

Diagnosztikai képalkotó eljárások fizikai alapjai

GEFIT303B

8. előadás: Az ionizáló sugárzások mérése. Az atommag felfedezése

Ismétlő kérdések

A Compton-szórás során a röntgensugárzás hullámhossz változása a szóróközeg anyagi minőségének a függvénye, mert a Compton-szórás az atommagon történik.

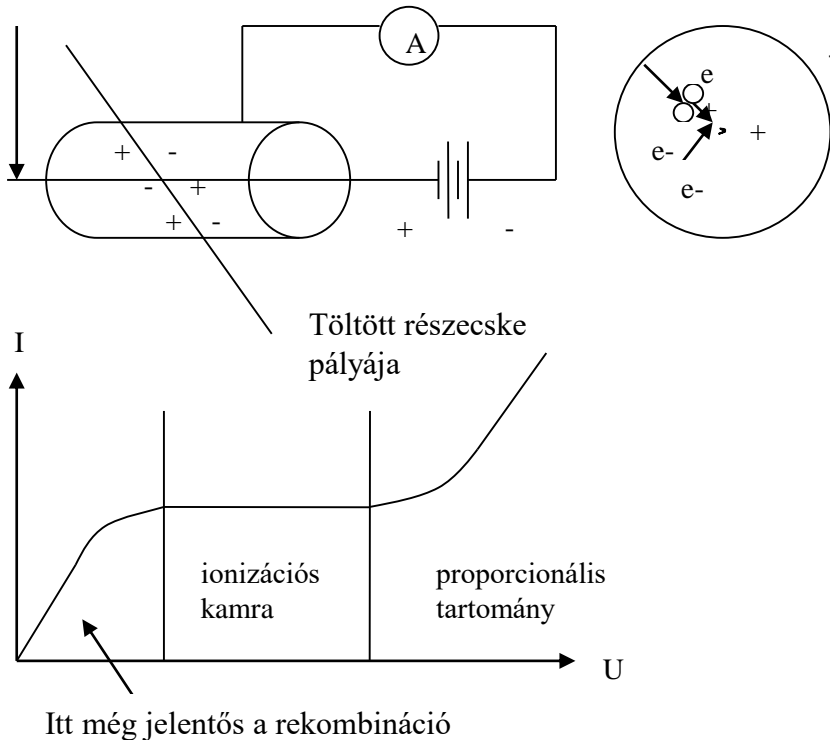
- a) Az állítás hamis, de az indoklás önmagában helyes
- b) Sem az állítás, sem az indoklás nem igaz
- c) Az állítás igaz, de az indoklás nem
- d) Az állítás és az indoklás is helyes, közöttük oki kapcsolat van

Mint tudjuk a gamma sugárzás az anyaggal az alábbi három folyamaton keresztül történhet. Állítsuk a folyamatokat energetikai sorrendbe aszerint, hogy milyen energián dominálnak! Kezdjük a legkisebb gamma energián domináns folyamattal!

- a) Compton-szórás, párkeltés, fotoeffektus
- b) fotoeffektus, Compton-szórás, párkeltés
- c) párkeltés, fotoeffektus, Compton-szórás
- d) Compton-szórás, fotoeffektus, párkeltés

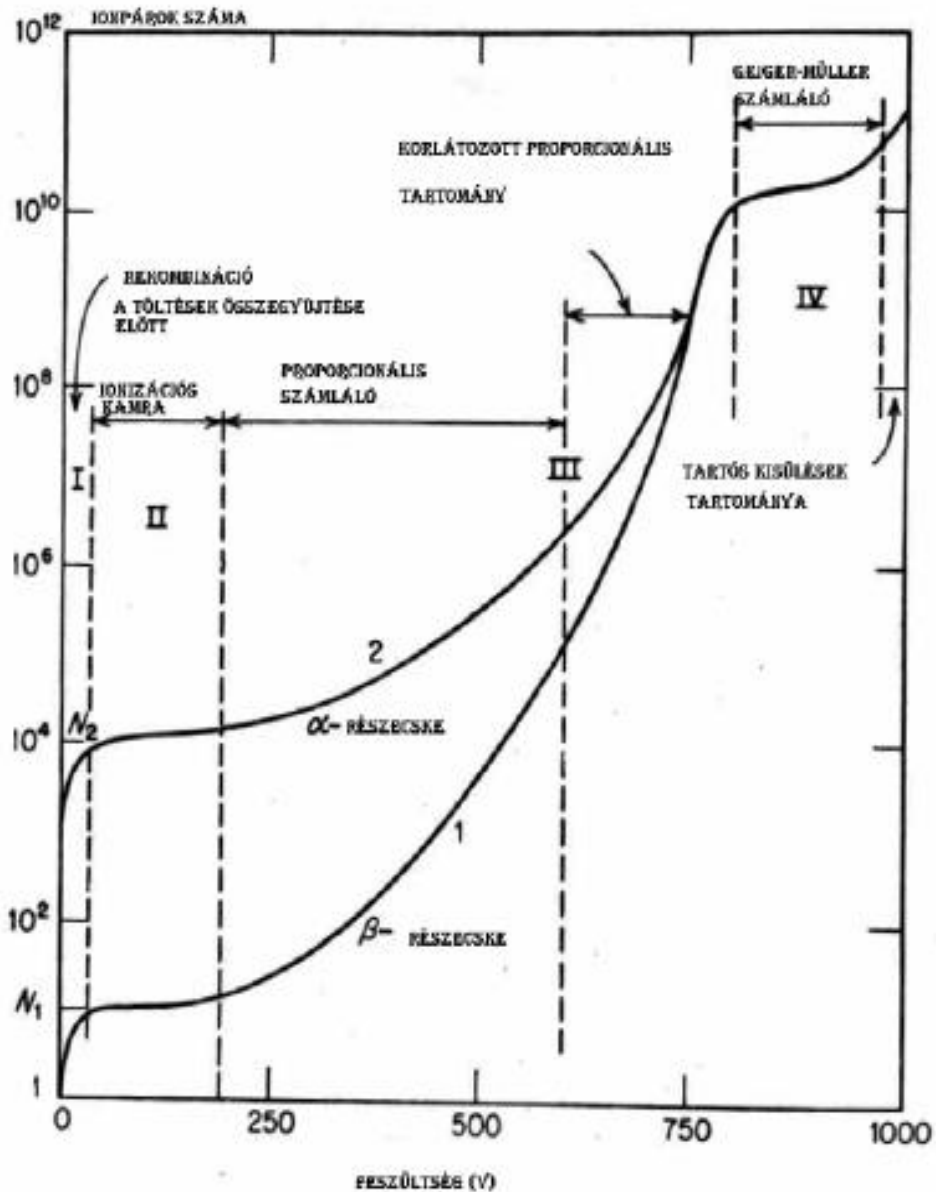
Gáztöltésű detektorok

Felépítése: ezek az eszközök tipikusan hengeres elrendezésűek: középen a vékony szál pozitív potenciálon, a hengerpalást pedig negatív potenciálon.



- A rákapcsolt feszültség hatására az elektronok a középső szál felé indulnak el, a pozitív ionok meg kifelé, csak sokkal lassabban.
- Kis feszültség esetén van esélye annak, hogy egy elektron találkozik egy pozitív ionnal és rekombinálódik (ez az ionizáció fordítottja). Nagyobb feszültségnél az elektronok olyan gyorsan felfutnak a szálra, hogy a rekombinációnak nem lesz esélye.
- Az **ionizációs kamra tartományban** az összes keletkezett iont begyűjtjük. Az igen kicsi ($I = 10^{-12} - 10^{-15} \text{A}$) áramerősséget azonban nagyon nehéz pontosan mérni.
- A hengeres elektródák közötti feszültséget tovább növelve a **proporcionális tartományba** érünk. Ekkor a szál közelében már olyan nagy a térerősség, hogy az elektronok két ütközés között annyira fel tudnak gyorsulni, hogy ionizációra is képesek lesznek. Az ionizáció során keltett elektron újra ionizál, tehát **elektron-lavinák** indulnak meg. A keletkezett pozitív ionok az elektronokhoz képest igen lassúak, lényegében tértöltést képeznek a keletkezési helyükön. Ez lerontja a teret a szál közelében, ami mindenképpen megszakítja a lavinát.
- Tehát már több elektront detektálunk, mint amennyit a sugárzás keltett. De a sokszorozódás még korlátok között marad, az áram még arányos az eredeti részecske által keltett ionpárok számával (proporcionális = arányos).

