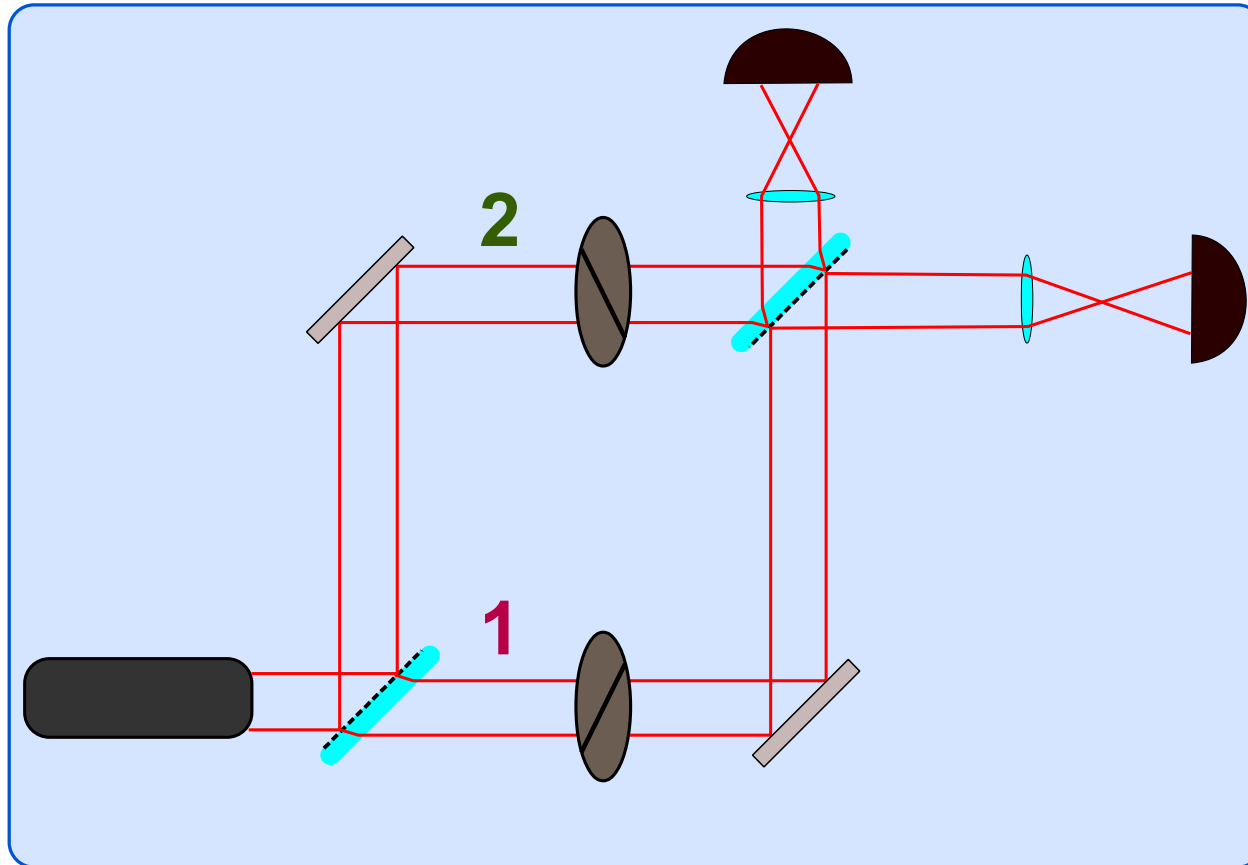
Polarizáció



$$\underline{E}(t) = E_0 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \cos(kx - \omega t)$$

