



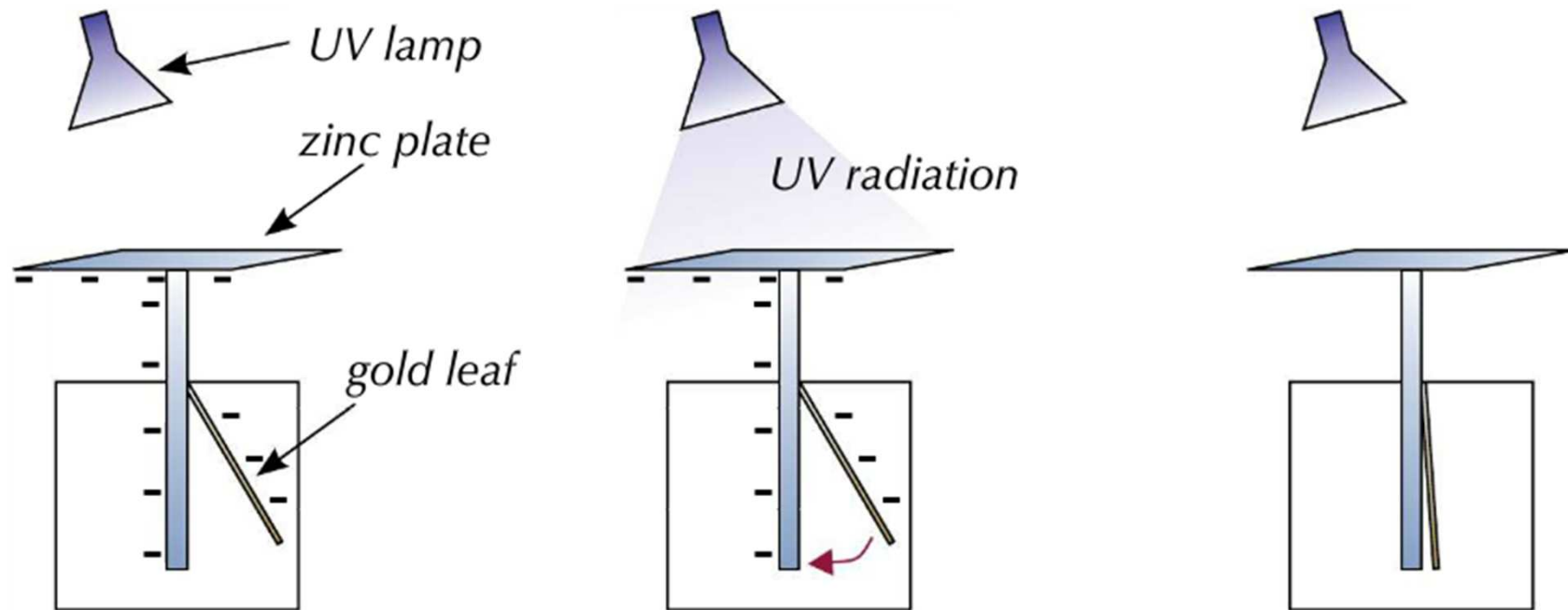
Modern fizika vegyészmérnököknek

3. óra: A fény kvantumos elmélete: fényelektromos jelenség

Budapest, 2023. szeptember 20.

A fotonok első kísérleti bizonyítéka a fényelektromos jelenség

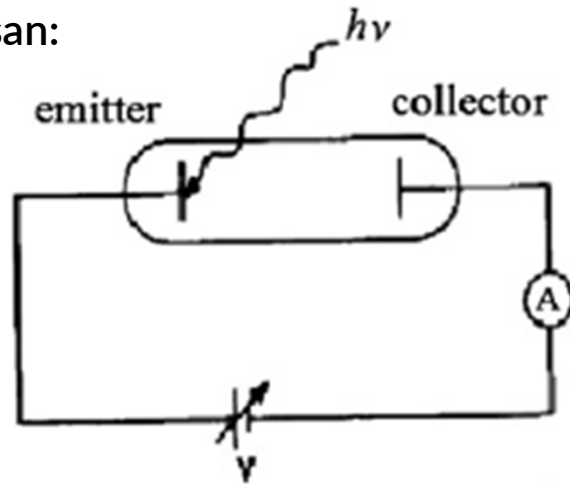
<https://www.youtube.com/watch?v=v-1zjdUTu0o>



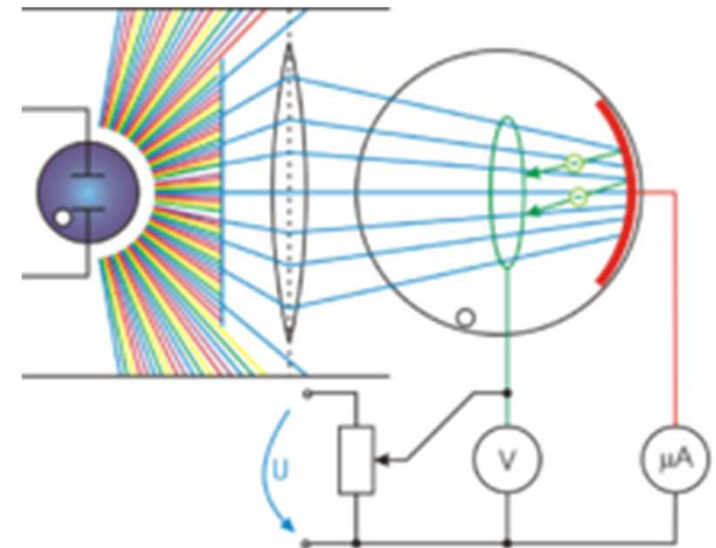
Látható fényre nem játszódik le a jelenség, még nagy intenzitás esetén sem. Miért a fény frekvenciája számít, nem az intenzitása?

