

Részecske- és magfizikai detektorok

Atommag és részecskefizika

9. előadás 2011. május 3.

Tematika

- Detektorok csoportosítása
- Gáztöltésű detektorok, ionizációs kamra, proporcionális kamra, GM-cső működése,
 - feszültség-áram karakterisztika, magreakción alapuló neutrondetektor GM-csővel,
- Félvezető-detektorok, felépítés, vezetési és vegyértéksáv, HPGe, Ge(Li), Si(Li), miért kell őket hűteni,
 - Monoenergiájú gamma-sugárzás detektorban hagyott energiájának eloszlása, jellegzetes események, spektrum szerkezete, spektrum értelmezése,
- Szcintillációs detektorok
 - szcintillátor, fényhozam, fotoelektron-sokszorozó, amplitúdó-analizátor,
- Vizuális detektorok,
 - ködkamra, buborékkamra, nyomdetektor, termolumineszcens doziméter, szikrakamra, közös működési elv

Detektorok, mérések célja

Alapelvek: sugárzás eléri a detektort, kölcsönhat az anyaggal, elveszíti az energiáját vagy annak egy részét, sok kis energiájú elektron szabadul fel, ezeket összegyűjtve elektromos jellé alakítjuk.

Milyen detektort válasszunk? Ez a sugárzás fajtájától függ, és hogy mit akarunk mérni. Pl. alfa-sugárzás: **vékony** (0.01-0.1 mm) detektor elég. Béta: 0.1-1 mm. gamma: 10 cm.

Ha csak a sugárzás **jelenléte** érdekel: GM-cső.

Ha az **energiát** is akarjuk mérni: az energialeadással arányos jel kell.

Pontos méréshez (kis statisztikus flukt.) az kell, hogy az ionizáló részecske sok elektront szabadítson fel (pl félvezetőkben).

Ha pontos **időmérés** kell, akkor gyors válaszidő fontos (pl. műanyag szcintillátor).

Részecske-azonosításhoz speciális detektorok, amelyek a tömegre, töltésre érzékenyek (emulzió, repülési idő, TRD, Cserenkov, TPC, stb).

Nagy **intenzitásokhoz**: kis holtidejű detektor.

Részecskepálya méréséhez (impulzus): helyérzékeny detektor, MWPC, TPC, Si, stb.

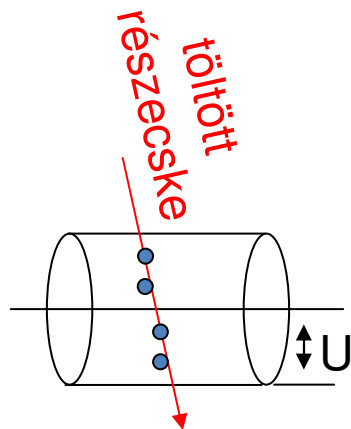
Detektorok

- Ködkamra
 - Wilson-féle
 - diffúziós
- Buborékkamra
- GM-cső (Geiger-Müller számláló)
- Ionizációs kamra
- Félvezető detektorok
- Cserenkov-detektorok
- Szcintillációs detektorok
 - Szilárd
 - Folyadék
- Kaloriméterek

Detektorok csoportosítása

- Gáztöltésű:
 - ionizációs kamra, proporcionális kamra, GM-cső,
 - MWPC (Multiwire Prop. Chamber), TPC (Time Projection Ch.)
- Félvezető detektorok:
 - HPGe (high purity Ge), Ge(Li), Si(Li)
- Szcintillációs detektorok:
 - NaI, folyadék, szerves (műanyag), TLD (termolumineszcens doziméter)
- Cserenkov-detektorok:
 - folyadék (víz), gáztöltésű
- Vizuális detektorok:
 - ködkamra, buborékkamra nyomdetektorok, emulzió, fotolemez...
- Kaloriméterek

Gáztöltésű detektorok



Töltött részecske ionizál

Elektromos térben az elektronok az anódszára gyűlnek

Elektromos impulzus

- 1) **Ionizációs kamra:** az U feszültség kicsi, az elektronok nem tudnak tovább ionizálni. Annyi elektron megy az anódra, ahány ionizáció

Kétféle üzemmód:

impulzus-üzemmód: egy impulzus/töltött részecske. →

áram-üzemmód: a részecskefluxussal arányos áram



- 2) **Proporcionális kamra:** nagyobb U feszültség. Elektron-lavina (másodlagos ionizáció) a szál közelében, ahol az elektromos tér nagy. Az elektronok két ütközés között elég energiát szereznek az elektromos térből az újbóli ionizációhoz. Sokszálas kamra, MWPC, TPC: a részecskék helyét, pályáját is méri.

- 3) **GM cső:** akkora feszültség, hogy önnfenntartó lavina, az egész hengerben. Nagy ellenállással kell sorbakötni (automatikus feszültség-csökkenés a kisüléskor). Mindig azonos nagyságú jelet ad, nem alkalmas energiamérésre, csak érzékeny számlálásra.

Gázdetektorok

- Feszültség-áram karakterisztika



Sokszálas kamrák

Table 28.4: For various gases at STP: (a) yield of ionization encounters ($1/\lambda$) for m.i.p. [80], (b) t_{99} : thickness of the gas layer for 99% efficiency, and (c) the average number of free electrons produced by a m.i.p. (calculated using data from Ref. 81).

	Encounters/cm	t_{99} (mm)	Free electrons/cm
He	5	9.2	16
Ne	12	3.8	42
Ar	25	1.8	103
Xe	46	1.0	340
CH ₄	27	1.7	62
CO ₂	35	1.3	107
C ₂ H ₆	43	1.1	113

- töltött részecske megfelelő gázkeverékben elektron-ion párokat kelt
- ennek minél nagyobb részét akarjuk detektálni
- legalább egy ionizálás valószínűsége $1 - \exp(-\Delta/\lambda)$
- az ütközések 65-80%-a csak egy elektront eredményez, a több mint 5 elektronos csoportok 10%; átlagosan 3-4 elektron ütközésekként

- elsődleges és másodlagos ionizáció (elektronok új atomokkal ütköznek, ill. köztes gerjesztett állapotok), nemlineáris folyamatok

- elektromos és mágneses terek hatására az ionizációs elektronok a gázban sodródnak, driftelnek

$$u = \mu |\mathbf{E}| \frac{1}{1 + \omega^2 \tau^2} \left(\hat{\mathbf{E}} + \omega \tau (\hat{\mathbf{E}} \times \hat{\mathbf{B}}) + \omega^2 \tau^2 (\hat{\mathbf{E}} \cdot \hat{\mathbf{B}}) \hat{\mathbf{B}} \right)$$

μ mobilitás, $\omega = eB/mc$ ciklotron-frekvencia, $\tau = \mu m/e$ ütközések közti idő jellemző érték 1-8 cm/ μ s

- az elektronokat vékony, 10 μ m sugarú anódszálak gyűjtik össze
- $1/r$ -es erős tér, másodlagos ionizálás, lavinák
a lavinákat kioltó gázok (szerves molekulák) alkalmazásával lokalizálják, melyek elnyelik a lavinában keltett fotonokat
- az erősítés G , a gáz sűrűsége ρ , $K = 5-8$
 $dG/G \approx K d\rho/\rho$, G akár 10^4
- az elektronokat néhány ns alatt begyűjtik
a pozitív ionok a száltól távolodnak, indukált jelük detektálható

Sokszálas proporcionális kamra (MWPC)

Georges Charpak Nobel-díj (1992)

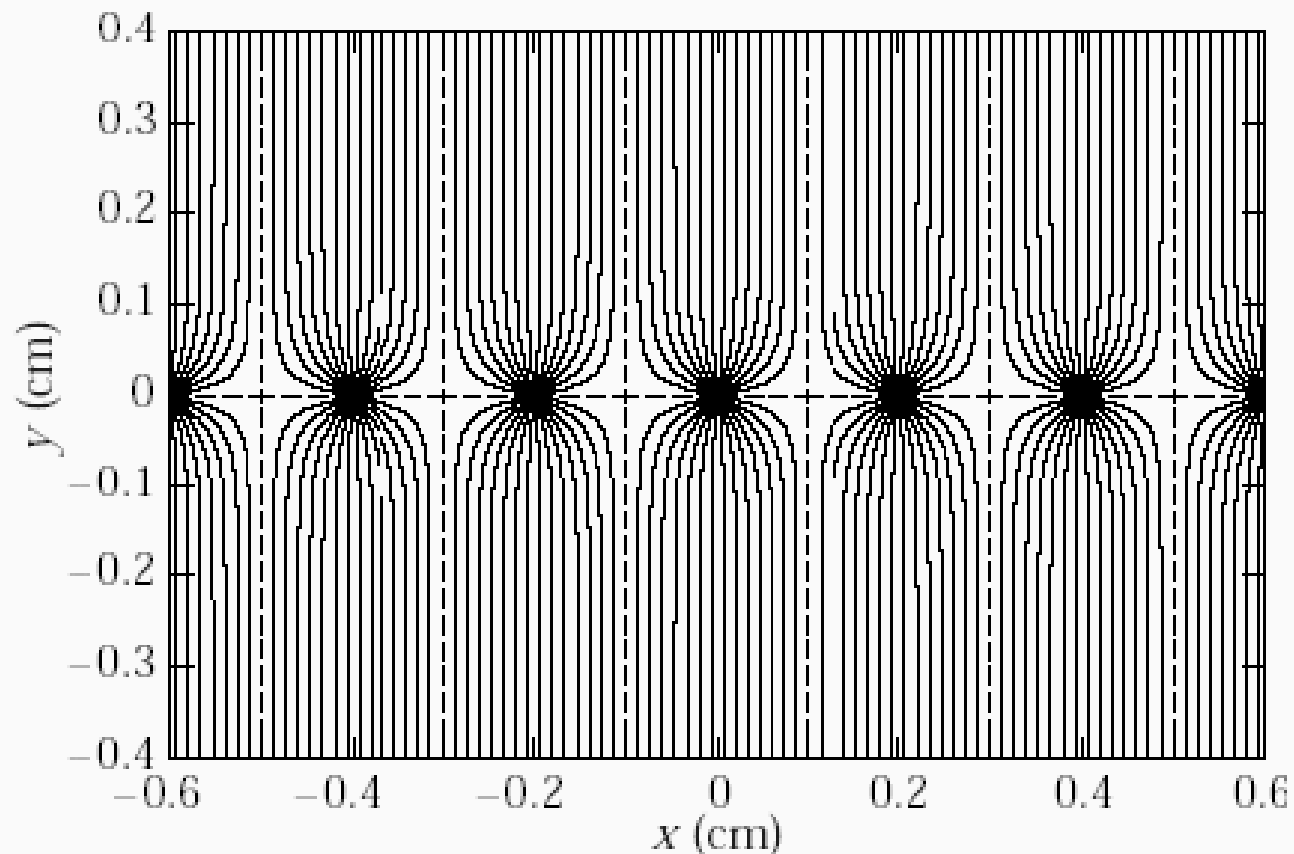
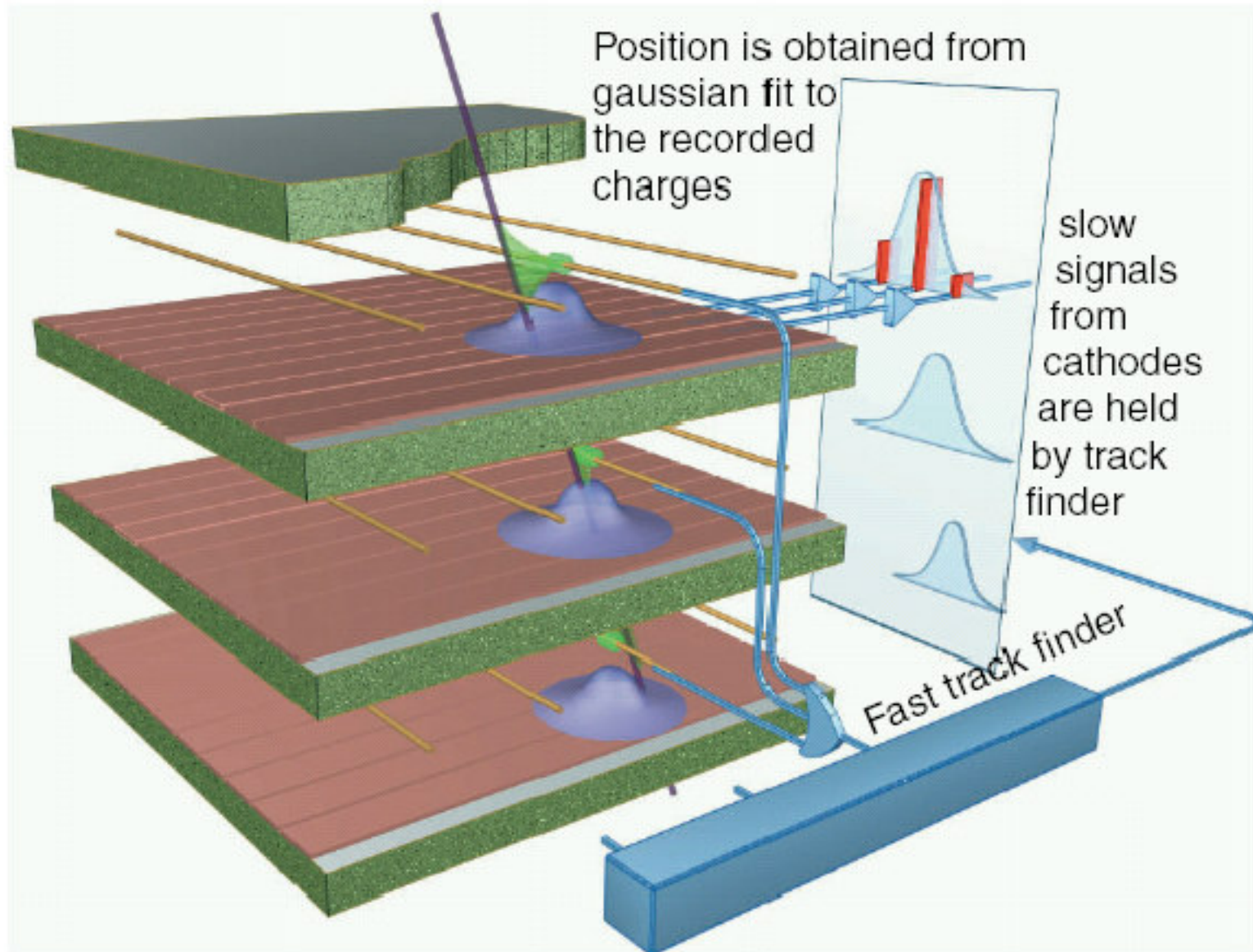


