

Mag- és neutronfizika 4. előadás

Sugárzás és anyag kölcsönhatása: (ismétlés, összefoglalás)

Elektromosan **töltött** részek **közvetlenül** ionizálnak
(elektronok, protonok, nagy energiájú atommagok)

Ionizáció jellemzője: dE/dx (Linear Energy Transfer, LET)

Elektromosan **semleges** részecskék **közvetve** ionizálnak

Gamma-sugárzás: **fotoeffektus, Compton-szórás, párkeltés**
(nagy energiájú **elektronokat** kelt)

Neutron-sugárzás: **rugalmas szórás, atommag-reakció**
(nagy energiájú **protonokat/atommagokat** kelt)

Detektorok

- Működésük a sugárzásnak az anyaggal való kölcsönhatásán alapul.
- Felerősítik** a sugárzásnak az anyaggal való kölcsönhatásából fakadó jelet makroszkopikus méretűre.

1/21

Az anyagban leadott energia következményei lehetnek:

- ionizáció → **ionizációs kamra, GM-cső**
- kémiai ill. fiziko-kémiai változás → **fotemuulzió, ködkamra...**
- atomok/molekulák gerjesztése, majd a legerjesztődést követő fényfelvillanás (szcintilláció) → **szcintillációs detektorok**
- elektron-lyuk párok keltése félvezetőkben → **félvezető detektorok**

Sugárzás áthatolóképessége

Érzékelés bonyolultsága

Nagyon kicsi

(pl. kis energiájú β ,
vagy α -részek)



Nehéz, mivel a sugárzás már
a detektor érzékeny térfogatába
jutás előtt elnyelődik

Nagyon nagy

(pl. neutrínók, vagy
nagyon nagy energiájú
részecskék)



Nehéz, mivel a sugárzásnak
kicsi a LET értéke, ezért kis
térfogatban nagyon kis energiát
ad csak le. Hatalmas
térfogatban (és sűrű anyagban)
lehet csak detektálni

2/21

Detektálási hatások

Teljes detektálási hatások:

$$\epsilon_{teljes} = \frac{\text{(detektált részecskeszám)}}{\text{(kibocsátott részecskeszám)}}$$

A teljes detektálási hatások két részből áll:

Geometriai hatások:

Azt fejezi ki, hogy a forrásból
kibocsátott részecskék közül nem
mindegyik éri el a detektort.

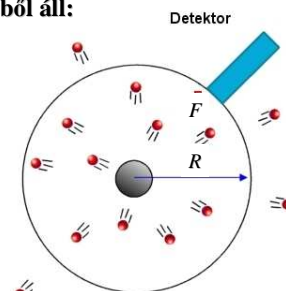
Pontszerű forrás és kis méretű,
távoli detektor esetén egyszerűen
meghatározható:

$$\epsilon_G = \frac{F}{4\pi R^2}$$

Itt R a forrás-detektor távolság,

F pedig a detektor érzékeny felülete

(a forráshoz húzott egyenesre merőlegesen)



3/21

Bonyolultabb geometria (kiterjedt forrás és/vagy detektor)
esetén a geometriai hatások csak bonyolultabb számítással
határozható meg.

4π számláló: olyan detektor, amelyre $\epsilon_G = 1$, azaz a forrásból
kibocsátott minden részecske eléri a detektort!
(Ezeknél általában a detektor körülveszi a forrást)

Belső (intrinsic) hatások

A detektor általában nem detektál minden ráeső részecskét.

(a nagy hatótávolságú részecskék egy része áthalad a detektoron)

$$\epsilon_{int} = \frac{\text{(detektált részecskeszám)}}{\text{(detektort elérő részecskék száma)}}$$

A teljes hatások tehát:

$$\epsilon_{teljes} = \epsilon_G \cdot \epsilon_{int}$$

4/21

A detektorok csoportosítása

Részecskék nyomait láthatóvá tevő detektorok

- Fotoemulzió
- Szilárdtest nyomdetektor
- Ködkamra
- Buborékkamra

Részecskeszámlálók

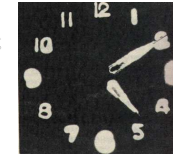
- Gáztöltésű számlálók
 - o Ionizációs kamra
 - o proporcionális kamra
 - o Geiger-Müller számláló (GM-cső)
- Szcintillációs számlálók
- Félvezető detektorok
 - o HPGe (nagy tisztaságú germánium)
 - o Ge(Li), Si (Li) detektorok
 - o Felületi záróréteges detektorok

5/21

Részecskék nyomait láthatóvá tevő detektorok

1) Fotoemulzió:

A radioaktivitás felfedezését (Becquerel, 1896) az tette lehetővé, hogy a sugárzás hatására a fényképezőlemez megfeketedett.



radiográfia



film doziméter

mai hasznosítások

Hogyan működik?

