



Az Információ-technika és a Bionika Fizikája I – 21

Kvantum fizika 1.

2015 Tavasz

Dr. Csurgay Árpád István

A klasszikus fizika világgépe 1900-ban

Eukleidészi Tér-Idő Testek Erők hatására mozognak

\mathbf{r}, t

m, q

$$F_{GRAV} = \gamma m_1 m_2 / r^2 \quad \mathbf{F}_{EMAG} = q\mathbf{E} + q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Oszthatatlan atomokból
épülnek fel (Kémia: 92 atom)

Ütköznek Vektoriálisan összeadódnak

MECHANIKA („vektor” Newton, „analitikus” Variációs elv
Lagrange, Hamilton mozgásegyenletek)

ELEKTROMÁGNESÉG (Electromagnetics – Maxwell egyenletek)

Álló töltés: elektromos erőter (közeli)

Állandó sebességgel mozgó töltés:
elektromos + mágneses erőter (közeli)

Gyorsulva mozgó töltés: Közeli + Távoli EMAG erőter
Távoli EMAG tér = „Sugárzás”

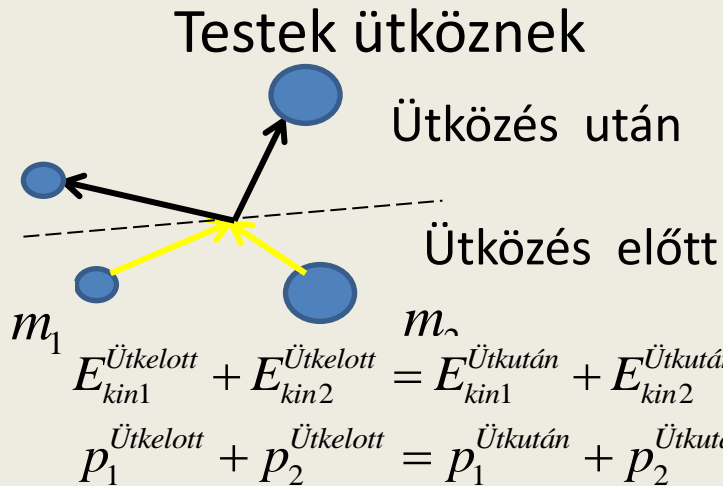
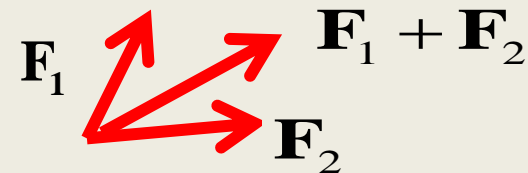
Részecske sokaság a testben
 A testben elnyelt hő kinetikus energiává alakul

$$f \cdot \frac{1}{2} k_{\text{Boltzmann}} T = \langle E_{\text{kin}} \rangle$$

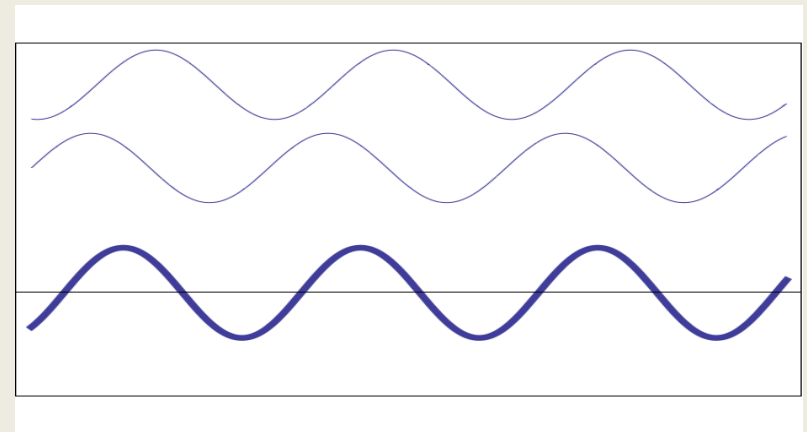
Maxwell-Boltzmann statisztika

$$\sim e^{-E/k_B T}$$

Erők pontról pontra
 vektoriálisan összeadódnak



Kinetikus energia ütközés előtt =
 = kinetikus energia ütközés után
 Összes lendület ütközés előtt =
 = összes lendület ütközés után



19. 20. század fordulóján: Új kísérleti eszközök

Új technológiák: Vákuum technika, új mérés technika

Mechanikai mérések (hely, idő, sebesség, gyorsulás, stb.)

Elektromágneses mérések: áram mérés, feszültség mérés, elektromágneses erőtér mérés

Vákuum technikai eszközök és sugárzás mérése
katód-anód dióda, gáz-kisülési cső , katód-sugárcső ,
sugárzás-mérők: frekvencia-mérés, intenzitás mérés

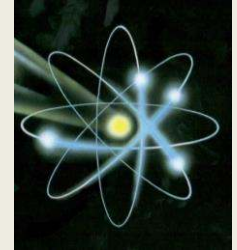
Klasszikusan megmagyarázhatatlan megfigyelések

1. Katódsugárcső – Az elektron felfedezése 1897 Thomson

2. Az atommag felfedezése – Rutherford 1911

Miért nem zuhan bele az elektron az atommagba?

A keringő elektron miért nem sugároz?



3. Miért változik az izzított test („fekete test”) színe?

4. A „fényelektromos” jelenség – Max Planck 1900

A fény elektronokat „üt ki” egy fém felületéből.

A kiütött elektronok energiája a fény színétől függ.