Figure 28.3: Electric field lines in a (MWPC) with an anode pitch of 2 mm as calculated with GARFIELD program [83].

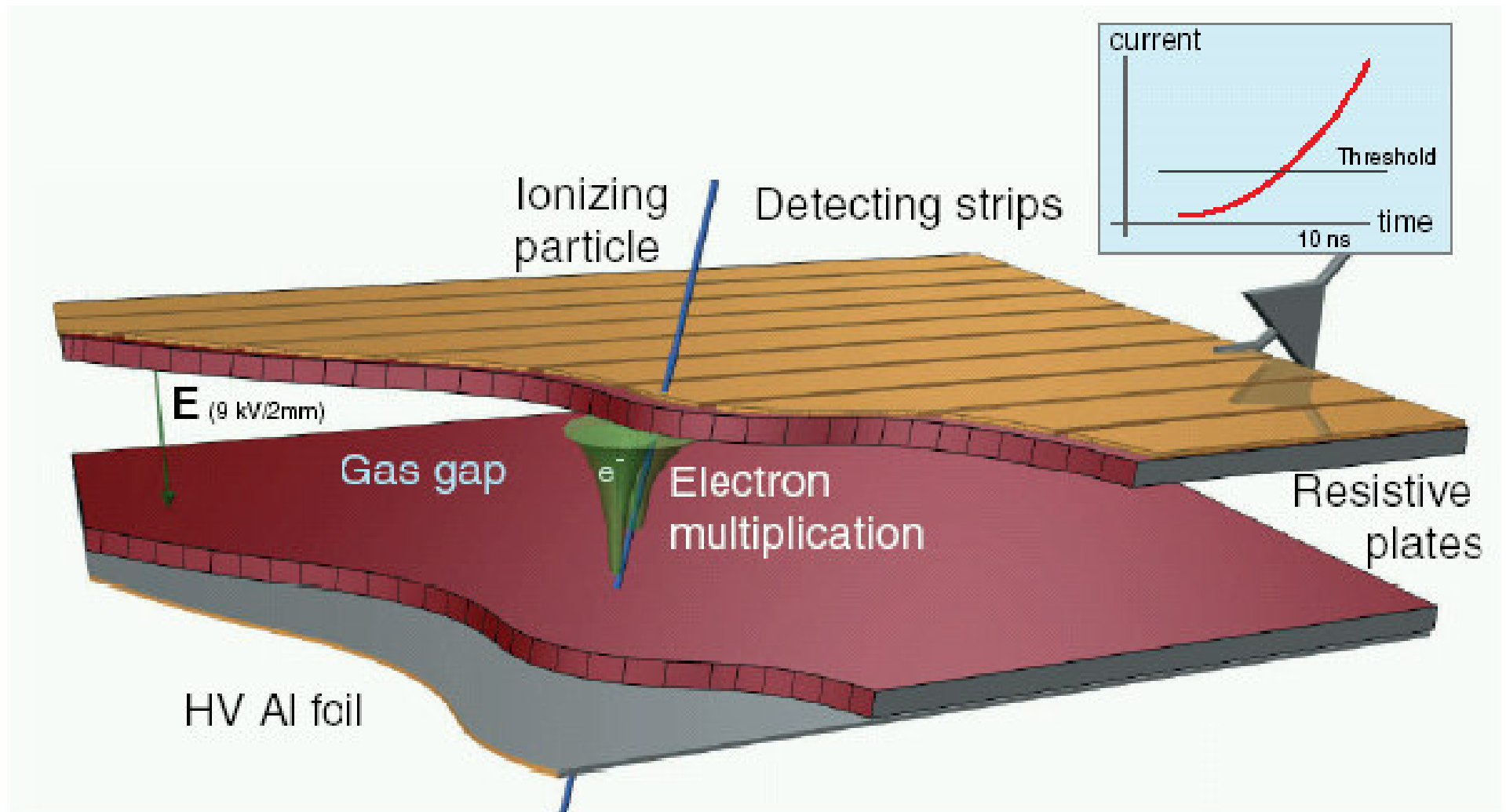
Sokszálas kamrák

- 1 cm drift után az elektronfelhő 30-500 μm , 5 cm drifthosszal 100-200 μm felbontás
- sok ütközőnyalábos kísérletben központi detektor, a szálak a nyalábiránnyal párhuzamosak
kis térfogatú kamrák (0.1 m³) vertex mérésre, 50 μm felbontás nagy nyomású és kis diffúziójú gázkeverékekkel
nagy térfogatú kamrák (5-40 m³) több ezer 1-2 m hosszú szállal, 100-200 μm felbontás
- helyfelbontás nem növelhető minden határon túl a száltávolság csökkentésével: elektrosztatikus erők
- nyomtatásos technika: 0.2 μm széles alumíniumcsíkok szigetelő alapon anódtávolság 0.1-0.2 mm, kis driftidő, jobb helyfelbontás, MSGC
- a lavina lokalizált az anódon, a szomszédos szálakon indukált jelekkel helymérése

Katód-csík kamrák



Resistive plate chamber (RPC)



Time Projection Chamber (TPC)

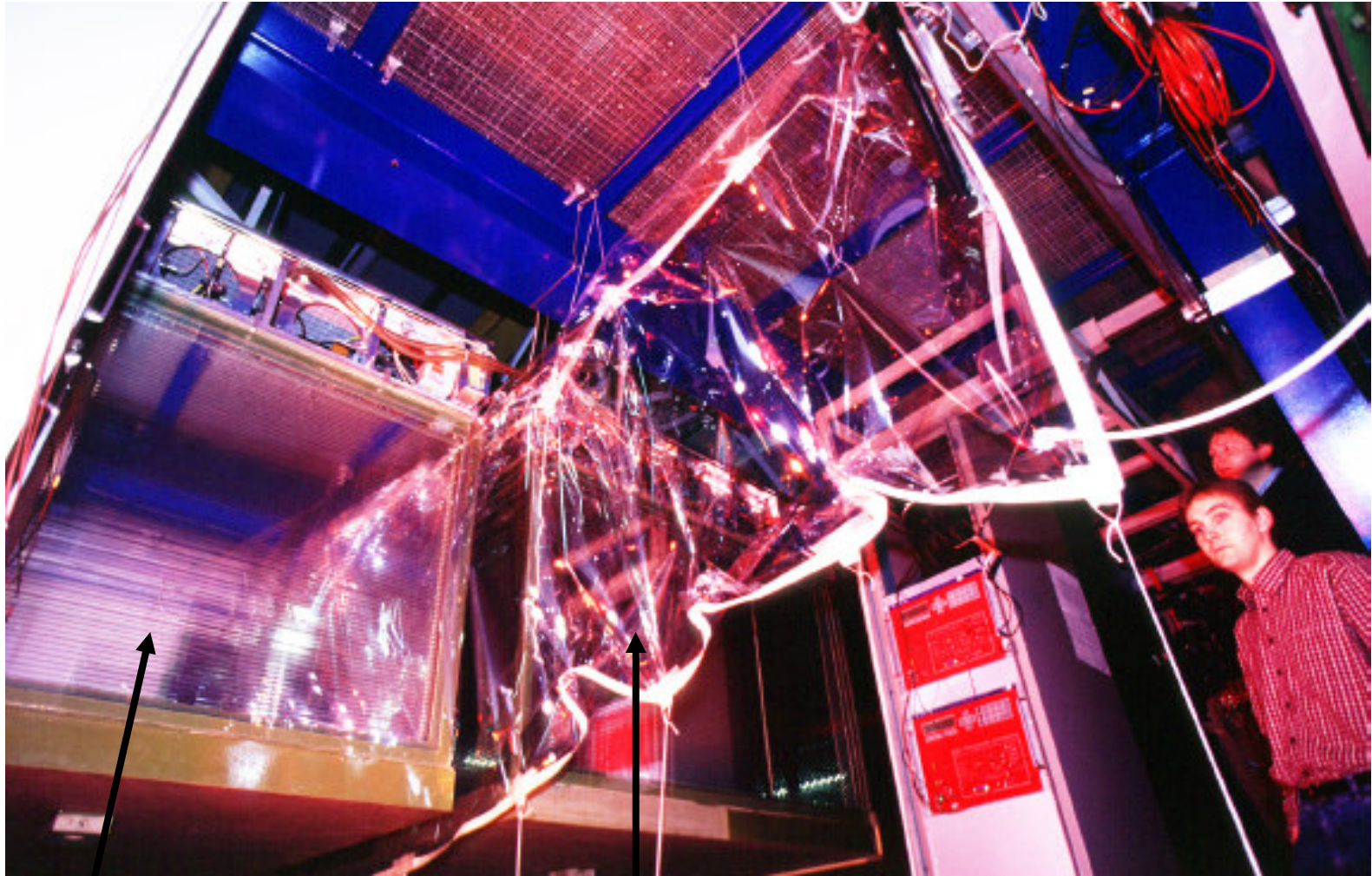
Homogén elektromos és mágneses tér (párhuzamos)
Kiolvasás a kamra tetején
Méteres drift úthossz