1900: Lénárd Fülöp részletesen vizsgálta kísérletileg a fényelektromos jelenséget

vázlatosan:

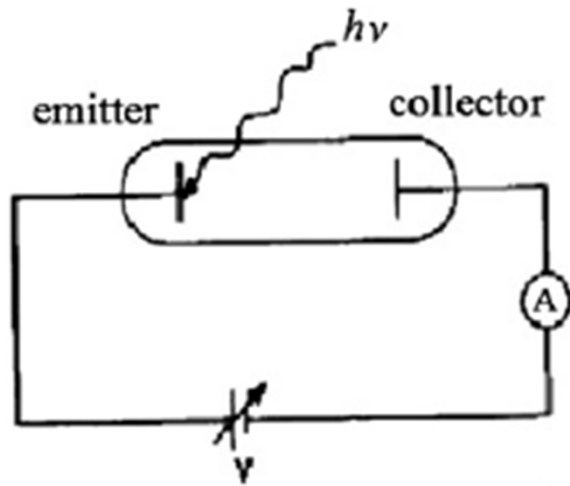


realisztikusabban:

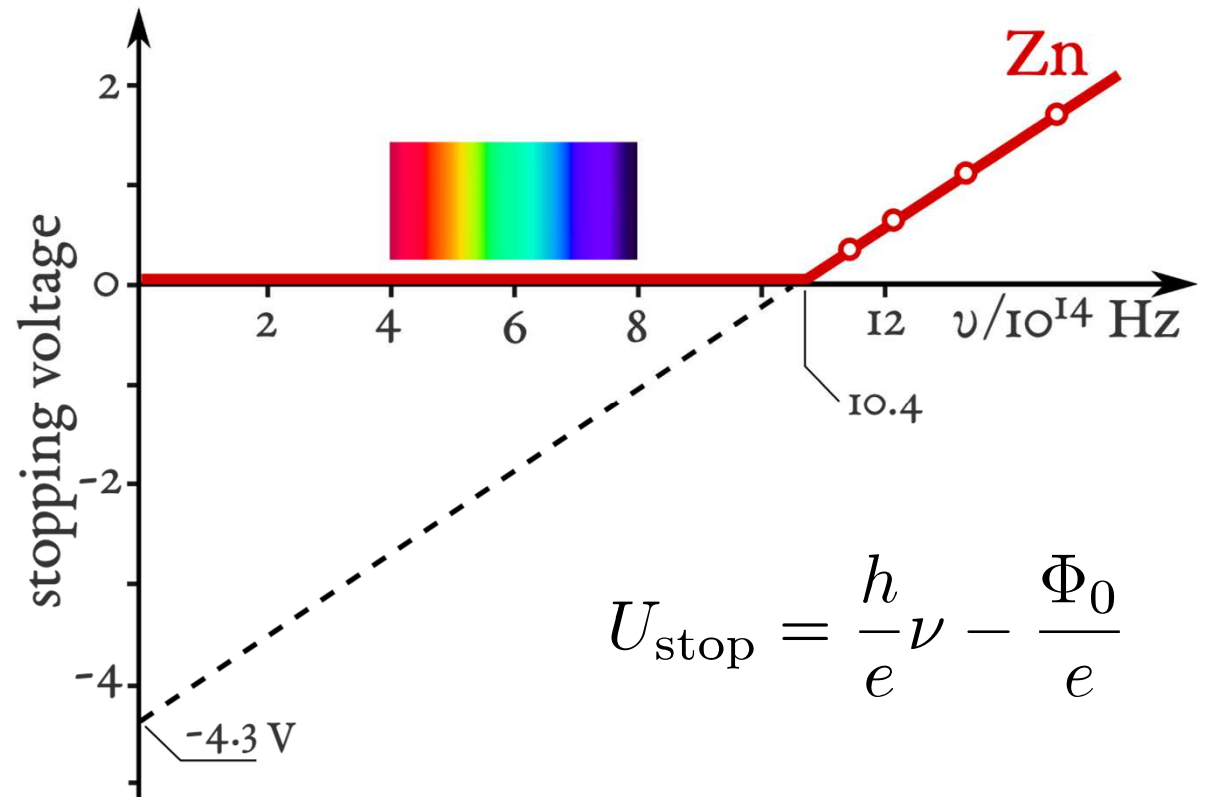


- 1) Ha a megvilágító fény *frekvenciája elég nagy*, elektronok lépnek ki a fémlapból
- 2) Elektronok száma (áram) arányosan nő a fény *intenzitásával*
- 3) Elektronok *energiája* (lassító V ellenére is elérnek a katódig) *nem függ a fény intenzitásától*
- 4) Elektronok *energiája* nő, ha a fény *frekvenciája* nő