Gáztöltésű detektorok/2



- A feszültséget tovább növelve a **Geiger-Müller tartományba** (GM cső-tartomány) jutunk, ahol az elektron sokszorozódás ennél is nagyobb és a jel már nem függ az eredeti részecske által keltett ionpárok számától.
- Olyan nagy a jel hogy közönséges elektronikával is detektálható.
- Nemcsak ionizáció, hanem **gerjesztés is** végbemegy => UV fotonokat termel=> a fotonok újabb elektronokat váltanak ki. A fotonok révén **a kisülés áterjed a szál teljes hosszára**, a lavina tehát nem marad lokalizált, mint a proporciónális esetben.
- A pozitív ionok által létrehozott tértöltés azonban előbb utóbb megszakítja a kisülést.
- A kisülés során áthaladt töltés azonban sokkal nagyobb lesz és a cső adataitól függ és nem a az eredeti részecske által keltett ionpárok számától.
- Egy idő elteltével a pozitív ionok megérkeznek a külső falhoz, ahonnan újabb elektronokat tudnak kiváltani. Ezek pedig újraindítják a kisülést. Ez lehetetlenné tenné további részecskék detektálását, tehát ezt mindenképpen meg kell akadályozni. Erre szolgálnak a **kioltógázok**.

Gáztöltésű detektorok/3

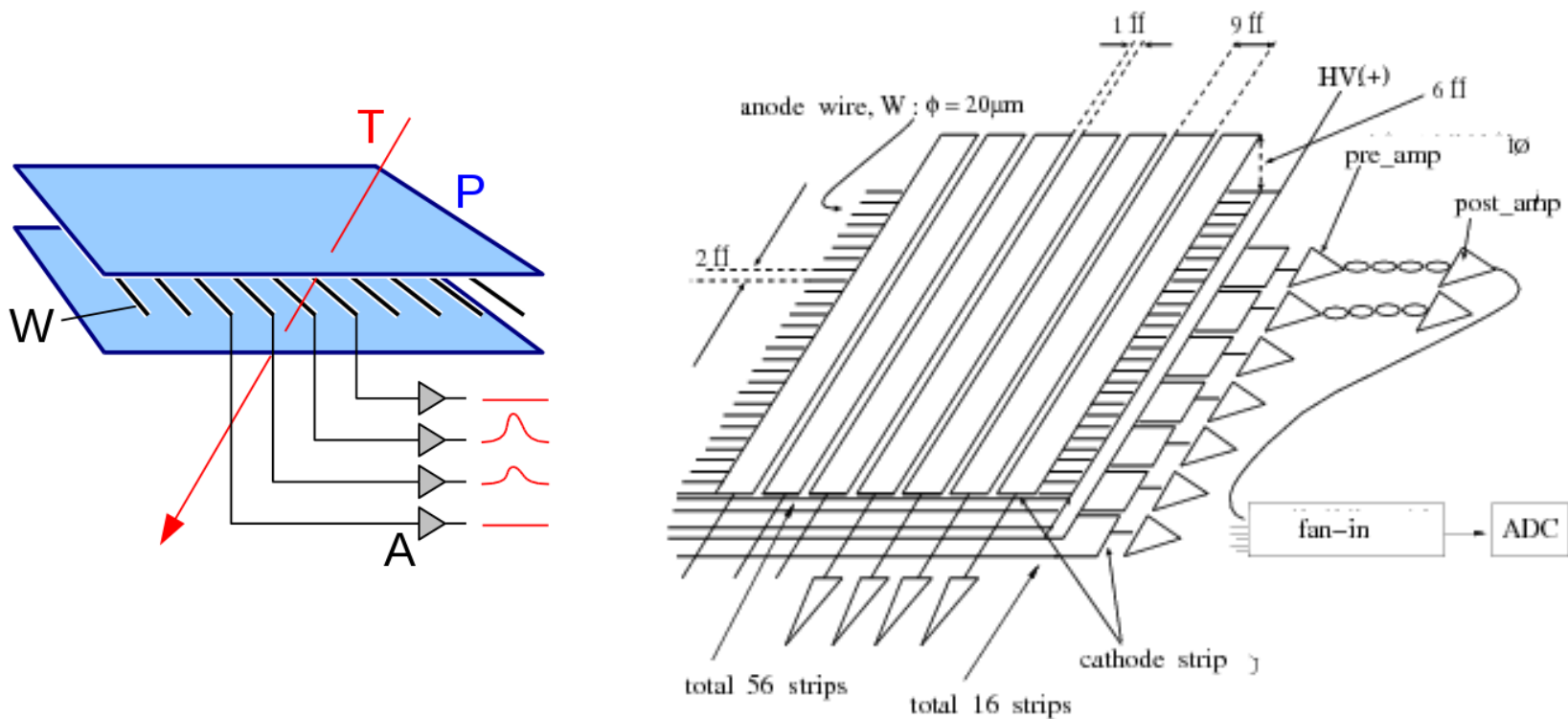


Ez a dózismérő proporcionális számlálót tartalmaz. A processzor egy jel nagyságtól függő értékkel növeli az elnyelt dózis értékét és kiszámítja a mozgó átlagot is. Csak gamma sugárzást tud mérni.

Ez az eszköz egy végablakos GM-csövet tartalmaz. Az ablakot fedő fólián a béta sugárzás is át tud menni, tehát a gamma mellett ezt is méri. Különböző rétegvastagságú anyagokon át haladó sugárzás gyengülését tanulmányozzuk vele.

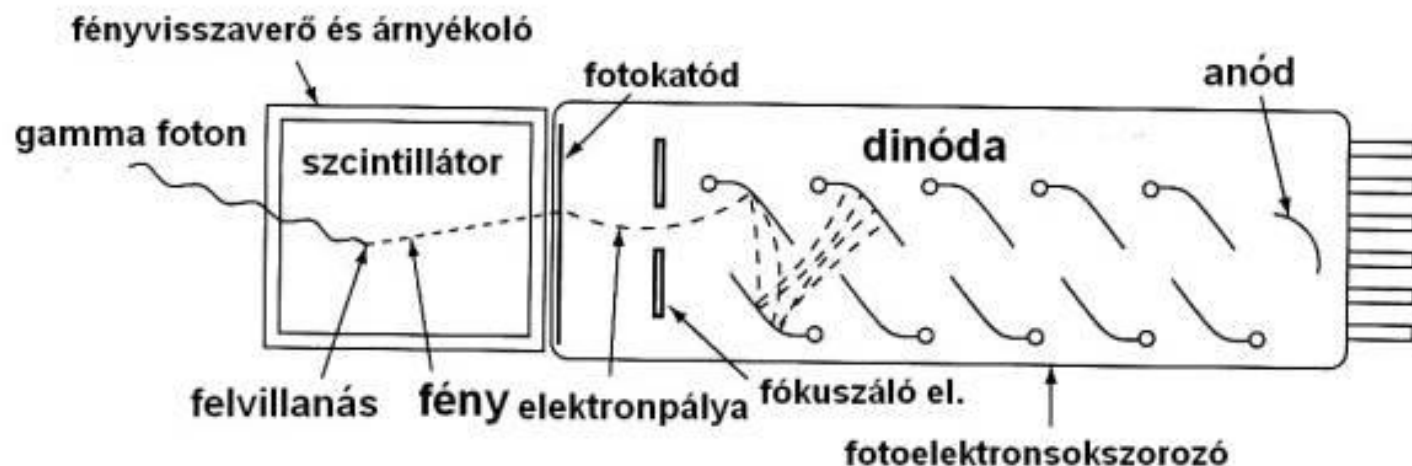


Sokszálas proporcionális kamrák (MWPC)



Meghatározható velük a detektálás helye és a detektorban leadott energia is. A CERN nagy detektor rendszereibe ilyenek is beépülnek.

Szcintillációs detektorok



A szcintilláció bizonyos szilárd anyagok sugárzás hatására történő világítását jelenti. Ez mikroszkópiusan inkább villódzás, a részecske detektálódása helyén egy szabad szemmel alig látható felvillanás.