NA49 kísérlet, CERN SPS



TPC (NA49)

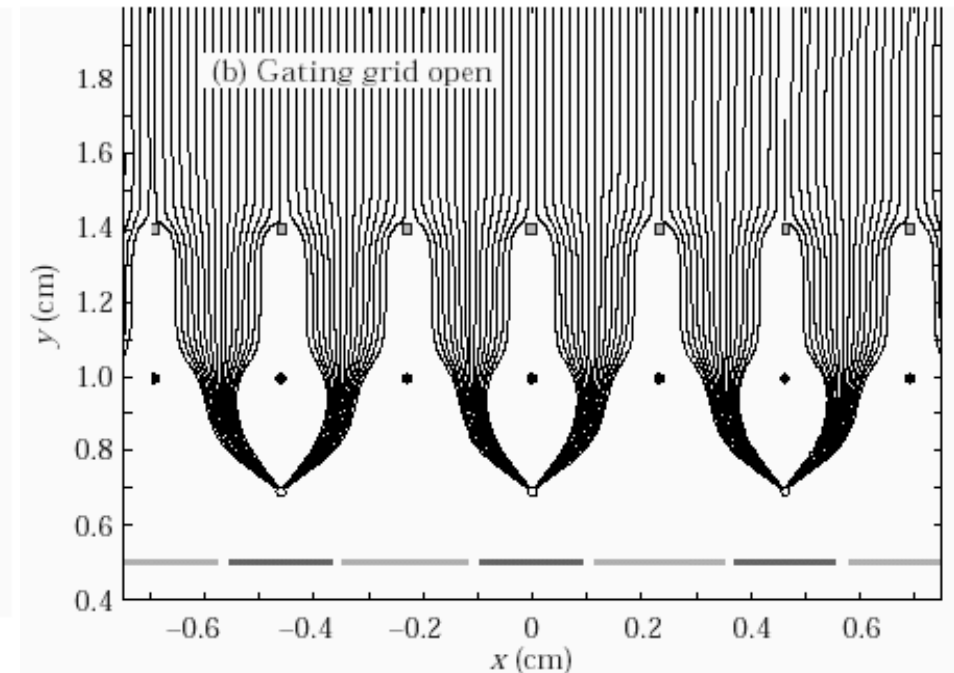
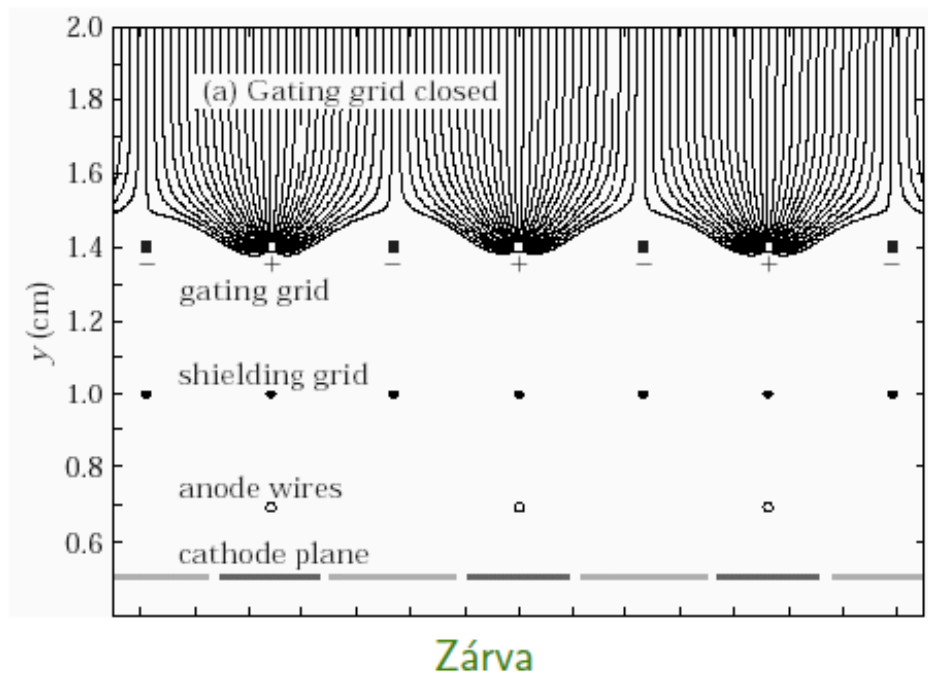


Drift térfogat

He-zsák

Time Projection Chamber

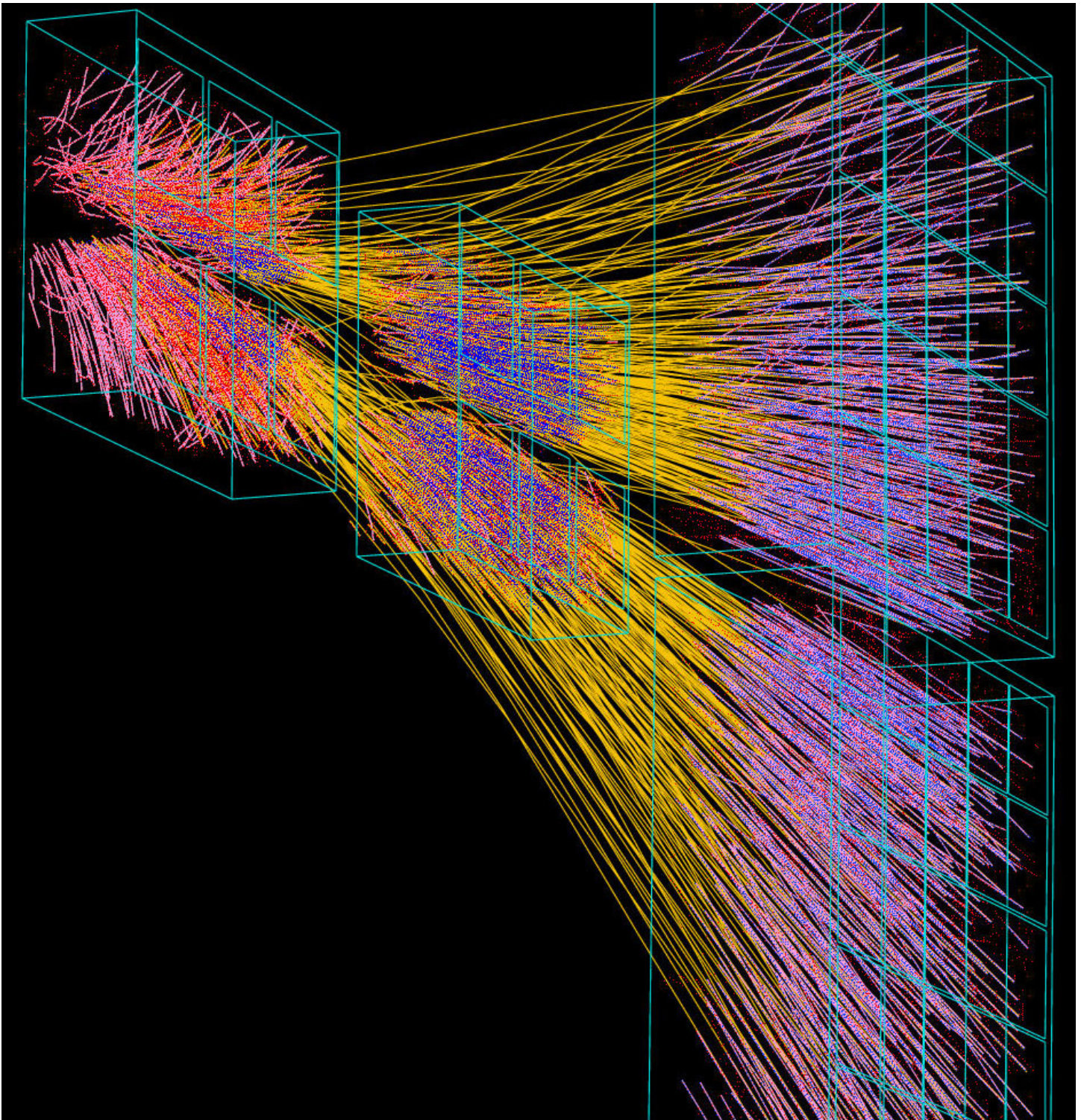
- hosszú drift, sok anódos proporcionális sík
- háromdimenziós információ (a harmadik az idő)
- a driftiránnyal párhuzamos mágneses tér lenyomja a diffúziót ($\sigma = \sqrt{2Dt}$)
 $D(B)/D(0) = \frac{1}{1+\omega^2\tau^2}$, ahol $\omega = eB/mc$ ciklotron frekvencia, τ az ütközések közötti átlagos idő
- a részecske útjának sokszoros rögzítése, energiaveszteség mérése
- impulzusmérés mágneses térben + $dE/dx \rightarrow$ kiváló részecskeazonosítás
- gázzal töltött, 1-2 m drifthossz, nagyfeszültségű tér váza
- jelformálás és -feldolgozás analóg eszközökkel vagy flash ADC-kkel
- kiváló minta-felismerés, nyom-azonosítás és részecskeazonosítás!