Az áram leállításához szükséges potenciál lineárisan függ a fény frekvenciájától



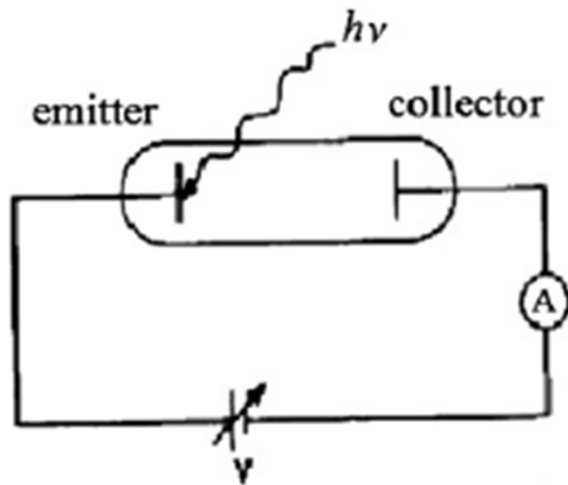
stopping voltage = “Ellentér” potenciál V értéke,
amikor nincsenek kilépő elektronok



$$U_{\text{stop}} = \frac{h}{e} \nu - \frac{\Phi_0}{e}$$

4) Elektronok *energiája* nő, ha a fény *frekvenciája* nő

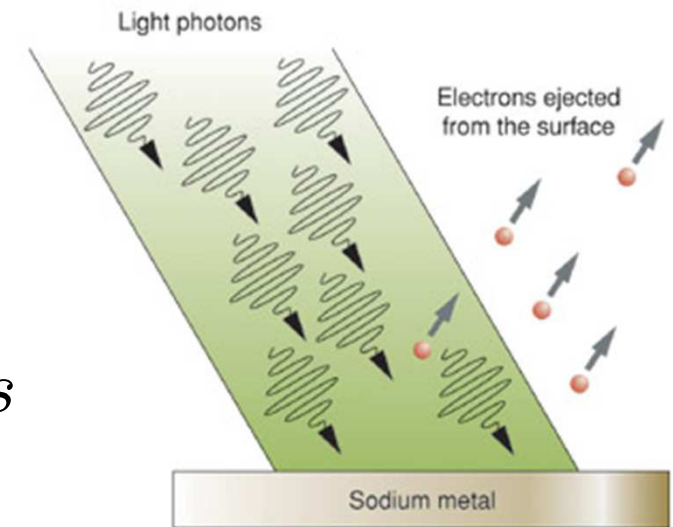
Einstein (1905): a fényelektromos jelenség oka, hogy a fény energiája diszkrét $h\nu$ “csomagokban” van → fotonok



$$E_{\text{phot}} = h\nu$$

$$h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

Planck-állandó

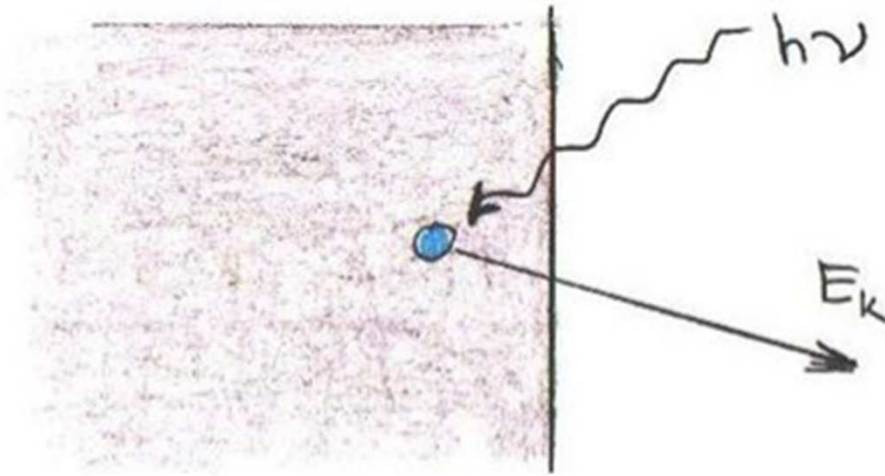


$$E_{\text{phot}} = h\nu > \Phi_0 \quad \text{kilépési munka}$$

1 elnyelt foton → 1 kilépő elektron

$$E_{\text{el, max}} = \frac{1}{2} m_{\text{el}} v_{\text{max}}^2 = h\nu - \Phi_0$$

A fényelektromos jelenség Einstein-féle magyarázata energiaszint-ábrán



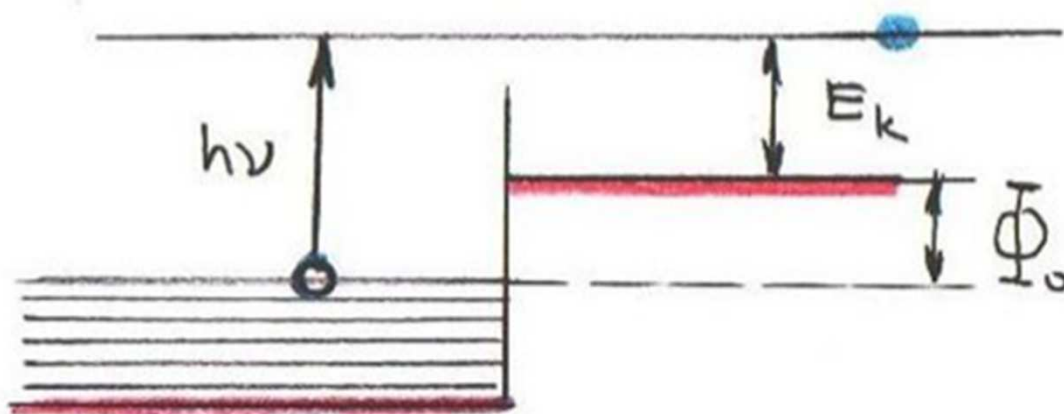
$$E_{\text{phot}} = h\nu$$

$$h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

elektron kilép, ha:

$$E_{\text{phot}} = h\nu > \Phi_0$$

Maradék energia az elektron kinetikus energiája lesz:

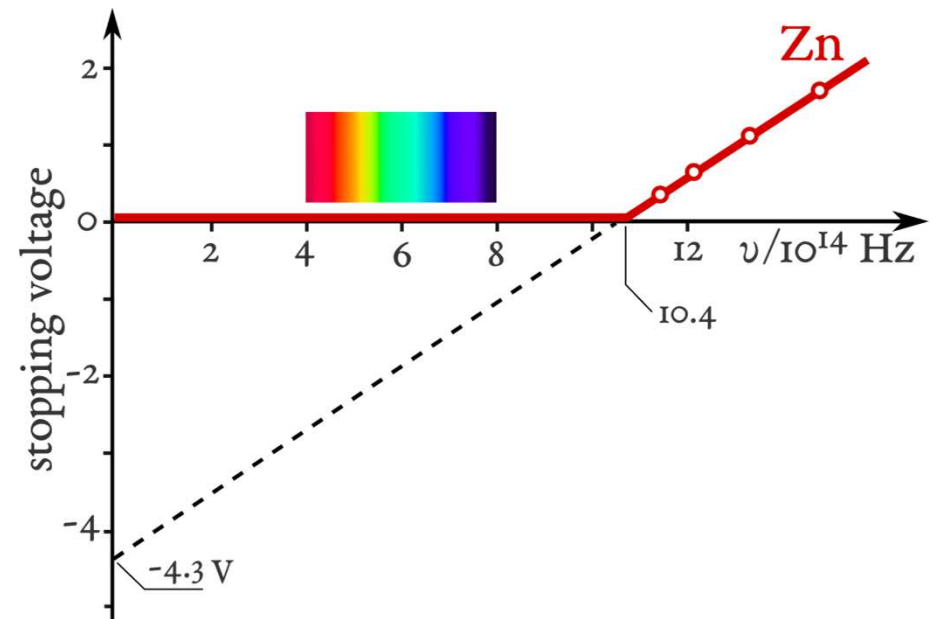
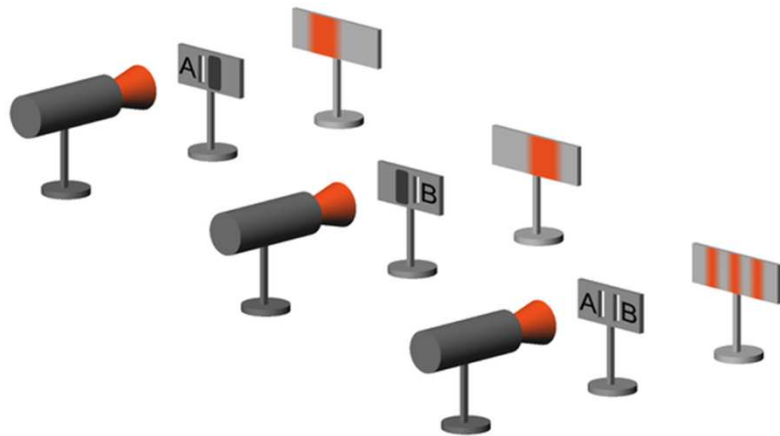


$$E_{\text{el, max}} = \frac{1}{2} m_{\text{el}} v_{\text{max}}^2 = h\nu - \Phi_0$$

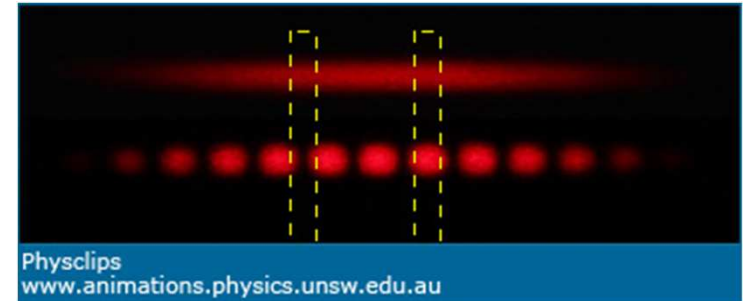
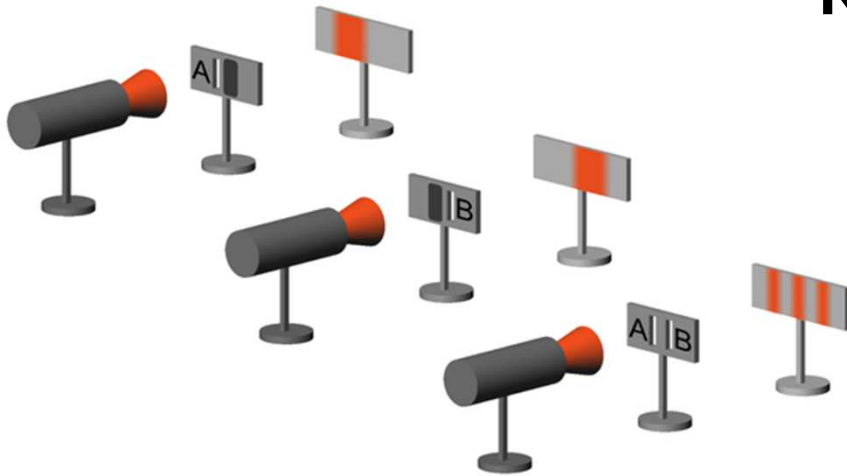
A fény hullám : kétréskísérlet

