



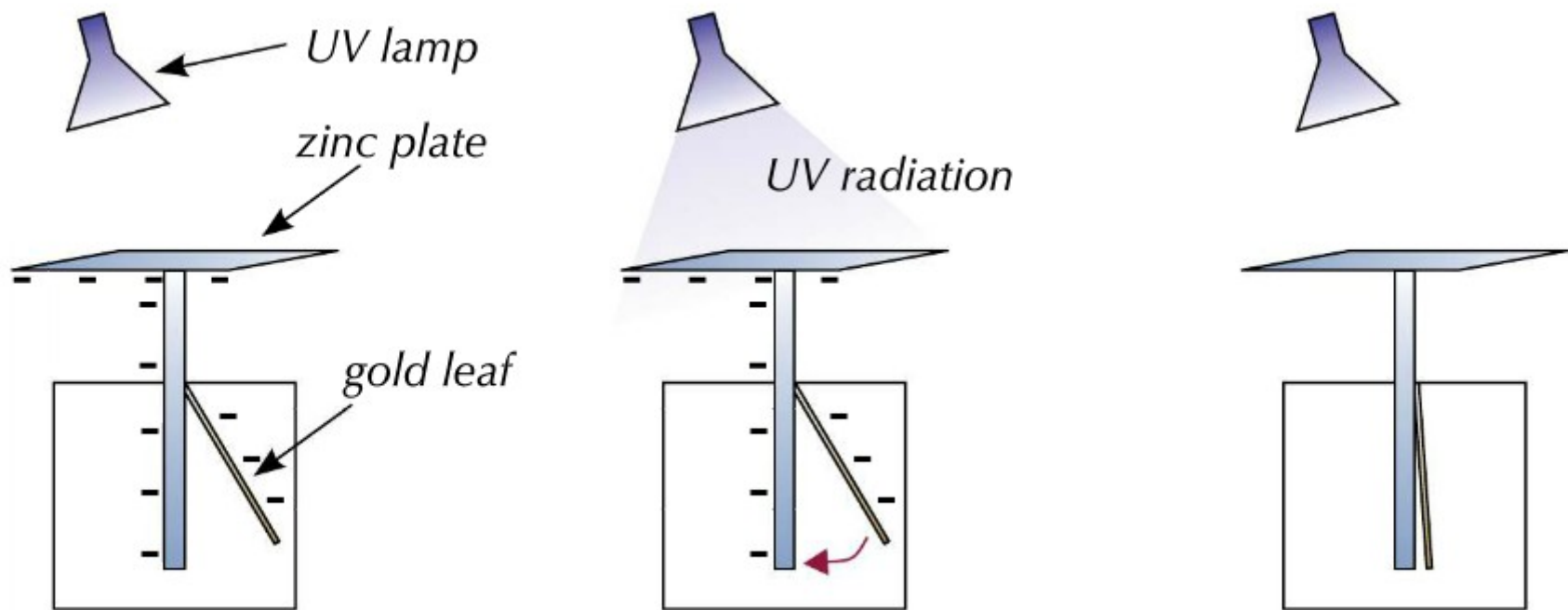
M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Modern fizika vegyészmérnököknek

3. óra: A kvantummechanika gyökerei: Fotonok, elektronhullámok

A fotonok első kísérleti bizonyítéka a fényelektromos jelenség.

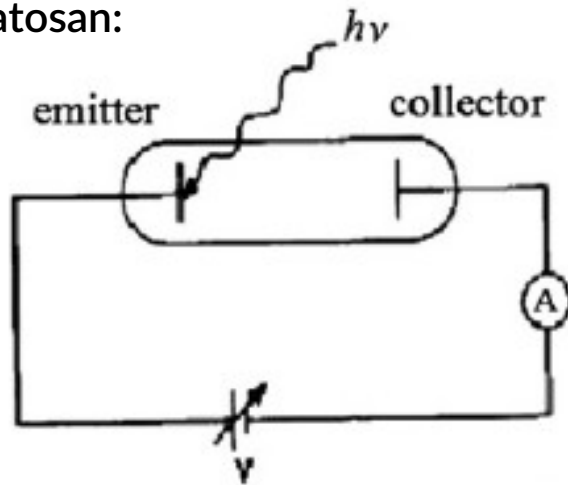
<https://www.youtube.com/watch?v=v-1zjdUTu0o>



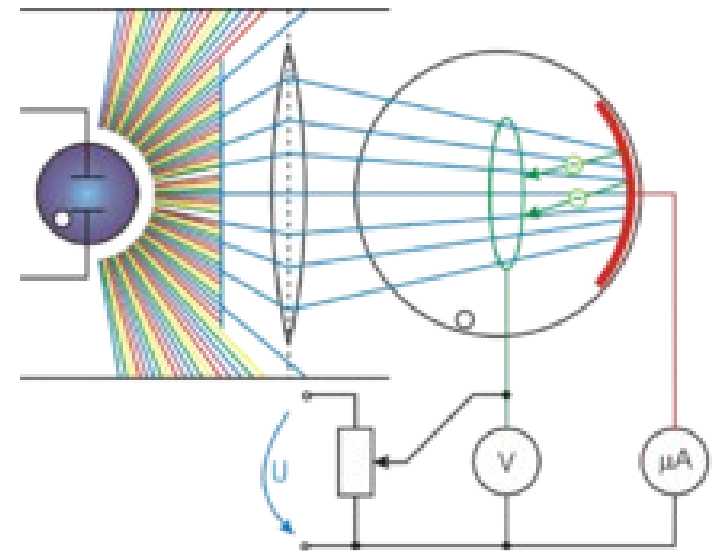
Miért a fény frekvenciája számít, nem az intenzitása?

1900: Lénárd Fülöp részletesen vizsgálta kísérletileg a fényelektromos jelenséget

vázlatosan:

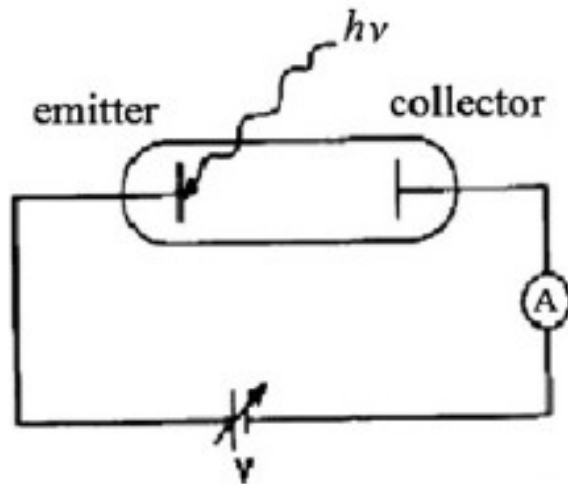


realisztikusabban:



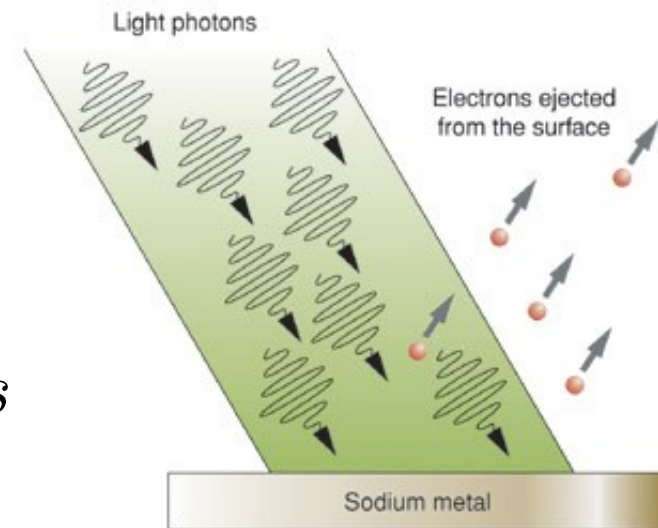
- 1) Ha a megvilágító fény *frekvenciája elég nagy*, elektronok lépnek ki a fémlapból
- 2) Elektronok száma (áram) arányosan nő a fény *intenzitásával*
- 3) Elektronok *energiája* (lassító V hatására is elérnek a katódig) *nem függ a fény intenzitásától*
- 4) Elektronok *energiája* nő, ha a fény *frekvenciája*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

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



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

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



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 hatására is elérnek a katódig) *nem függ a fény intenzitásától*

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

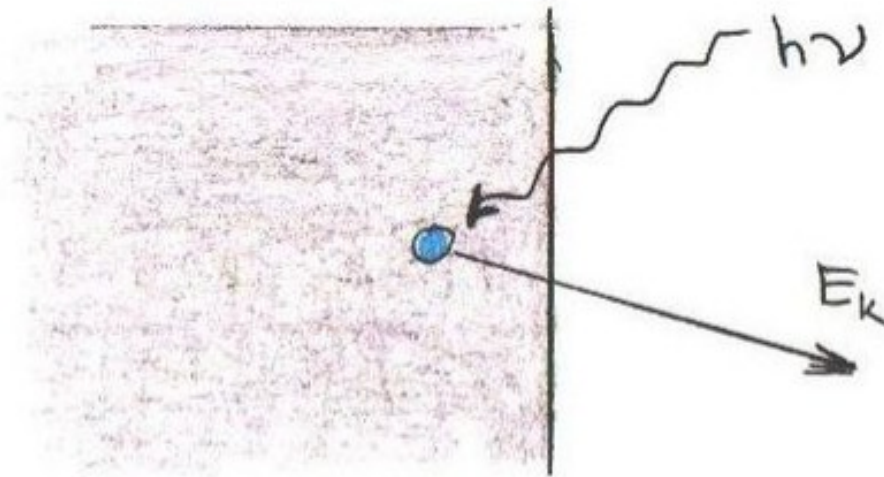
$$E_{\text{phot}} = h\nu > \Phi_0$$

kilépési munka

1 elnyelt foton
 $\rightarrow$ 1 kilépő elektron

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

A fényelektromos jelenség Einstein-féle magyarázata energiaszint-ábrán



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

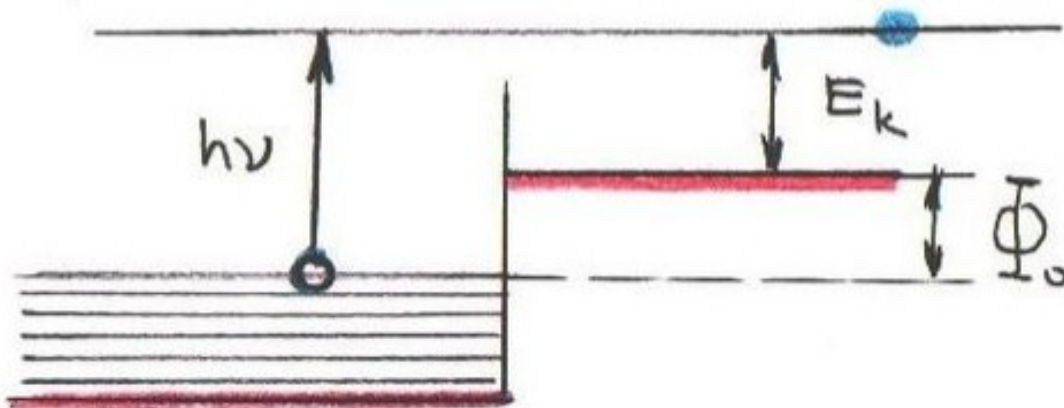
$$h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

elektron kilép, ha:

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

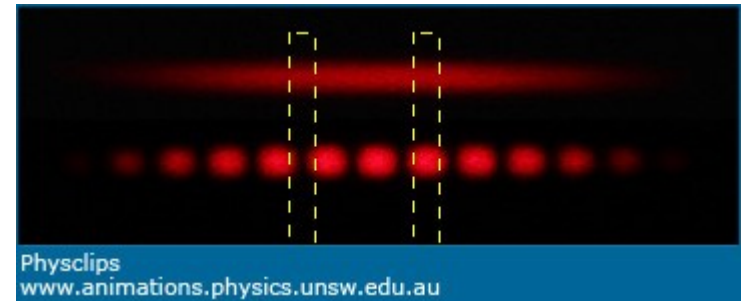
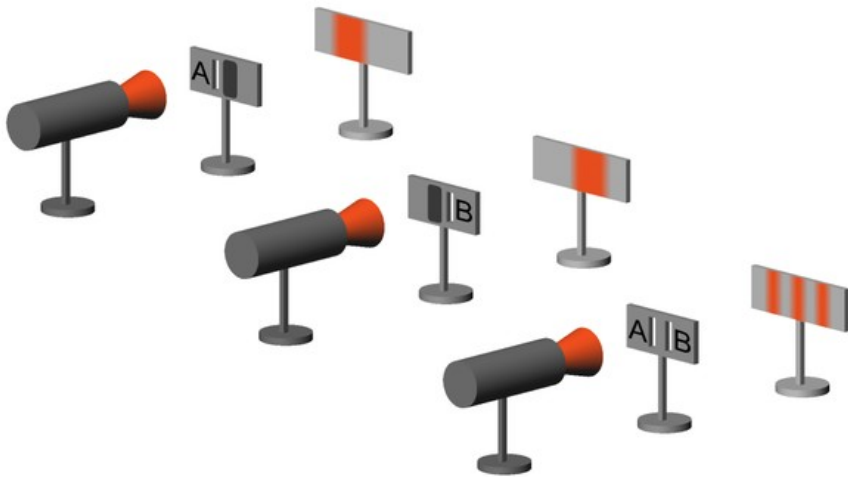
Maradék energia az elektron kinetikus energiája lesz:

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

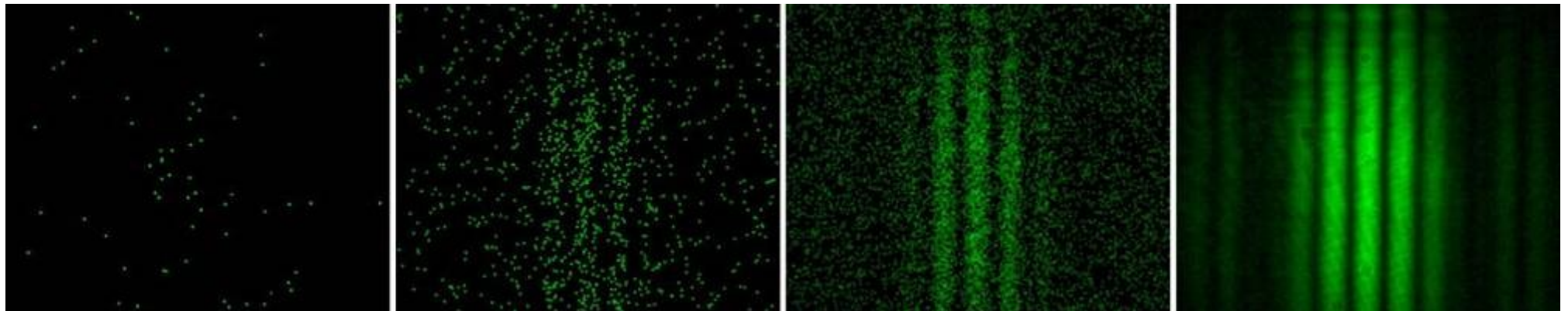


A foto-effektus Einstein-féle magyarázata

Ha a fény fotonokból áll, mi van a közismert hullámtulajdonságaival? Pl. kétréskísérlet