A lemezben AgI és AgBr szemcsék vannak.

- Az ionizáció hatására a molekulák szétesnek, és fém ezüst (Ag) válik ki a részecske pályája mentén (látens kép)
- Az „előhíváskor” ezek a centrumok katalizátorként viselkednek, ezek körül egyre nagyobb méretű „blob”-ok alakulnak ki („jel erősítés”). **Ezek már mikroszkóppal láthatóak.**
- A „fixálás” a blobok növekedését megállítja

6/21

2) Szilárdtest nyomdetektor

Hogyan működik?

- Egyes szilárd szigetelőanyagokban a **nagy LET értékű** részecskék roncsolják az anyagot, szubmikroszkópikus anyaghibák keletkeznek (látens kép)
- „Maratás”: a hibák körül gyorsabb oldódás („jel erősítés”), azaz **mikroszkóppal is látható nyomok alakulnak ki.**

Leggyakoribb detektoranyagok:

- Cellulóz-nitrát. **α -részecskékre** is érzékeny. Környezeti hatásokra is érzékeny, emiatt külön kell kalibrálni. Marószer: NaOH.
- Cellulóz-triacetát (CTA) és cellulóz-acetát-butirát (CAB). Környezeti hatásokra kevésbé érzékeny. Marószer: NaOH.
- Polikarbonátok. Műanyagfólia alakjában készülnek. **Csak nehézionok** hagynak bennük nyomot. Marószer: NaOH
- Egyes üvegek. Csak **nehézionokat** ($A > 32$) detektál. Marószer: tömény HF.
- Egyes ásványok (pl. csillám, olivin). Csak **nehézionokat** ($A > 28$) detektál. Marószer: tömény HF, ill. NaOH, KOH.

7/21

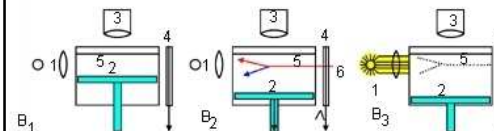
3) Ködkamra (C.T.R. Wilson 1869-1959, Nobel-díj 1927)

Hogyan működik?

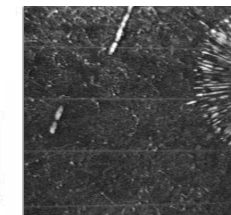
- **Túltelített gőzben** megindul a köd lecsapódása az ionok, mint lecsapódási centrumok körül („jel erősítés”)
- Vékony „ködfonal” alakul ki a részecske pályája mentén.



Az expanziós ködkamra működési elve



nyugalmi állapot (B_1)
 kioldás egy részecske áthaladásakor (B_2)
 a részecskenyom fényképezése (B_3)
 1 fényforrás 2 dugattyú 3 kamera 4 számlálócső 5 üveglemez
 6 részecskesugár



Részecskék képe ködkamrában

8/21

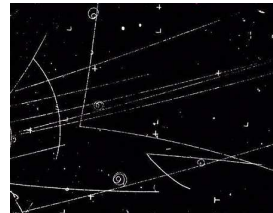
4) Buborékkamra (D.A. Glaser 1926-, Nobel-díj 1960)

Hogyan működik?

- **Túlhevített folyadékban** megindul a forrás az ionok, mint zavarcentrumok körül („jel erősítése”)
- Vékony „buborékfonal” alakul ki az ionizáló részecske pályája mentén.