5. A fény hol hullámként hol részecskeként viselkedik.

Hol interferál (T. Young), hol „ütközik” (Lénárd Fülöp, Einstein)

6. A gázok sugárzása (spektruma) „vonalas”. Miért?

Katódsugárcső – Az elektron felfedezése

1897 Sir Joseph John THOMSON katódsugárcső kísérlet:
“oszthatatlan” atomok részecskéket emittálnak.

H

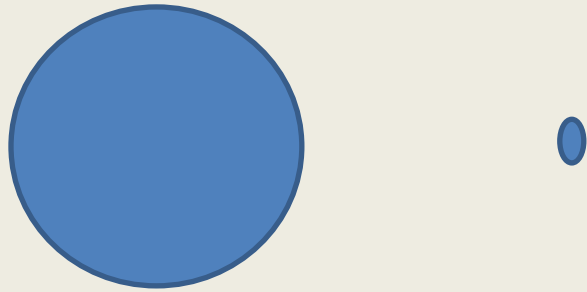
He

Li

B

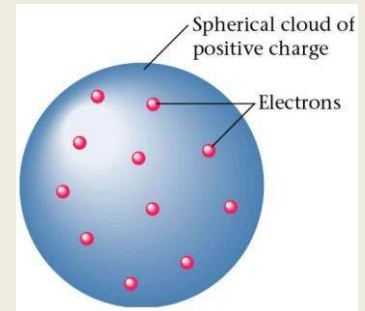
C

...



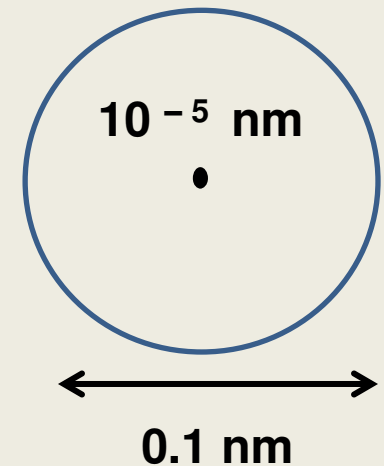
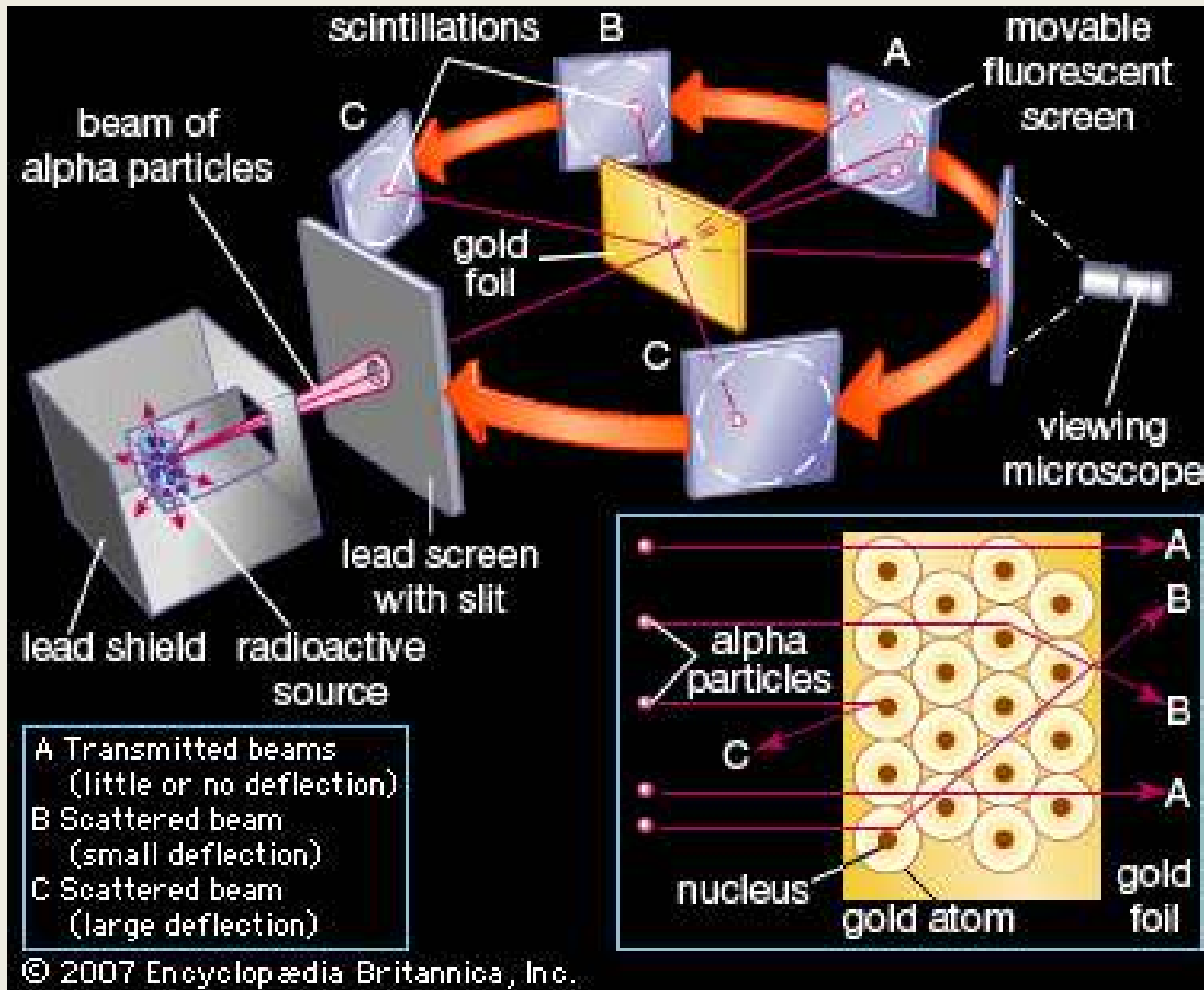
Az emittált részecskék negatív töltésűek,
tömegük $\sim 1/2000$ az atom tömegének,
közben az atom pozitívvá válik.

