

1.3. ATOMOK ELEKTROMÁGNESES VÁLASZAI

Gázok, gőzök tanulmányozásából:

→ egyedi atomtulajdonság

Válaszra készítés: abszorpciós és emissziós spektrumok → atomokra jellemzők

Nem csak a látható tartományban!

Néhány adat és egység:

Látható tartomány: $\sim 380\text{-}780\text{ nm}$

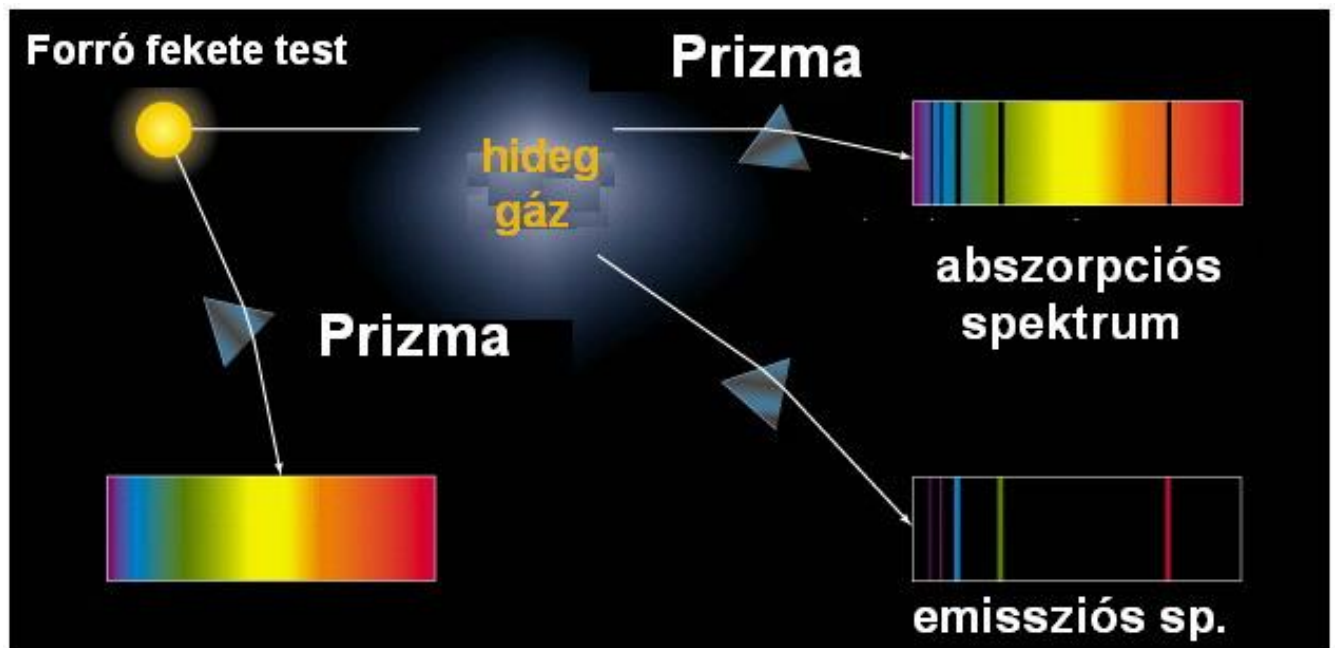
(A határ a kék felé függ az életkortól.)

→ $f \rightarrow 7.89 \cdot 10^{14} \text{—} 3.85 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$

$\omega \rightarrow 4.98 \cdot 10^{15} \text{—} 2.42 \cdot 10^{15} \text{ rad/s}$

$\tau \rightarrow \tau = f/c [\text{cm}^{-1}] \text{ (kayser)} \rightarrow 26315.8 \text{—} 12820.5$

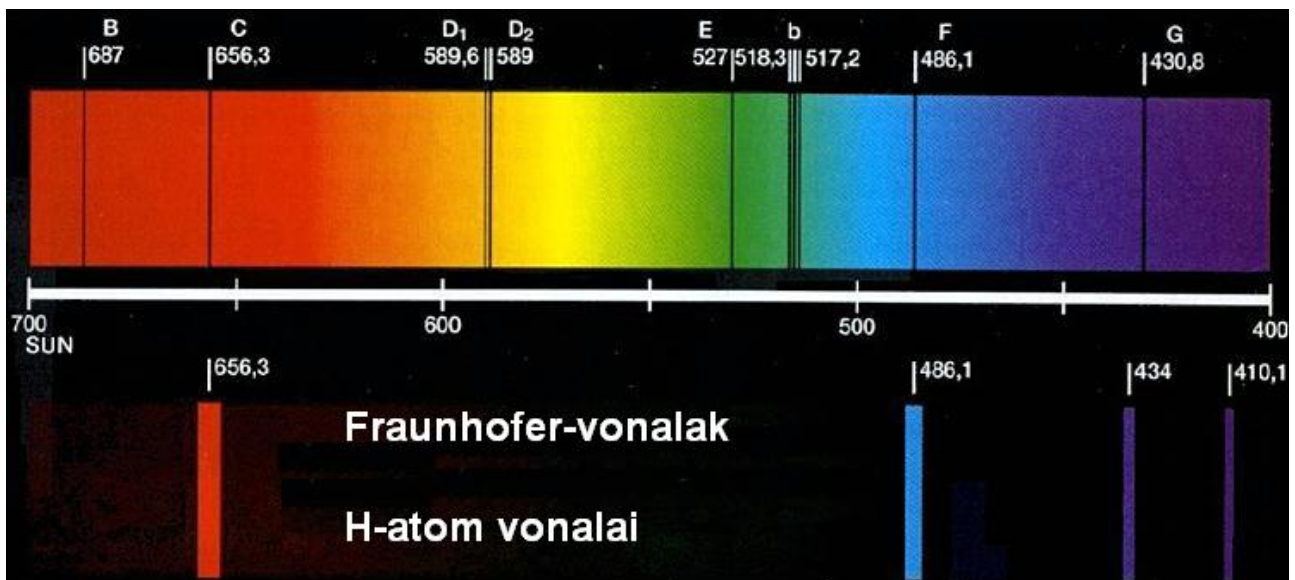
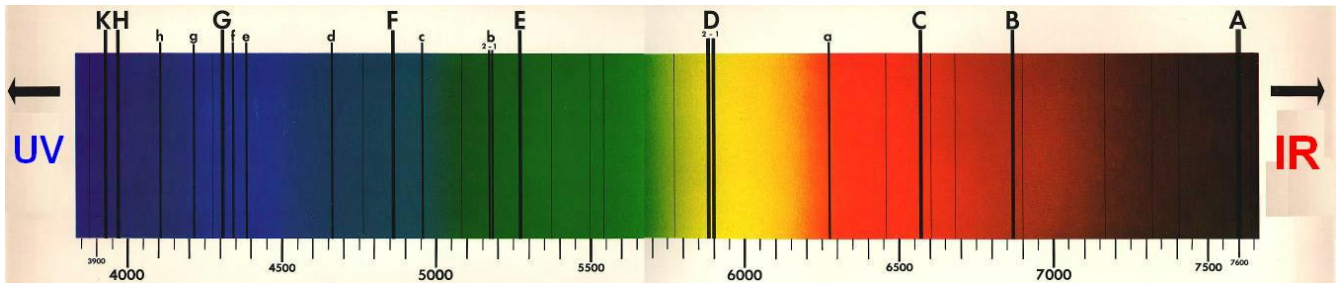
Kísérletek elve:



Forró gázok spektruma → emissziós sp.