Ezek milliói rajzolják ki a katódsugár-csöves tv (CRT) képernyőjén a képet

Történelmi előzmények: C. Röntgen, rádiumos óraszámplap

A korszerű szcintillációs detektorok három részből állnak:

- 1, Szcintillátor anyag: ebben keletkezik az ionizáló részecske hatására a fényfelvillanás. Ennek anyaga a történelmi ZnS (cink-szulfid) helyett lehet pl. NaI(Tl) kristály. Ma gyakran használnak szerves, folyadék és műanyag szcintillátorokat is. A keletkezett, tipikusan néhány ezer fotont a fényvisszaverő burkolatnak a fotokatódra kell vezetnie.
- 2, Fotokatód: az üvegbúra belső oldalára felvitt vékony réteg fotoeffektussal (fényelektromos jelenséggel) a fotonokból elektronokat „gyárt”. Egy foton max. egy elektront kelthet, de veszteségek mindig vannak. Tehát a fotokatódot (a kristállyal átellenes oldalon) néhány ezer primer elektron hagyja el, számuk a kezdeti fotonok számánál mindenképpen kisebb.
- 3, Elektronsokszorozó: szekunder elektronokat emittáló dinódák rendszere. Egy becsapódó elektron több szekunder elektront kelt. Ezek a következő dinóda felé gyorsulnak, mivel azt pozitívabb potenciálra kapcsoljuk. Ott a becsapódó elektronok mindegyike többszöröződik ismét, tehát az anód felé haladó elektronok száma exponenciálisan nő. Az anódra végül több milliárd elektron érkezik, ami már jól mérhető elektromos impulzusnak felel meg

Szcintillációs detektorok/2

A Fizikai Tanszék szcintillációs mérőfeje

Az alsó kiszélesedő részben van a NaI(Tl) kristály

A fotokatód valahol az elkeskenyedésnél lehet, fölötte a fényes részben van az elektronsokszorozó. Két dinóda között $\sim 100\text{-}200\text{V}$ feszültség van, tehát az elektronsokszorozóra kapcsolt feszültség kV nagyságrendű.

Ez az egész fém házban van, ahová kívülről fény (és vízpára) semmiképpen sem juthat be.

Fölötte a szürke részben van az elektronika, amely előállítja a dinódákra jutó feszültséget, másrészt erősíti az anódról jövő impulzust



Félvezető detektorok

A félvezető detektorok olyan ionizációs kamráknak tekinthetők, amelyekben az ionizáció szilárd félvezető anyagban jön létre.

A legjelentősebb előnyei a szilárd anyag nagy sűrűsége (gázokhoz képest), az egy töltéshordozó pár keltéséhez szükséges energia kicsinysége (~ 1 eV), ezáltal a keltett töltéshordozók nagy száma.

A félvezető kristályon áthaladó töltött részecske által keltett elektron-lyuk párok (a gázokban keletkező elektron-ion párokhoz hasonlóan) rákapcsolt elektromos mezővel összegyűjthetők.

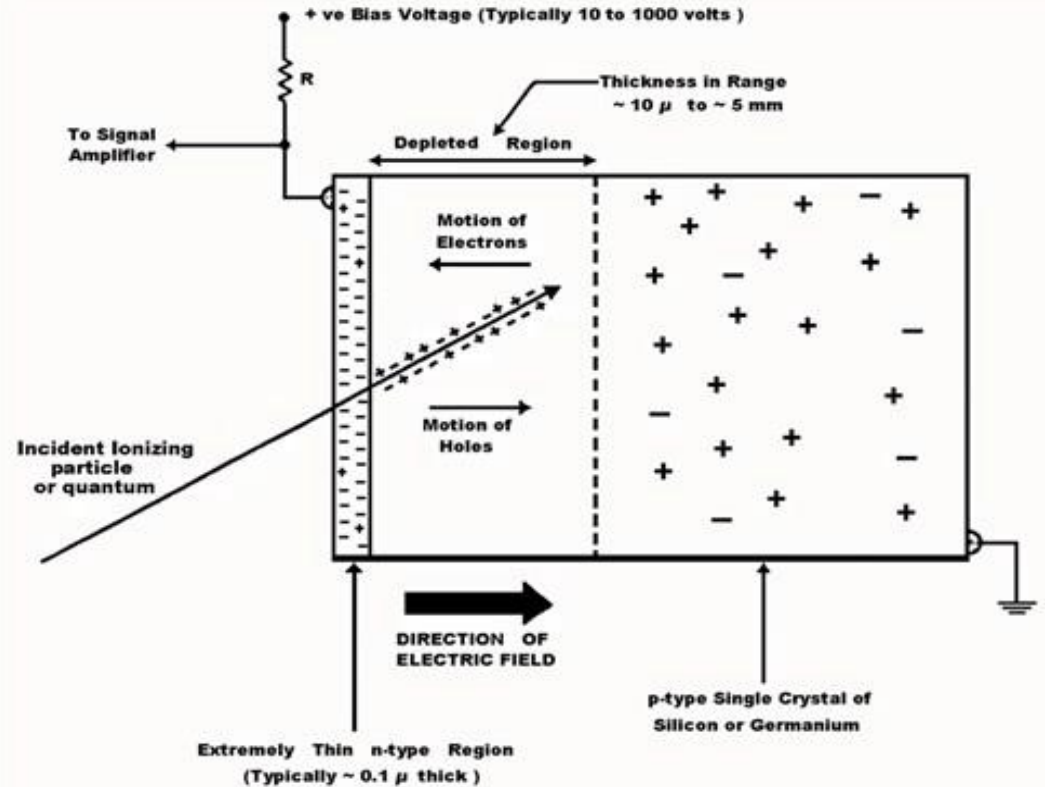
Legnagyobb probléma az, hogy szobahőmérsékleten nagy a félvezetők fajlagos vezetőképessége, ezért működés közben mindenképpen hűtésre szorulnak. Ha ezt nem tesszük, akkor a hőmozgás által keltett töltéshordozók árama elnyomja a töltött részecske által keltett töltéshordozók áramát.

Legfontosabb típusaik:

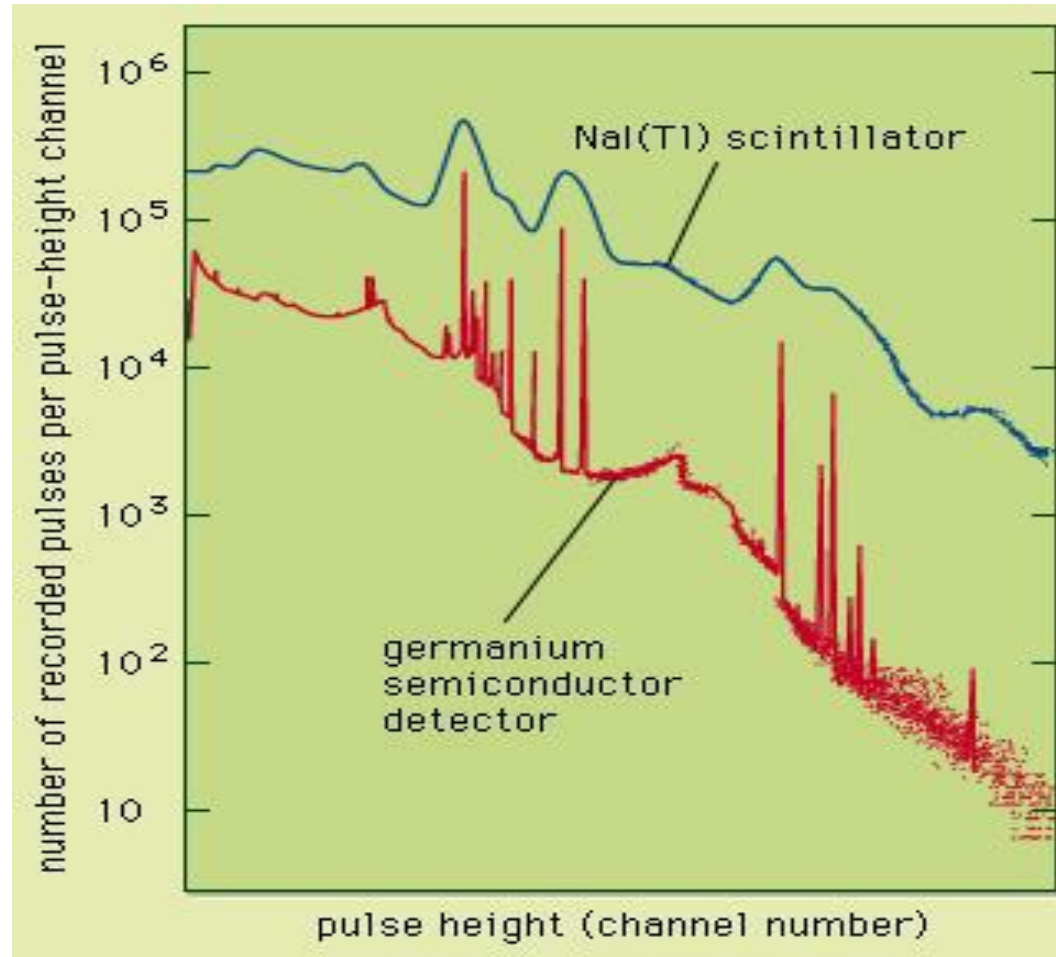
- Si(Li) Li-mal driftelt Si
- Ge(Li) Li-mal driftelt Ge
- HP Ge nagy tisztaságú Ge