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



A kétréskísérletet hallgatói laboratóriumban is végzik – svájcban, de a BME-n is

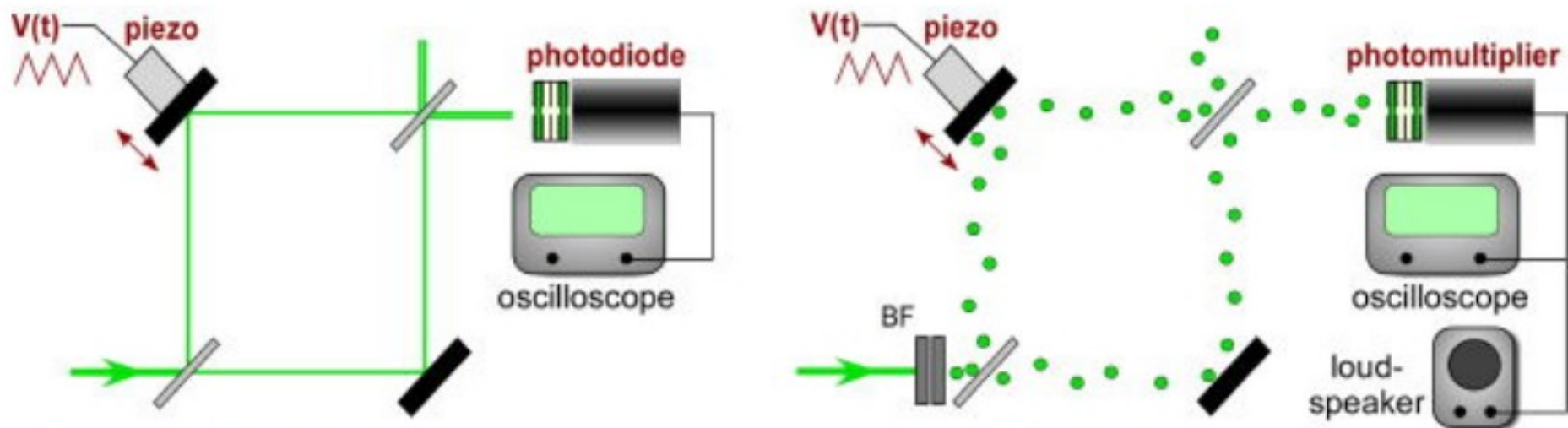


Figure 2. Mach-Zehnder interferometer operated with strong light (left) and with individual photons (right). BF: attenuating filters. A 5 mW green laser is used as primary light source.

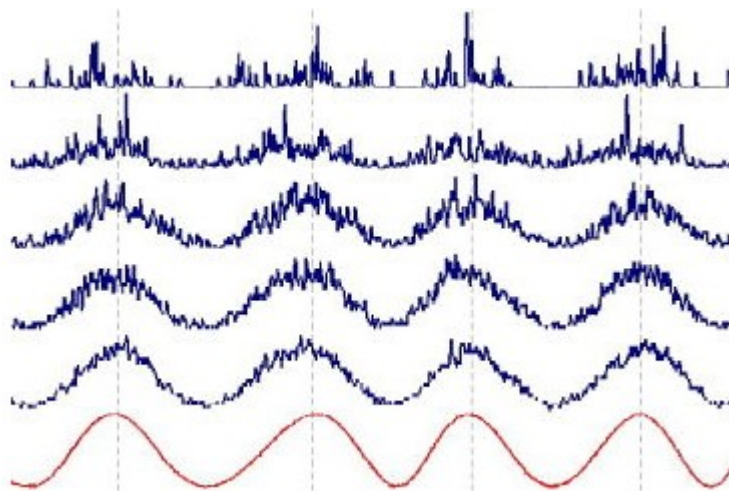


Figure 3. Digital oscilloscope traces of PM pulses produced by single photons (blue) from the MZI in scanning mode. The top trace is a single trace, and below are averages of 4, 16, 64, and 128 traces, respectively. As more and more traces are accumulated, the particle aspect reduces to shot noise on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

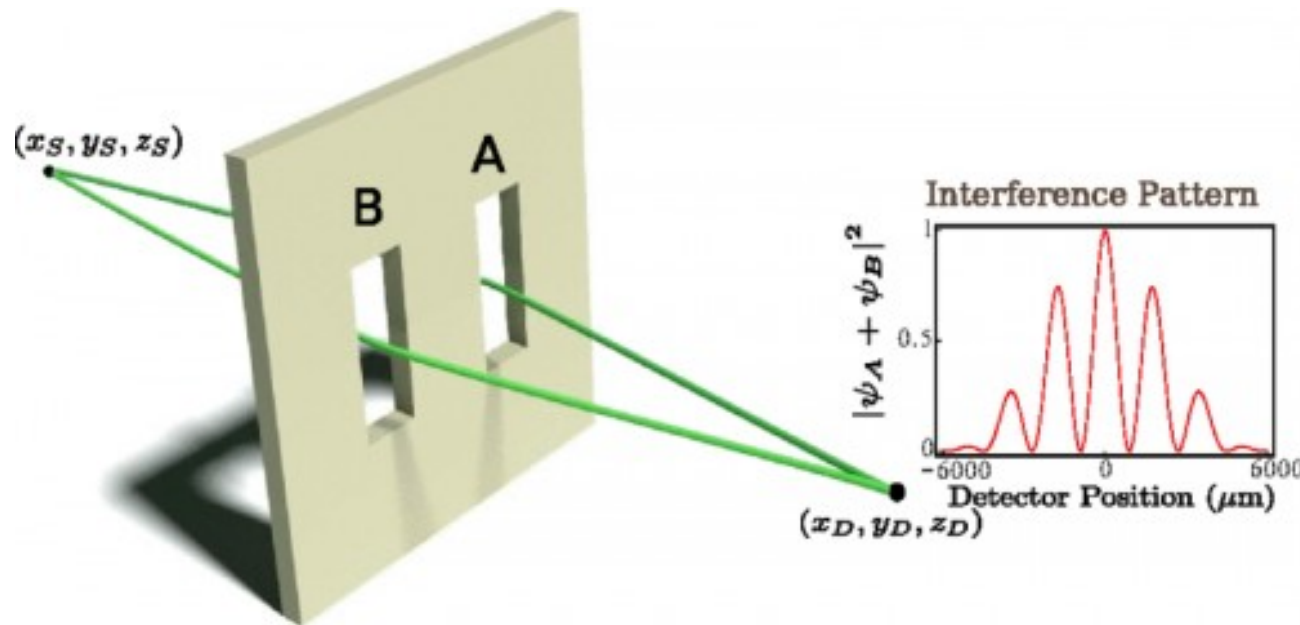
² University of Plovdiv "Paissi Hilendarski", Plovdiv, Bulgaria

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

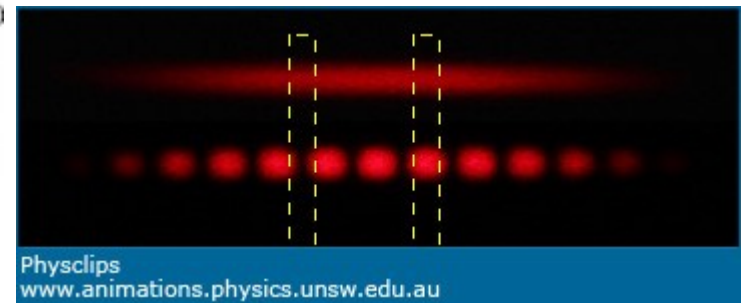


Demonstration that each photon interferes with itself. Left: a small background photon rate is observed when the photons have a choice of two paths. The photon count rate increases when one path is blocked, thereby forcing the photons to follow a specific path.