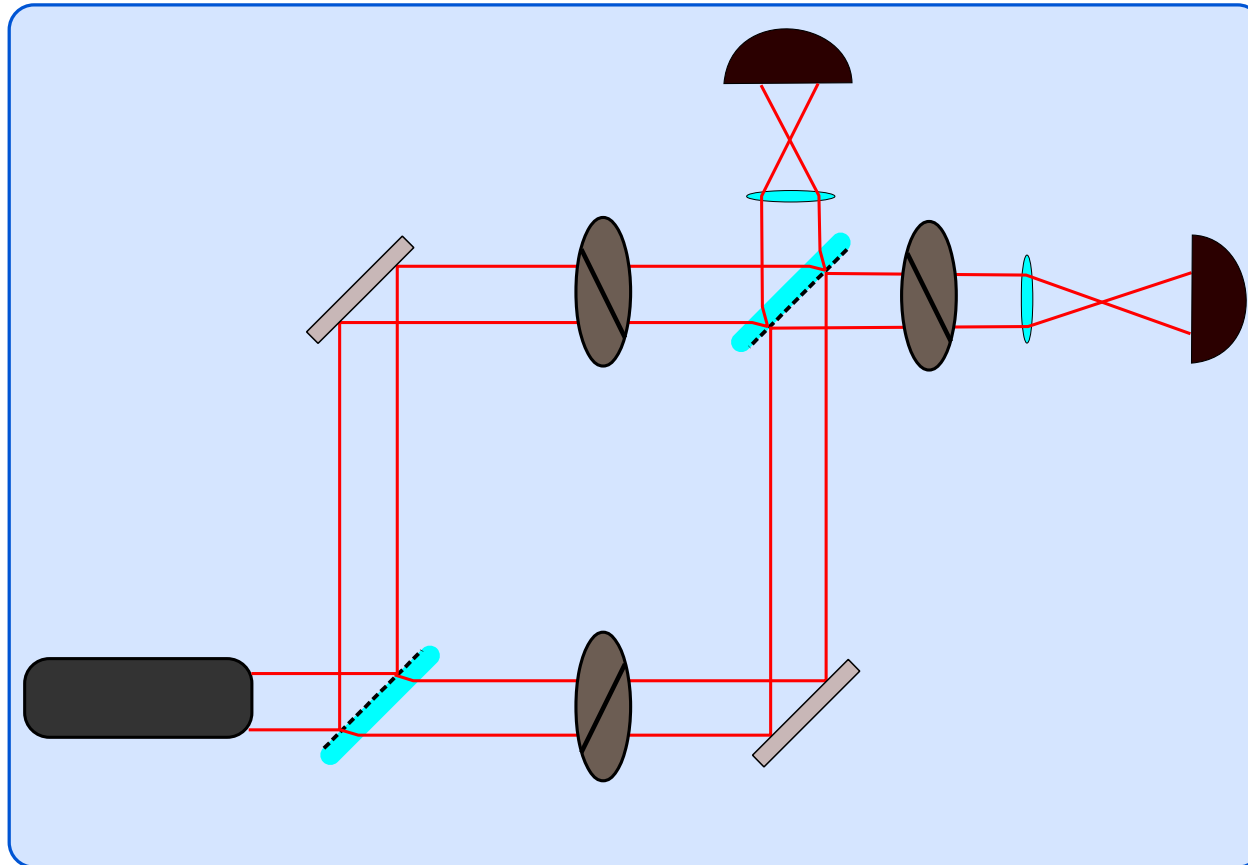
$$\underline{E}(t) = E_0 \begin{pmatrix} \sin \alpha \\ \cos \alpha \end{pmatrix} \cos(kx - \omega t)$$