A Ge(Li) detektorokat üzemben kívül is folyékony nitrogénben kell tárolni, anélkül tönkremennek. Előnyük hogy egy töltéshordozó pár keltéséhez igen kis energia szükséges (~ 1 eV), az energia feloldás sokkal jobb.

A Si(Li) detektoroknak előnye az, hogy nem kötelező állandóan hűteni.



A szcintillációs és a félvezető detektorok összehasonlítása



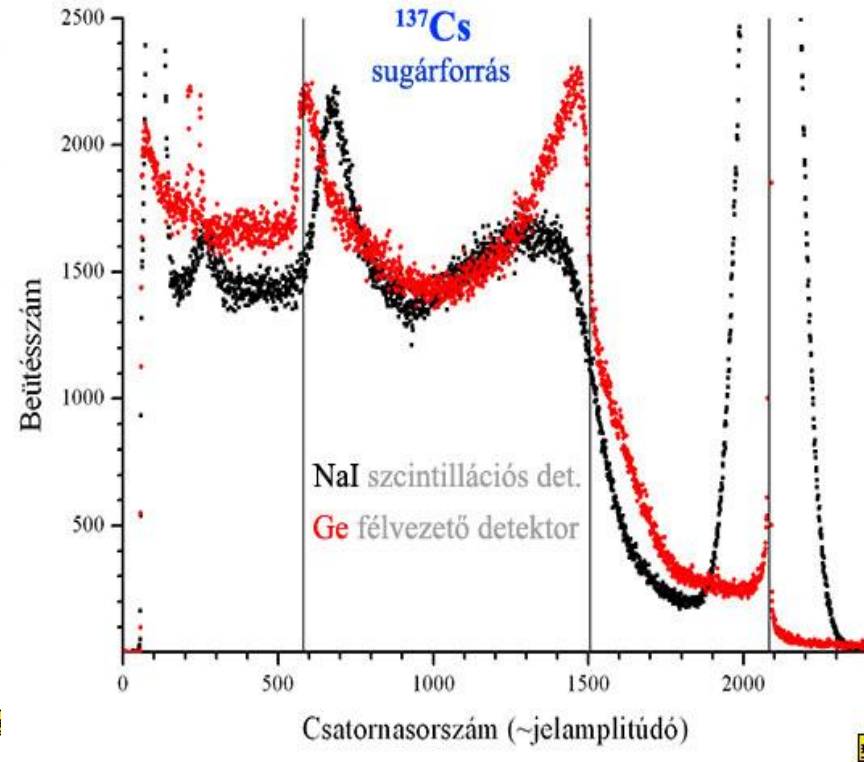
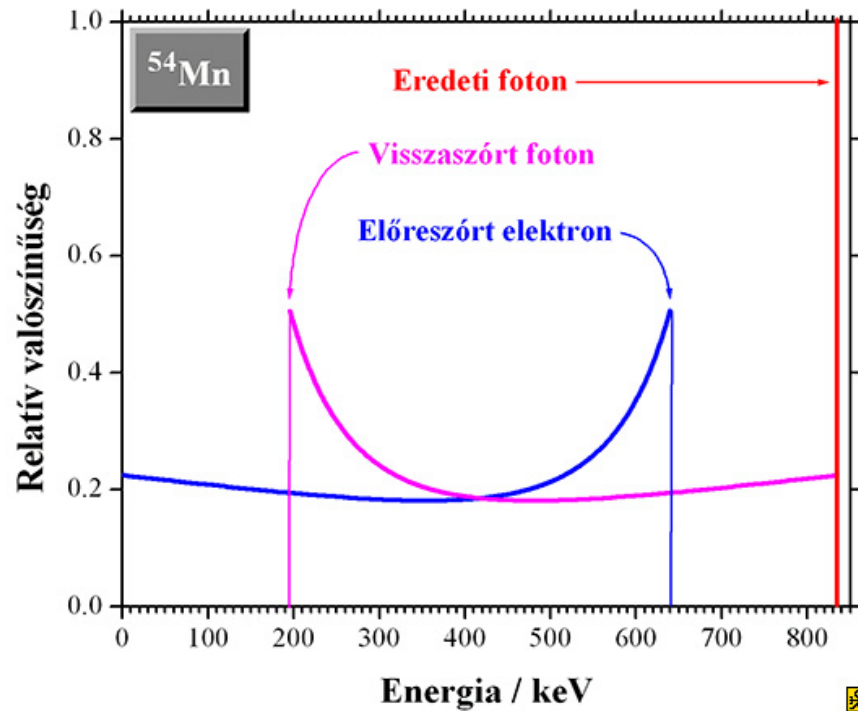
A félvezető detektornak összehasonlíthatatlanul jobb az energia felbontása...

DE: a szcintillációs detektornak jobb a hatásfoka

...és sokkal olcsóbb

A gamma spektrumok szerkezete

A görbék a Klein-Nishina formula (Leo 2.109) alapján számítottam.



A fotoeffektus és a Compton-szórás
nyomai a spektrumban



Ezt az **expanziós** ködkamrát használta *Szalay Sándor* és *Csikai Gyula* a neutrínó kimutatására

A ködkamrák

Az els ködkamrát *Charles Thomas Rees Wilson* (1869-1959), skót fizikus fejlesztette ki.

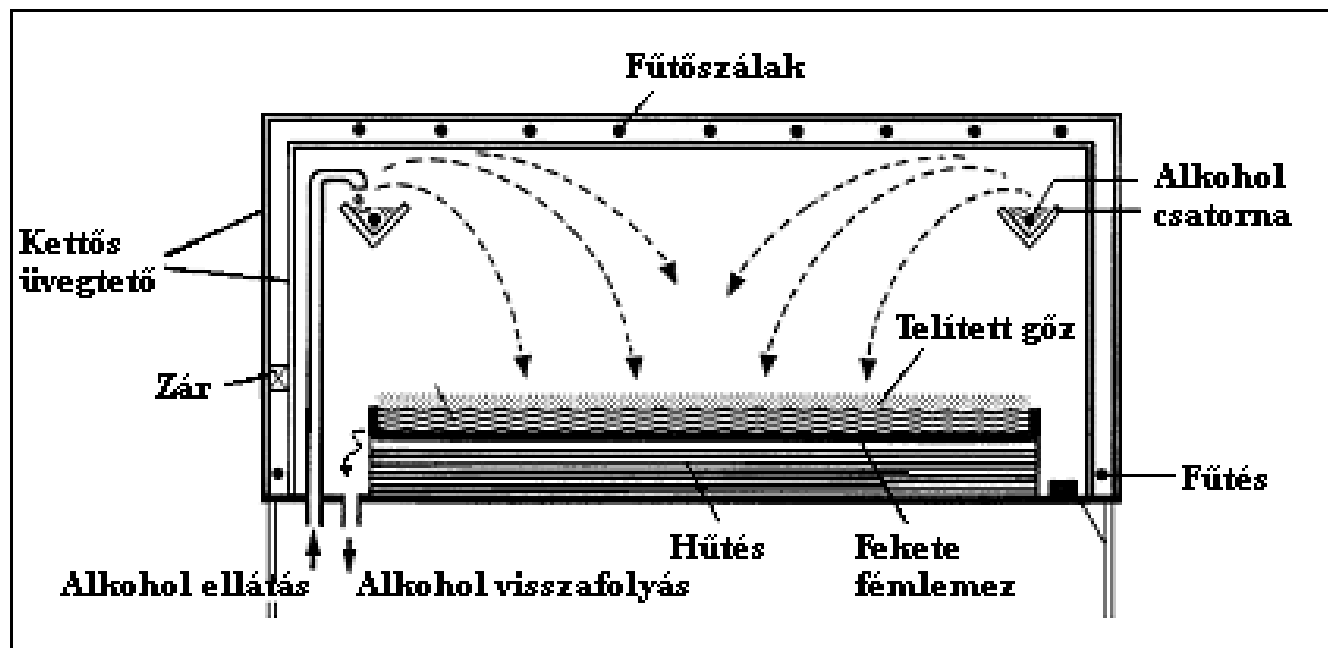
Wilson (*Arthur Comptonnal* megosztva) kapott fizikai Nobel-díjat 1927-ben a ködkamrával kapcsolatos munkájáért.