1897 Az elektron
felfedezése



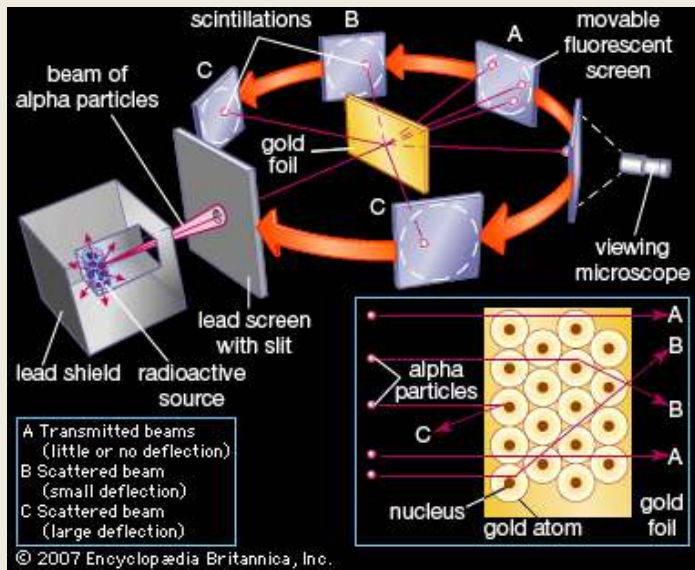
Az atom
“Pudding”
modellje.

1911 Ernest RUTHERFORD: az atomban a pozitív töltés egy kis magban koncentrálódik, melynek átmérője kb 10^{-5} nm, így 10 000 –szer kisebb, mint az atom átmérője, amely kb 0.1 nm)



$$m_{nucleus} \approx 0.9995 \cdot m_{atom}$$

Az Ernest RUTHERFORD kísérletben



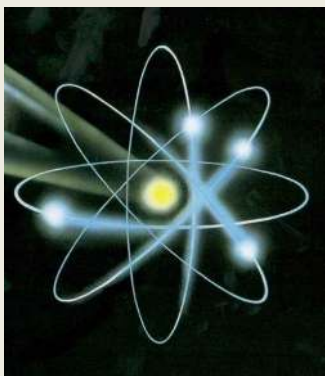
A részecskéknek csak 98%-a halad át zavartalanul az arany fólián.

Kb 2% áthalad, de repülési iránya jelentősen elhajlik

A részecskék 0.01%-a visszaverődik !

A Rutherford Atom Model

1. Az atomban van egy pici atommag. Az atommag térfogata 10^{-15} -ed része az egész atom térfogatának
2. Majdnem a teljes atom-tömeg az atommagban koncentrálódik
3. Az atommag töltése pozitív. Az elektronok negatív töltése neutralizálja az atomot.
4. Az elektronok az atommag körüli üres térben keringenek.



Nuclear
planetary model?

Gondok:

A klasszikus fizika szerint (Newton + Maxwell) :

Az atommag körül keringő elektron gyorsulva mozgó töltés, tehát sugároz, mint egy körantenna.

Ha a keringő elektron energiát veszít, akkor az elektronnak közelebb kell kerülnie az atommaghoz, és végül bele kell zuhannia az atommagba.

A sugárzó keringő elektron által kisugárzott energia frekvenciája folytonosan változik.

A kísérletek viszont azt mutatják, hogy

1. az atomok (tiszt gázok) sugárzásának spektruma „vonalas” diszkrét frekvenciák .
2. Ha egy atom eléri a legkisebb energiájú u.n. “ground state” –et, akkor az atom megszűnik sugározni (minimum energy state) Stacionárius saját állapotokban sem sugároz.

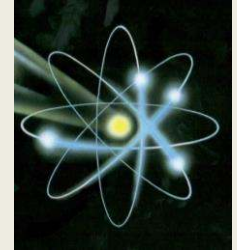
Klasszikusan megmagyarázhatatlan megfigyelések

1. Katódsugárcső – Az elektron felfedezése 1897 Thomson

2. Az atommag felfedezése – Rutherford 1911

Miért nem zuhan bele az elektron az atommagba?

A keringő elektron miért nem sugároz?



3. Miért változik az izzított test („fekete test”) színe?

4. A „fényelektromos” jelenség – Max Planck 1900

A fény elektronokat „üt ki” egy fém felületéből.

A kiütött elektronok energiája a fény színétől függ.

5. A fény hol hullámként hol részecskeként viselkedik.

Hol interferál (T. Young), hol „ütközik” (Lénárd Fülöp, Einstein)

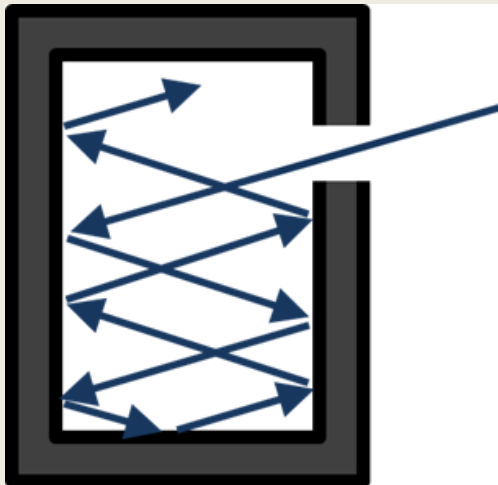
6. A gázok sugárzása (spektruma) „vonalas”. Miért?

„Fekete test” „hő”sugárzása (Black-body radiation)

Izzított vas (kovács mester): Fekete – Vörös – Sárga – Kék – Fehér - Miért?