Útvonal megjelölése



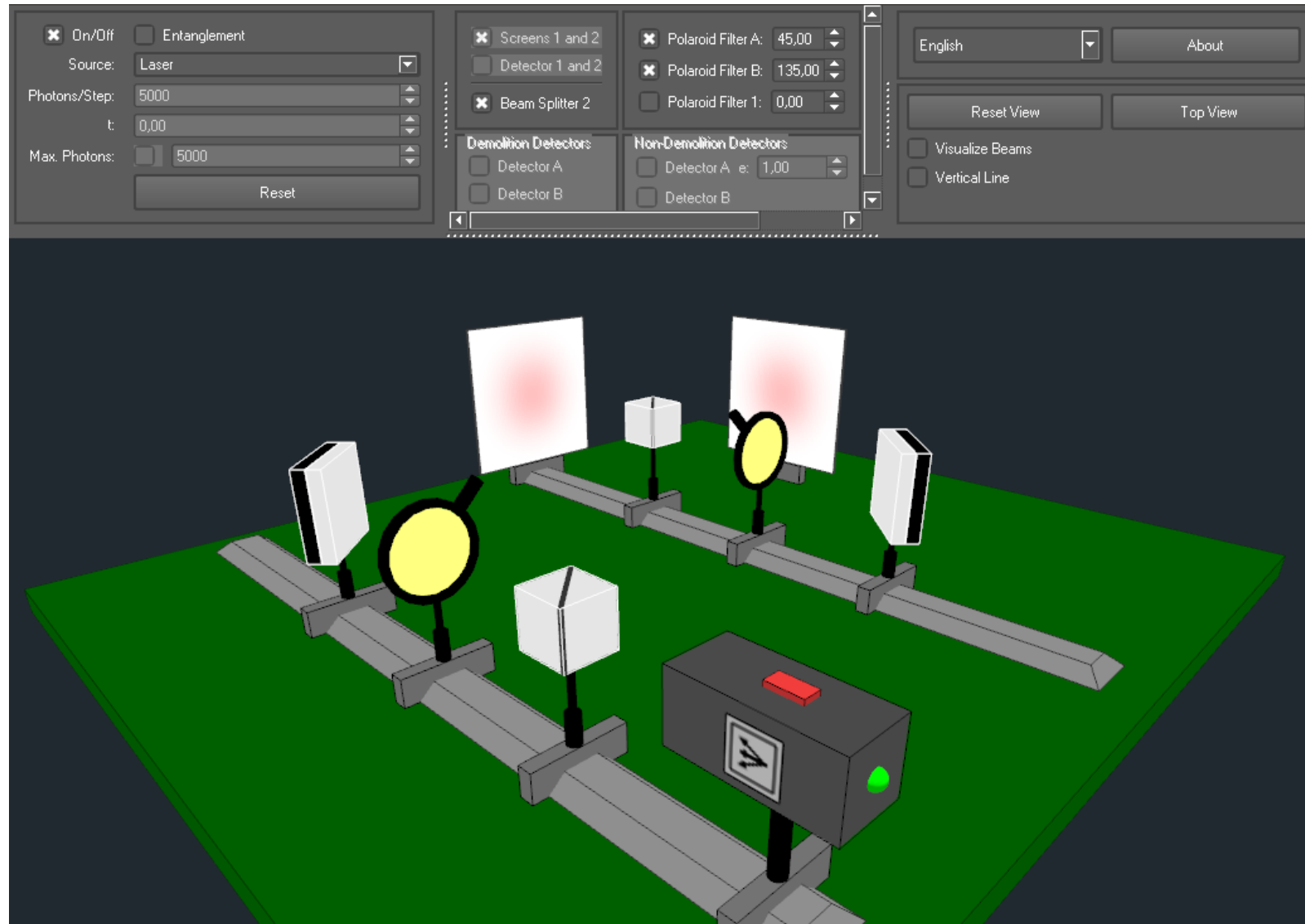
$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{2}(-1 + 1) = 0$$