Nyitva

- amíg a kapu zárva, a driftelő elektronokat a kapuzó rács gyűjti össze az árnyékoló rács zárja le a drift régiót
- a trigger megérkezése után az elektronok áthaladnak a kapuzó rácson, sokszorozódnak az anódszálaknál
- a lavinákban keletkezett pozitív ionokat jól szegmentált katódlapok detektálják: pontos mérések
- a lassú pozitív ionokat a kapuzó rács ismételt bezárása gátolja meg abban, hogy a drift régióba jussanak

Nyomkövetés az NA49 TPC-vel



TPC - részecskeazonosítás

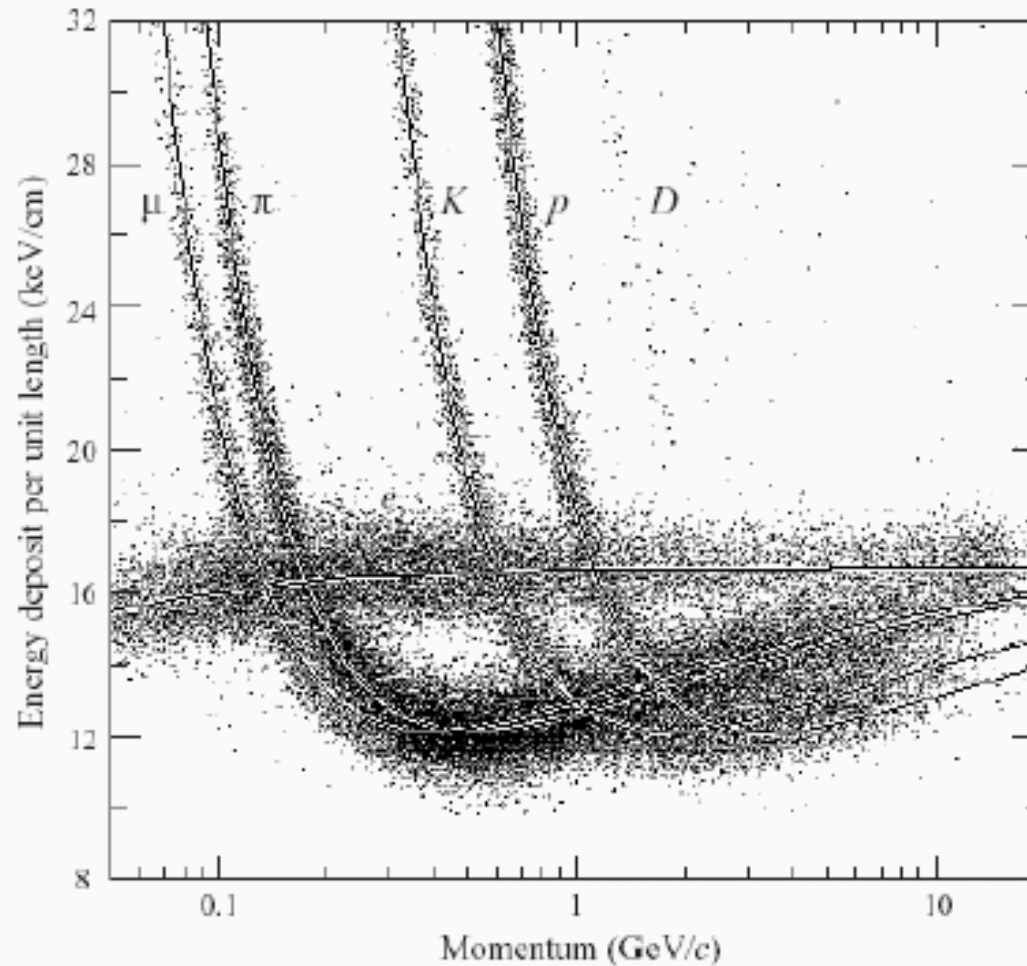


Figure 28.5: PEP4/9-TPC energy-deposit measurements (185 samples @8.5 atm Ar-CH₄ 80-20%) in multihadron events. The electrons reach a Fermi plateau value of 1.4 times the most probably energy deposit at minimum ionization. Muons from pion decays are separated from pions at low momenta; π/K are separated over all momenta except in the cross-over region. (Low-momentum protons and deuterons originate from hadron-nucleus collisions in inner materials such as the beam pipe.)

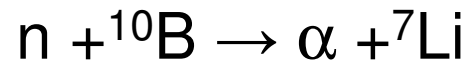
Neutronok detektálása

- Visszalökődésen alapuló
(neutron-mag rugalmas ütközés)
- Magreakciókon alapuló (lassú neutronokra)

^{10}B vagy ^6Li

Atommagtól jóval nagyobb neutronbefogási hatáskm. $\sim 1/v$

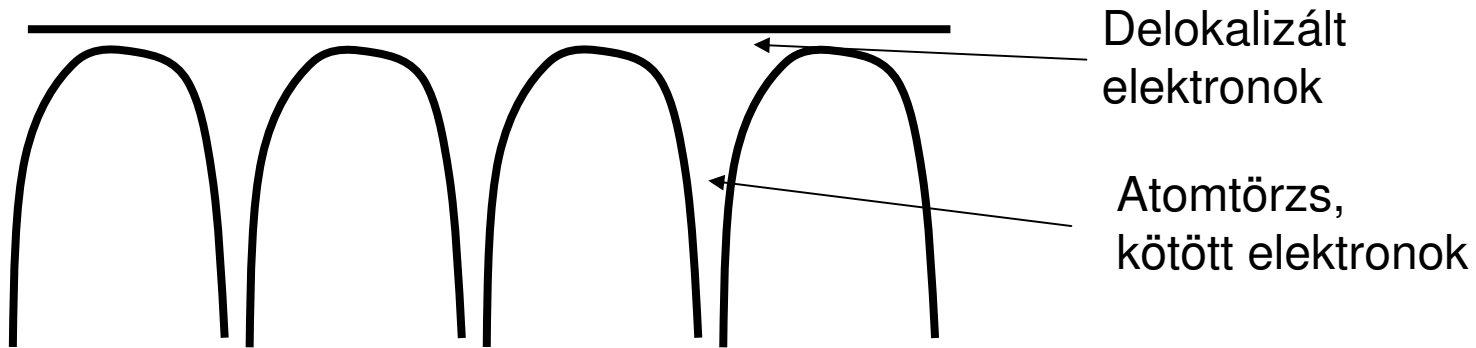
BF_3 gázból GM cső...



Mindkét esetben töltött részecskék mérésére vezetjük vissza!
Csak a töltött részecskék ionizálnak. Ezeket a legkényelmesebb mérni.

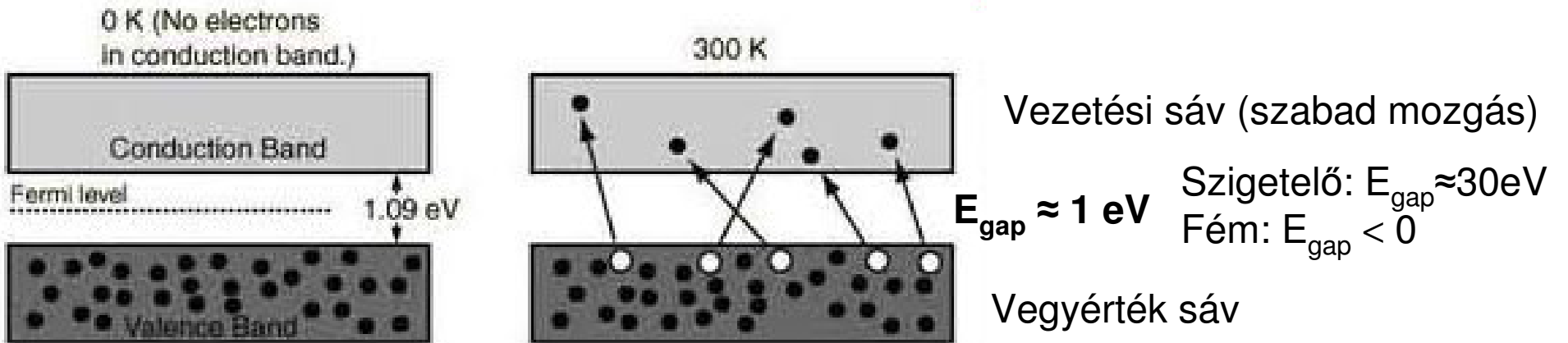
Félvezető detektorok

Potenciál egykristályban:



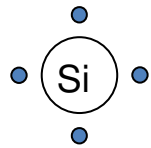
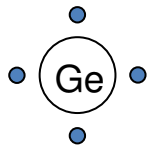
Elektronok hullámfüggvénye sok atomtörzsre kiterjed
 Nagyon sok energiaszint → energiasáv
 Kristályrács → sáv szerkezet.

Félvezetőknél speciális sáv szerkezet:

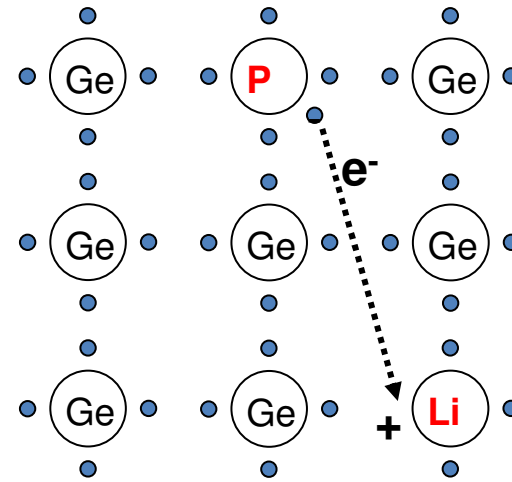


Félvezető detektorok

Lítiumot belediffundálnak: Ge(Li), Si(Li)



Hűteni kell.



n típusú
szennyezés
(negatív)

Kiürített zóna

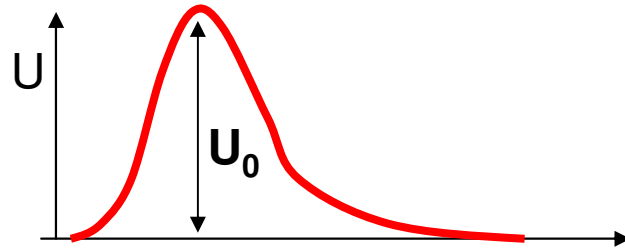
p típusú
szennyezés
(pozitív)

Újabb technika: HPGe: nagyon tiszta germánium (high purity).

Folyékony nitrogénnel hűtjük (hőmozgás csökkentése)

Beérkező gamma-foton kilök egy elektront (Compton, fotoeffektus), az elektron ionizál amíg el nem fogy az energiája, elektron-lyuk párok keletkeznek, a rákapcsolt feszültség (néhány kV) hatására kimennek az elektródákra.