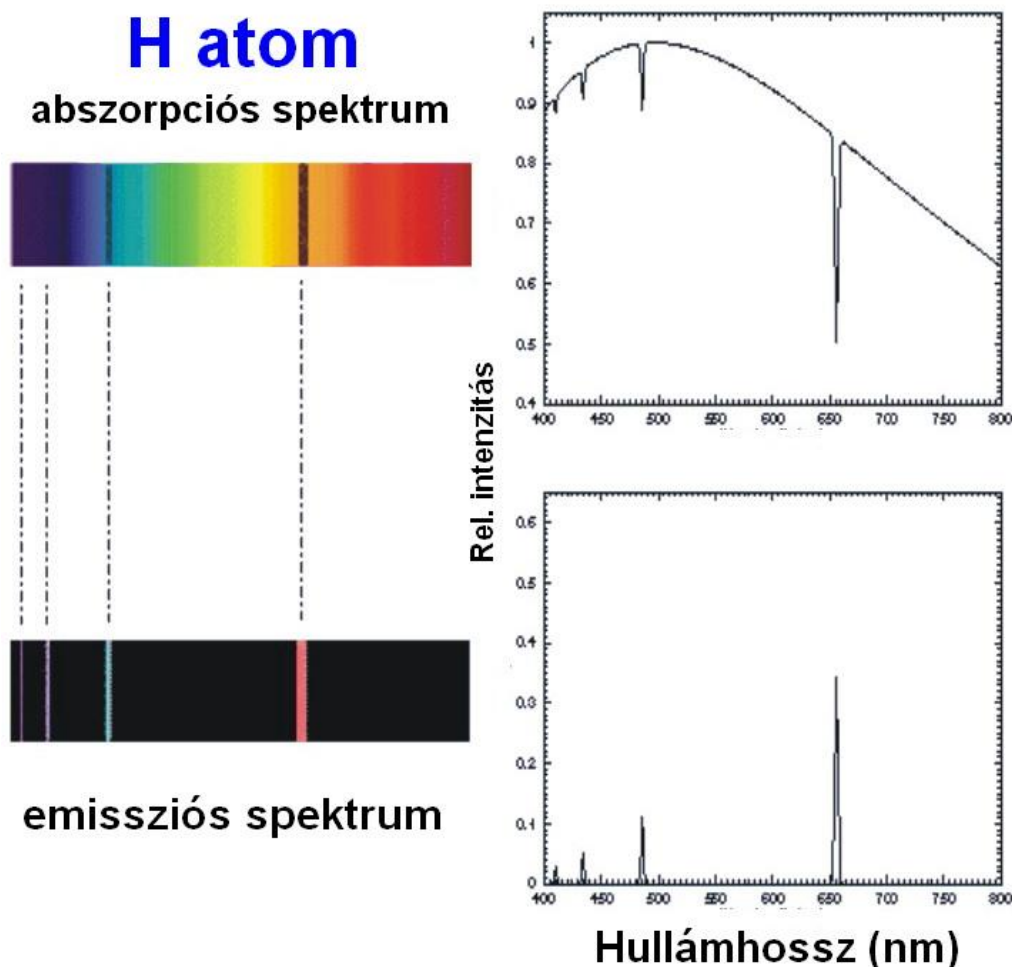
• Abszorpciós spektrum: fényelnyelés

Először: a Nap Fraunhofer-vonalai
[Joseph von Fraunhofer (1787-1826)
1814: Nap spektrumában 574 vonal]



- Ennek a spektrumnak az alapján**
azonosították a Napban lévő elemeket
- **Emissziós spektrum: forró gázok és gőzök fénykibocsátása**

Megfigyelés: emissziós és abszorpciós vonalak ugyanott



Kísérletek: elérhető elemekre, széles frekvenciatartományban elvégezték

Óriási adatbázisok

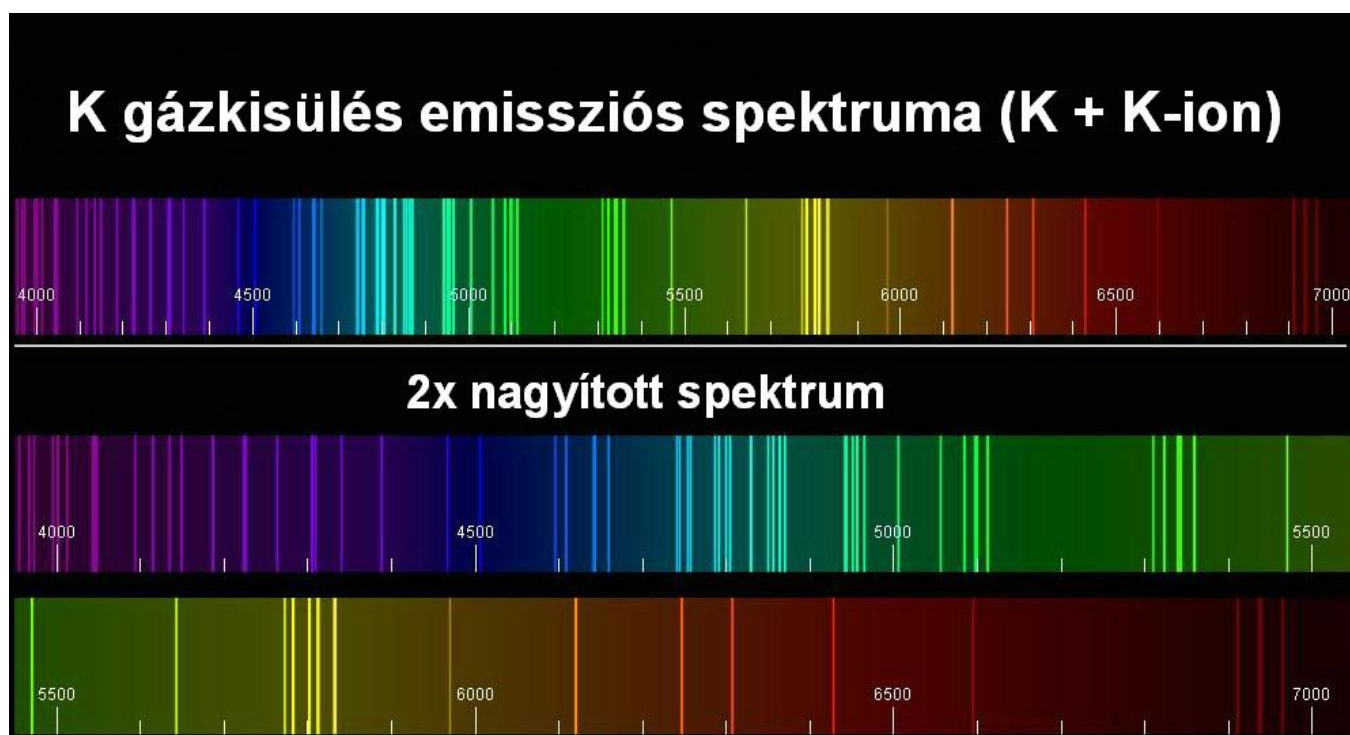
Pl.: NIST Atomic Spectra Database

<http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/index.html>

Mindenütt nagyszámú spektrumvonal → a tájékozódás igen nehéz!