Útvonal kiolvasása

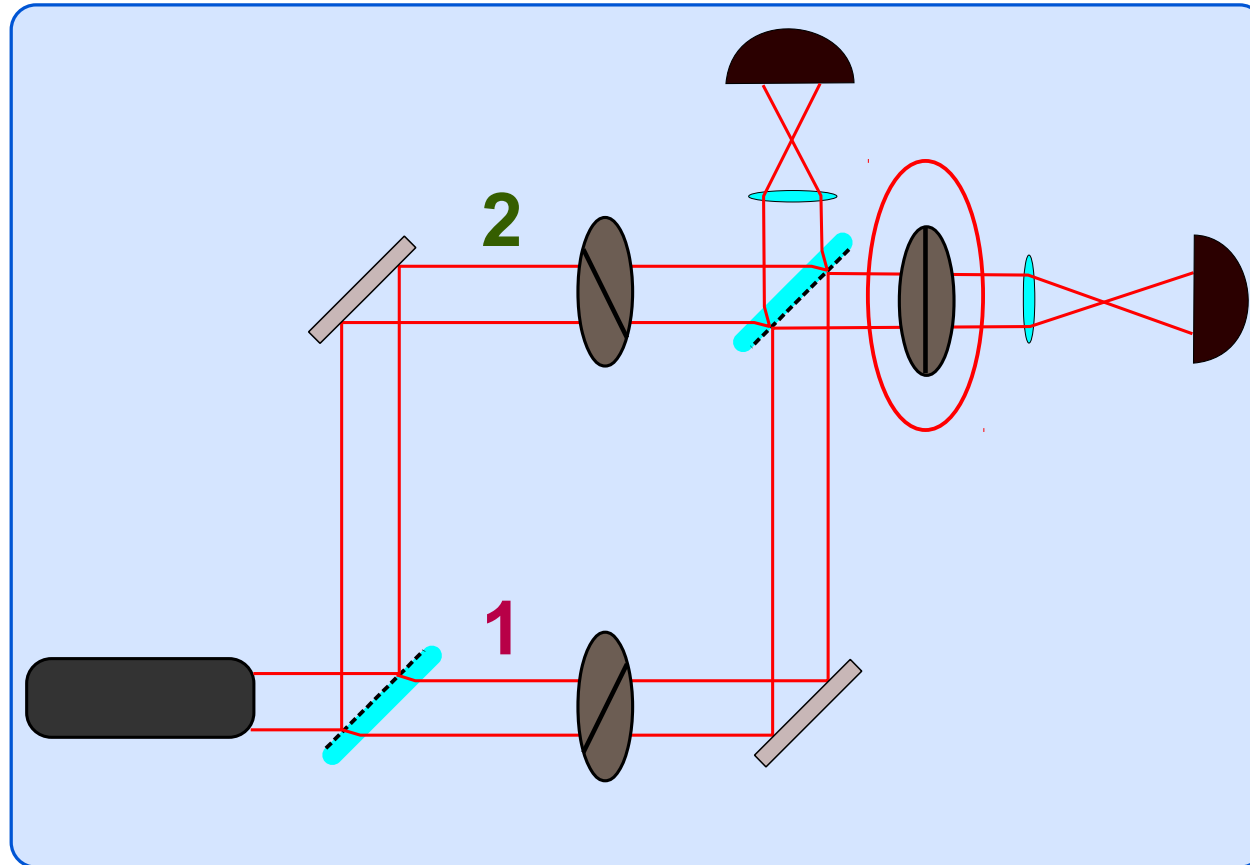


Interferencia eltűnik, akár kiolvassuk az útvonalat, akár nem!

Szimulátor II.