A fény részecske : fotoeffektus

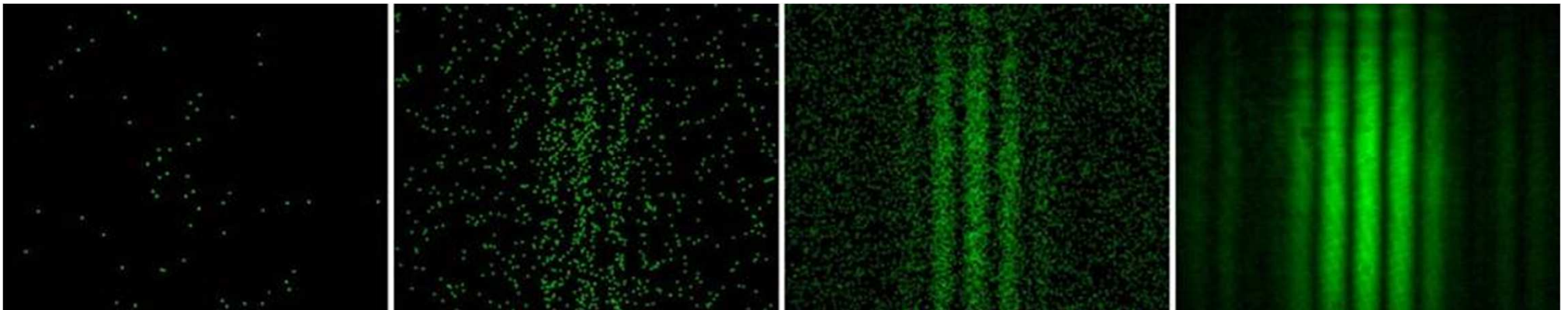
???



Ha olyan gyenge a fényforrás, hogy egyesével lépnek ki a fotonok, akkor is működik a kétrés kísérlet



A fényforrást gyengítve, a fotonok egyesével érkeznek meg a vászonra (CCD kamerára). Minden egyes foton átment vagy a bal, vagy a jobb részen. Akkor miért vannak sötét csíkok?



A “két rés” lehet teljesen különböző irány is.

Hallgatói labormérés

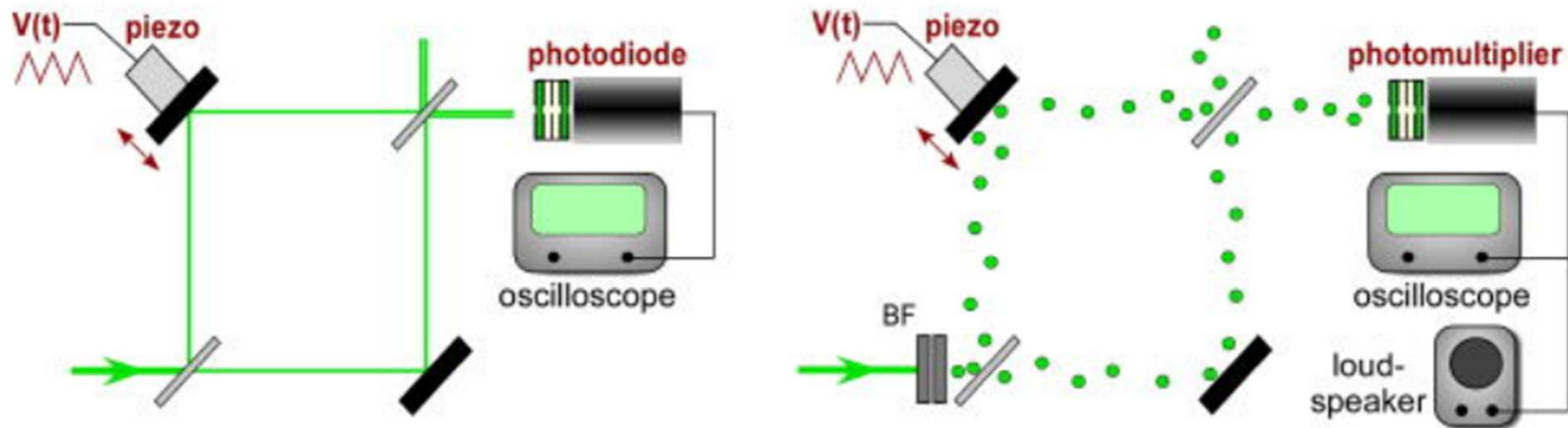


Figure 2. Mach-Zehnder interferometer operated with strong light (left) and with individual photons (right). BF: attenuating filters. A 5 mW green laser is used as primary light source.