Neutrínó visszalökődési kísérlet.

A hosszabb nyom a béta-részecskének, a rövid vastag nyom pedig a visszalökött ${}^6\text{Li}$ magnak felel meg.

Diffúziós ködkamra



Az ionizáló sugárzás pályája mentén a keletkezett ionok **ködmag**ként szolgálnak és megindul rajtuk a ködképződés.

A keletkezett apró folyadékcseppek kirajzolják a **töltött ionizáló részecske pályáját**.

Ehhez túltelített gőz szükséges, amelyet például nagy hőmérsékletkülönbségben fellépő **diffúzió**val hozhatunk létre.

Az eszköz két fő egységből áll: a szerkezeti elemeket (hűtőelem, áramellátó, alkoholtartály, alkoholpumpa, programozható időkapcsoló) tartalmazó részből és a megfigyelő részből.

A megfigyelő kamrarész alja fekete fémlemezről (45cm × 45cm) készült, amelyet egy hűtő -30 °C-ra, vagy az alá hűt le. A megfigyelő rész kettős üvegtetőből áll, melyek között fűtőszálak helyezkednek el. Ezek melegítik a kamra felső üveglapját, és ezáltal megakadályozzák a lecsapódást. A fűtőszálak nagyfeszültségen vannak, hogy elektromos mezőt hozzanak létre, ami az ionok kivonását (vonzását) eredményezi.

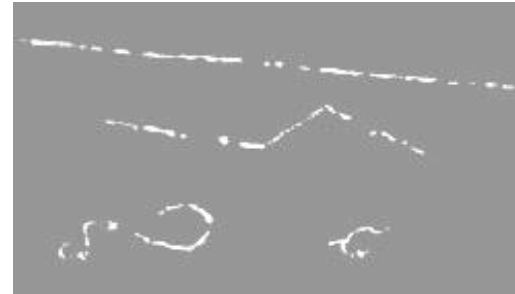
Felül, az üveg oldala mentén helyezkedik el az elektromosan melegített alkohol csatorna. Izopropil-alkohol (propanol) kering a csövekben, ami belecsepeg a csatornába. Az alkohol elpárolog, majd szétterjed a kamra felsőbb, melegebb részéből a hidegebb rész felé. Ott az alkohol apróbb cseppekben lecsapódik, és a fölösleg visszafolyik a tartályba. A diffúziós ködkamrában a részecskék különböző nyomokat (ún. „ködfonalakat”) hoznak létre, melyek már az emberi szem számára is láthatók.



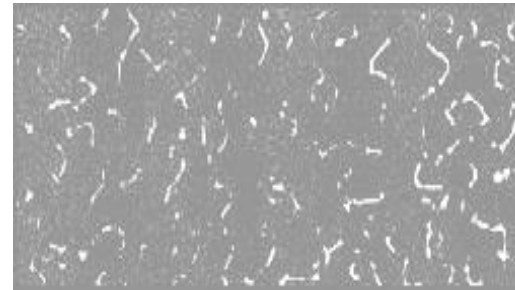
Az **alfa-részecskék** rövid, vastag, egyenes nyomot hagynak a ködkamrában. A teljes energiájukat (5-7 MeV) néhány cm-en adják le, eltérülésük ritka jelenség.



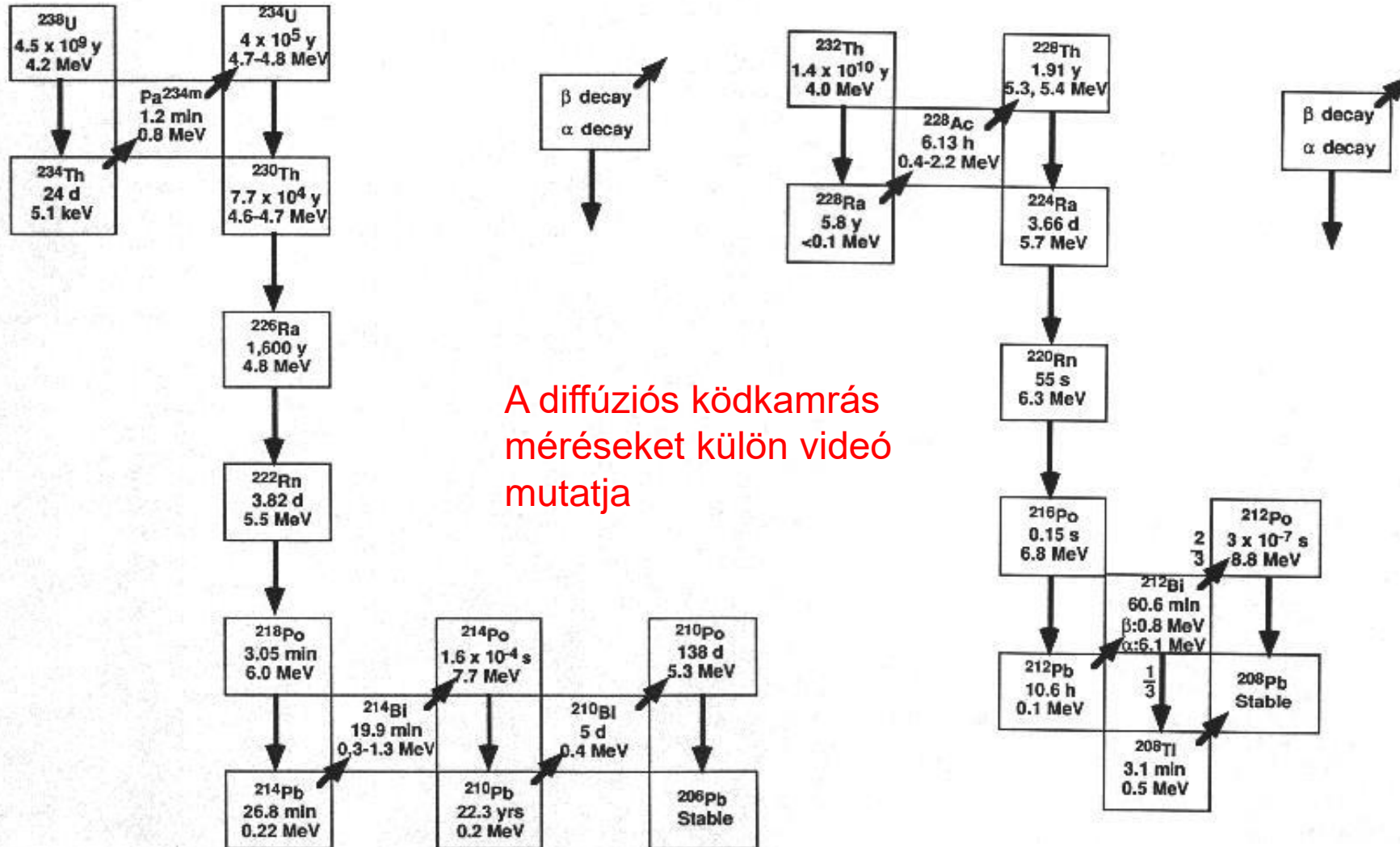
A **béta-részecskék** (elektronok) nyoma vékonyabb és hosszabb. A kis elektronok a lefékezésük során gyakran el is térülnek.