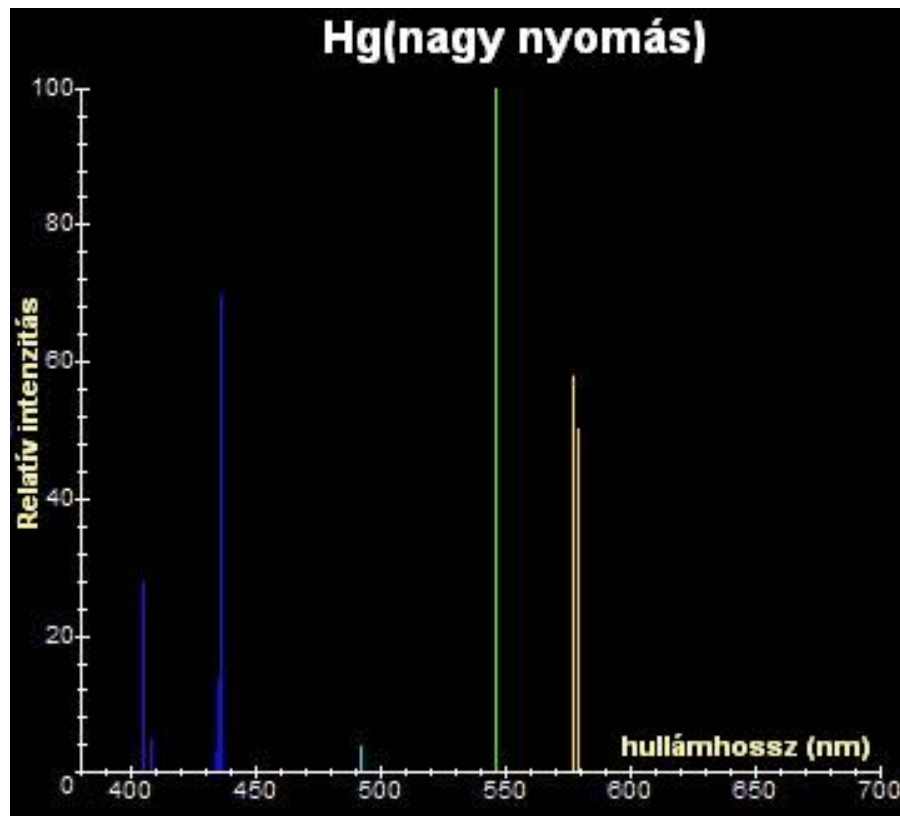
**Pl.: Na $\rightarrow$ 10-1000 nm között 4672 vonal
a látható tartományban: ~380 vonal**

Példák: K és K⁺ emissziós spektruma

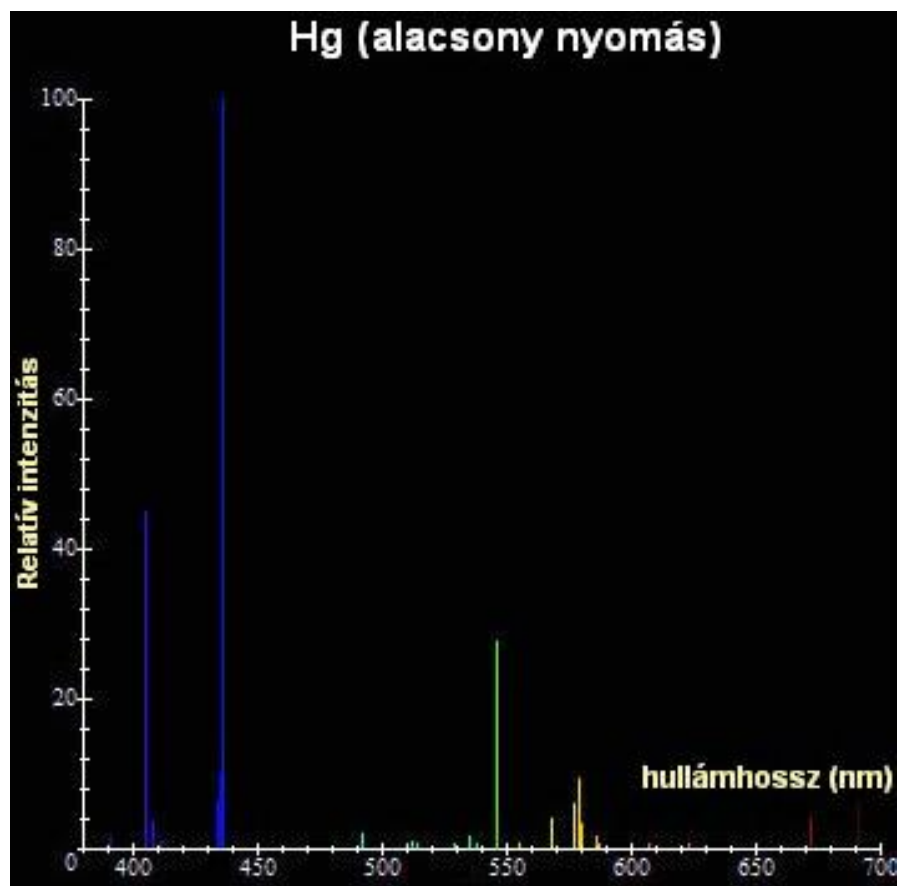


**(A folytonos háttér mesterségesen adták
hozzá a jobb megfigyelhetőség kedvéért)**

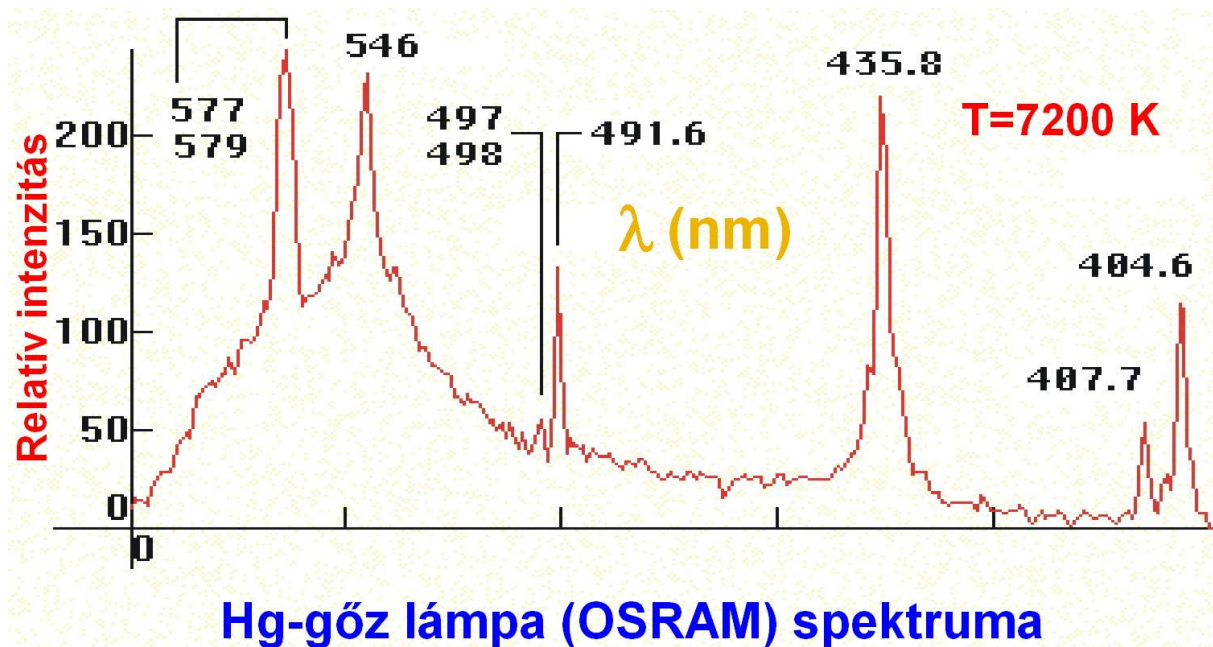
Higanylámpa spektrumának egy részlete:



**Vonalak
helye→
atomfüggő**



**Intenzitás:
Függ a
körülme-
nvektől**



A vonalak mindenütt ugyanott, szerkezet más (kiszélesedés, csúcsnagyságok, folytonos háttér)

Mérendők (mind az abszorpciós, mind az emissziós) spektrumokban:

- csúcsok helye
 - csúcsok intenzitása
 - csúcsok alakja, szélességük
 - folytonos háttér alakja, intenzitása
- széles frekvencia-tartományban**

Az egyatomos gázok, gőzök spektrumaira vonatkozó eredmények összefoglalása:

1. A vonalak helye mind az abszorpciós, mind az emissziós színekben ugyanott $\rightarrow$ jellemző az atomra

$\rightarrow$ ez erős támasza annak, hogy az abszorpciós spektrumokat saját frekvenciával rendelkező csillapított dipólusok kényszerrezgéseként, az emissziós spektrumokat pedig elektromos dipólusok szabadrezgéseként írjuk le