Összehasonlítva a ködkamrával:

- anyagsűrűség nagyobb (folyadék)
 - nagyobb hatásfok (kisebb LET-ű részecskék)
- Hatalmas méreteket lehet készíteni
 - nagyenergiájú részecskék detektálása

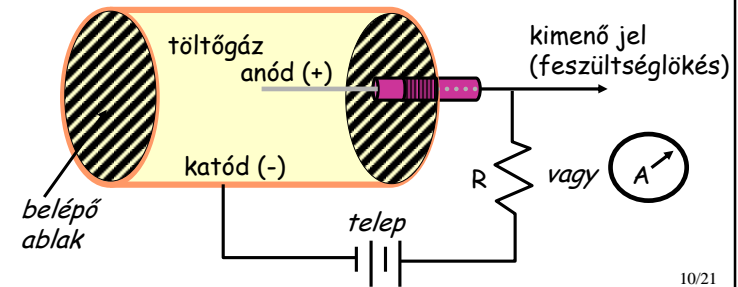


Részecskeszámlálók

1. Gáz töltésű detektorok

Hogyan működik?

- Az ionizáló részecskék a gázban **elektron-ion** párokat keltenek
- A gázban lévő elektródok elektromos tere ezeket **szétválasztja** és **begyűjti** → elektromos áramlökés keletkezik
- Az elektromos áramlökést elektronikusan **erősítjük**
- Az erősített impulzusokat **feldolgozzuk** (megszámláljuk, amplitúdójukat megmérjük stb.)



10/21

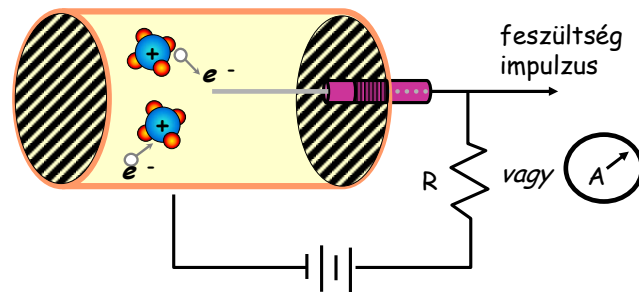
Kétféle üzemmód:

- **Impulzus-üzemmód** (számlálás, amplitúdómérés stb.)
- **Folyamatos áram** (nagy intenzitású sugárterek, pl. reaktor)

Néhány fontos folyamat a gázban

1) A begyűjtés **ellen** dolgozik a **rekombináció** (ionok ismét találkoznak elektronokkal, és a már szétvált töltések újra egyesülnek)

Emiatt **elég nagy térerősség kell** a töltések teljes begyűjtéséhez



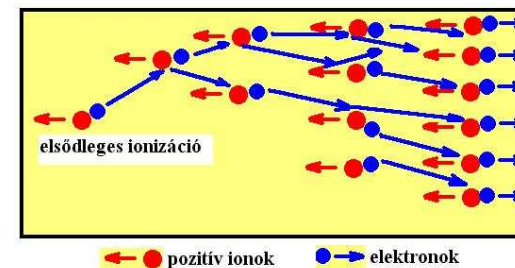
11/21

Néhány fontos folyamat a gázban (2)

2) Gázerősítés (lavina-folyamat)

- Nagy térerősség → az elektronok két ütközés között nagy mozgási energiát nyernek
- **másodlagosan ionizálnak**, új elektron-ion pár keletkezik.
- **több töltést** lehet begyűjteni, mint amit a detektált részecske választott szét eredetileg

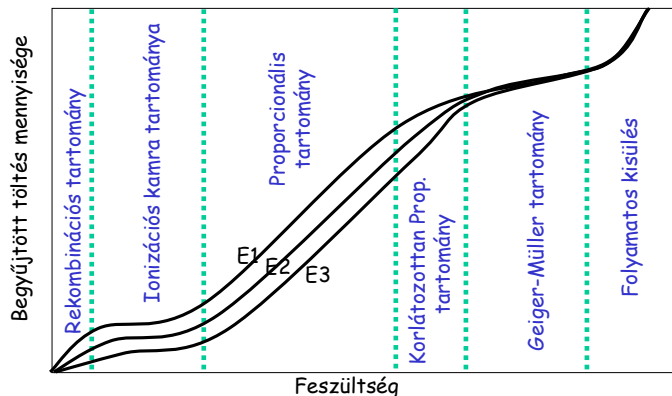
Lavinafolyamat gázokban



← ● pozitív ionok ● → elektronok

12/21

Ezek eredményeképpen a jelek amplitúdója (begyűjtött töltés mennyisége) a következőképpen függ a detektorra adott feszültségtől (detektor **karakterisztika**)