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 részt letakarom, eltűnnek

Ha detektálom, melyik résen ment át a foton, eltűnnek

Ha detektálom, melyik résen ment át, de utána
törölöm 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: “Vízeselektrikus 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, rassistisch, blutmäßig bedingt.

Intenzitás – fotonszám

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

Intenzitás – fotonszám

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 $2\times$ nő. Ezért a fémlapból kilépő elektronok száma, a fotoáram...

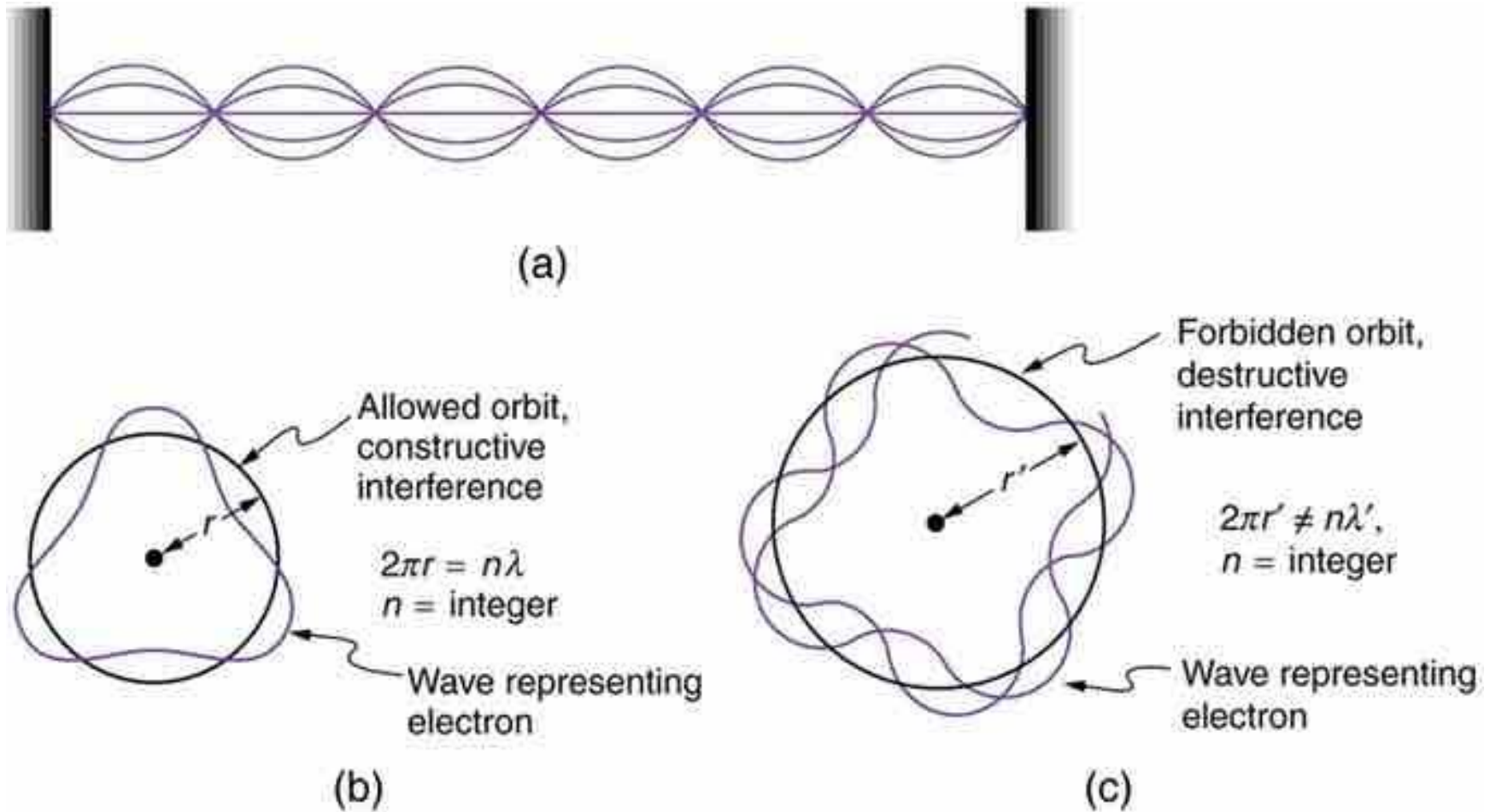
- A) mindenképp nő
- B) nem változik
- C) mindenképp csökken
- D) nő vagy nem változik, attól függ, mi a fotokatód anyaga

Kétréskísérlet értelmezésére kísérlet

“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.”

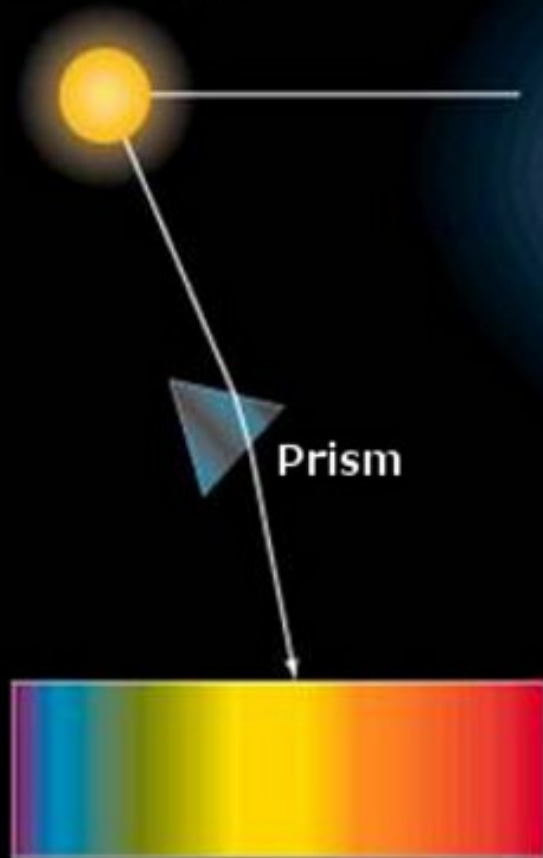
- A) Igen, pont így
- B) Nem, mert nincs “fél foton”, a fényelektromos hatásos mérések miatt
- C) Igen, és az energiamegmaradás miatt a fél fotonok hullámhossza feleakkora
- D) Igen, de csak ha a fény hullámhossza nagyobb, mint a rések távolsága

Kvantum gyökerei 2. - az atomok színeképe



Gázok emissziós és abszorpció spektrumában vonalak vannak. Miért?