2. Abszorpciós spektrumokban vonalintenzitás $\sim N$

- vonalszélesség $\Gamma_r \sim \frac{\omega_r^2}{c^3} \rightarrow$ ezért főleg sugárzási csillapítás
- Doppler-hatás látható
- van egy frekvencia [*Z kicsinél $\sim 1.6 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$ ($\sim 100\text{-}200 \text{ nm} \sim 10\text{-}20 \text{ Å}$)*], aminél nagyobb frekvenciákra nincsen vonalas szerkezete az abszorpciós spektrumnak; ez különböző atomokra jelentősen eltér, ennél magasabbra: abszorpció a folytonos tartományban (ionizáció)

- a vonalas tartományban sok ω_r , (több nagyságrend lehet)
- sok $\omega_r \rightarrow$ vonalsorozatok választhatók ki ezeknél $\rightarrow \Delta\omega$ csökken $\rightarrow$ a vonalak egy értékhez tartanak

Megfigyelésben: $n \sim 100$ is lehet

- a sorozatokban a határok azonosak, vagy különbözőek lehetnek
kis Z -re $\rightarrow$ határok egy nagyságrendben
nagy Z -re $\rightarrow$ a határfrekvenciák négy nagyságrendben lehetnek
- a mikro- és rádióhullám abszorpciója nem az elektronszerkezet rezgése

3. Emissziós spektrumokban

Kísérlet: vonalas + folytonos tartomány

Emissziónál: több olyan sorozat és folytonos tartomány, ami az abszorpcióban nincs

- az intenzitás: hőmérséklet- és nyomás-függő
- a vonalak helye (ω_r) jellemző az atomra és ugyanott, mint az abszorpciósnál
- a vonalak frekvenciakülönbségeiben ismétlődések láthatók

Felfedezések: spektrum-termek

$$\rightarrow \omega_r = \omega_{\alpha\beta} = |\tau_\alpha - \bar{\tau}_\beta| \cdot 2 \cdot \pi \cdot c$$

$$\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_\alpha, \dots$$

Spektrum-termek:

$$\bar{\tau}_1, \bar{\tau}_2, \dots, \bar{\tau}_\beta, \dots$$

τ -k a termék; egysége 1 kayser = 1 cm^{-1}

$$k' = \frac{1}{\lambda} = \frac{f}{c} = \frac{\omega}{2 \cdot \pi \cdot c} \rightarrow \omega = 2 \cdot \pi \cdot c \cdot [\text{termadat}]$$

A termék egy additív konstansig adottak $\rightarrow$ egyik τ -t 0-nak választjuk

Egy példa: La^{++} ion emissziós spektruma
megfigyelt vonalak [cm^{-1}]

....10885 30043 65097
 12114 31272 68193
 15748 31520 79393
 16977 37236 79641
 28424 40332 80870 82489.....

Ugyanez 4 + 4 mennyiség különbsége:

$\tau \searrow \bar{\tau}$	42015	45111	93232	94461
13591	28424	31520	79641	80870
82347	40332	37236	10885	12114
110210	68193	65097	16977	15748
124504	82489	79393	31272	30043

Több vonal $\rightarrow$ több term

- elvileg végtelen sok
- ilyen mátrixok összegezik a tapasztalatot

**Gyakorlat: nem minden termkülönbség
figyelhető meg**

**Ok: csak dipól átmenet figyelhető meg földi
laboratóriumokban (pl.: kvadrupólrezgés-
sek sugárzása kis valószínűségű)**

**A termek szerinti rendezés: Rydberg – Ritz
kombinációs elv (1908): *a spektrum
frekvenciái vagy összegei, vagy
különbségei más spektrumvonalakénak.***

***(Johannes RYDBERG [1854-1919], svéd
Walter RITZ [1878-1909], svájci***

**Empirikus felismerés: az atomfizika
fejlődésének jelentős állomása → nívók
felismerése az atomokban**

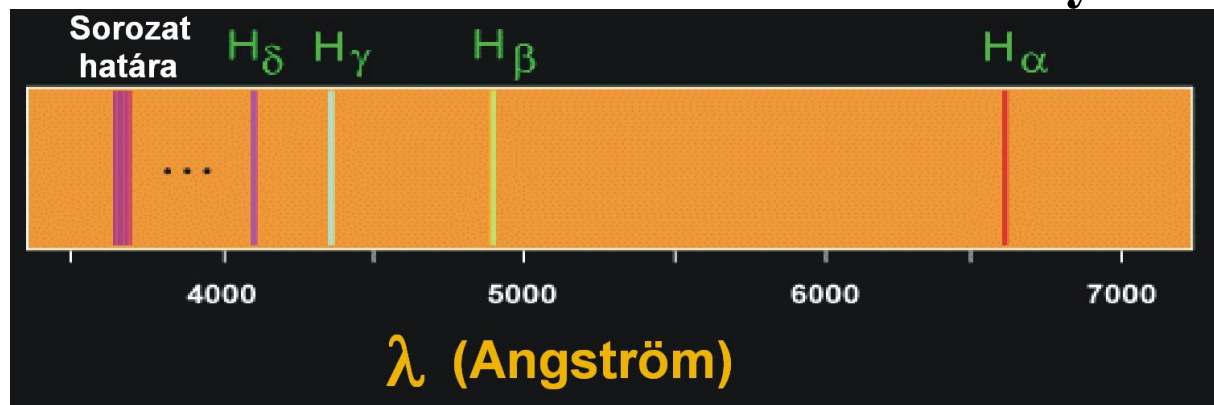
- **Hidrogén spektrum:** $\tau_\alpha, \bar{\tau}_\beta$ **ugyanaz**

$$\tau_n \rightarrow \left[-\frac{2.07 \cdot 10^{16} \text{ rad}}{n^2 \text{ sec}} \right] \rightarrow -\frac{1.1 \cdot 10^5}{n^2} (\text{cm}^{-1})$$

Történetileg: Balmer (1884)

$$\tau_\alpha \rightarrow n = 3, 4, 5, 6, \dots; \bar{\tau}_\beta \rightarrow n = 2$$

Balmer-sorozat $\rightarrow$ látható tartomány

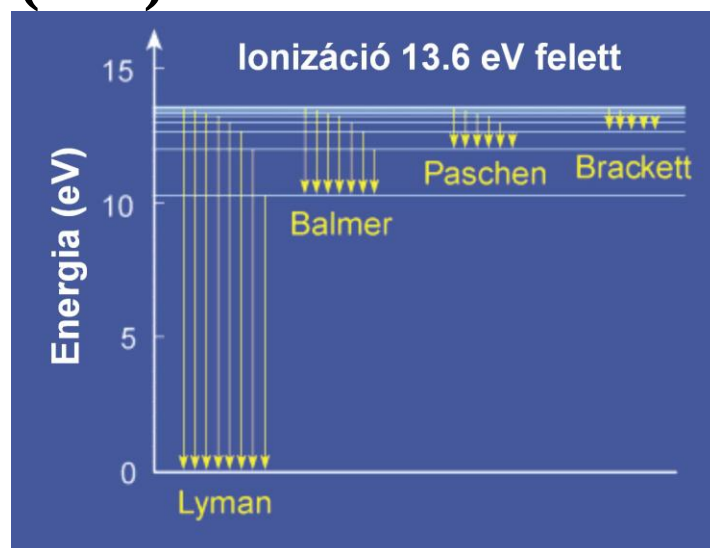


20 év múlva: Lyman-sorozat $\rightarrow$

ultraibolya $\bar{\tau}_\beta \rightarrow n = 1$

Később: infravörös sorozatok:

**Paschen-Bach (n=3), Brackett (n=4),
Pfund (n=5)**



1.4. ATOMI ENERGIAÁLLAPOTOK

Vizsgáljuk: atom – EM sugárzás

atom – elektron ütközés

Energiaátadás: elemi folyamat

- Atomok energiái,
 - EM sugárzás energiája
- diszkrét jelleg

1. A fotoelektromos jelenség szabad atomon

- Fotoelektromos jelenség fémekben

**Jelenség: látható fény elektront távolít el
alkáli fémekben**

Legtöbb anyagnál → ultraibolya fény

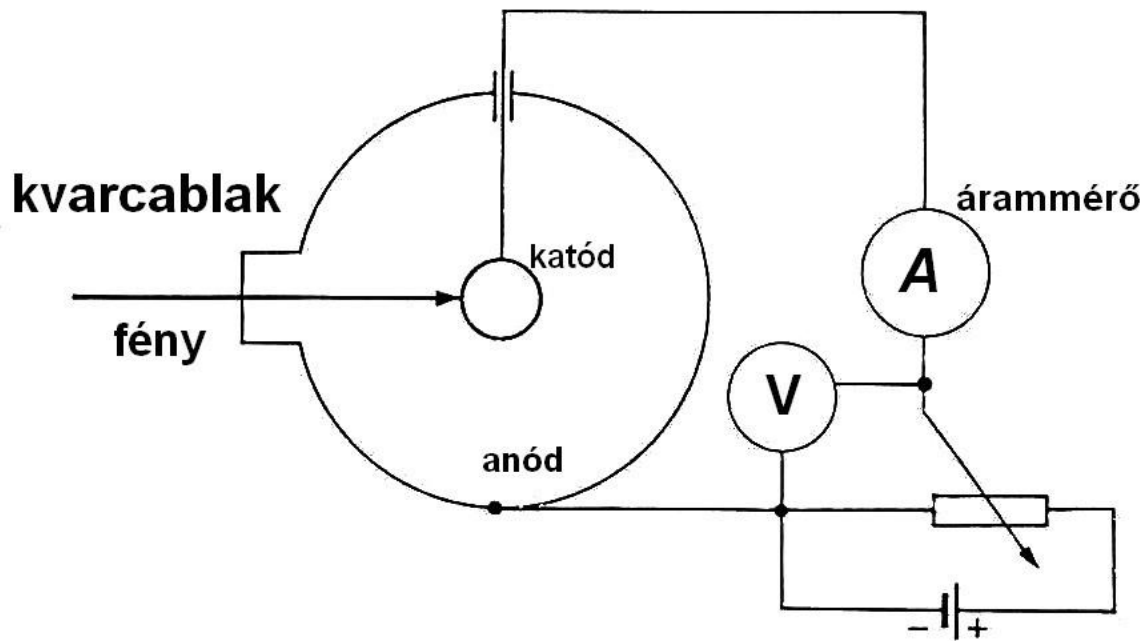
Eredmény:

- fotoelektronok száma intenzitástól függ (arányos)
- elektron energiája: frekvenciafüggő
- ν_0 → legkisebb frekvencia, amelynél elektron még kilép – az anyag fizikai-kémiai állapotától függ

- A felületi fényelektromos jelenség

Jelenség: fény hatására → elektronok

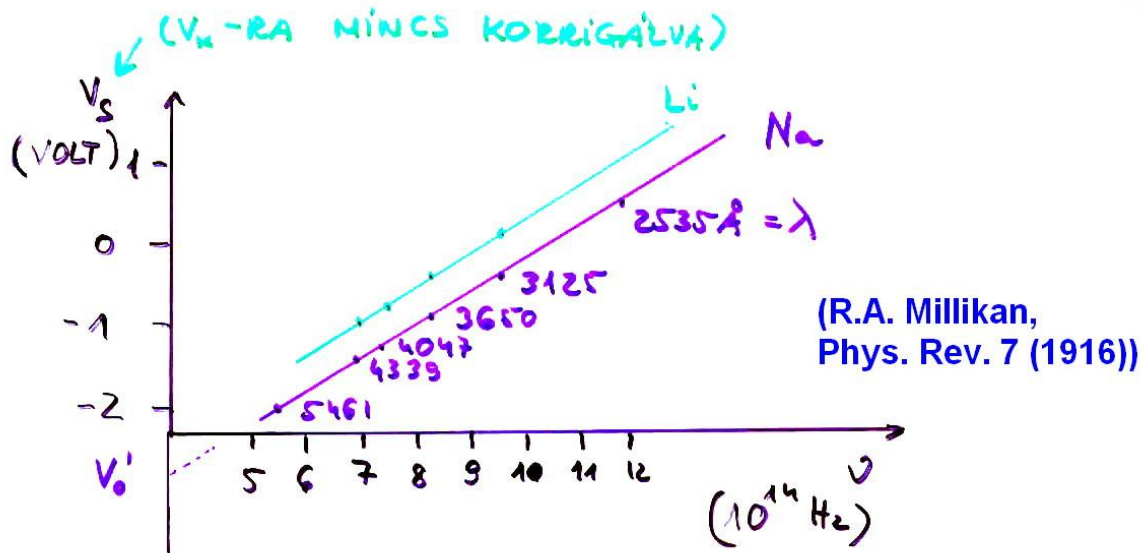
Kísérlet:



Frekvenciák: $v_3 > v_2 > v_1$

A görbék intenzitásfüggetlenek

Az eredeti eredmények Li-ra és Na-ra:



Értelmezés:

$$E = e \cdot V_s + E_e^{\text{kin}} + \Delta k = h \cdot \nu$$

$\swarrow$ kilépési munka
 $\downarrow$ el. kin. en.
 $\searrow$ fotokatódnak adott energia

Ha $\Delta k = 0 \rightarrow E_e^{\text{kin}} \rightarrow \text{maximum}$

$$\rightarrow e \cdot V_0 + e \cdot V_s = h \cdot \nu$$

- V_s független az intenzitástól,
- az elektron azonnal kilép ($\tau_{\text{késés}} < 10^{-11} \text{ s}$)

Becslés: hullámképben → akkumulációs idő

$$W = e \cdot V_0 = \frac{\phi}{n \cdot d} \cdot \tau$$

$$d \sim \lambda \sim 5 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$$

$$W \sim 3 \text{ eV}; n \sim 3 \cdot 10^{22} \text{ el/cm}^3$$

$$\text{innen: } \tau \sim 8 \cdot 10^6 / \Phi$$

$\Phi \rightarrow$ en. áram sűrűség
$d \rightarrow$ behatolási mélység
$n \rightarrow$ vezetési el./cm ³
$\tau \rightarrow$ akkumulációs idő

$$\text{ha } \Phi = 10^{-3} \text{ J/m}^2 \rightarrow \tau \approx 3 \text{ hónap}$$

$$\text{Kísérlet: } 10^{-8} \text{ J/m}^2\text{-re } \rightarrow \tau < 10^{-10} \text{ sec}$$

Fotonhipotézis:

- energia: $E = h \cdot \nu$
- impulzus: $E^2 = m_0^2 \cdot c^4 + p^2 \cdot c^2$
 $m_0 = 0 \rightarrow p = h \cdot \nu / c = h / \lambda$

Fényelektromos jelenség: minden tapasztalat alátámasztja a fotonhipotézist

[Monokromatikus, nagy intenzitású fény

$\nu < \nu_0$ – nál is elektronkilépés

→ ok: elektron egyszerre több fotonnal lép kölcsönhatásba (több fotont abszorbeál)]

Példák:	ν_0	Na	$6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$
		Ni	$12.1 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$
		Au	$11.7 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$