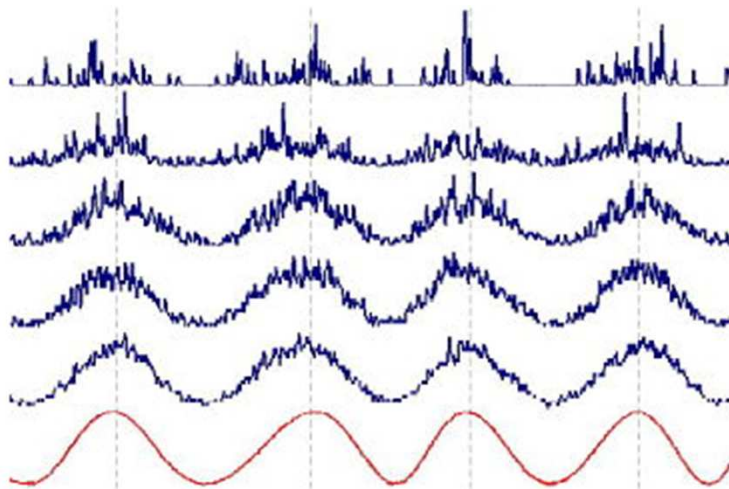


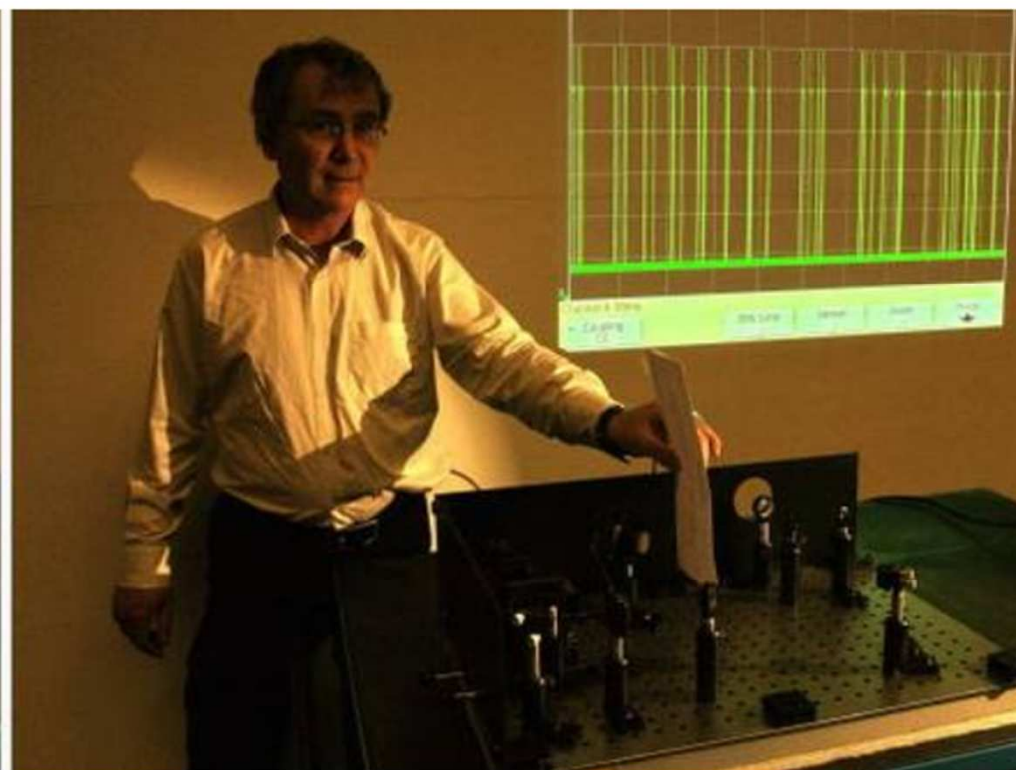
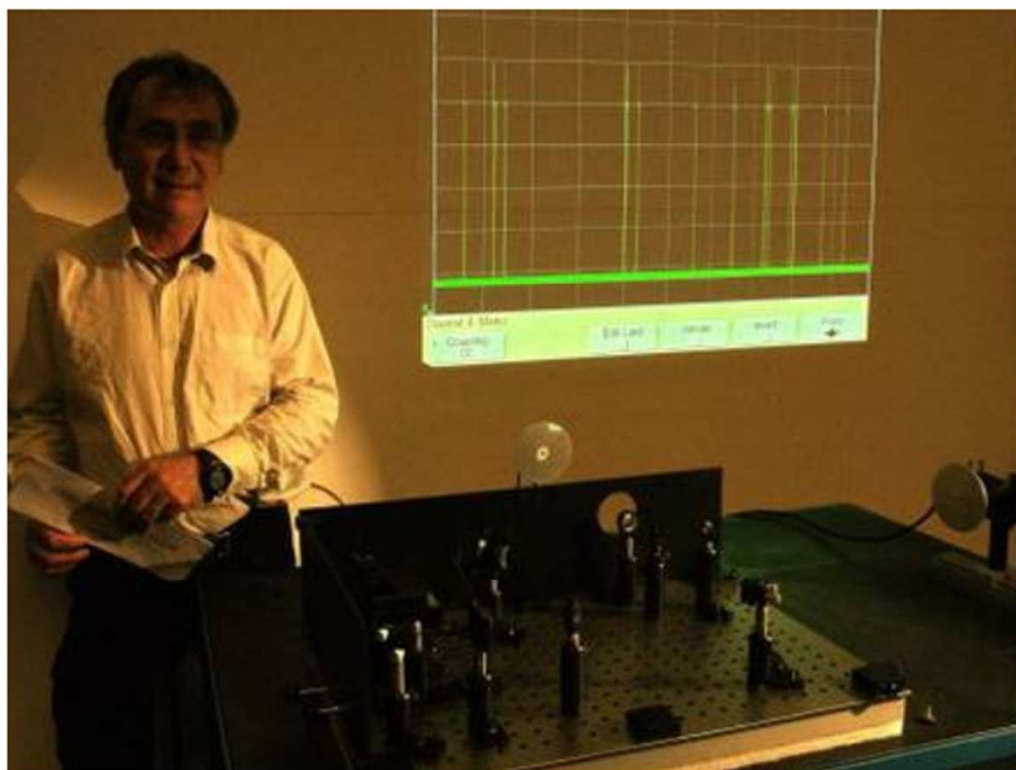
Figure 3. Digital oscilloscope traces of PM pulses produced by single photons (blue) from the MZI in scanning mode. The top trace is a single trace, and below are averages of 4, 16, 64, and 128 traces, respectively. As more and more traces are accumulated, the particle aspect reduces to shot noise on a classical interference pattern. Bottom trace (red): classical interference fringes from strong light recorded by a photodiode.