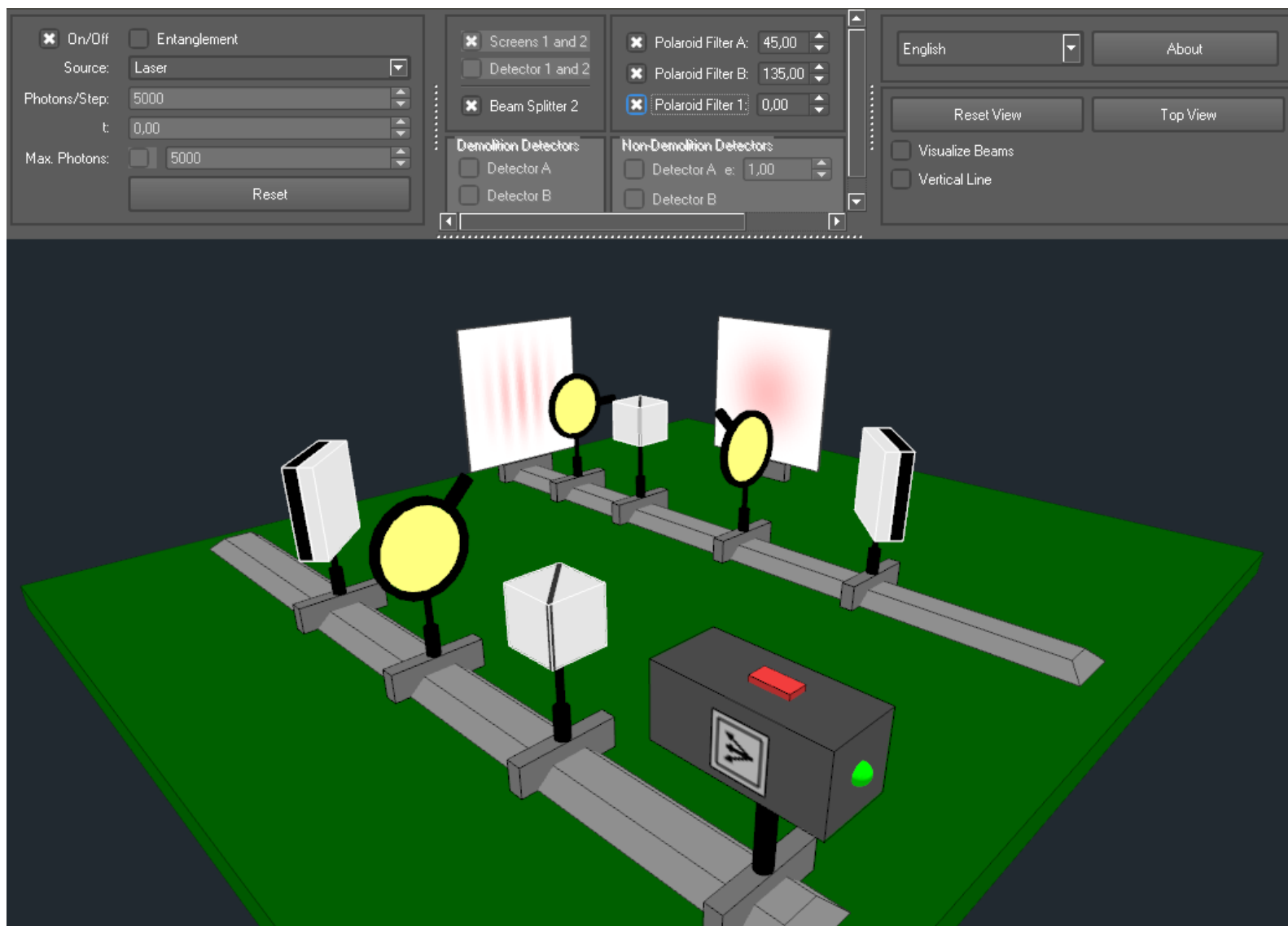
3. Polárszűrő (kvantumradír)



$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Szimulátor III.



Végére egy kis kvantummechanika

- Intenzitás csökkentésével, fény adagokban (1905 Einstein – fényelektromos jelenség, Nobel-díj)
- Foton, interferenciamintázat lesz :)
- Hullámfüggvények

$$E_1 \rightarrow \Psi_1$$

- Megtalálási valószínűség (pl. az ernyőn):

$$P_1 = |\Psi_1|^2$$

Analógia

- Hullámoptika

$$I_{12} = I_1 + I_2 + 2\underline{E}_1\underline{E}_2 \cos \delta$$

- Interferencia a keresztmetszetben
- Merőlegesen polarizált (ortogonális), IF eltűnik
- 3. polárszűrő helyreállítja

- Kvantummechanika

$$P_{12} = P_1 + P_2 + 2 \langle \Psi_1 \Psi_2 \rangle$$

- Interferencia a keresztmetszetben
- Ha ortogonálisak a hullámfüggvények, IF eltűnik
- Kvantumradír helyreállítja