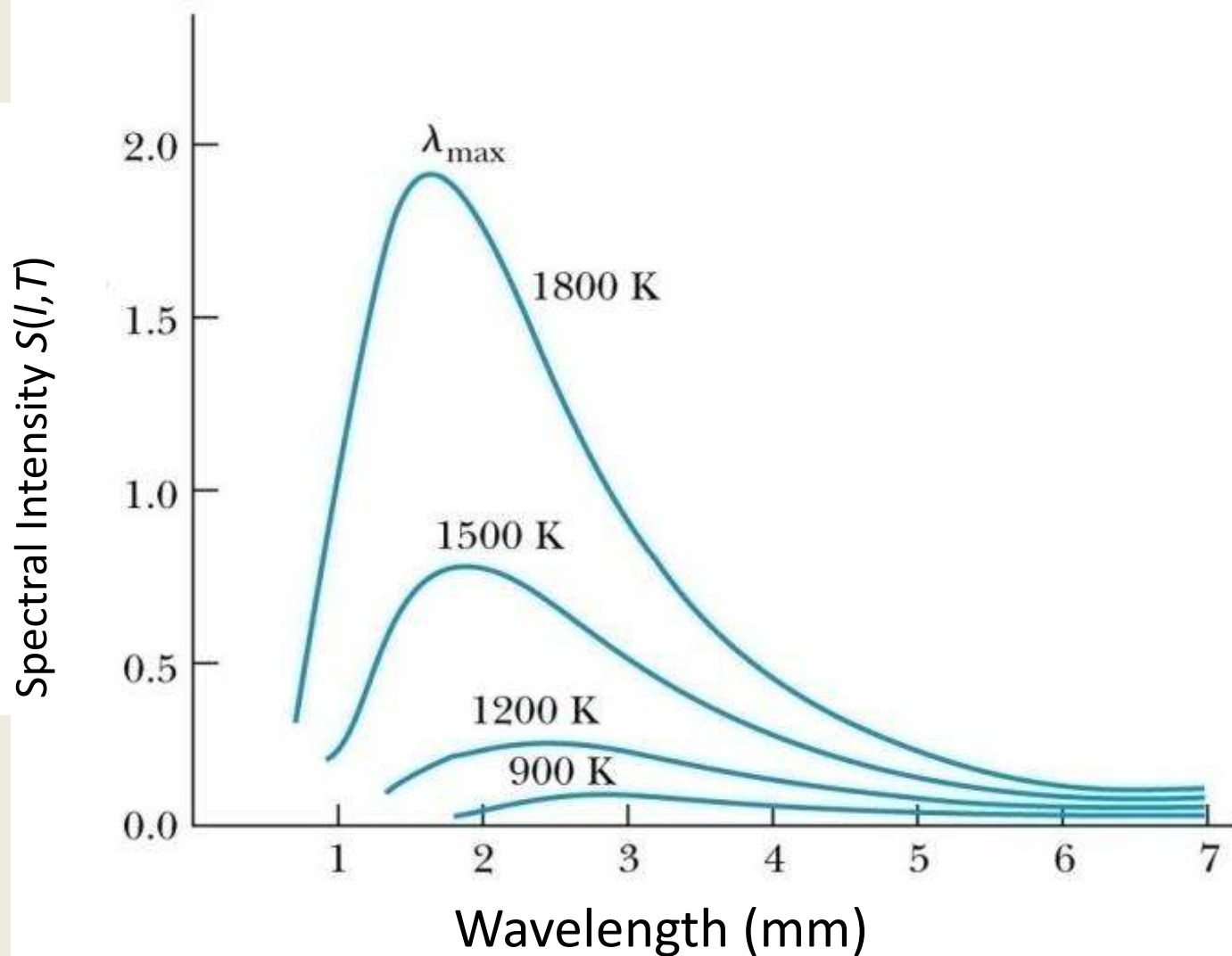
Minden gáz, folyadék és szilárd test, ami
– 273 fok hőmérsékletnél melegebb
elektromágneses hullámokat SUGÁROZ
SUGÁRZÁST „EMITTÁL” (emission of radiation)

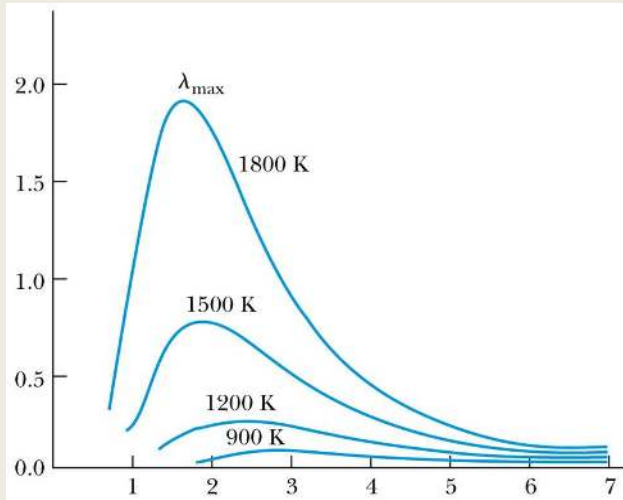
A minden sugárzást elnyelő (abszorbeáló) u.n. „fekete test”
sugárzása független a sugárzó test anyagától és alakjától



Rögzített hőmérsékleten mérték a
felületegységen adott frekvencián
(vagy hullámhosszon) hullámhossz-
egységre eső kisugárzott intenzitást

$$S(\lambda, T)$$





Wien megfigyelése (törvénye)

$$\lambda_{\max} T = 2.898 \times 10^{-3} \text{ [m} \cdot \text{K]}$$

Stefan-Boltzmann törvény σT^4

$$P(T) / A = \sigma T^4 = \int_0^{\infty} S(\lambda, T) d\lambda / A$$

$$\sigma = 5.6705 \cdot 10^{-8} \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)]$$

A felületegységen sugárzott teljes teljesítmény az abszolút hőmérséklet negyedik hatványával nő

Planck megpróbálta megérteni a méréseket. Tudták, hogy az ideális fekete test minden színt tökéletesen elnyel és minden színt sugároz. Az $S(\lambda, T)$ csak a hőmérséklettől függ, a test alakjától és anyagától nem függ.

Planck keresett egy formulát, amely visszaadja a mért görbéket. A formula egyszerűnek tűnt, és csak egy paramétertől függött.

A paramétert (h – t) a mért görbékre illesztéssel határozta meg.

Planck kiváló teoréter volt: megpróbált klasszikus magyarázatot adni .