A **gamma-fotonok** nyoma közvetlenül nem látható. Azonban bármelyik atommal kölcsönhatnak a kamrában. A keletkezett foto- és Compton-elektronok a béta-részecskékhez hasonló nyomot hagynak.



Az urán-sor és a tórium-sor



Ellenőrző kérdések

Párosítsuk össze a sugárvédelemben használt műszereket és a velük végzett méréseket!

- | | |
|----------------------------|--|
| a) proporcionális számláló | 1) ionizáló részecskék pályavonalának láthatóvá tétele |
| b) szcintillációs számláló | 2) sugárzás gyengülése anyagon történő áthaladás során |
| c) diffúziós ködkamra | 3) dózismérés |
| d) GM-cső | 4) gamma spektrum felvétele |

Megoldás: a3, b4, c1, d2

Mi nem jellemzi a gáztöltésű detektorok Geiger-Müller számláló tartományát?

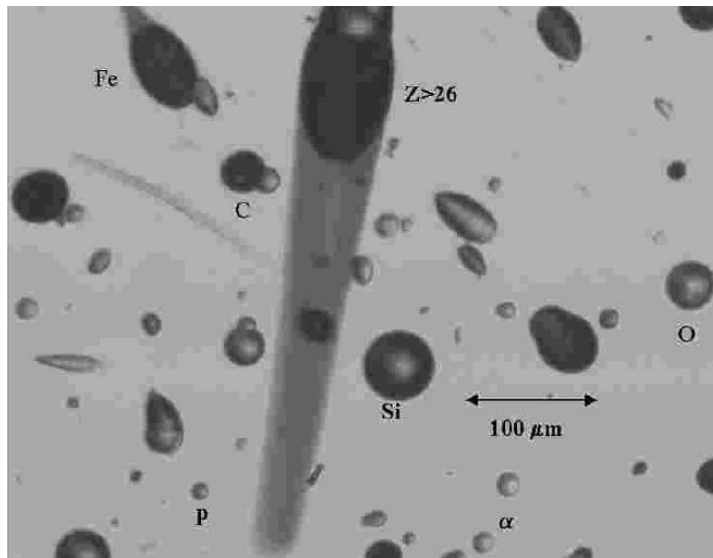
- a) A csőfeszültség nagyobb, mint a proporcionális tartományban
- b) Az elektron lavinák a cső teljes hosszában beindulnak
- c) Az áramimpulzus nagysága arányos a kezdeti ionok számával
- d) A pozitív ionok által létrehozott tértöltés megszakítja a kisülést

További detektorok

- **Szilárdtest nyomdetektor:** Egyes szigetelőkben (pl.: cellulóz-nitrát) az α - részecskék pályája mentén az anyag „szétrobban”, csatornácskák alakulnak ki, amelyek nem láthatóak, de maratással láthatóvá tehetők.

Az atomi méretű (10-30nm) csatornácskák 1000szeresükre maratva μm tartományba esnek, amely már mikroszkóppal megfigyelhető.

Különböző nyomdetektor és abszorbens rétegekből felépített szendvics elrendezésekkel különböző sugárzástípusok kimutatására optimalizálható.



Nyomdetektorról készített felvétel (400-szoros nagyítás), ahol a kémiai kezelés után megjelenő nyomok jól illusztrálják a kozmikus részecskék sokféleségét.

Termolumineszcensz doziméter (TLD)

A termolumineszcencia során melegítés (de még nem izzás) hatására különböző kristályos szerkezetű anyagok fényt bocsátanak ki .

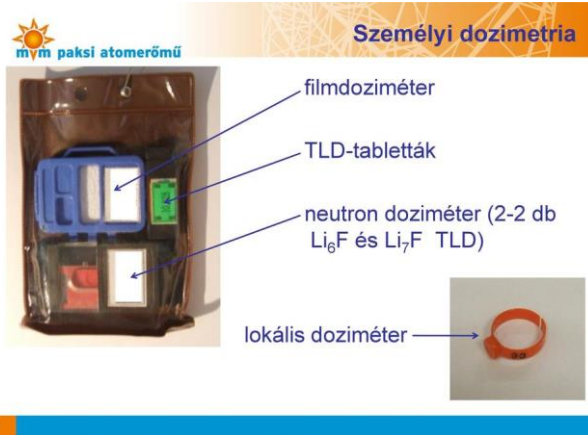
A lumineszcencia kialakulásához tehát megemelkedett energia szintről alacsonyabb energia szintre törekvő elektronokra van szükség. A kristályban az elektronokat a környezetében előforduló radioaktív elemek (^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{40}K , stb.) bomlása során keletkező ionizáló sugárzás, valamint a kozmikus sugárzás emeli magasabb energiaszintre.

A vegyértéksávból kiszabaduló, többlet energiával rendelkező elektronok a kristályrács hibáihoz (pl.: hiányzó negatív ion, pozitív töltésű szennyeződés) kötődnek. Ezekből az úgynevezett csapdákból azután hő hatására szabadulhatnak ki, és kerülhetnek alacsonyabb energiaszintre (lumineszcens központokba). Ezt a folyamatot foton leadás, azaz lumineszcencia kíséri. Így a fénymentesen elzárt idő tulajdonképpen a lumineszcens jel felhalmozódásának ideje, míg a hevítés során a jel fotonok formájában távozik a kristályból.

Alkalmazása az alábbi fontos összefüggéseken alapul:

- a csapdákból tárolt elektronok száma arányos a kristályrács által egységnyi idő alatt elnyelt dózissal (dózis ráta vagy dózisteljesítmény) és a radioaktív sugárzás időbeli hosszával,
- a csapdákból tárolt elektronok száma a hővel történő stimulálás során leadott fotonok számával is arányban áll.

A TLD különleges felhasználásai



Hatósági személyi doziméterben

Űrdoziméterben (Pille, KFKI, Budapest)

A Pille az első magyar űrhajós és az első amerikai női űrhajós kezében



Farkas Bertalan és a Pille (Forrás: oszk.hu)



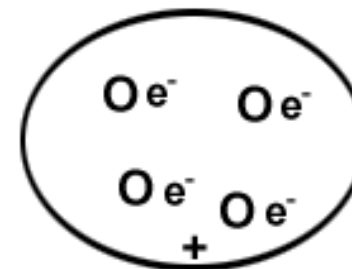
Sally Ride első női amerikai űrhajós a Pillével - Forrás: NASA

Az atommag felfedezése

Előzmény: 1897-ben J.J. Thomson felfedezte az elektronokat.

Az atom modellje egy „mazsolás puding” volt.

atommodell (+) puding az atomtörzs, (-) mazsolák az elektronok



Rutherford kísérlet (1911) :

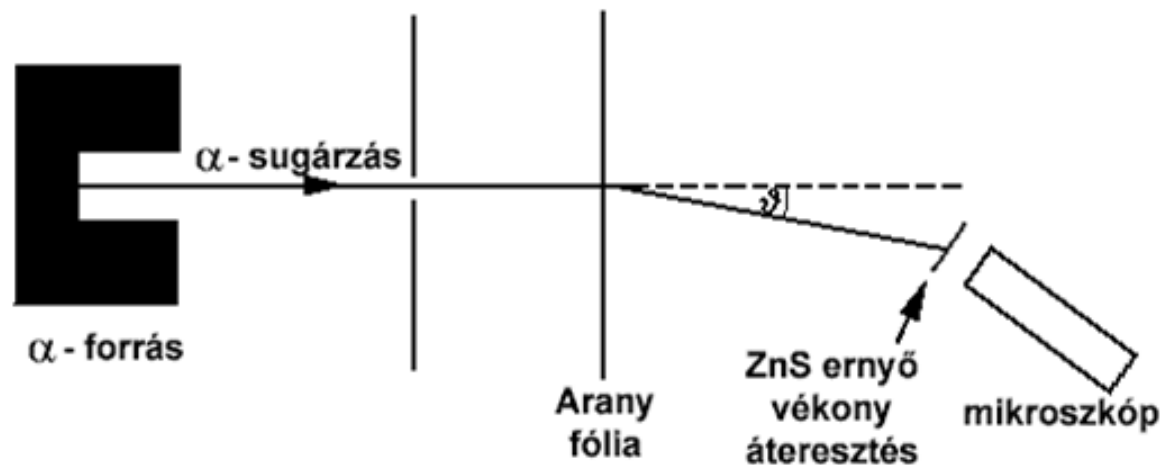
Felvették az $I(\theta)$ függvényt

ZnS : 1 db α - részecske

1 db fényfelvillanást okoz (szcintilláció)