Heated Element
Gives Off Light



Prism



Continuous Spectrum

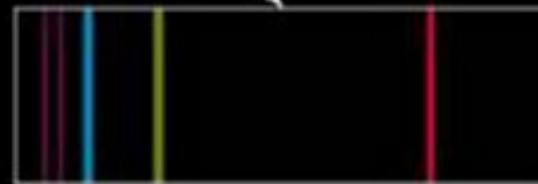
Cloud of
cooler gas

Prism



Absorption Line Spectrum

Prism



Emission Spectrum

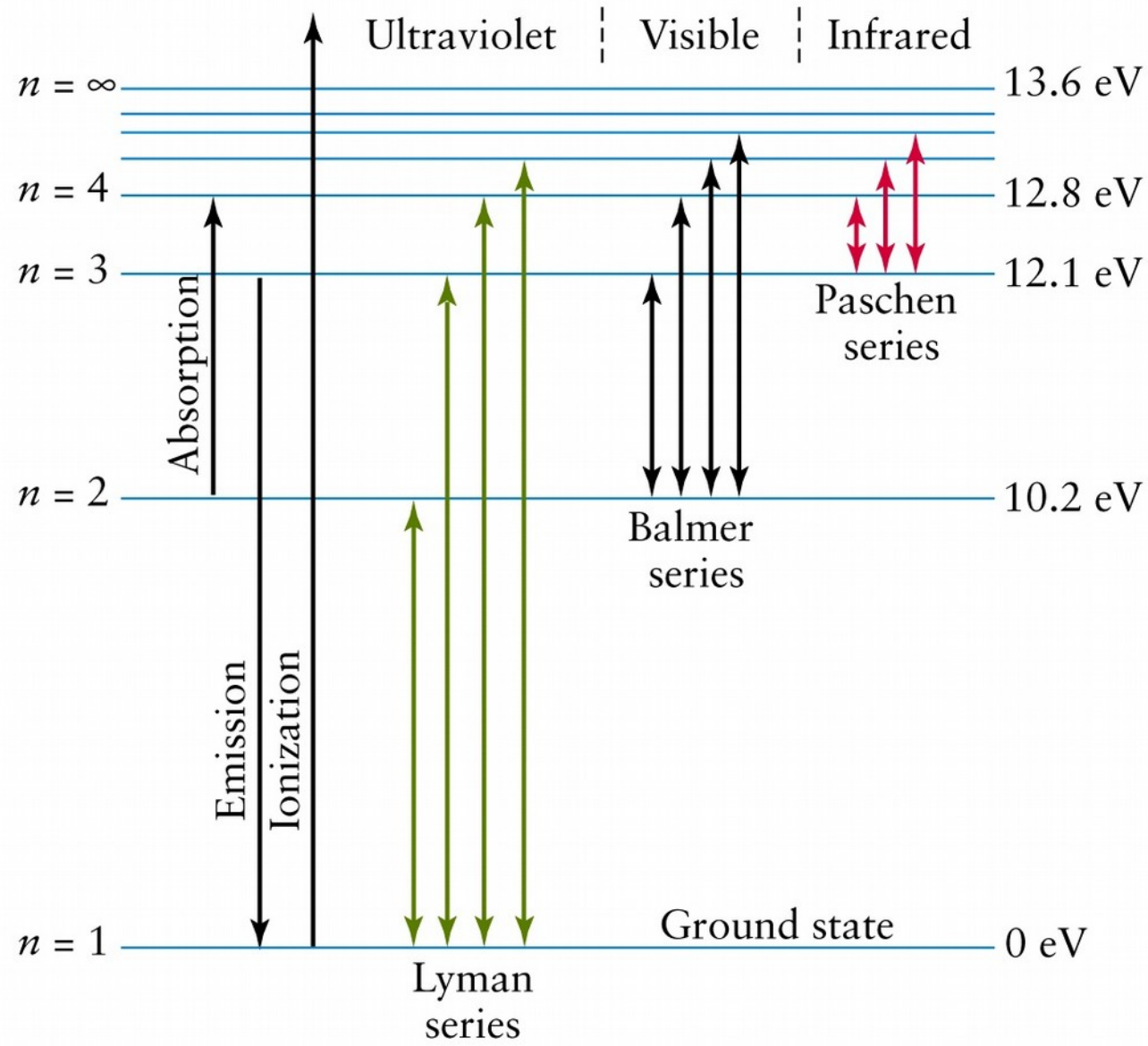
A spektrális vonalakat energiaszintek közötti ugrásokkal magyarázhatjuk

$$h\nu = E_{\text{from}} - E_{\text{to}}$$

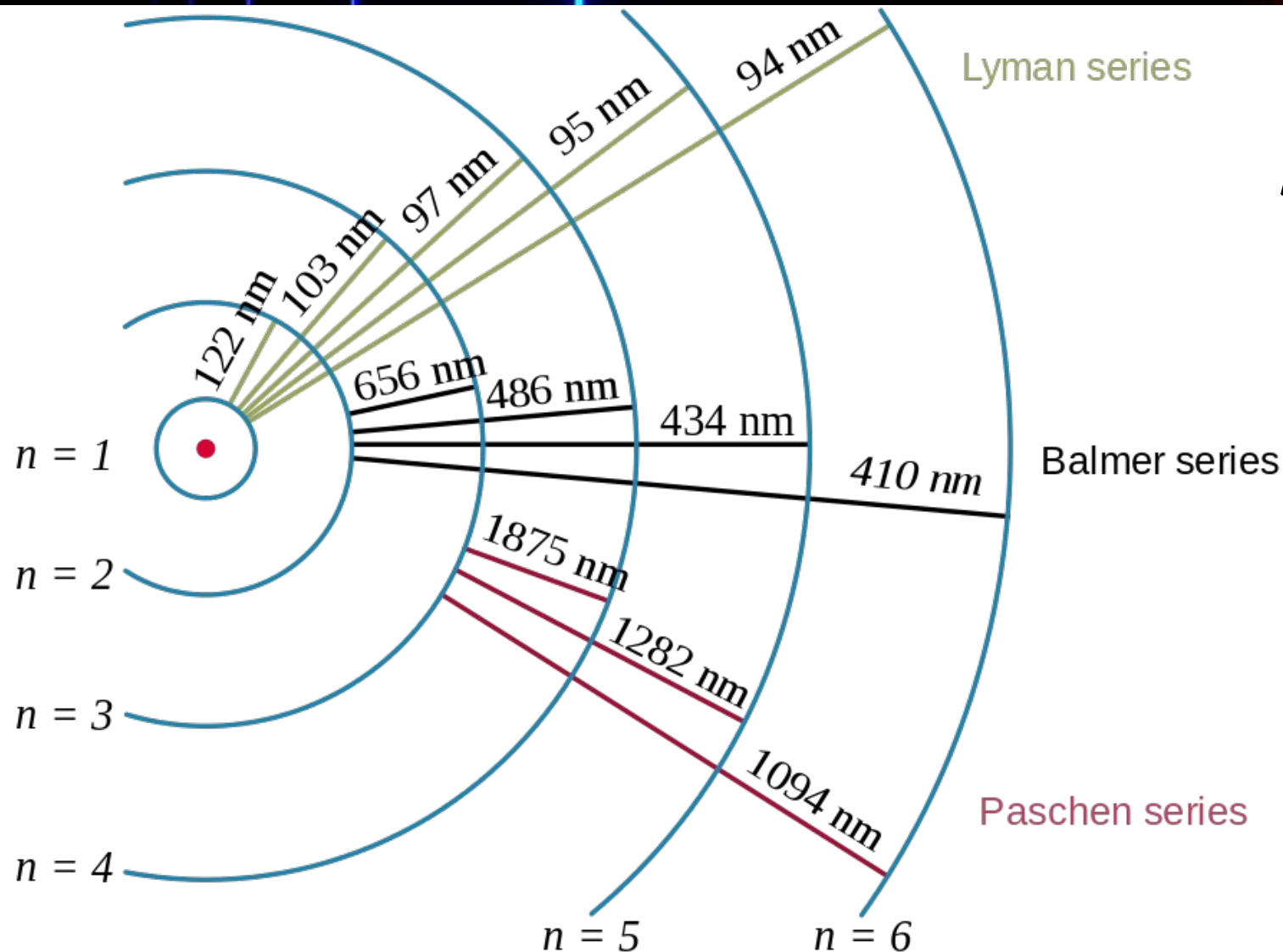
$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