Planck feltette, hogy a sugárzást az üregben lévő „oszcillátorok” , az üreg rezonáns módusai (Maxwell) nyelték el és sugározták vissza a kis nyíláson át.

Adott T hőmérsékleten, egyensúlyban minden szabadságfokra $0.5 k T$ energia jut.

A módusok száma a frekvencia négyzetével nő (Ultraibolya paradox)

Csak úgy kapott a mérésekkel egyező formulát, ha a Maxwell egyenleteknek ellentmondó feltevést tett: az oszcillátorok csak „kvantált” energiájúak lehetnek (Energy „QUANTUM”)

$$E = n \cdot h \cdot \nu, \quad n = 0, 1, 2, \dots; \quad \Delta E = h \cdot \nu = \hbar \cdot \omega$$

Planck sugárzási törvénye (1900 december 14)

$$S(\lambda, T) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}$$
$$h = 6.665 \cdot 10^{-34} \text{ [Ws}^2\text{]};$$
$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.05 \cdot 10^{-34} \text{ [Ws}^2\text{]}$$

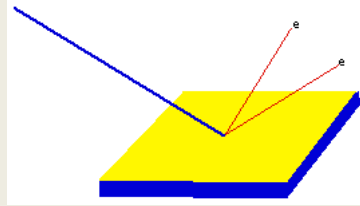
Planck állandó

KLASSZIKUS FIZIKA „CLASSICAL” PHYSICS

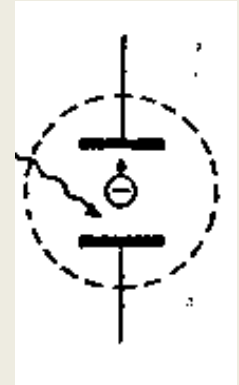
Mindaz, amit 1900 december 14-e előtt a mechanika (hőtan) és az elektrodinamika törvényeinek ismeretében értettünk, vagy érthettünk volna.

1900 december 14:
Max Planck cikkének megjelenése \hbar
a fekete test sugárzásáról

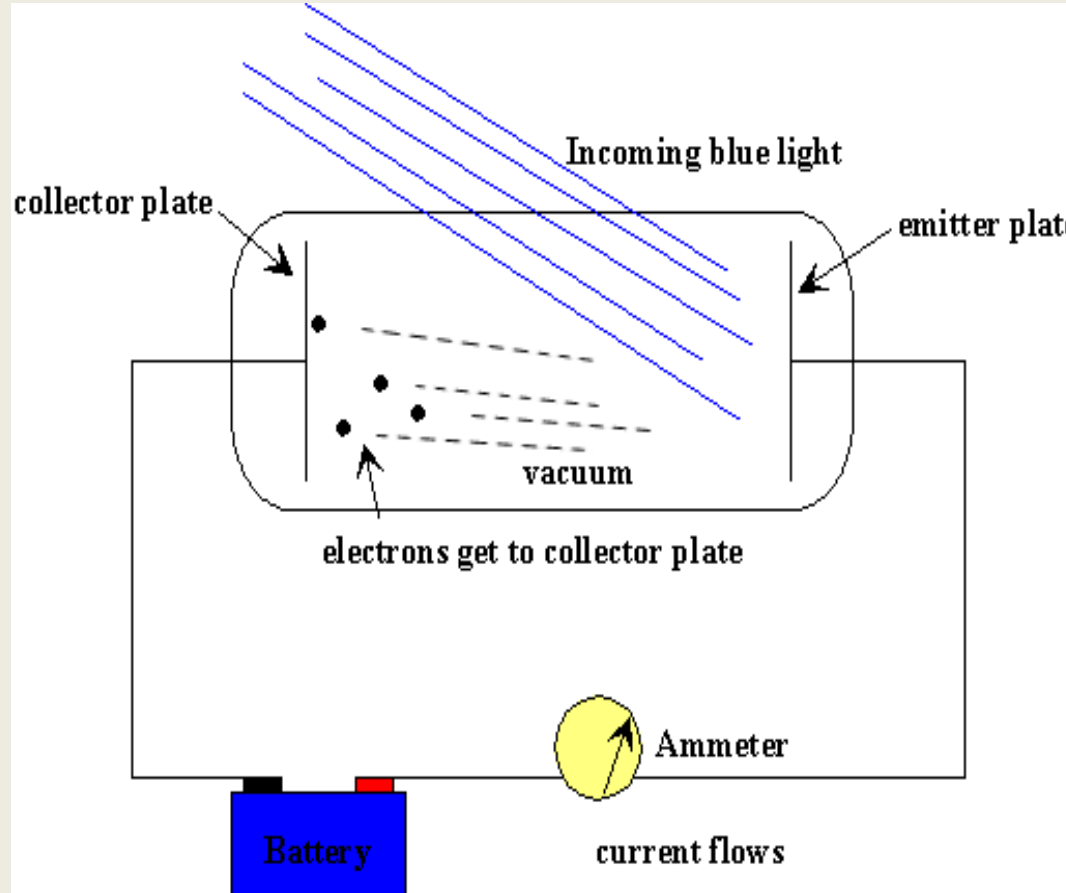
Fényelektromos jelenség (Photoelectric effect)

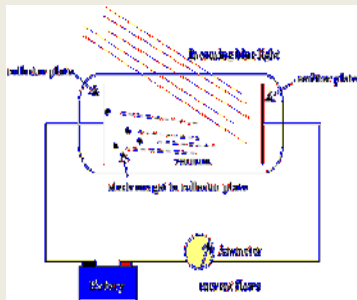


Fénnyel megvilágított fémfelületből elektronok lépnek ki. Ezeket hívjuk „fotoelektronoknak”.