[A. Weis¹](#) and [T. L. Dimitrova^{1,2}](#)

¹ Physics Department, University of Fribourg, Fribourg, Switzerland

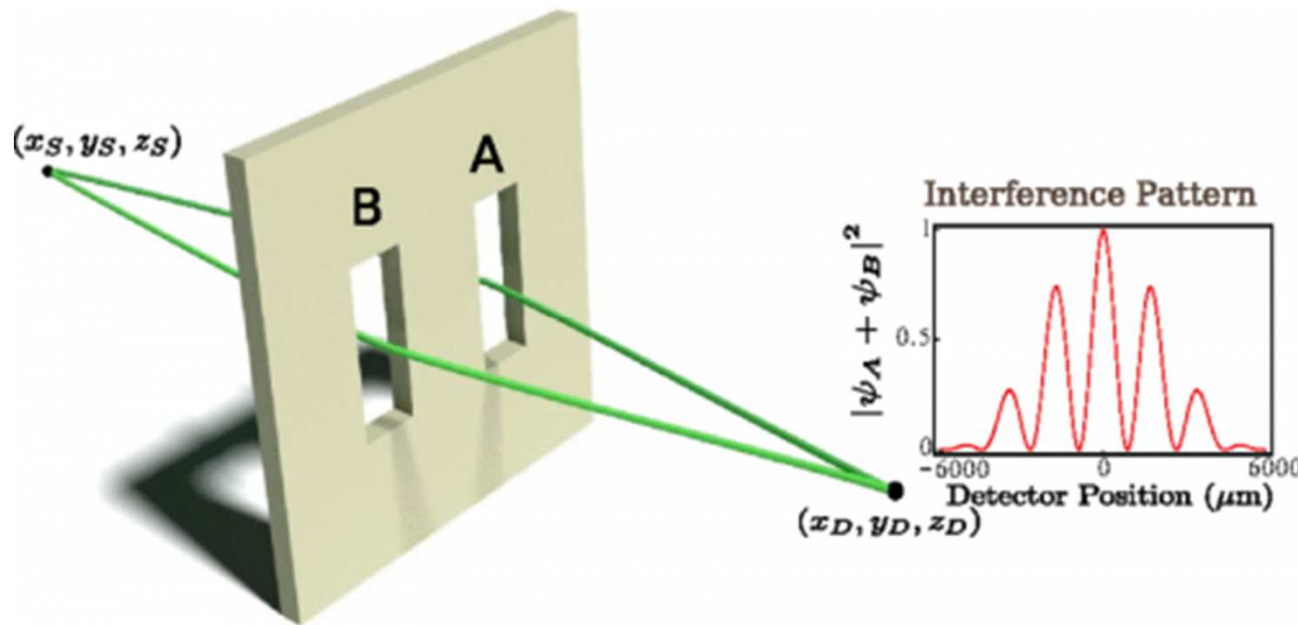
² University of Plovdiv "Paissi Hilendarski", Plovdiv, Bulgaria

A kétréskísérlet demonstrációja: az egyik utat papírral lefedve, a fotonok száma nő

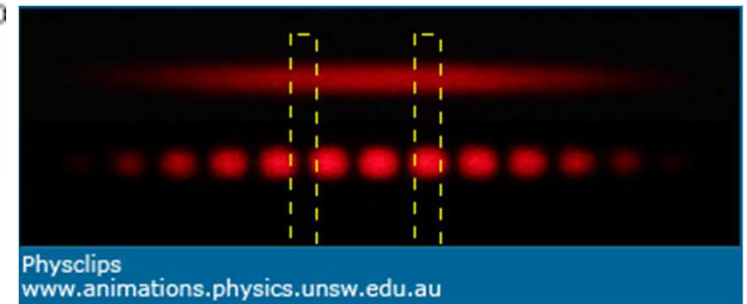


Demonstration that each photon interferes with itself. Left: a small background photon rate is observed when the photons have a choice of two paths. The photon's wall projection of an oscilloscope trace. Right: the photon count rate increases when one path is blocked, thereby forcing the photons to follow a specific path.