Adatokra illesztésből:

$$E_n = -\frac{13.6\text{eV}}{n^2}$$



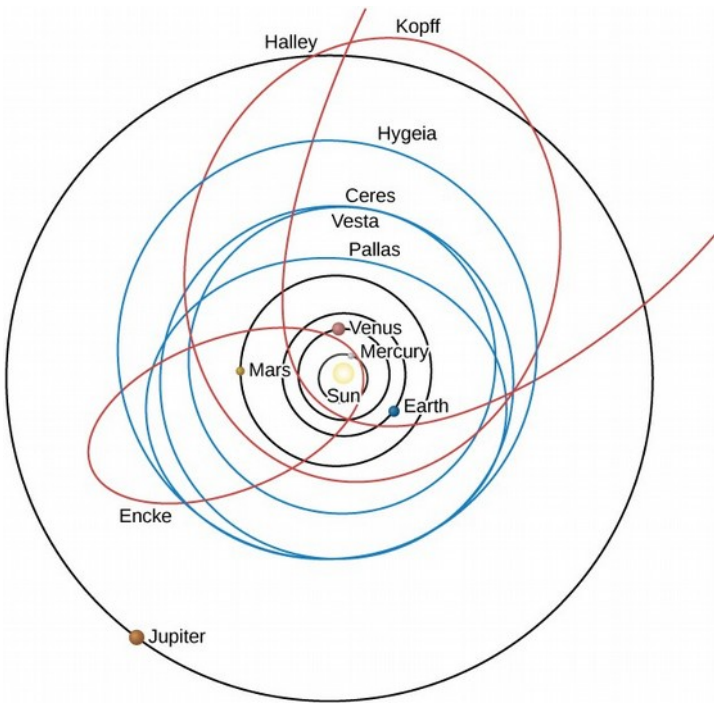
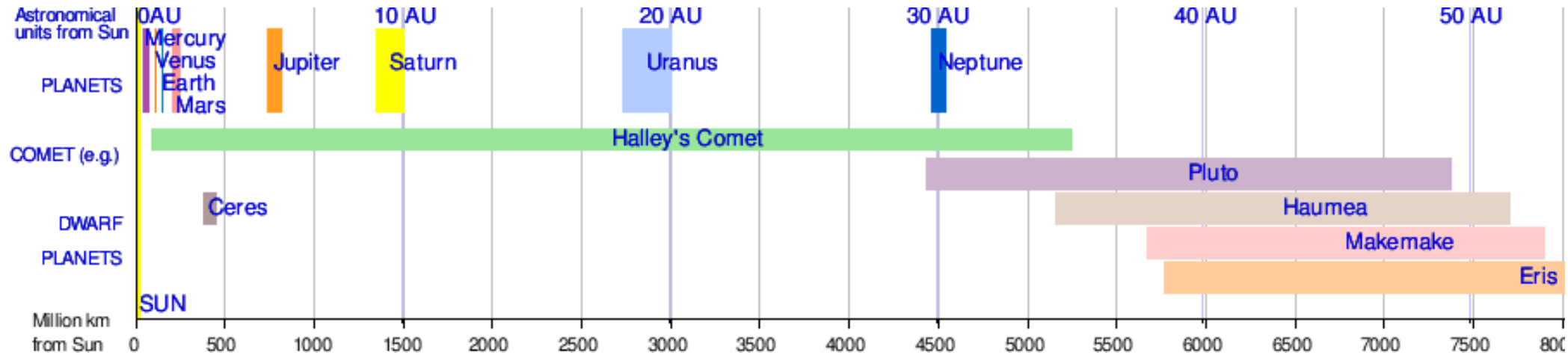
Az energiaszintek a Bohr-féle atommodellben az elektronok pályái



$$h\nu = E_{\text{from}} - E_{\text{to}}$$

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

Miért nem folytonosan változik a pályák energiaszintje?



Naprendszer: a bolygópályák sugarai nem ilyen jól meghatározottak

(lábjegyzet: Titius–Bode-szabály, pályarezonanciák miatt egymáshoz képest kb

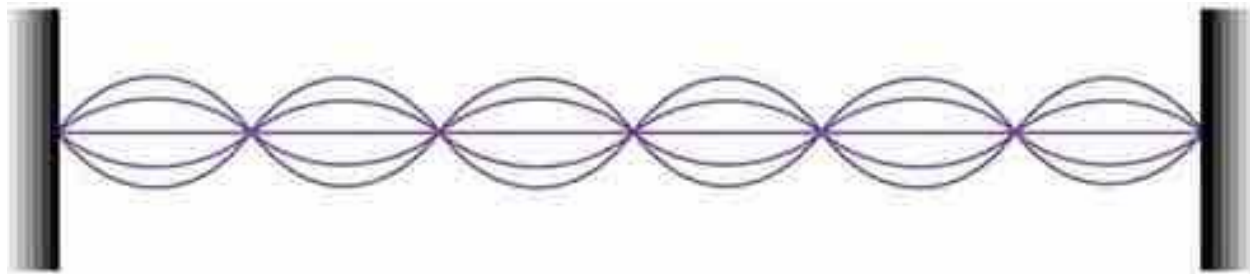
$$R_n = \frac{4 + 3 \cdot 2^n}{10}$$



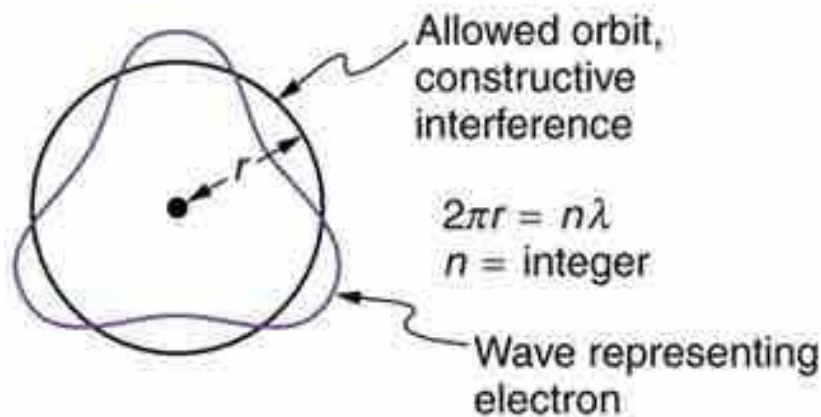
Az atommag körüli elektronok olyanok, mint a rezgő húrok