***Albert EINSTEIN [1879-1955], 1905, ezért
kapott Nobel-díjat 1921-ben***

$$E = e \cdot V_0 + e \cdot V_S = h \cdot \nu$$

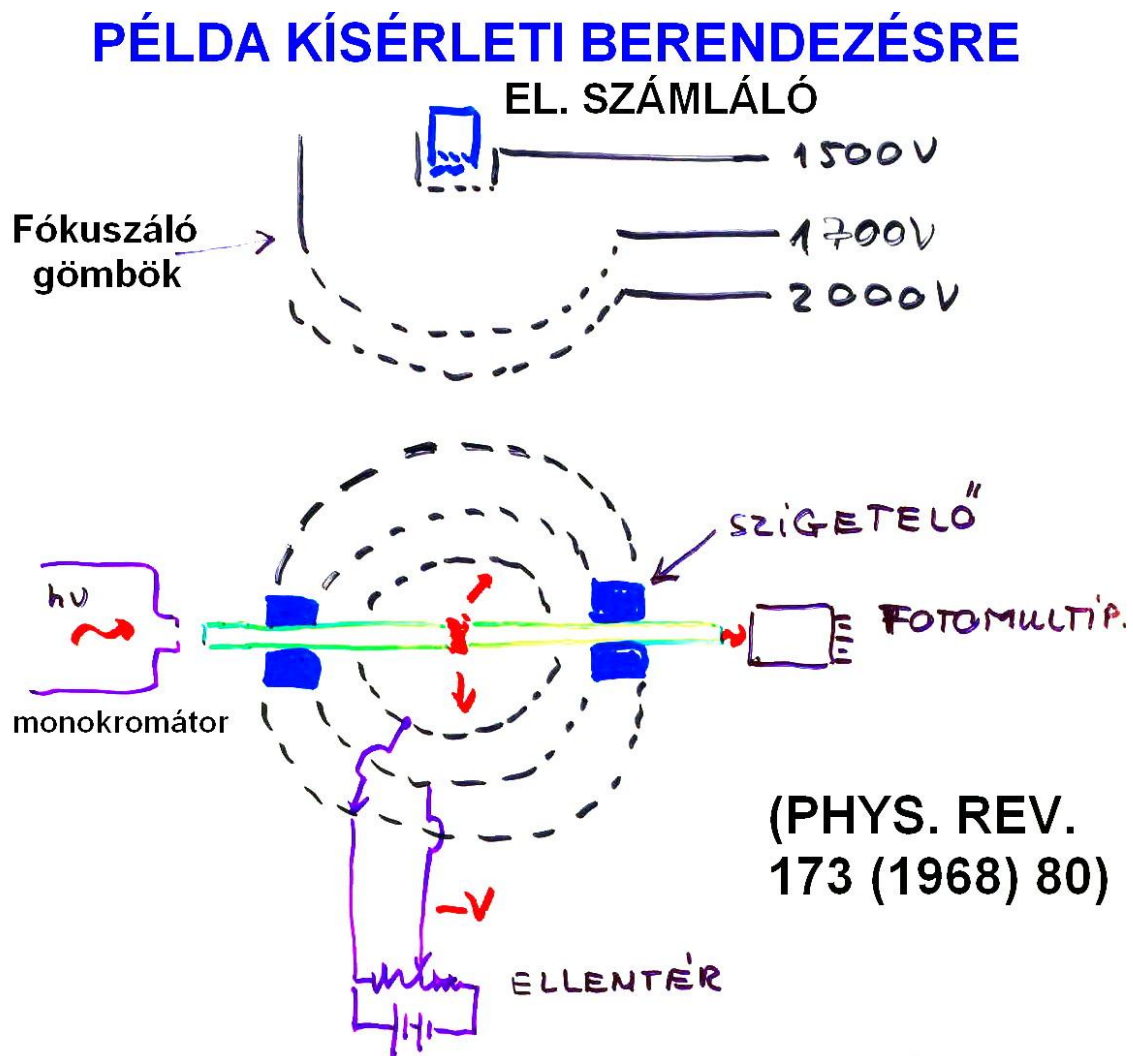
$\swarrow$ $\searrow$
 el. kilép. munka el. kin. energiája
 V_S – zárófesz.; $I=0$

$h \rightarrow$ minden anyagra u. az: Planck-állandó
 $h = 4.136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{sec} = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec}$

- Fotoeffektus: egyatomos gázokban, gőzökben

Kísérletek: később, mint a fémeken
nehéz kísérletek (~ 1960)

→ **küszöbfrekvencia: UV, néha a távoli UV**



Mérendő: az ellentéren átjutó elektronok száma (integrális spektrum)

Differenciális spektrum (E ; $E+dE$ között):
ebből (vagy kis váltófesz + ellentér, stb.)
egyszerűen kapható

Eredmények áttekintése:

- elektronok azonos energiával lépnek ki monokromatikus fénynél → energia-átadás és az EM frekvencia kapcsolata egyértelmű → $E = e \cdot V_0 + e \cdot V_s = h \cdot \nu$
- több kilépési munka, diszkrét értékek $e \cdot V_0 < e \cdot V_1 < e \cdot V_2 \dots$
- fotoelektronok száma arányos az atomok számával → elemi esemény → *elektronok számának mérésével a tér abszolút intenzitása meghatározható*

Mindebből következtetések a fotonokra:

- az EM tér energiája mindig diszkrét értékkel emittálódik/abszorbeálódik
- a sugárzási tér energiája fotonok energiájának összege → kvantált
- a kvantáltság az atomokkal való kölcsönhatásában figyelhető meg
(pl. 40 W-os égő $\sim 10^{20}$ foton/sec)

Ebből → A sugárzási tér az anyag atomos jellegéhez hasonló → hasonló és eltérő tulajdonságok

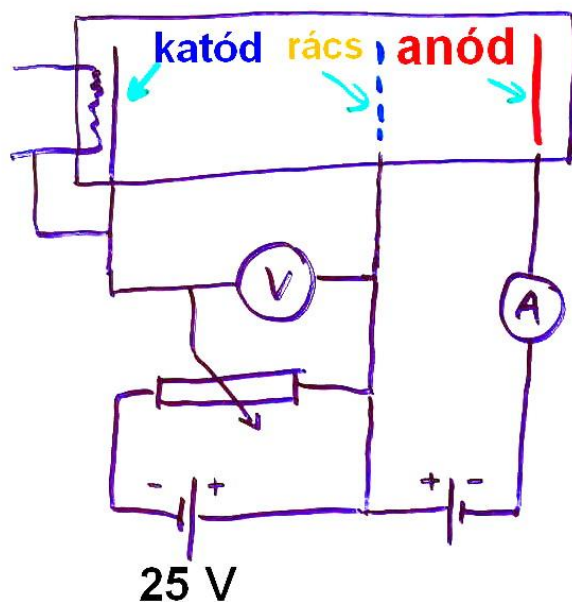
**Max PLANCK (1859-1947); Nobel-díj 1918
energiakvantálás: 1900**

2. Atom – elektron ütközések

Léteznek-e az atomban az energiaszintek?

Válasz: elektronok és atomok ütköztetése

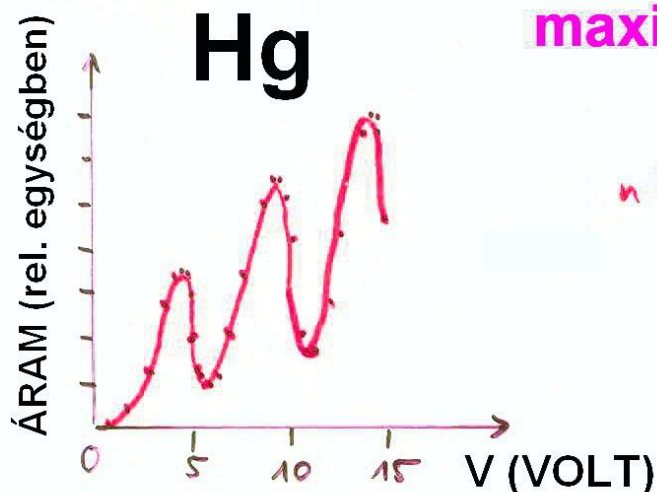
[Frank-Herz] Kísérlet:



csőben: Hg gőz

mérendő: A(V)

Eredmény:



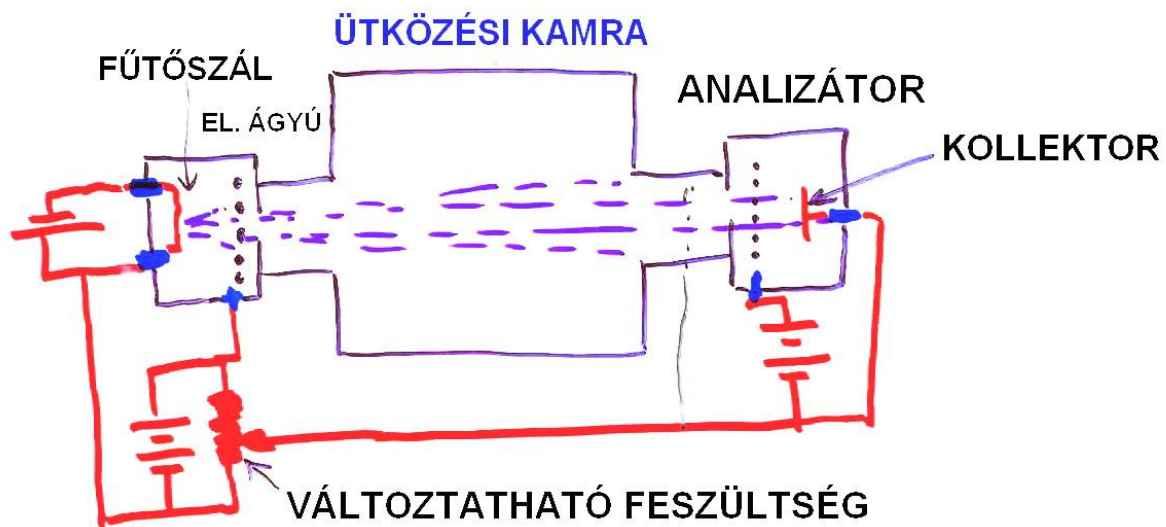
maximumok helye

$$n \cdot 4,9 \text{ V}$$

$n \cdot 4,9 \text{ V} \rightarrow$ fénykibocsátás

$$\lambda = 2537 \text{ Å}$$

Kísérlet vázlat (E_{el.} < 1 keV)



A berendezéssel szemben igény:

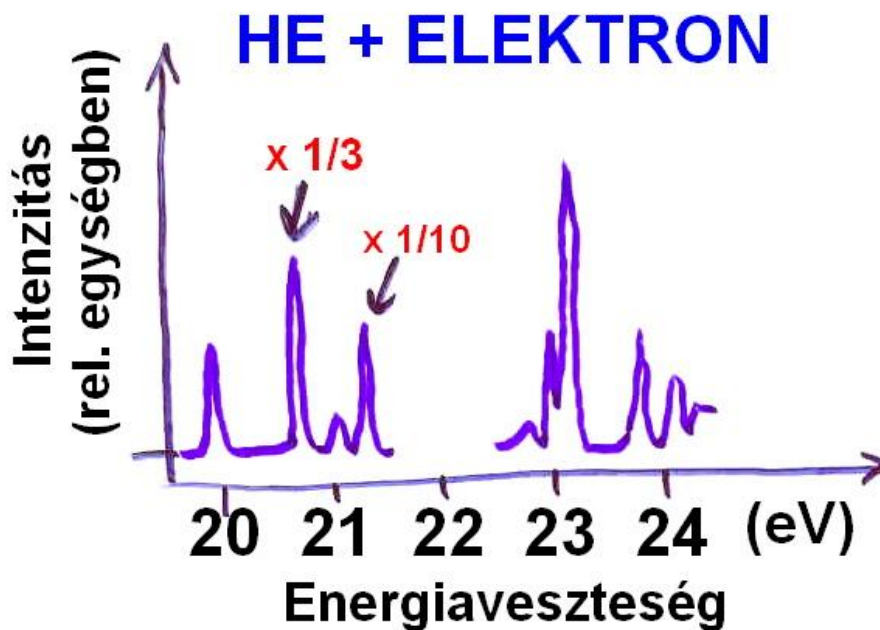
- jól definiált energiájú, intenzív, kollimált elektronnyaláb (elektronágyú)
- ismert aktív térfogatú, monoatomos gázt tartalmazó ütközési kamra; ne legyen többszörös ütközés
(*alacsony < 0.01 Hgmm nyomás [szab. úthossz elektronra ~ 1 cm], inhomogenitást elkerülni*) – nehéz feladat
- analízátor → jó energiamérés

Járulékos berendezés: ütközés egyéb termékeit is mérni (pl. fényt)

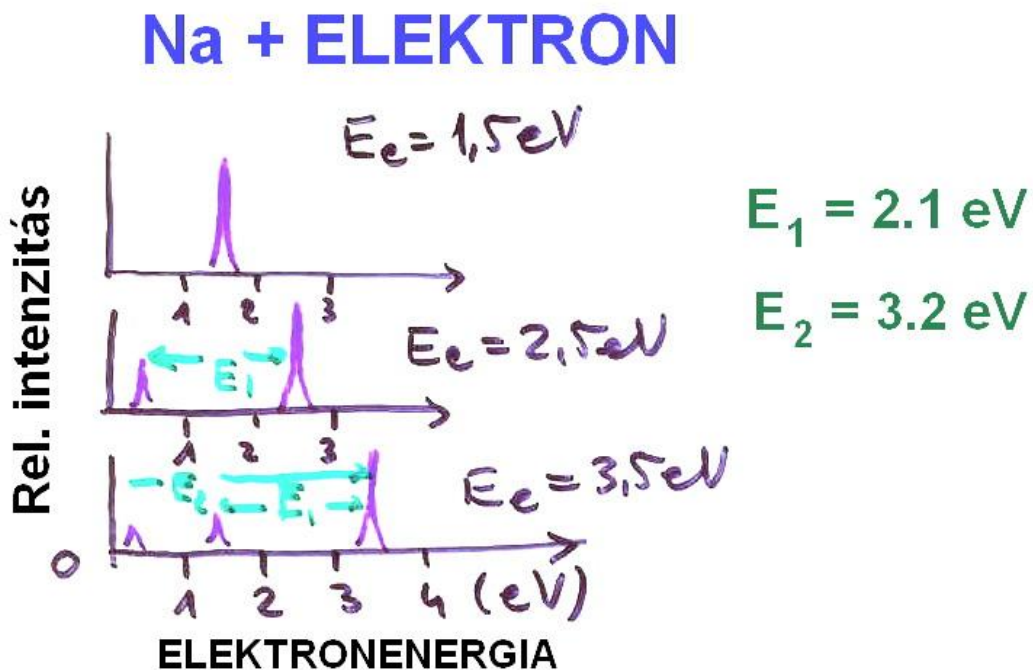
Nehéz jó berendezést készíteni: a szempontok egymásnak ellentmondóak

Példa:

a) mérés:



b) tájékoztató diagram:



Eredmények áttekintése:

- $E_{el} < E_0 \rightarrow$ nincs rugalmatlan elektron
 $E_0 \rightarrow$ jellemző az atomra