(E1 > E2 > E3 a bejövő részecske által a gázban leadott energia)

A gáztöltésű detektorok típusai:

- Ionizációs kamra
minden elsődleges töltést és iont begyűjtünk, de csak azt!
Kis amplitúdójú jelek, nagy utóerősítés kell.
Részecske által leadott **energia mérésére alkalmas**
- Proporcionális kamra
gázerősítés még a proporcionális tartományban
nagyobb amplitúdójú jelek
Energiamérésre alkalmas
- Geiger-Müller számláló (GM-cső)
nagy gázerősítés,
nagy amplitúdójú jelek
amplitúdó független a gázban leadott energiától
Energiamérésre **nem alkalmas**, csak részecske **számlálásra**

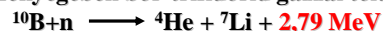


14/21

Neutrondetektorok (probléma: **csak** neutront számláljon, mást ne)

1) BF₃ számláló

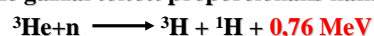
Lényegében bór-trifluorid gázzal töltött proporcionális kamra.



A keletkezett töltött részecskék (⁴He, ill. ⁷Li) kapják az energiát, erősen ionizálnak a gázban → a kamra impulzust ad ki.

2) ³He számláló

³He gázzal töltött proporcionális kamra.



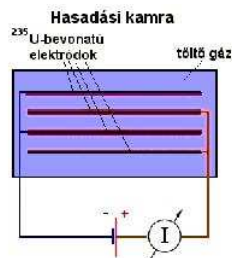
A keletkezett töltött részecskék (³H, ill. ¹H) kapják az energiát, erősen ionizálnak a gázban → a kamra impulzust ad ki.

3) Hasadási kamra

proporcionális kamra, amelyben urán-bevonatú lemezek vannak



A hasadás során keletkezett nagy energiájú hasadványok erősen ionizálnak a gázban → a kamra impulzust ad ki (áramot jelez)



2. Szcintillációs detektorok

Egyes anyagokban **fényfelvillanás** (szcintilláció) jön létre, ha energiát kapnak becsapódó részecskéktől

- Fluoreszcencia – azonnali fényfelvillanás ($t < 10^{-18}$ s)
- Foszforeszcencia – késleltetett fénykibocsátás ($t > 10^{-18}$ s)

Anyagát tekintve lehet

- **szilárd**
- **folyadék**
- **gáz**
- **szervetlen**
- **szerves**

Már a magfizika őskorában is használták:

„**spinthariscop**” (1903 W. Crookes)
Felépítése: vékony ZnS (cinkszulfid)

réteg, amelyet nagyító figyel
A ZnS-ban a becsapódó részecskék hatására felvillanások (szcintillációk) keletkeznek.



16/21

Szilárd, szervesen (kristályos) szcintillátorok

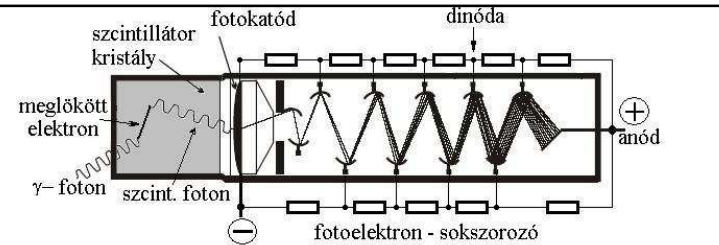
- Többségük ionkristály, valamilyen alkálihalogenid (alkáli fém és halogén vegyülete)
 - o NaI(Tl) nátriumjodid (talliummal szennyezve)
 - o CsI(Tl) céziumjodid
 - o LiI(Eu) lítiumjodid (európiummal szennyezve)
 - o CaF₂(Eu) kalciumfluorid
- Szennyezés igen kis mennyiségben (nyomokban)
 - o a szennyezés az „aktiváló”, ez biztosítja a felvillanást
 - o Pl. Eu a kristályban csak ezreléknyi mennyiségben van