$$\nu_n = n \frac{v}{2L}$$

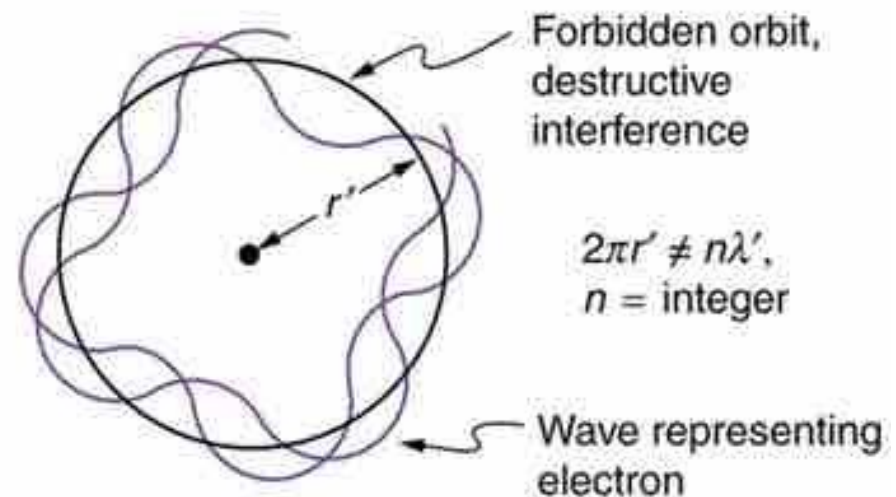
$$E_n = \frac{-13.6\text{eV}}{n^2}$$



(a)



(b)



(c)

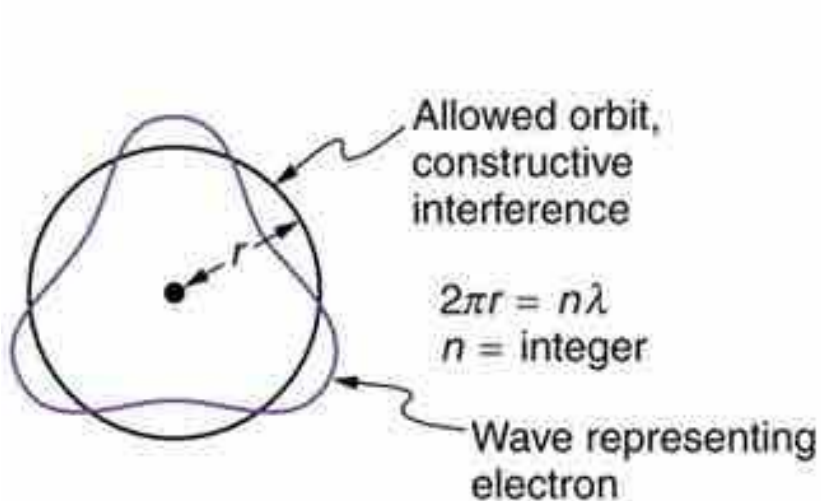
1924, de Broglie herceg doktorija: az elektronok hullámok!

foton impulzusa:
(ismert)

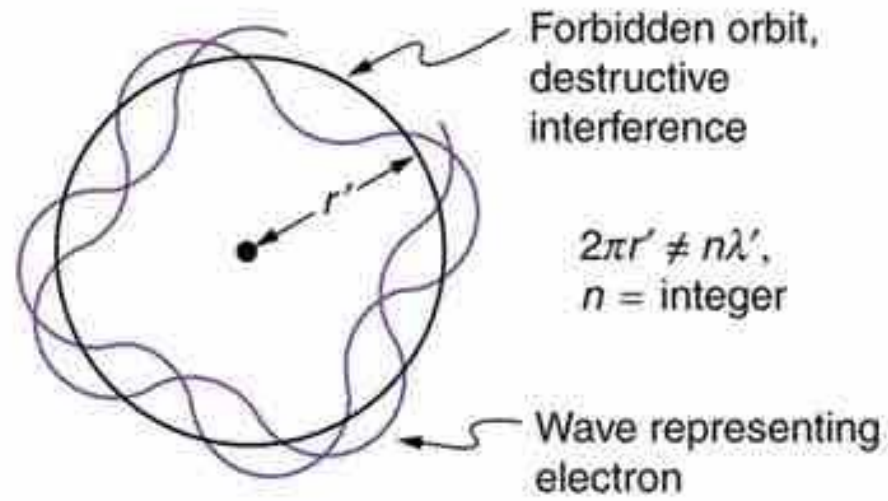
$$p = \frac{h}{\lambda}$$

elektron hullámhossza:
(posztulált)

$$\lambda = \frac{h}{p}$$



(b)



(c)

A de Broglie hipotézist beírva a centripetális erőbe, kijönnek a H-atom energiaszintjei!

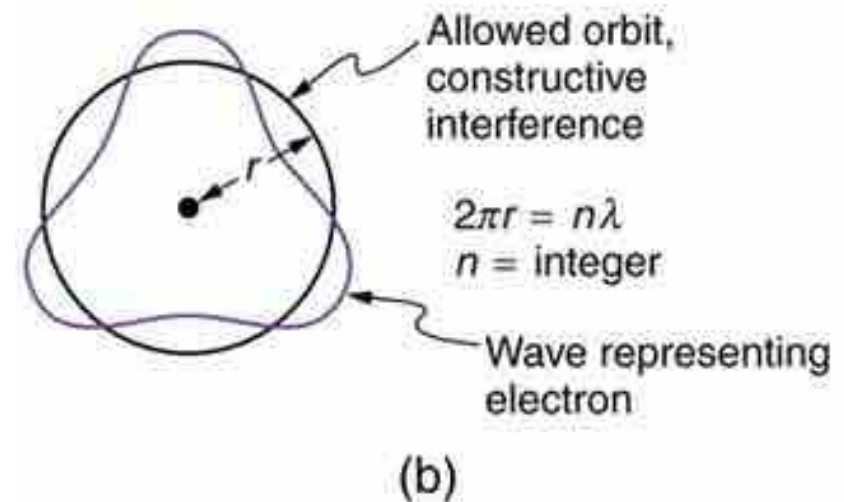
$$F_{\text{cp}} = F_{\text{el}} \quad \text{azaz} \quad \frac{mv^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r^2}$$

$$E = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} = \frac{mv^2}{2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r} = -\frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r}$$