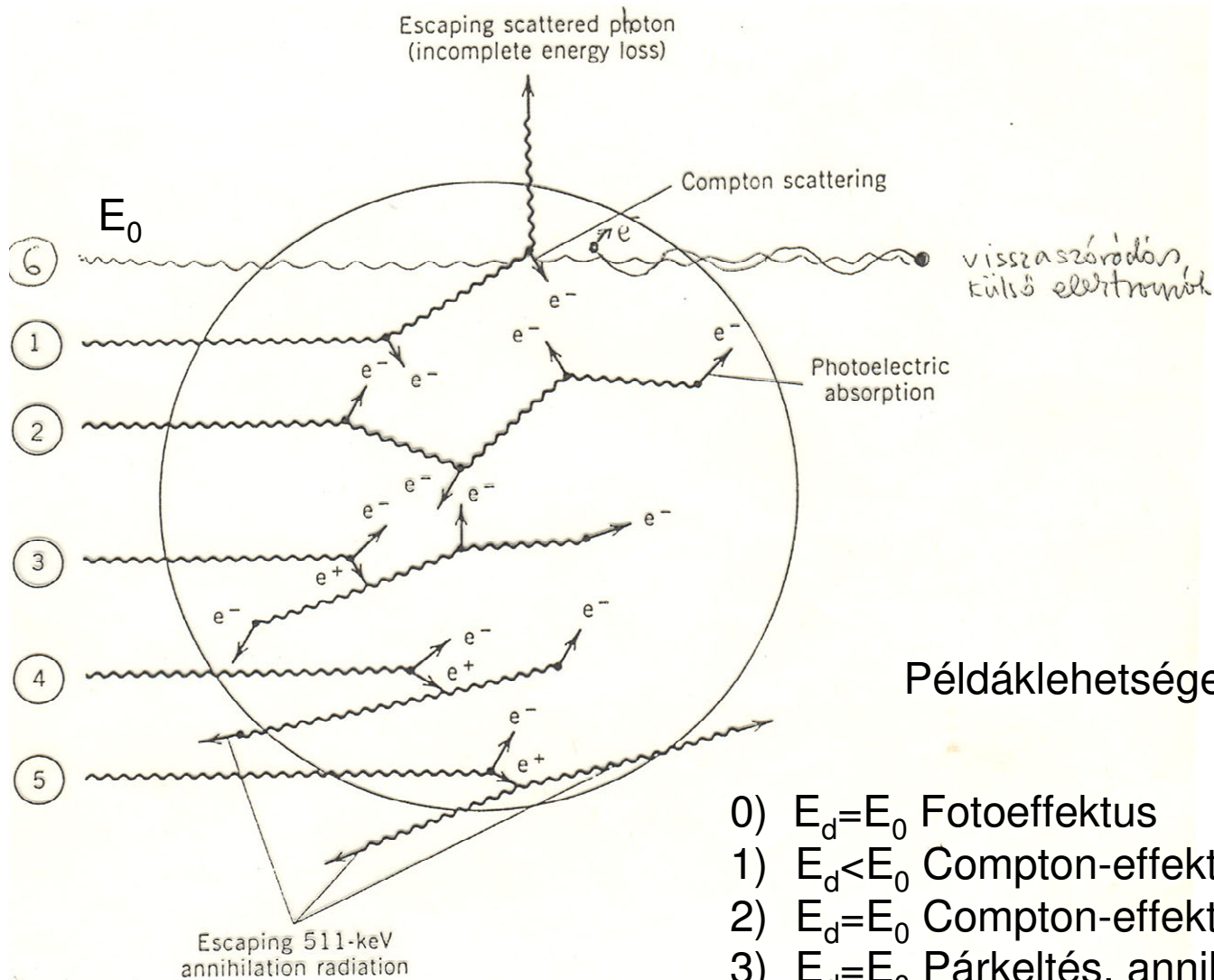
Jel:



$$U_0 \sim N_{e^-} \sim E_d$$

Amplitúdó-analizátor: osztályozza, hisztogramozza a jeleket nagyság szerint.

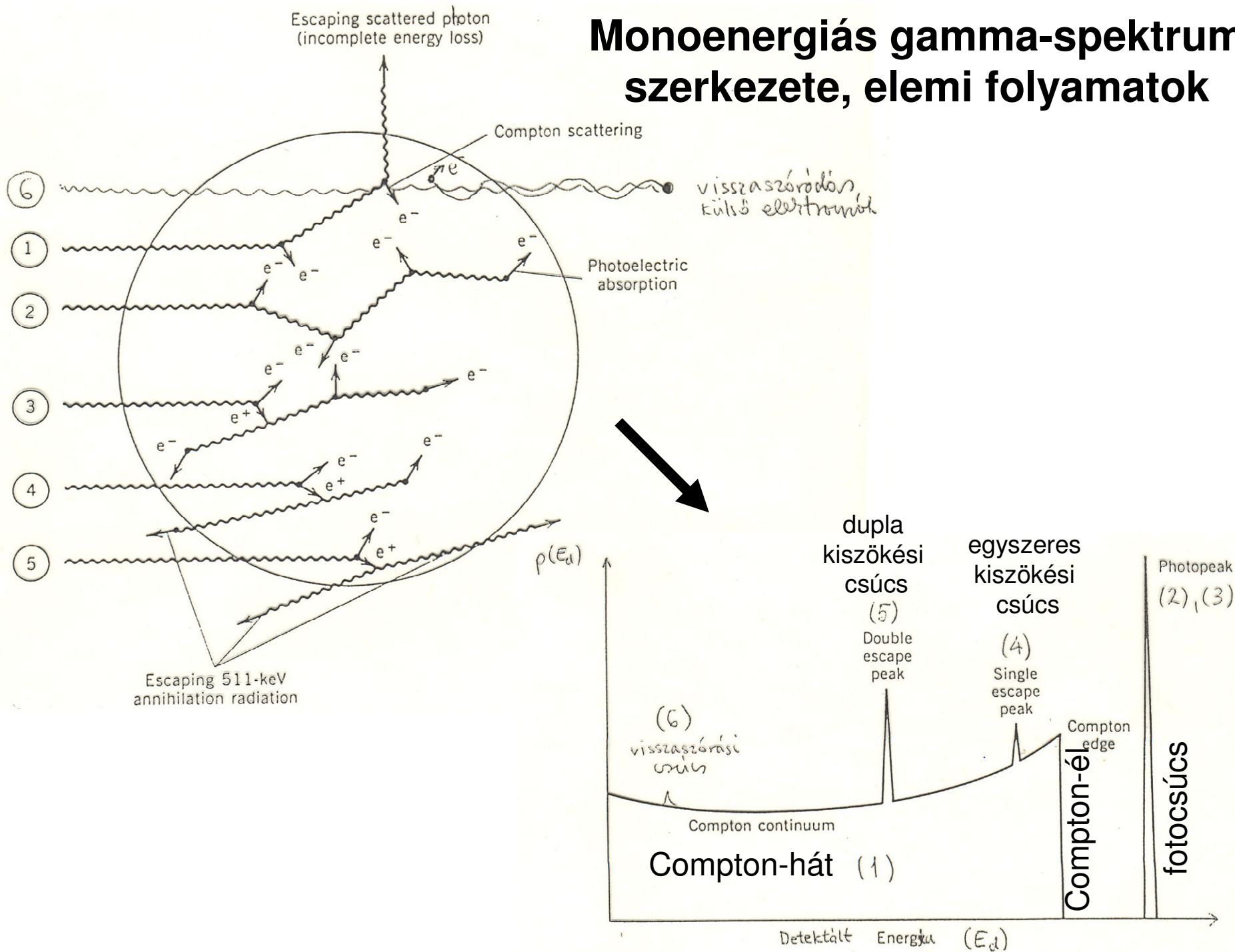
Monoenergiás gammasugárzás spektruma



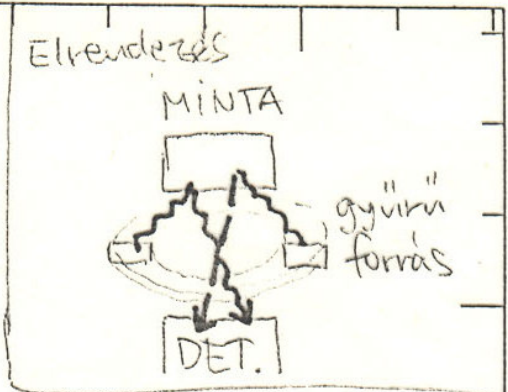
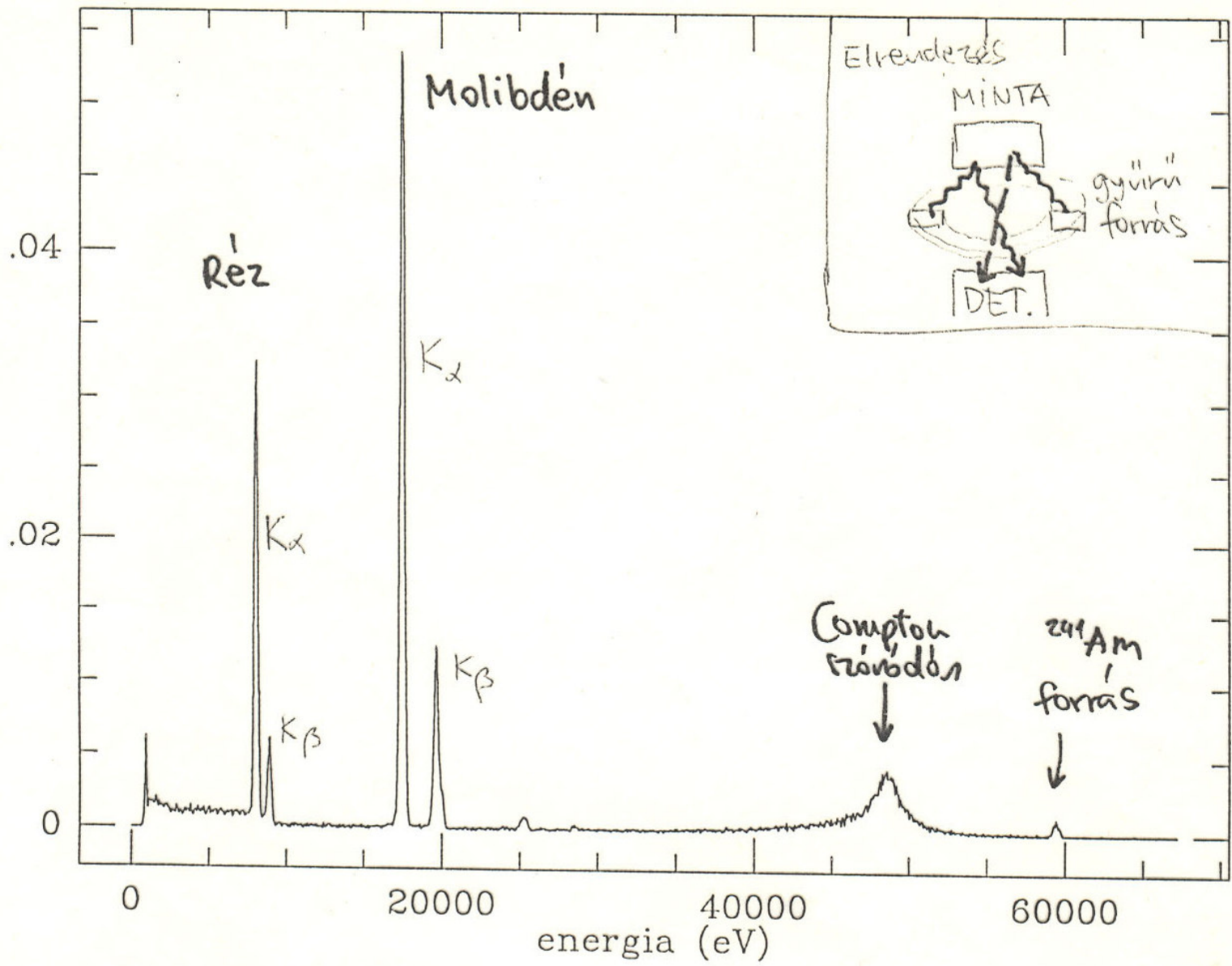
Példáklehetséges folyamatokra:

- 0) $E_d = E_0$ Fotoeffektus
- 1) $E_d < E_0$ Compton-effektus(ok), utána kiszökés
- 2) $E_d = E_0$ Compton-effektusok sorozata
- 3) $E_d = E_0$ Párkeltés, annihiláció, Compton, foto
- 4) $E_d = E_0 - 511\text{keV}$ Párkeltés, annihiláció, kiszökés
- 5) $E_d = E_0 - 1022\text{keV}$ Párkeltés, annihiláció, kiszökés
- 6) $E_d < E_0$ Visszaszórás, fotoeffektus