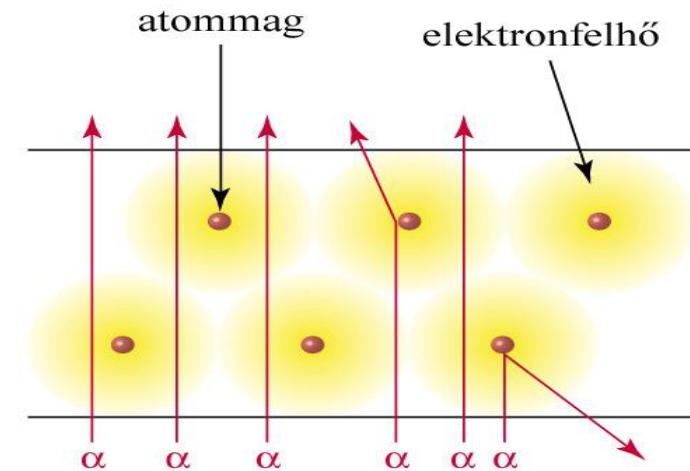
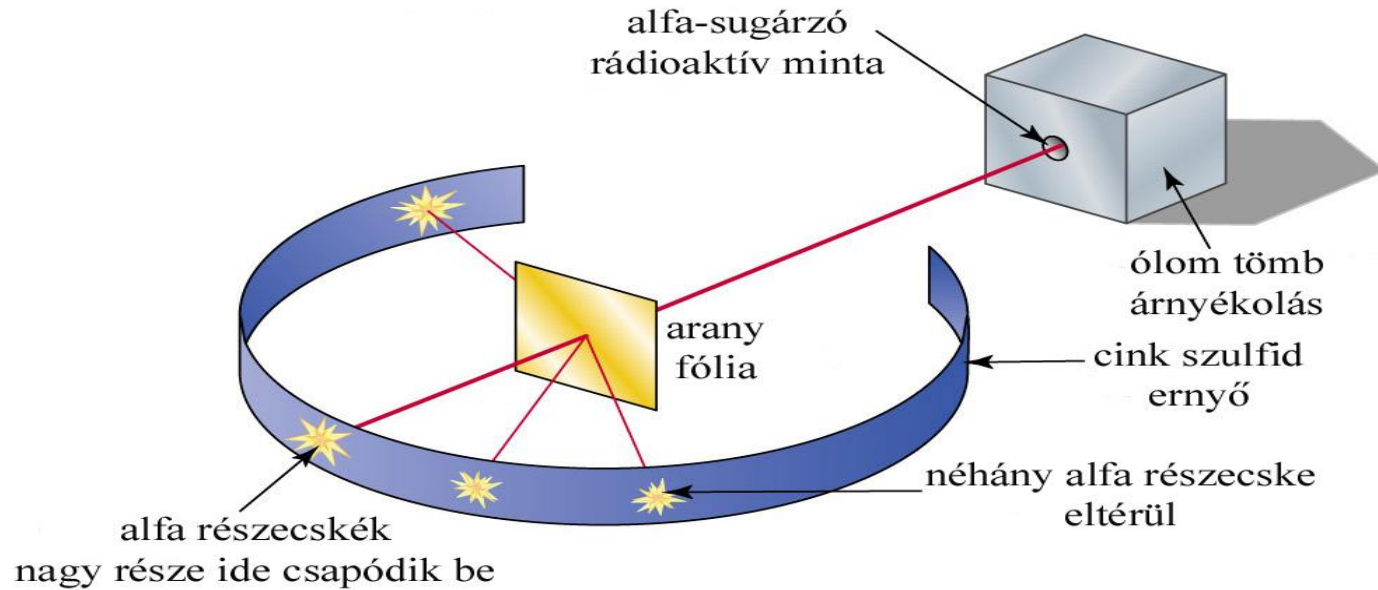
Kvalitatív tapasztalatok :

1. Az α - részecskék több mint 99,9%-a nem térül el.
2. Kb. 0,1% jelentősen eltérül.
3. Néhány α - részecske visszaszóródik



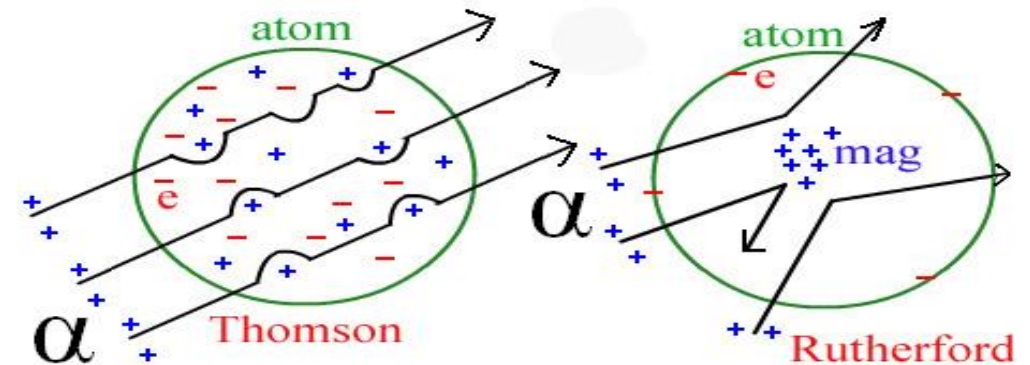
Az atommag felfedezése/2

Rutherford kísérlet (1911): Az atom pozitív töltése és a tömeg nagy része egy nagyon kis helyre összpontosul. Ezt nevezte el atommagnak.



Az eltérülés ritka de nagymértékű.
Thomson puding atom-modellje nem lehet helyes.

Az atom mérete 10^{-10} m nagyságrendű (angström, Å).
Az atommagé 10^{-15} m (femtométer, fm)



Az atommag felfedezése/3

Az alfa részecske szóródását lehet a klasszikus fizika alapján is tárgyalni, mert a hullámhosszuk nagyon kicsi. (Az elektronnal ez már nem tehető meg.)

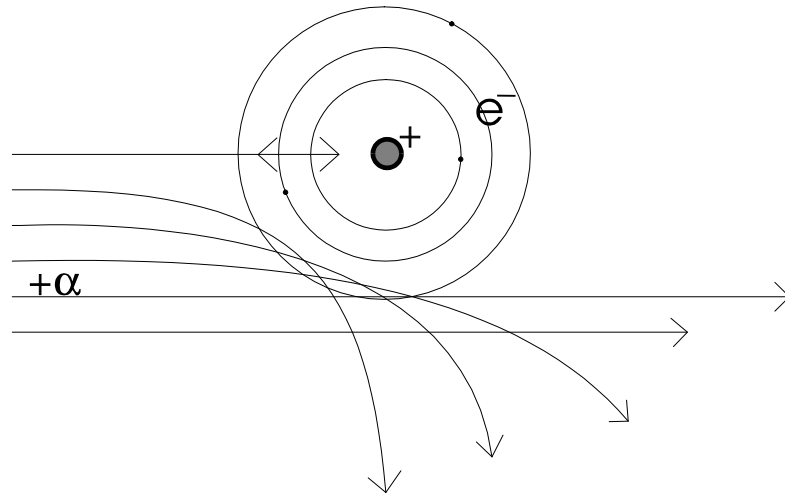
Itt még van értelme a klasszikus analógiáknak is: **szalmakazal golyószórózása**

Meg akarjuk tudni, hogy van-e valami a szalmakazalban. Elkezdjük egyenletesen megszórni golyókkal.

A szalmakazal mögött felfogjuk a golyókat (vagy a golyók nyomjelzősek), és azt tapasztaljuk, hogy a lövedékek legnagyobb hányadának pályája nem változott, de néhány golyó mozgásának iránya nagymértékben megváltozott.