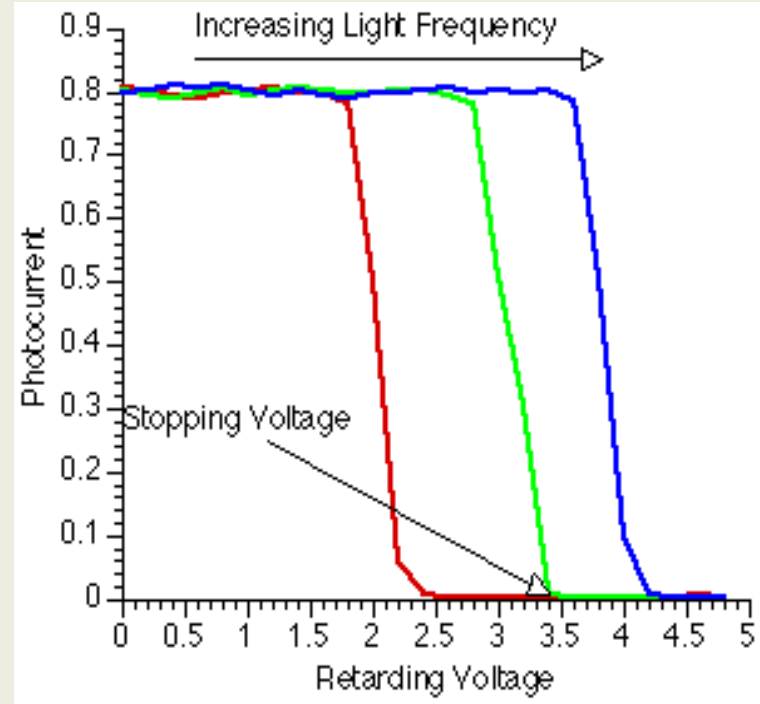
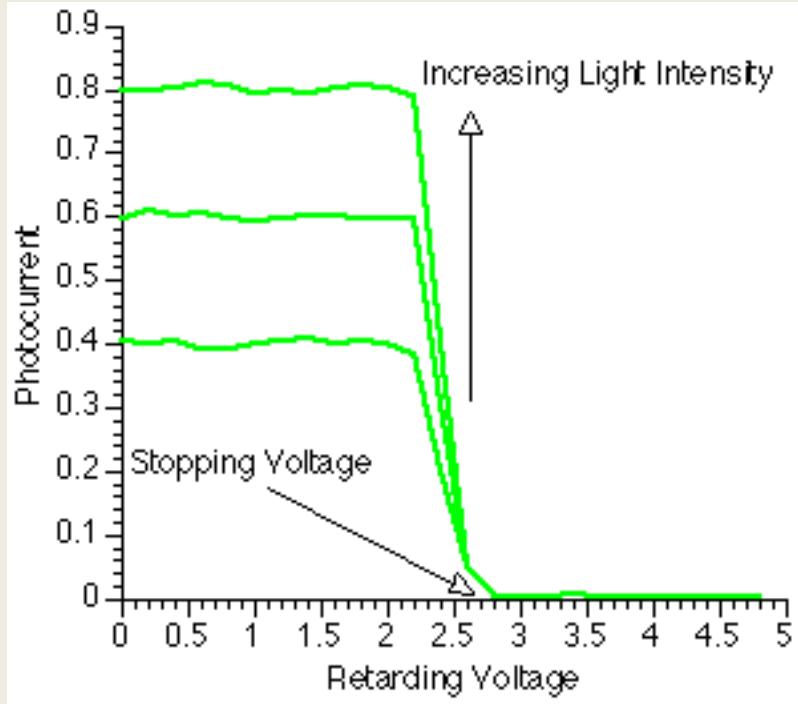
Kísérletek:





A kilépő elektronok maximális energiája nem függ a megvilágító fény intenzitásától, csak a megvilágító fény frekvenciájától (színétől) függ.

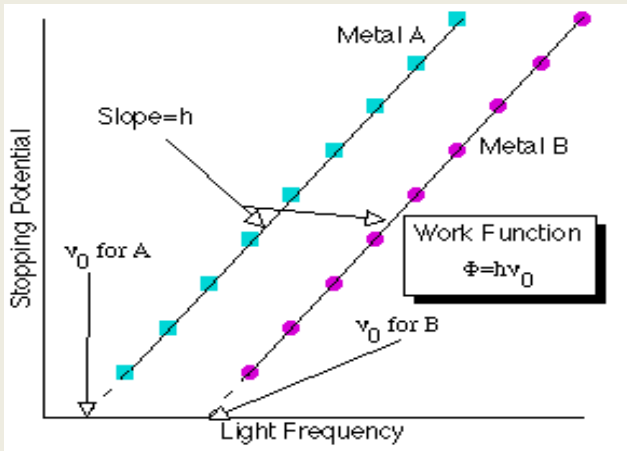
Az intenzitás növelésével a kilépő elektronok száma nő, de energiája nem nő.



Az anódra eljutó elektronok száma csökken a fékező feszültség növelésével.

Záró feszültség (Stopping potential)

A záró feszültség lineárisan nő a megvilágító fény frekvenciájával.



Albert Einstein 1905

A fény „tűsugárzás” elmélete

Elektromágneses síkhullám energia „csomagokban” terjed:

ν frekvenciájú csomag energiája $E = h \cdot \nu$

$$h = 6.625 \cdot 10^{-34} \text{ W s}^2$$

A fény c sebességgel repülő $h \cdot \nu$ energiájú "részecskéként"