Kristályokból **nagy méreteket** lehet növeszteni

Kettős előny: nagy atomsűrűség (szilárd) → **Nagy hatásfokú detektor!**
nagy méret

A szcintillációt ma már nem szabad szemmel figyelni!
Fotoelektron-sokszorozó (photomultiplier)

17/21



A detektálás lépései (pl. γ -foton detektálása):

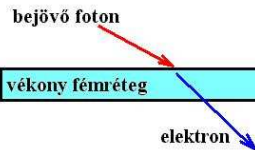
- A γ -foton kölcsönhat a szcintillátor anyagával: energiát ad át egy elektronnak (Compton-szórás, fotoeffektus, párkeltés)
- A keltett elektron az útja mentén energiát ad át a kristálynak (dE/dx) és megáll (vagy kiszökik, ha kicsi a kristály)
- Az átadott energiára a kristály szcintillációval felel. Látható fotonok keletkeznek. **A fotonok száma arányos az átadott energiával (!)**
- A keltett (látható) fotonok elhagyják a kristályt, és belépnek a fotoelektron-sokszorozóba

18/21

A fotoelektron-sokszorozó működésében két folyamat lényeges:

- külső fotoeffektus
- szekunder elektronok

1) Külső fotoeffektus



Foton ütközik egy elektronnal a fémben, és a teljes energiáját átadja neki

$$E_{\text{elektron}} = h\nu - E_{\text{kilépés}}$$

Einstein ennek megmagyarázásáért kapott Nobel-díjat 1922-ben!

2) Szekunder elektronok

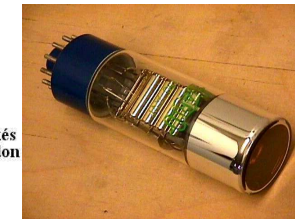
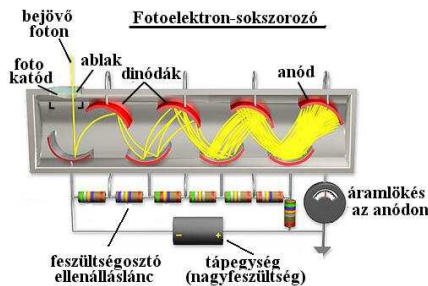


Nagy energiájú elektronok újabb elektronokat ütnek ki

A fotoelektron-sokszorozó tehát egy speciális „erősítő”:

- nagy erősítésű (~10⁶)
- kis zajú

19/21



A működés lépései:

- A beeső foton **külső fotoeffektussal** kiváltja az első fotoelektront a fotokatód anyagából
- az elektron gyorsul az első dinóda felé
- a dinódára beeső gyors elektron **szekunder elektronokat** vált ki
- ezek a következő dinóda felé gyorsulnak, és újabb **szekunder elektronokat** váltanak ki
- ...stb
- végül az anódon begyűjtjük a sok elektront → **áramlökés**

20/21

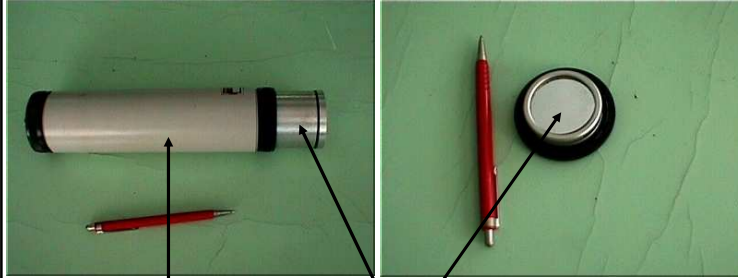
Becslés az áramlökés nagyságára:

Tegyük fel, hogy az erősítés 10^6 , azaz 1 elektrontól 10^6 elektron lesz

Az áramlökés ideje kb. $0,1 \mu\text{s} = 10^{-7}$ s. Az áram átlagos nagysága:

$$I = 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} / 10^{-7} = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ A} = 1,6 \mu\text{A}.$$

Szcintillációs kristályt tartalmazó detektor felépítése



Fotoelektron-sokszorozót
+ elektronikát tartalmazó ház

szcintillátor kristály (cserélhető)

(α , ill. β -sugárzás detektálására
vékony fémfóliával fedett)

21/21