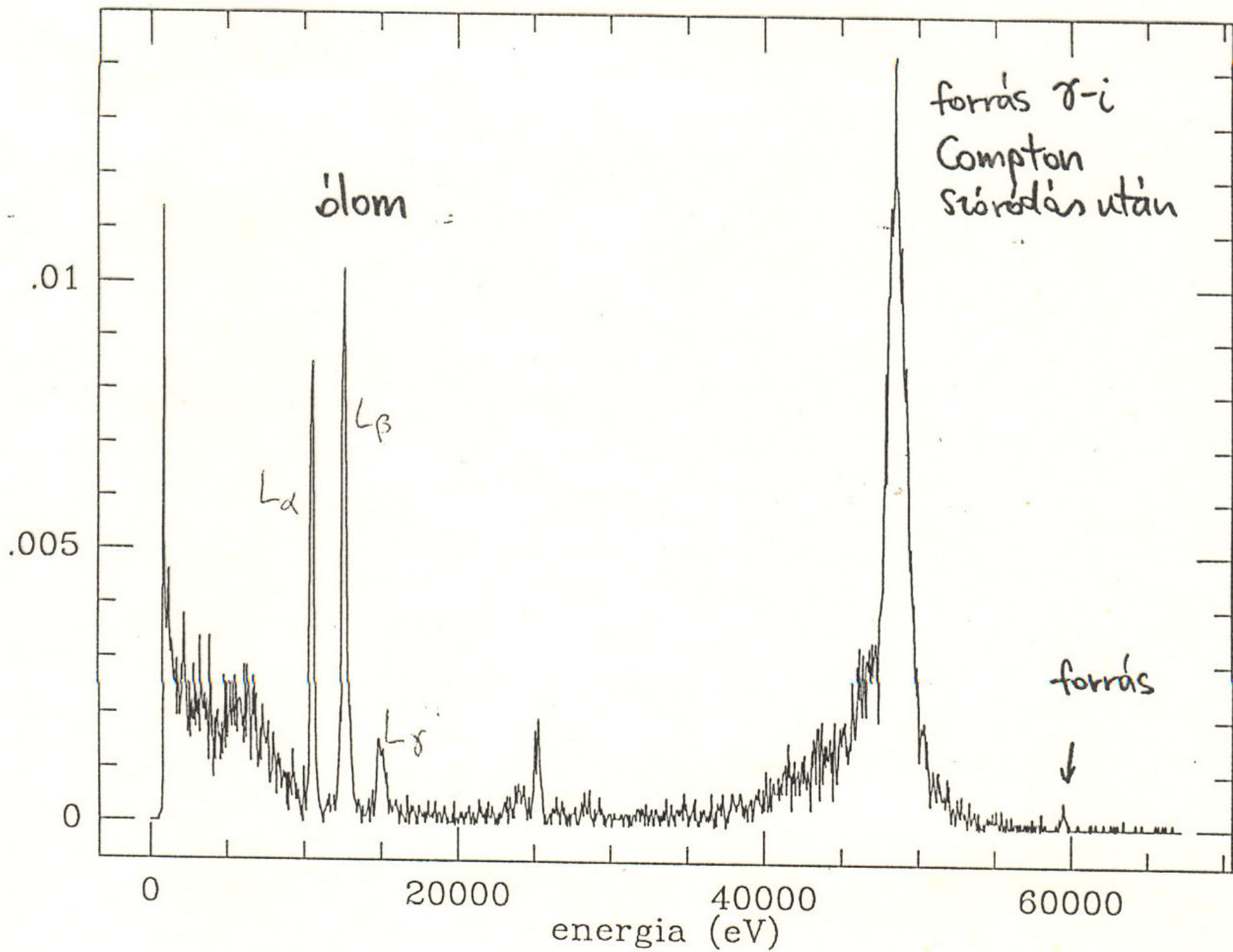
Monoenergiás gamma-spektrum szerkezete, elemi folyamatok



TIPIKUS RFA SPEKTRUMOK Si(Li) detektorral

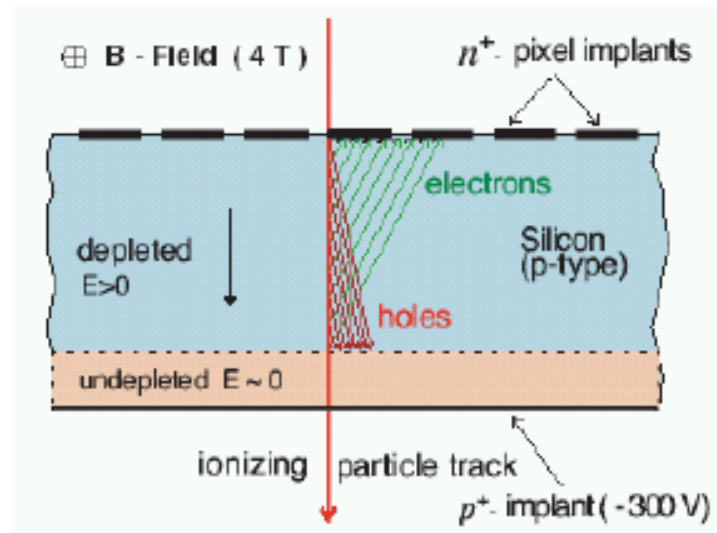


detektorral

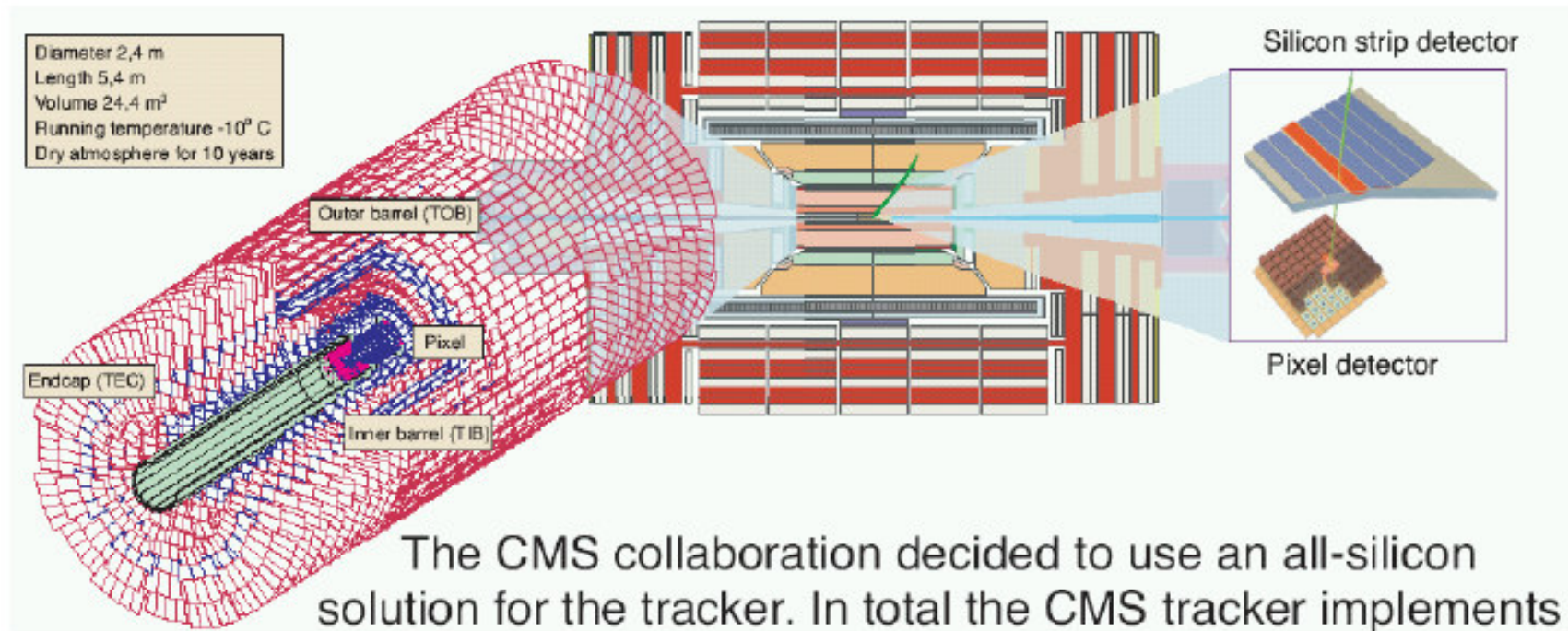


Félvezető nyomkövető detektorok

- kulcsfontosságú: nagyfelbontású vertex és nyomkövető detektorokhoz, használják fotodetektorként szcintillátorokhoz is
- anyagok: szilícium, germánium, gallium-arszenid, gyémánt
- kis sűrűsége és kis ionizálása miatt megfelelő nagyságú jelek 100-300 μm vastagsággal elérhetők, gyors jelek $\mathcal{O}(10 \text{ ns})$
kis zajú elektronika



CMS szilícium nyomkövető rendszer

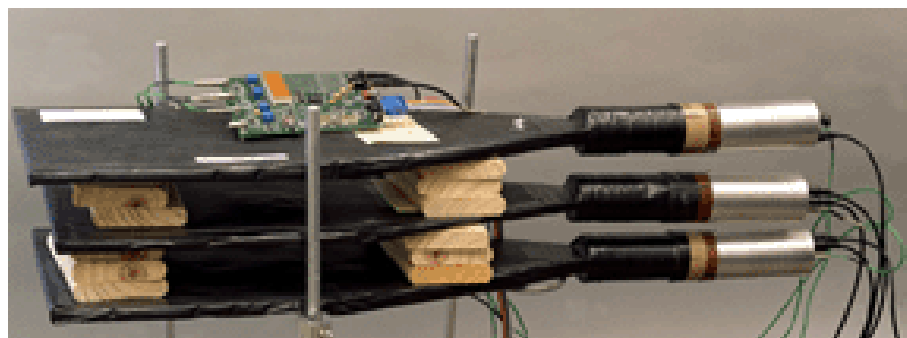
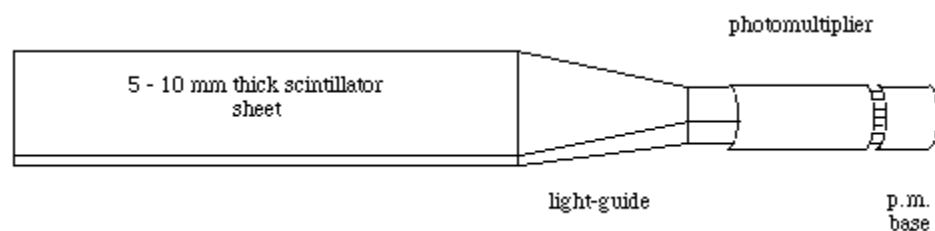