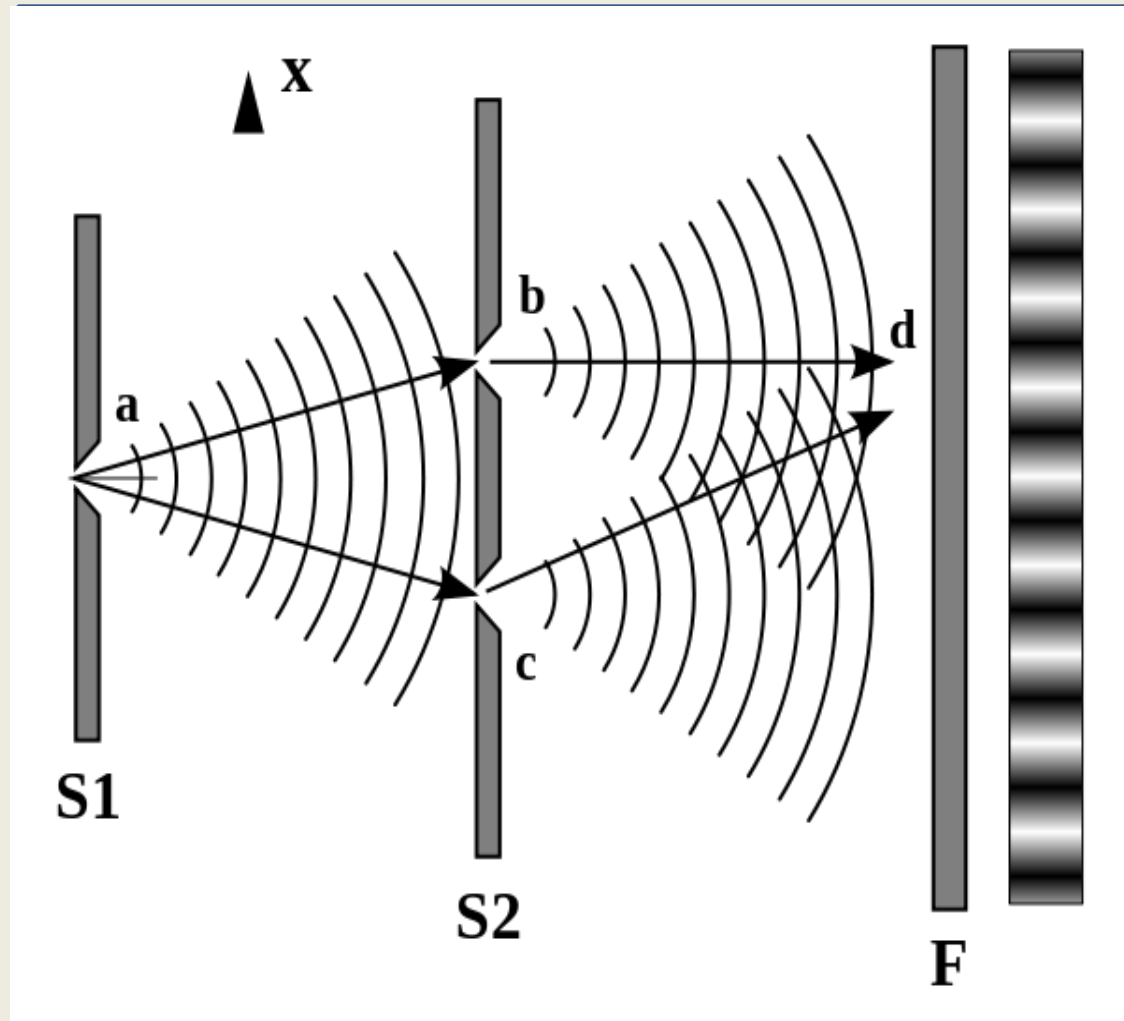
ütközik a fém felületébe, ha van elég energiája, akkor behatol és kiüt egy elektront

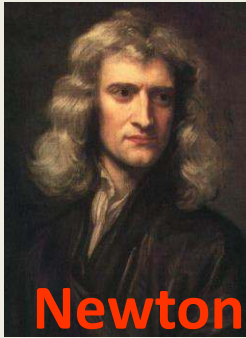
Az energia megmaradása $h\nu \geq \frac{1}{2}mv^2 + E_w$ E_w a fém "kilépési munkája"

A záró feszültségnél $q_e U_r = \frac{1}{2}mv_{\max}^2 = h\nu - E_w$

a leggyorsabb ν_{\max} elektron sem jut el az anódra.

Thomas Young kísérlet (1799): A fény hullám



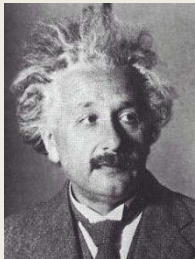


A fény
„részecske-nyaláb”
Ütközik,
Elhajlik,
Visszaverődik



A fény hullám
Interferencia

Huygens, Young, Fresnel



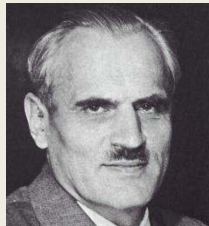
Einstein

A fény
Elektromágneses hullám



Maxwell

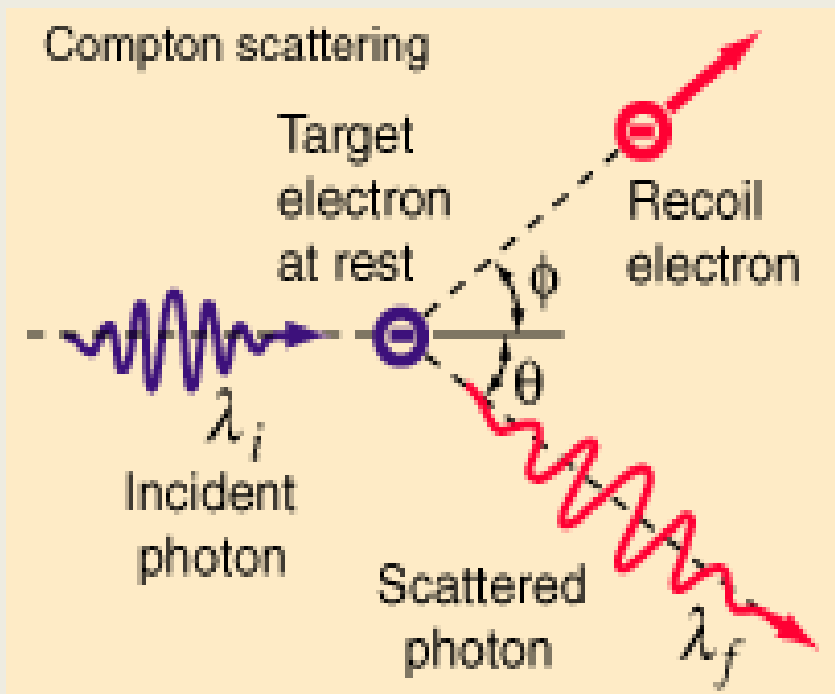
A fényelektromos jelenségben
a fény részecskéként ütközik



Compton

Végezzünk kísérleteket!
Hogyan ütközik az elektron és a fény?