Sötét csíkok (csökkenő beütés) csak úgy lehet, ha a fotonok “egyszerre több helyen”, szuperpozícióban tudnak lenni



Úgy tűnik, a foton
“saját magával interferál”,
azaz
“egyszerre halad át mindkét résen”



Interferenciacsíkok:

Bármelyik rést letakarom, eltűnnek

Ha detektálom, melyik résen ment át a foton, eltűnnek

Ha detektálom, melyik résen ment át, de utána törlöm az információt, megjelennek (kvantumradír)

Az osztrák-magyar Nobel-díjas Lénárd Fülöp haláláig nem fogadta el a kvantumfizikát

(Pozsony, 1862 – Messelhausen, 1947)

1. borkémia Bécsben, Kémia Budapesten

2. Matematika Heidelbergben, Berlinben

- 1886: Doktorija: “Hulló cseppek rezgései”

- 1892: Habilitációja: “Vízesekek elektromos jelenségei”

- 1900: fényelektromos jelenség kísérleti vizsgálata

- 1905: Nobel-díj a katódsugárzás vizsgálatáért

- 1907-32: Heidelbergi Fizikai Intézet vezetője

- 1. vh után: Relativitás- és kvantumelméleteket elutasítja,
“valóságtól elrugaszkodottak”, “zsidó hazugságok”

- 1923-tól Adolf Hitlerrel levelezik, belép az NSDAP-ba

- megalapítja a “klasszikus fizika szilárd talaján álló” “Német fizika” csoportot



„Deutsche Physik?“ wird man fragen. Ich hätte auch arische Physik oder Physik der nordisch gearteten Menschen sagen können, Physik der Wirklichkeits-Ergründer, der Wahrheits-Suchenden, Physik derjenigen, die Naturforschung begründet haben. [...] In Wirklichkeit ist die Wissenschaft, wie alles was Menschen hervorbringen, rassisch, blutmäßig bedingt.

Kérdés (~ZH)

A 2W-os UV lézerből a 2W-os vörös lézerhez képest mp-ercenként több vagy kevesebb foton lép ki?

- A) több
- B) ugyanannyi
- C) kevesebb
- D) nem tudjuk: nem csak a fotonok hullámhosszán, hanem a frekvenciájukon is múlik

Kérdés (~ZH)

Melyik lézerből lép ki mp-enként a legtöbb foton?

A) $P = 1 \text{ W}$, $\lambda = 1064 \text{ nm}$

B) $P = 2 \text{ W}$, $\lambda = 1064 \text{ nm}$

C) $P = 1 \text{ W}$, $\lambda = 695 \text{ nm}$

D) $P = 2 \text{ W}$, $\lambda = 695 \text{ nm}$

Fényelektromos hatás árama

Fényelektromos hatással kísérletezem. Ha adott hullámhosszú fényforrás intenzitását megkétszerezem, a fotonok mp-ercenkénti száma is kétszeresére nő.

Ezért a fémlapból kilépő elektronok száma, a fotoáram...

- A) mindenképp nő
- B) nem változik
- C) mindenképp csökken
- D) nő vagy nem változik, attól függ, mi a fotokatód anyaga

Kérdés (~ZH)

“A kétréskísérletben a foton két részre válik szét: fél foton az egyik résen, fél foton a másik részen megy át. Utána a két fél foton ütközik egymással, ez magyarázza a fekete csíkokat az ernyőn.”

- A) Igen, pont így
- B) Nem, mert nincs “fél foton”, a fényelektromos hatás mérések miatt
- C) Igen, és az energiamegmaradás miatt a fél fotonok hullámhossza feleakkora
- D) Igen, de csak, ha a fény hullámhossza nagyobb, mint a rések távolsága

Számolós kérdés (ZH)

2.3 W-os lézerből másodpercenként 14.4 mikromol foton lép ki.

Hány nm a lézer hullámhossza?

Számolás kérdés (ZH)

2.3 W-os lézerből másodpercenként 14.4 mikromol foton lép ki.

Hány nm a lézer hullámhossza?

$$\frac{\Delta N_{ph}}{\Delta t} = 14.4 \frac{\mu\text{mol}}{s} = 14.4 \times 6.022 \times 10^{23} \times 10^{-6} \frac{1}{s} = 8.6717 \times 10^{18} \frac{1}{s}$$

$$P = \frac{\Delta E_{ph}}{\Delta t} = \frac{\Delta N_{ph} \cdot h\nu}{\Delta t} = 2.3 \frac{J}{s}$$

$$h\nu = P / \left(\frac{\Delta N_{ph}}{\Delta t} \right) = \frac{2.3}{8.6717} 10^{-18} J = 2.6523 \times 10^{-19} J$$

$$\nu = \frac{2.6523 \times 10^{-19} J}{6.62 \times 10^{-34} J \cdot s} = 4.0065 \times 10^{14} \frac{1}{s}$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{2.998 \times 10^8 m/s}{4.0065 \times 10^{14} 1/s} = 7.4828 \times 10^{-7} m = 748.28 \text{ nm}$$