Emiatt arra következtetünk, hogy a szalmakazalban valamilyen kicsi, kemény tárgy van. A szalmakazalt megfeleltethetjük az atomnak, a kis tárgyat az atommagnak, a golyókat pedig az α -részecskének.

Az új atommodell:

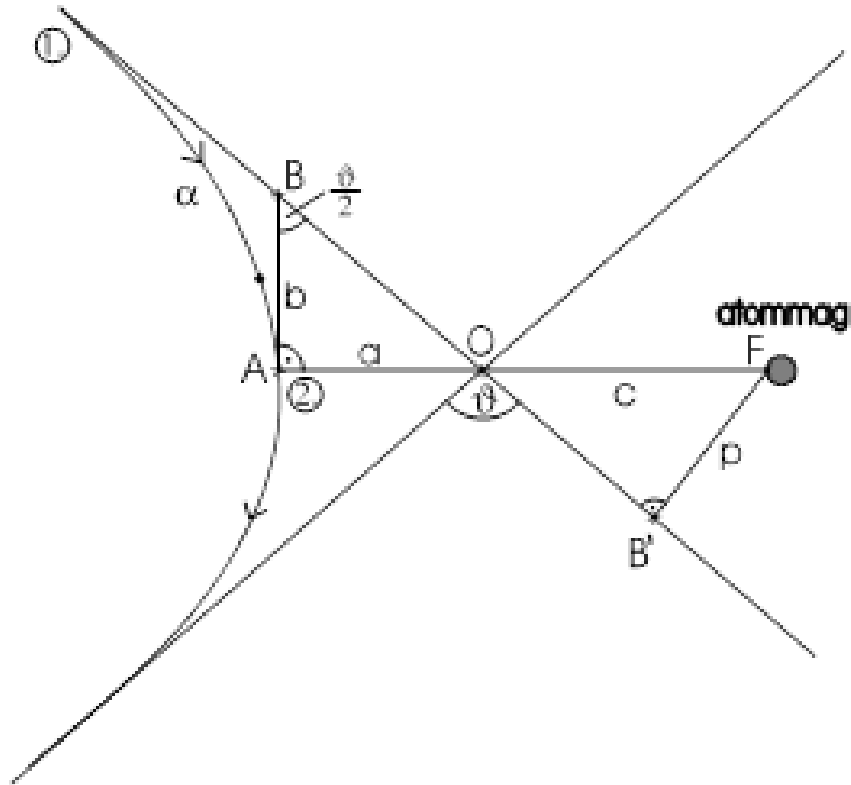


Középen, a kis térrészben helyezkedik el az anyag legnagyobb része, több, mint **99,9** %-a, ez az atommag.

Néhány megfontolás a Rutherford-féle szórási formulához vezető úton (ínyenceknek)

1, Geometriai megfontolás

Az α -részecske pályája kúpszelet, pontosabban **hiperbola**, melynek külső fókuszában helyezkedik el az atommag. A Kepler probléma tárgyalása során kapott eredmény itt is használható, mivel a Coulomb-törvény a gravitációs erőtvényhez hasonló alakú. Az atommag rögzítettségének feltételezése jó közelítés, mert tömege jóval nagyobb, mint az α -részecskéé.



a: fél nagytengely

b: fél kistengely

c: fókusz távolság

ϑ : az eltérülés szöge

p: ütközési paraméter (ilyen messze ment volna el az atommag mellett.)

Levezethető, hogy minél kisebb az ütközési paraméter, annál nagyobb az eltérülés szöge. (Egészen pontosan:

$$\operatorname{ctg}\left(\frac{\vartheta}{2}\right) = \frac{b}{a} = \frac{p}{a}$$

2, Megmaradási tételek

A, Mivel az atommag körül kialakult elektrosztatikus tér **konzervatív**, ezért érvényes benne a **mechanikai energia megmaradására** vonatkozó tétel.

B, Másrészt mivel **centrális**, érvényes a **perdületmegmaradás**.

Alkalmazzuk a két fent említett tételt az ábrán 1.-gyel illetve 2.-vel jelölt pontok (egy, az atommagtól távoli pont, és az **A** pont) között.

$$A, \quad \frac{1}{2}mv_0^2 + 0 = \frac{1}{2}mv_A^2 + k \frac{q_1q_2}{r_{\min}} \quad B, \quad mv_0p = mv_A r_{\min}$$

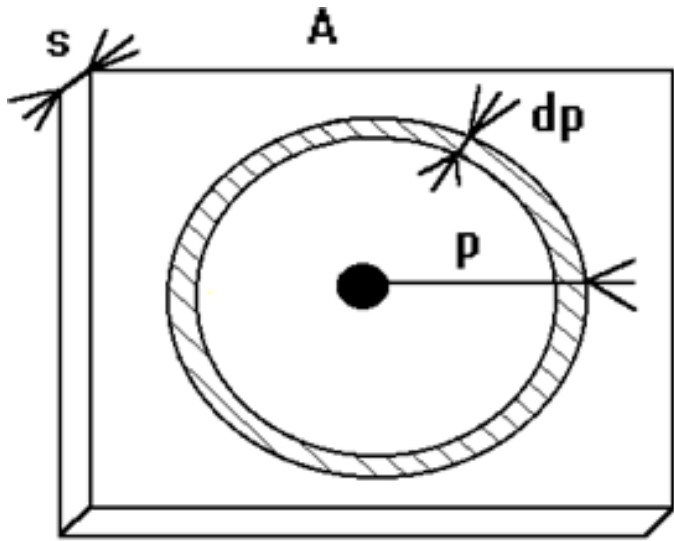
Igen fontos speciális eset, amikor az α - részecske éppen eltalálja (illetve eltalálná, ha nem pattanna vissza) az atommagot, azaz $p=0$. Ekkor természetesen $v_A=0$ és $\vartheta = 180^\circ$. Ekkor

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = k \frac{q_1q_2}{r_{\min}}$$

, tehát az α -részecske energiájának ismeretében kiszámítható az a távolság, amelyre az α -részecske legjobban megközelíti a magot.

3, Statisztikus megfontolások

Minden pont felé ugyanolyan valószínűséggel halad α -részecske.



dn_1 : annak a valószínűsége, hogy az α -részecske a $(p, p+dp)$ ütközési tartományba esik

n : az összes α -részecske száma

$2p\pi dp$: a körgyűrű területe

Geometriai valószínűség egy célpont esetén:

$$\frac{dn_1}{n} = \frac{2p\pi dp}{A}$$

Célpontok száma : NAs ,

$$N = \frac{\text{atom}}{\text{térfogat}}$$

Összes céltárgy :

$$\frac{dn}{n} = NAs \frac{dn_1}{n}$$

Nem lehet biztosítani, hogy a $(\vartheta, \vartheta+d\vartheta)$ szóródási tartományt figyeljük.

Műszerrel a ϑ körüli $d\Omega$ térszöget lehet figyelni.

Erre a következő ún. **Rutherford-formula** vezethető le:

$$\frac{dn}{n} = Ns\pi \left(\frac{kz'e^2}{mv_0^2} \right)^2 \cdot \frac{1}{\sin^4 \left(\frac{\vartheta}{2} \right)} \cdot d\Omega$$

A kísérlet eredménye

1. A szórási kép (az egységnyi térszögbe jutó α -részecskék száma), azaz a mért $I(\vartheta)$ egyezik a modell által szolgáltatott

$$\frac{1}{\sin^4\left(\frac{\vartheta}{2}\right)} \quad \text{összefüggéssel.}$$

Tehát a modell által adott szögfüggés egyezett a tapasztalattal. Ezt a kísérleti bizonyítéknak tekintjük és a modellt elfogadjuk (míg az ellenkezőjére nem találunk bizonyítékot).
Ez volt az első kísérleti bizonyíték az atommag létezésére.

2. n ismeretében z' is meghatározható. Az eredmény: $z' = z$, vagyis **az atommag töltése (e egységben) egyezik a rendszámmal.**

A rendszám hármasszám jelentése (ezt követően)

1. sorszám a periódusos rendszerben
2. az atommag töltése $+e$ egységben
3. a semleges atomban levő elektronok száma

Viszont az atommag tömege nagyobb, mint a benne lévő protonok össztömege. Miért???

20 év alatt találták meg a helyes választ.