A Compton kísérlet (Compton effect)



Az energia megmaradása:

$$h\nu + m_0c^2 = h\nu' + \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}c^2$$

Röntgen (X-ray) kvantumokat ütköztet elektronokkal.

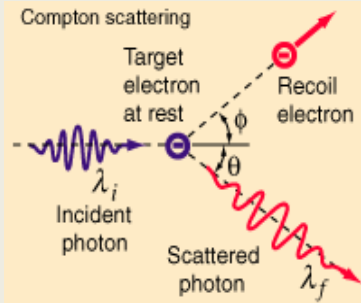
Az ütközés során a röntgen-kvantum az álló elektront meglöki, kinetikus energiát ad át, a fénykvantum energiát veszít és szóródik.

A momentum (lendület) megmaradása:

$$\frac{h\nu}{c} = \frac{h\nu'}{c} \cos \vartheta + mv \cos \varphi$$

$$0 = \frac{h\nu'}{c} \sin \vartheta - mv \sin \varphi$$

A fénykvantum („foton”) energiája az ütközés után :



$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos \vartheta)}$$

A fénykvantum hullámhosszának megváltozása:

$$\Delta\lambda = \frac{c}{\nu'} - \frac{c}{\nu} = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos \vartheta).$$

Kísérleti igazolás *Wilson-chamber-ben* (köd-kamra):
A részecskék trajektóriái nagy pontossággal igazolják
a fénykvantum részecskeszerű viselkedését

A fény „kettős természete”

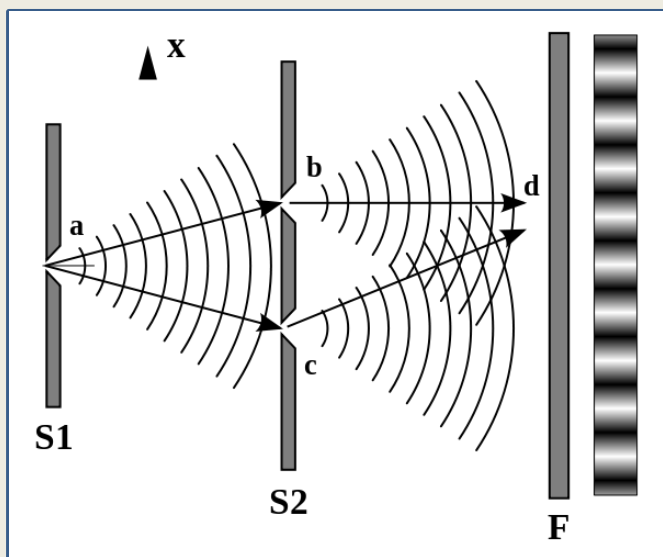
Mi a fény természete?

Elektromágneses hullám ami erőter így interferenciát mutat vagy fénykvantum”részecske”, ami ütközéskor testként viselkedik?

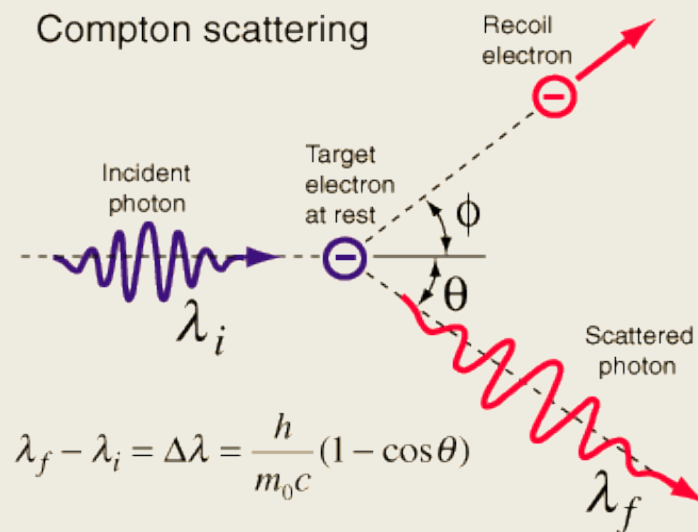
Ha hullám, akkor frekvenciája, terjedési sebessége és hullámhossza van, azaz frekvenciája és hullámszám-vektora van (ω, \vec{k})

Ha részecske, akkor energiája és lendület-vektora van (E, \vec{p})

Thomas Young kísérlet (1799)



Compton kísérlet (1922)



A fény hullám is részecske is, de sem nem egészen hullám,
sem nem egészen részecske .

Ugyanaz a foton egyik kísérletben hullámszerűen, egy másik
Kísérletben részecskeszerűen viselkedik

Hullám (wave) is, részecske is (particle)

Richard P. Feynman: „waveickle”

Hullám $(\omega, \vec{\mathbf{k}})$ $(\omega = 2\pi \cdot \nu, \quad \vec{\mathbf{k}} = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{n})$

Részecske $(E, \vec{\mathbf{p}})$ $(E = m \cdot c^2, \quad \vec{\mathbf{p}} = m \cdot \mathbf{v})$

Kapcsolat a hullám és a részecske természet között

$$E = \hbar\omega = h\nu \quad \vec{\mathbf{p}} = \hbar \cdot \vec{\mathbf{k}} = (h / \lambda) \mathbf{n}$$