Pixelek: 66 millió pixel, 25 ns exponálási idő

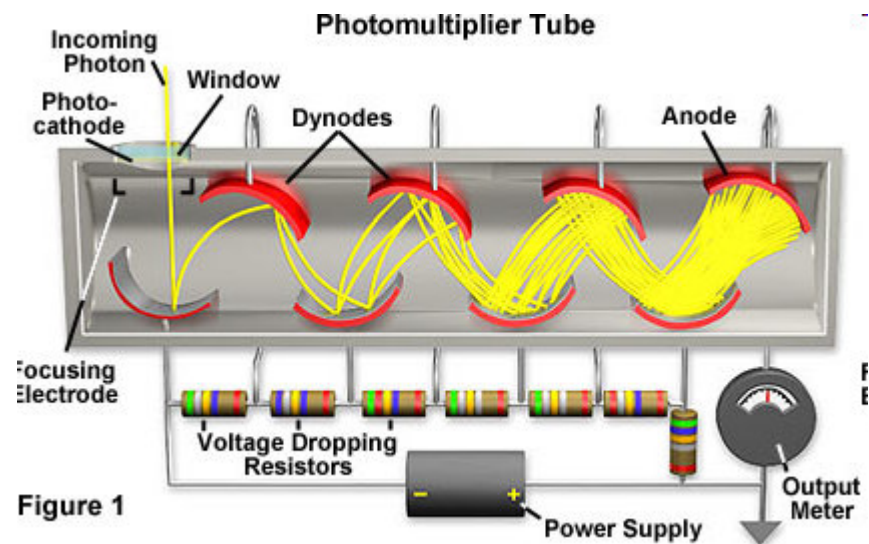
Sztintillációs detektorok

Szcintilláló anyag + fotoelektron-sokszorozó (PMT, *photomultiplier tube*)
Szcintilláció: töltött részecskék energialeadásának hatására gerjesztések,
majd kis fényfelvillanás

PMT detektálja ezt a látható v. UV fényt: fotoeffektus, majd elektron-sokszorozás



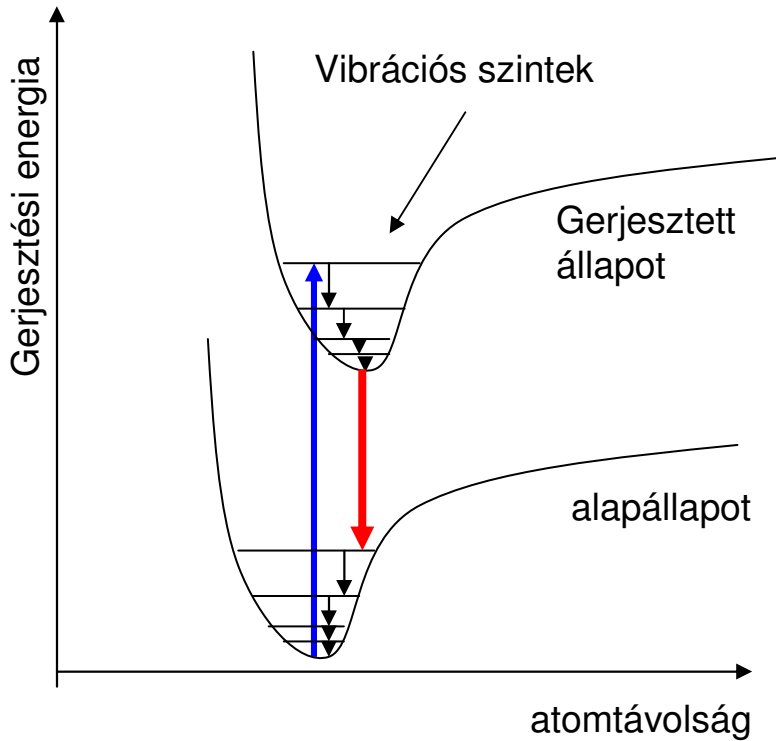
$$E_d \sim N_{\text{gerjesztett}} \sim N_{\text{látható foton}}$$



Fotoeffektus → fotoelektron → befókuszálódik → elektron becsapódik → néhány elektront kiüt → ezek a következő dinódán megint többszöröződnek.
10-12 dinóda → milliószoros elektronhozam (erősítés).

Szcintilláció

Fontos: saját kibocsátott fotonjaikkal szemben átlátszóak kell, hogy legyenek.



Szerves szcintillátorok:

Gerjesztés valamelyik vibrációs szintre

A vibrációs alapállapotot gyorsan eléri

Utána **legerjesztődés** az alapállapotba,

foton kibocsátás. Ez a foton nem tud elnyelődni, nincs elég energiája.

Szervetlen szcintillátorok: pl. NaI kristály
(40 foton/keV, 50% hatásfok).

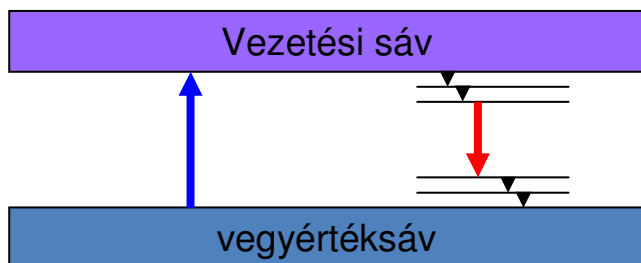
Egykristály kell (átlátszóság).

Ionizáló részecske a vegyértéksávból a
vezetési sávba gerjeszti az elektront.

Gap kb. 4 eV. Aktivátorok: pl. Tl, szennyezés,
energiaszinteket hoz létre a két sáv között.

Legerjesztődés ezeken keresztül.

Önátlátszóság.