Ne 16.6 eV

Cs 1.4 eV

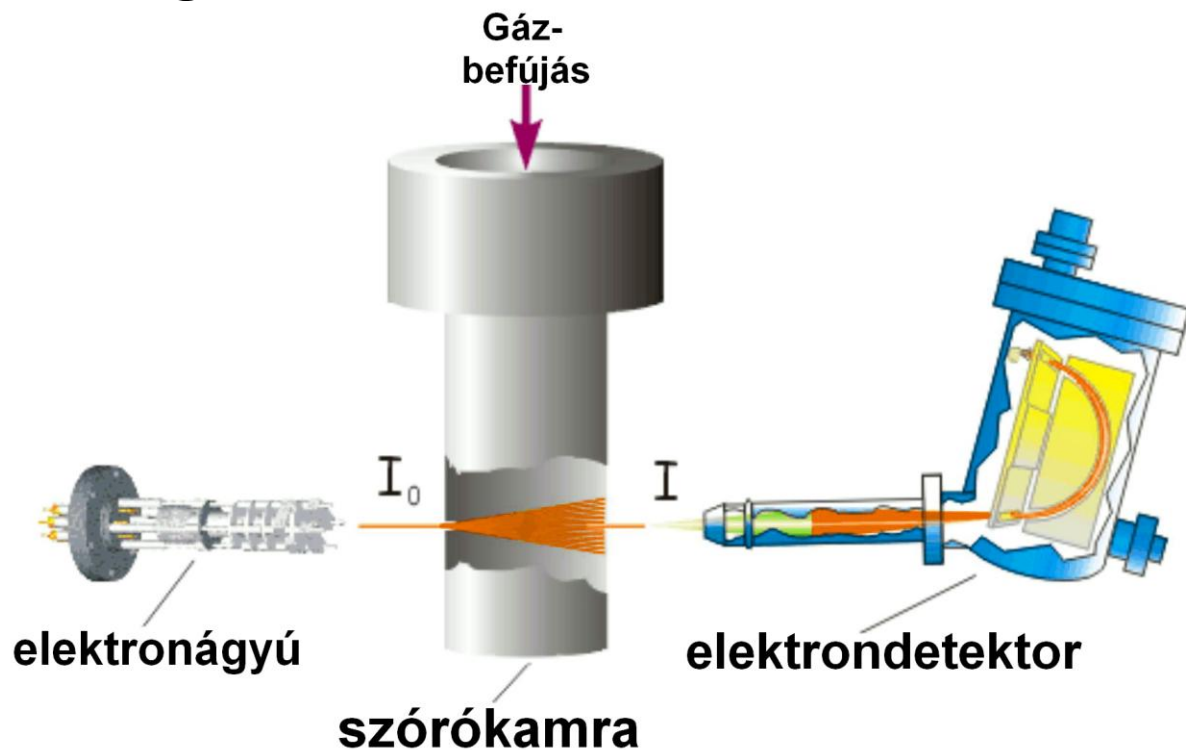
Hg 4.9 eV

- a rugalmatlanul ütköző elektron jól meghatározott energiaveszteséggel távozik $\rightarrow$ az atom vette fel az energiát
 $\rightarrow$ *az atomi energiaszintek léteznek*
- az inelasztikus elektronok száma $\sim$ az atomszámmal $\rightarrow$ elemi folyamat

Elektronütköztetés: kísérletileg korlátozott hatékonyságú

Lehet: más termékek (pl. fény) vizsgálata is.

Példa korszerű elektronszórás-berendezésre
*Alkalmas az elektronok és atomok,
molekulák különböző kölcsönhatásai
abszolút hatáskeresztmetszetének
meghatározására*



Elektronágyú: vékony wolframszál, irányító rendszerrel (2 pár, egymásra merőleges eltérítőlemez) → precíziós nyaláb,
 $I \rightarrow \text{pA} - 100 \mu\text{A}; E \rightarrow 20 \text{ eV} - 5 \text{ keV}$
Gáz: 0.5 mm belépés, $10^{-9} - 600 \text{ mbar/s}$
Kamra hossza: 132 mm
Kamra – el. det. 290 mm, turbomol. pumpa
Detektor: 150° szférikus kondenzátor, elektron channel multiplier

1. Az atomok energiaszintjei

A kísérletekből egyértelműen kitűnik:

→ Az atomoknak meghatározott, diszkrét energiával bíró állapotai vannak → stacionárius állapotok

Stacionárius állapotok: izolált

kvantumrendszerek jellegzetessége → kvantumjelenség

→ az alapállapot felett gerjesztett állapotok az egyes atomokra jellemző energiákon

→ ΔE a gerjesztési energiával gyorsan csökken

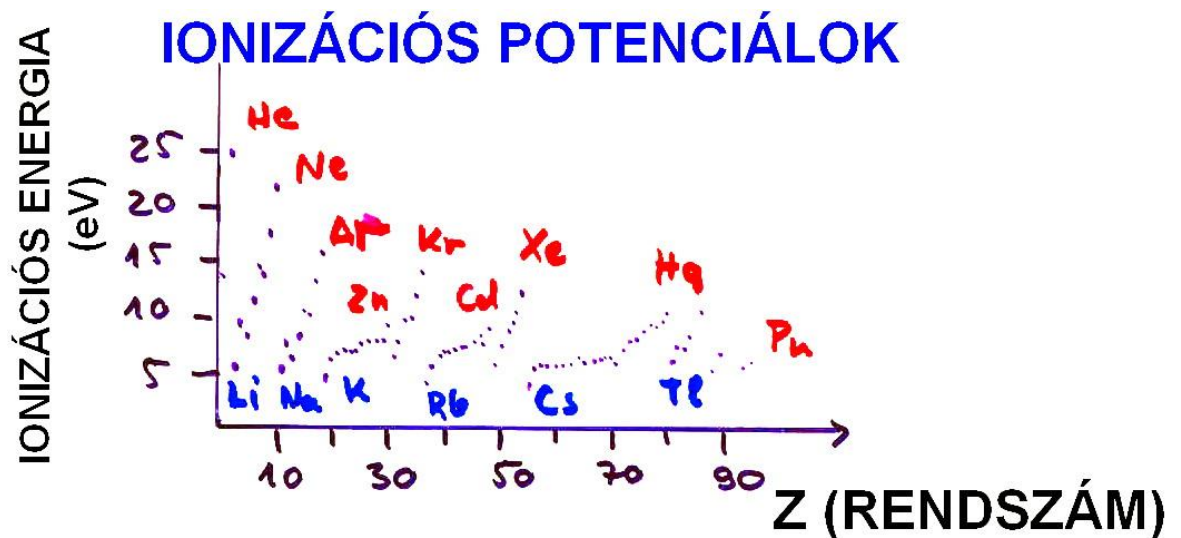
Vizsgálat eszköze: EM gerjesztés, el. szórás

- Ionizáció $E_{\text{el.}} > E_{\text{I}}$ – nél fellép**
 - feszültséggel töltéseket lehet azonosítani, neg. feszültséggel pozitív ionok figyelhetők meg**
 - nő az elektron áram**
 - E nő → ionok száma erőteljesen nő**

Eredmények:

- $E_I = e \cdot V_0$ (gáz fotoeffektusánál megfigyelt érték) $\rightarrow$ el. kötési energiája
- Ha két elektron lép ki $\rightarrow$ folytonos energiaeoszlás ($E_1 + E_2 = E - E_I$)
- E_I értéknél nagyobb E -re $\rightarrow$ új kritikus potenciálok (*más elektronok kiütése, többszörös ionizáció*)
- fénykibocsátások kísérik (*ionizáció + gerjesztés*)

Ionizációs potenciálok (*kísérlet: elemek gőz formájában*)



- Általában 5 és 25 eV között,
- Legkisebb az alkáliaknál, legnagyobb a nemesgázoknál
- fűrészfog-szerű függvény

- **Az atomok sugárzása**

**El. – atom ütközési kamra → fény lép ki
($E > E_1$)**

– **a fény monokromatikus ($E_1 = h\nu$)**

Pl.: Na ($E_{el.} = 3.2 \text{ eV}$) → $5900 \text{ \AA}$ ($5.1 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$)

– **intenzitás $\sim$ atomok számával → *elemi folyamat nyomán lép ki az atomokból***

– **E-t növelve újabb fotonok lépnek ki
→ *újabb sugárzási potenciálok [($E_2 - E_1$); ($E_3 - E_2$) stb.]***

→ ezek az atomi energia-szintkülönbségeknek felelnek meg

Kísérletileg: a legjobb információforrás az energiaszintek tanulmányozására az atomok által kibocsátott fény megfigyelése (*a gerjesztés mechanizmusa ebben kevés szerepet játszik*)