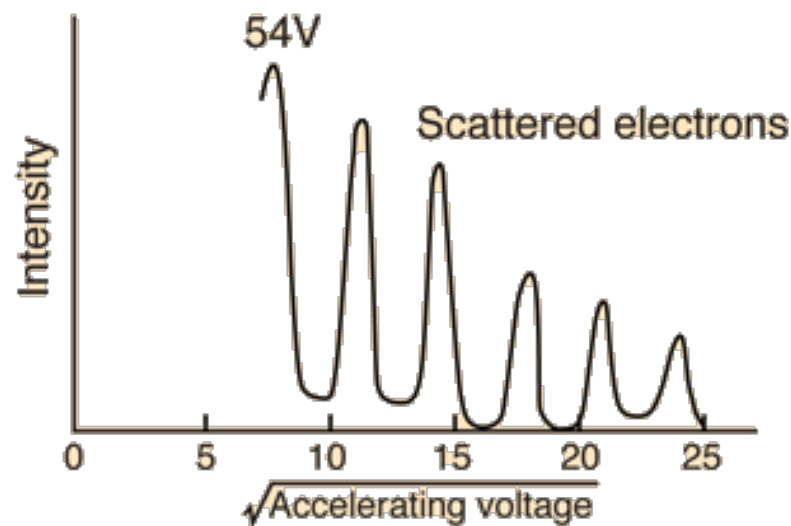
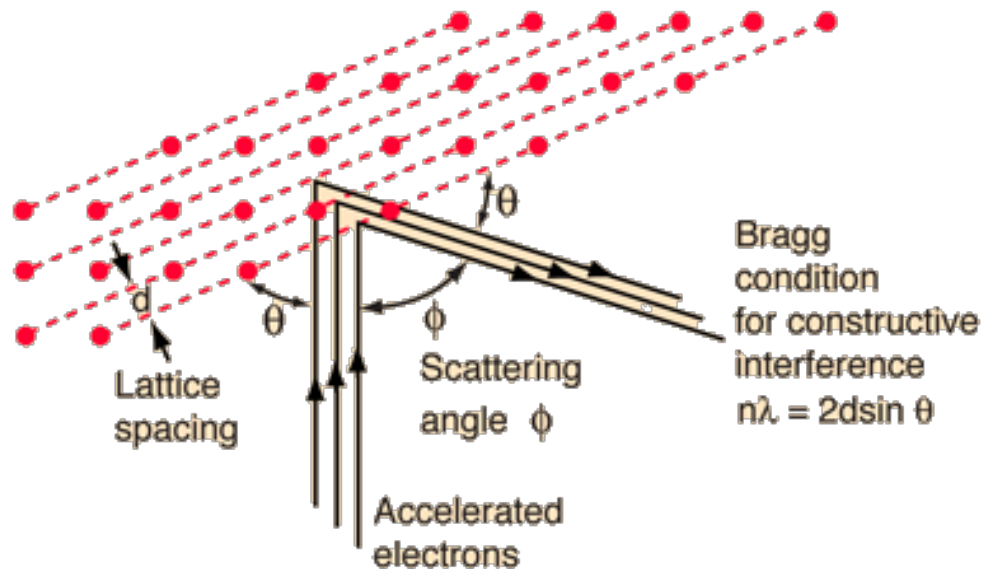
de Broglie: $\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{2\pi r}{n}$

egymásba helyettesítgetve...

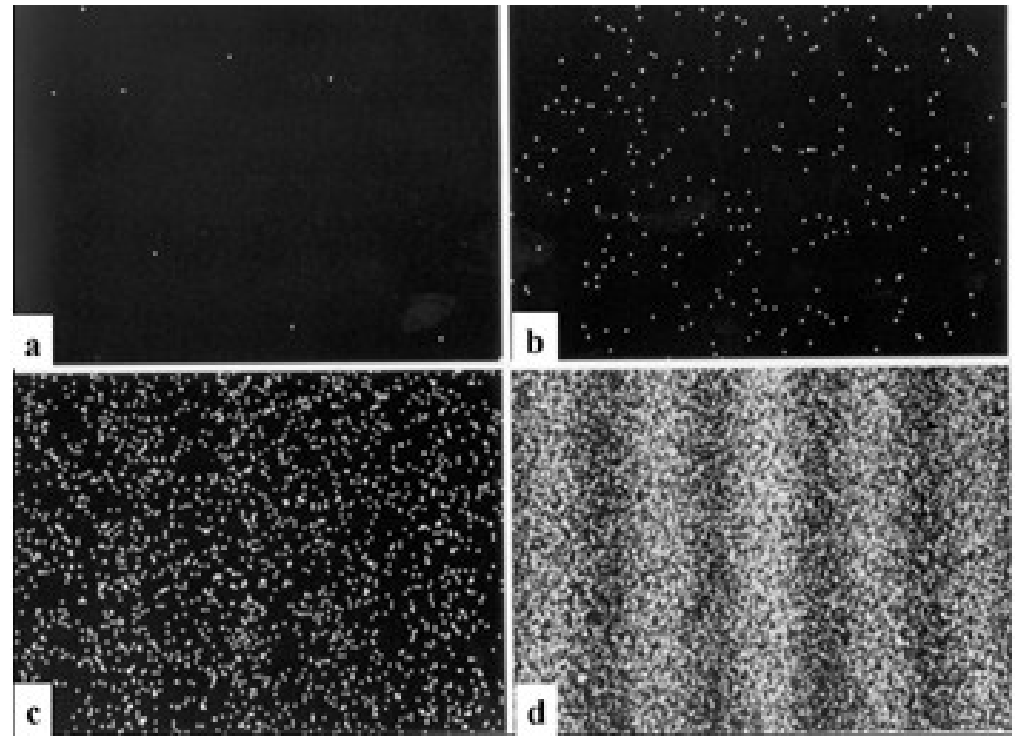
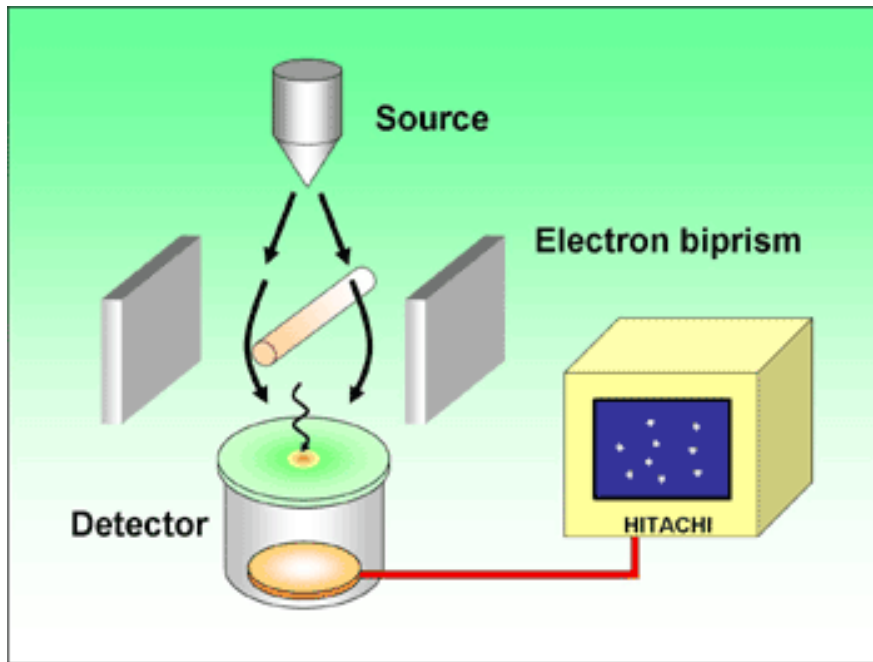
$$E_n = -Z^2 \underbrace{\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2}}_{13.6\text{eV}} \frac{1}{n^2}$$



Elektron is hullámzik: akkor ő is tud interferenciaképet adni – Davisson-Germer, 1923-27



Egyes elektronokkal végzett kétréskísérletre
1989-ig kellett várni. Az elektronok is
“egyszerre mennek át a két résen”



Tonomura, Hitachi, 1989

A kvantummechanika alapjai: a hullámok részecskék, a részecskék hullámok

fotonok:

EM tér hullámozása kis adagokban terjed

Fotonok részecskék, de szuperpozícióban lehetnek

dinamikát a Maxwell-egyenlet adja meg

elektronok:

elektronter hullámozása kis adagokban terjed

Elektronok részecskék, de szuperpozícióban lehetnek

dinamikát a Schrödinger-egyenlet adja meg