Nagy levegő

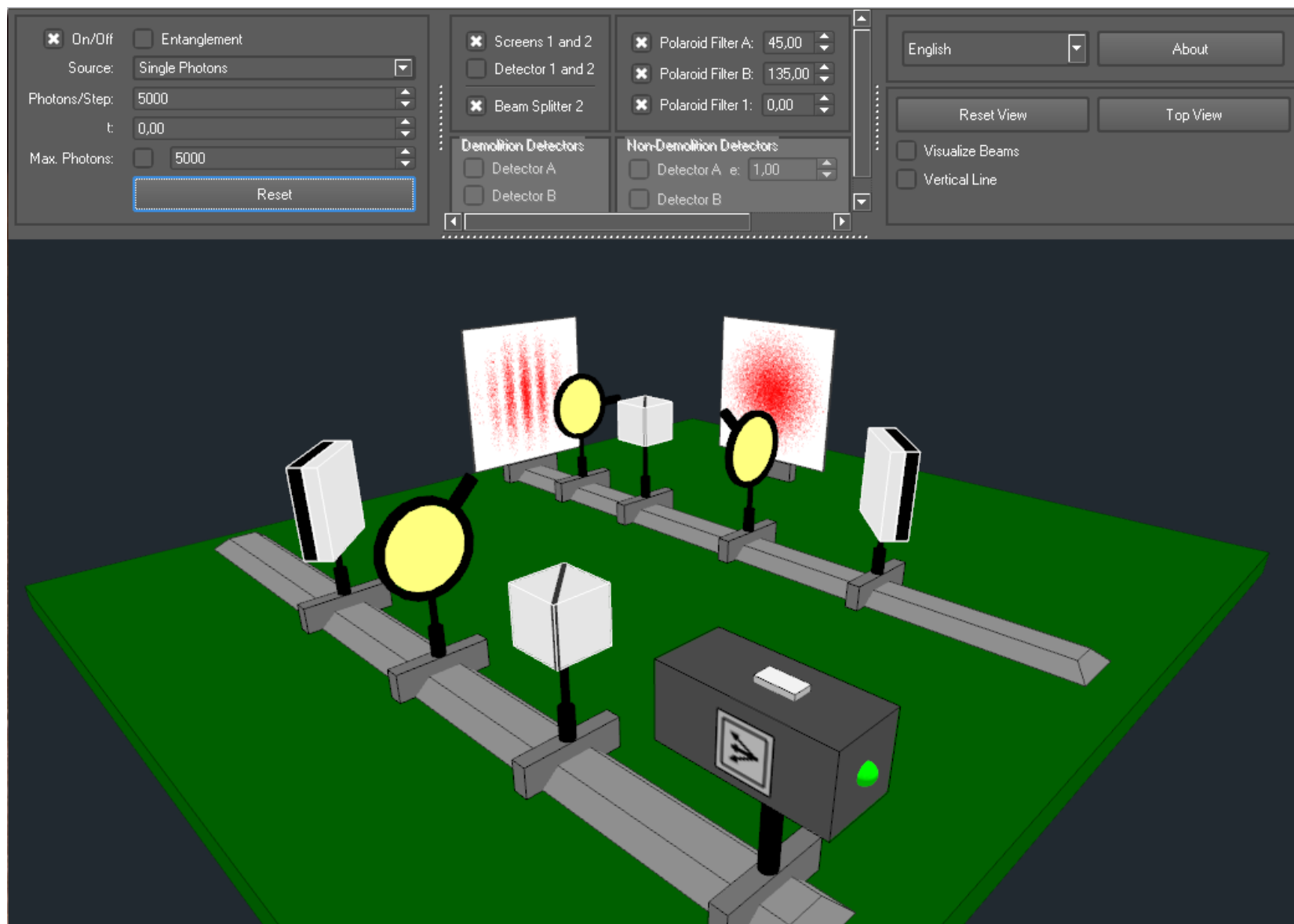
- Útvonaljelölő – operátor
- Különböző sajátértékekhez ortogonális sajátállapotok (hullámfüggvények)

$$\langle \Psi_1 \Psi_2 \rangle = 0$$

- Kvantumradír – operátor

$$\Psi_1, \Psi_2 \rightarrow \Psi'_1, \Psi'_2 \quad \langle \Psi'_1 \Psi'_2 \rangle \neq 0$$

Szimulátor IV.



Összefoglalás

- Részecske-hullám kettőstermészet.
- Interferencia a keresztmetszetben.
- Interferencia elvesztése, időnként helyreállítható, ezt nevezzük kvantumradírnak.
- Mikroszkopikus világ másképpen működik, mint a makroszkopikus.
- *Gyertek fizikusnak!*
- *Olvassatok sokat, tanuljatok angolul!*

Kísérleti bemutató

- Ha sikerül beállítani, akkor megleshető.
- Ha nem sikerül, akkor majd a Modern Fizika Labormérés során beállítjátok magatok!