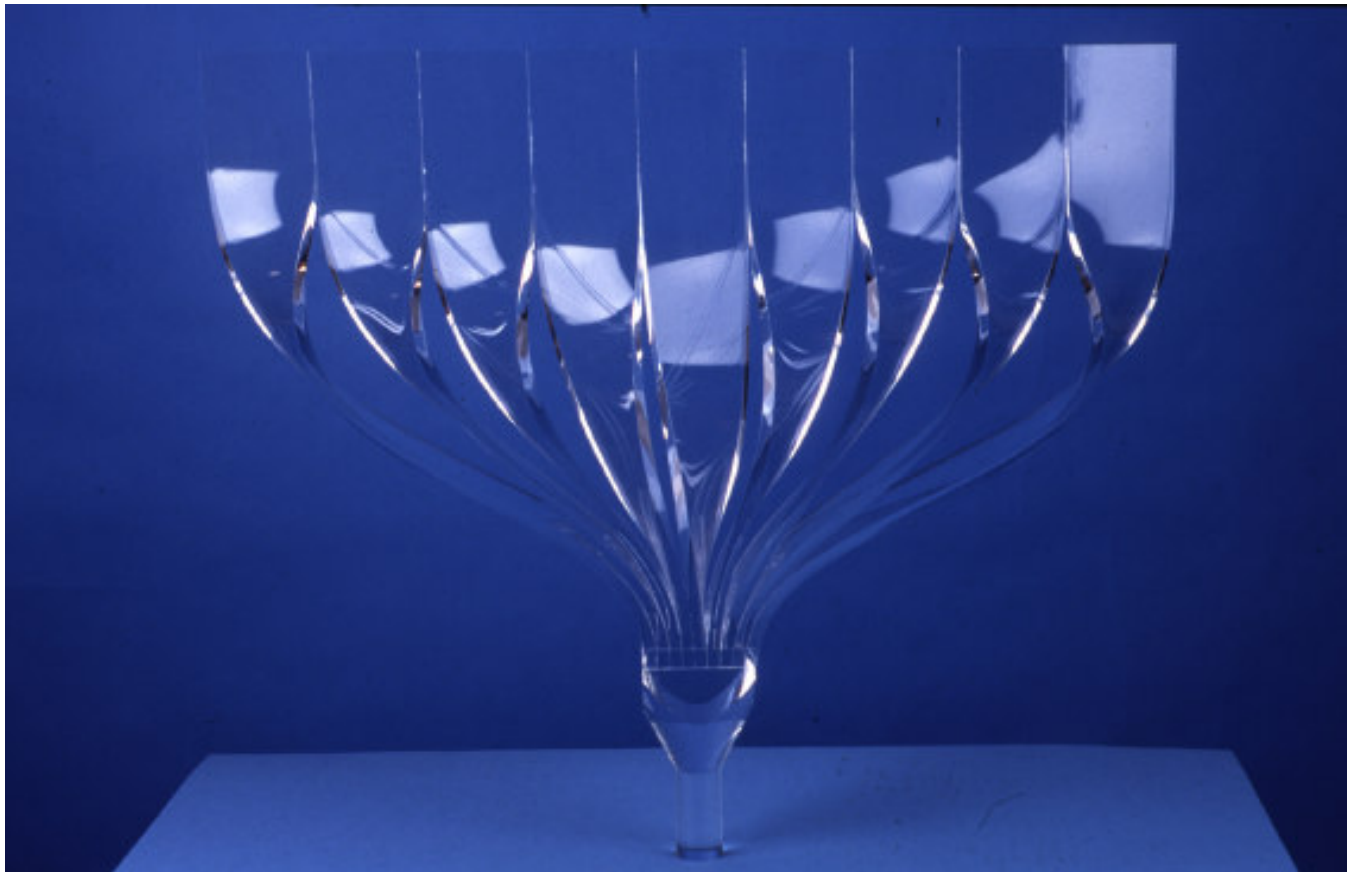


Szerves szcintillátorok – szcintilláló és hullámhossz-eltoló üvegszálak

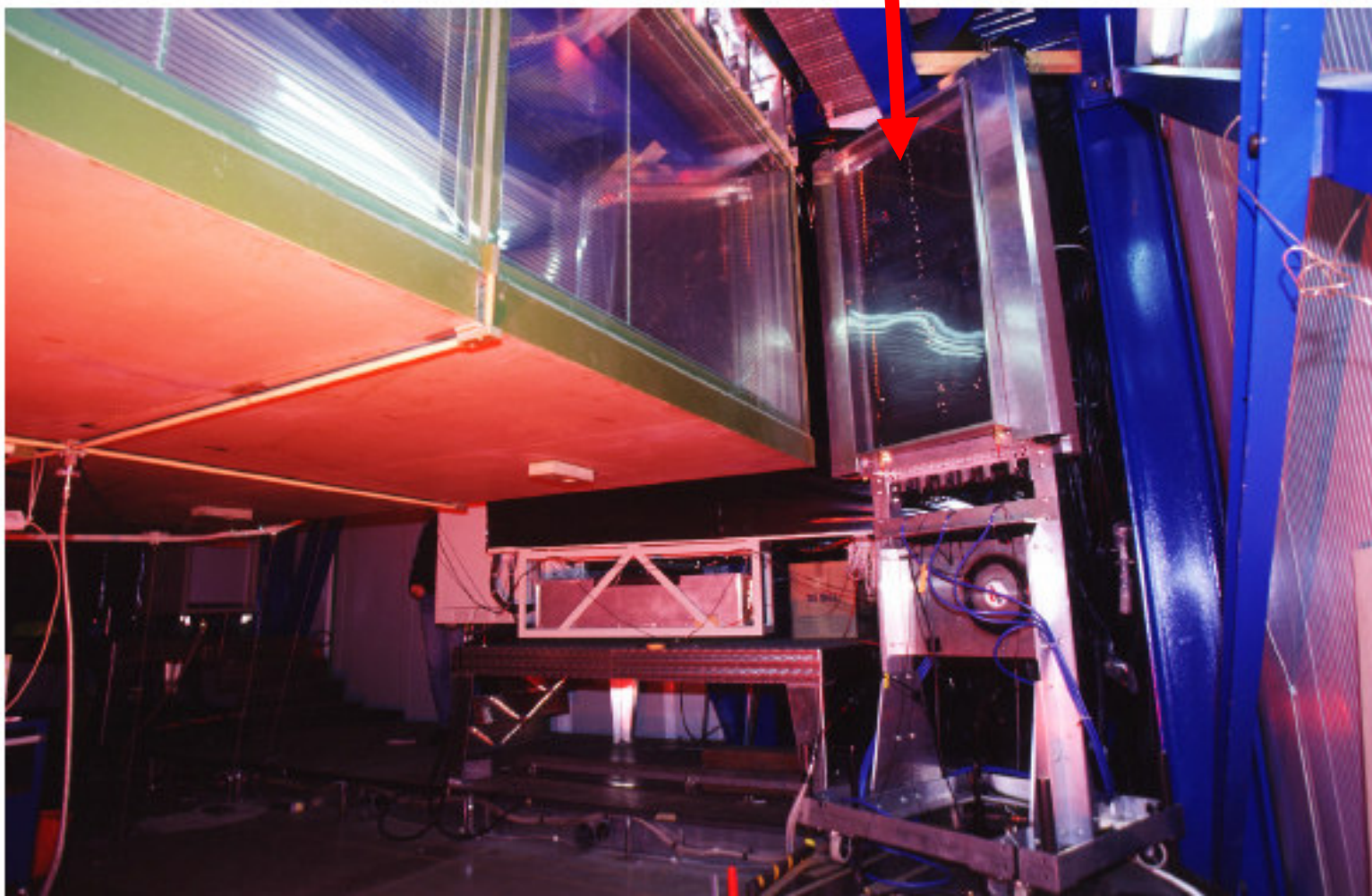
- gyors, sűrű, sugárzásnak ellenáll, jó felbontású
- nyomkövetőkben, kaloriméterekben
- polisztirol alap, néhány mikron vastagságú PMMA-ba (polimetilmetakrilát) burkolva, 0.5-1 mm átmérő
- a keletkezett fény 6-10 %-a szállítódik el
- 1 mm átmérőjű szálban egy MIP mintegy 2000 fotont kelt, ebből 200 kerül befogásra, melyeknek csak 5 %-a detektálódik
- a fénycsillapítási hossz: önabszorpció, visszaverő felületek minősége akár néhány m

Fényvezetők

- A szcintillátorok és a PMT-k optikai csatolása
- Teljes visszaverődés fontos, lágy ívek, nincsenek töréspontok

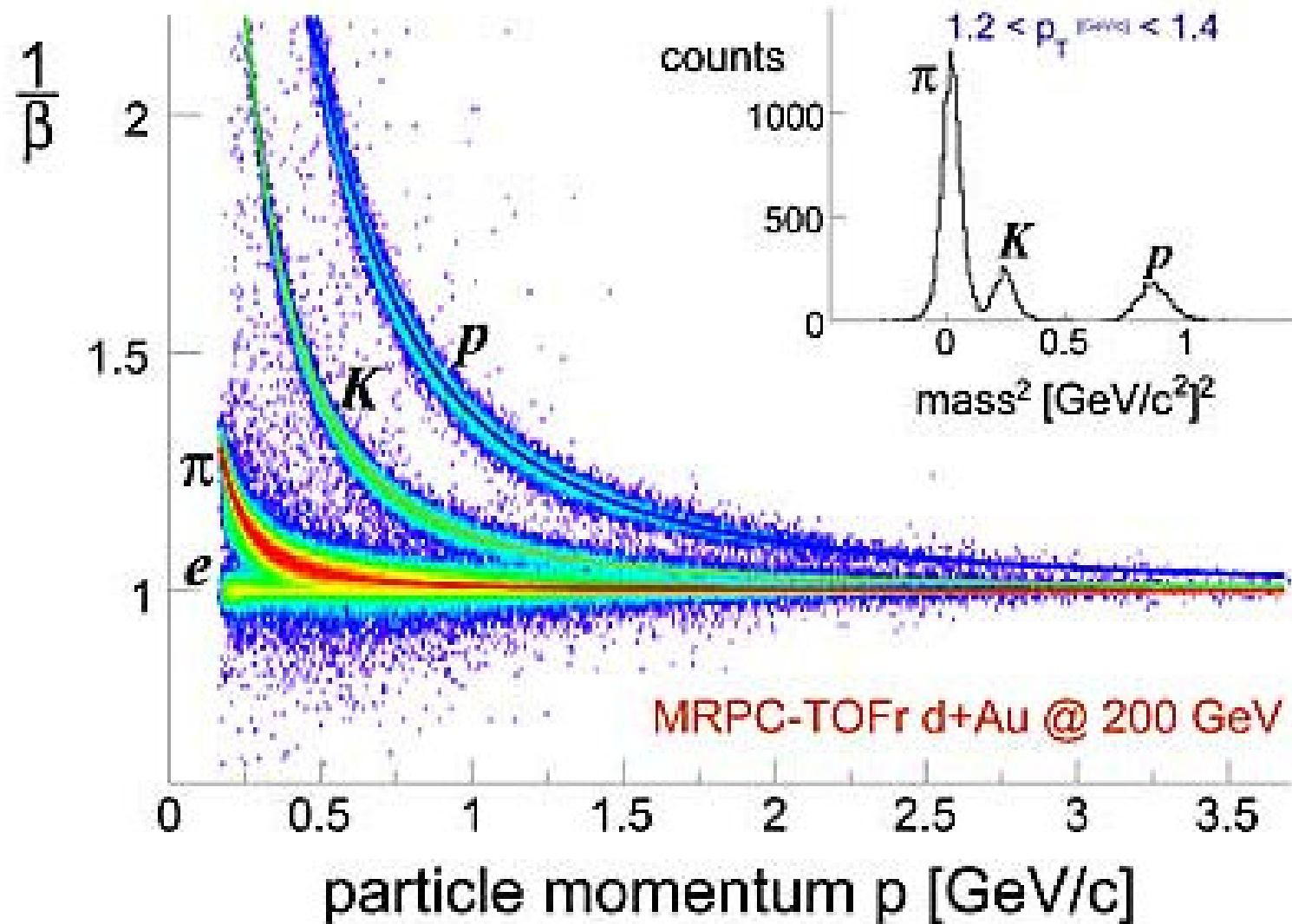


Időmérés: Time of Flight



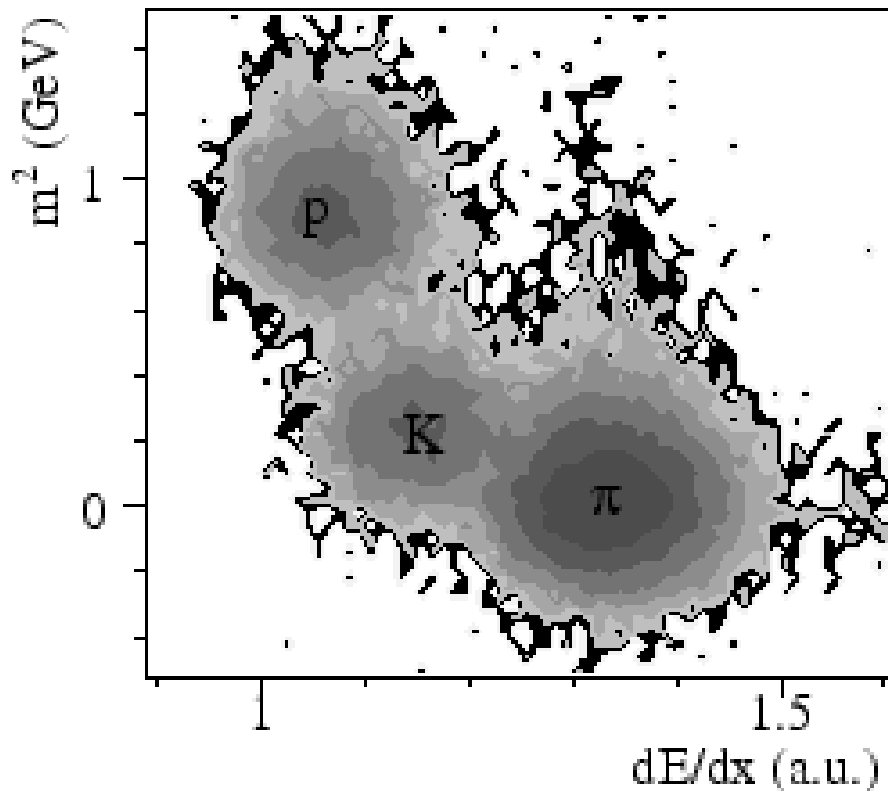
Mintegy 100 ps időfelbontás, rács- vagy mozaik-elrendezés
KFKI RMKI, CERN

Részecske-azonosítás TOF és p segítségével



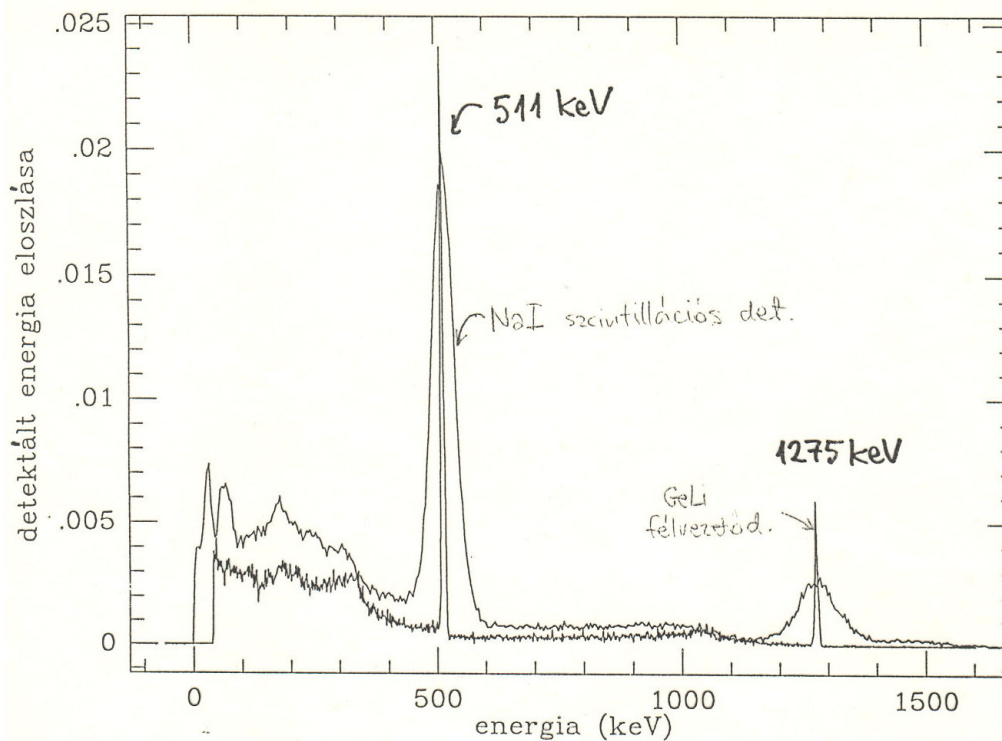
A TOF és dE/dx technikák kombinálása

- Egy adott impulzustartományban a részecskék ionizációja és repülési ideje is a tömegüktől függ.

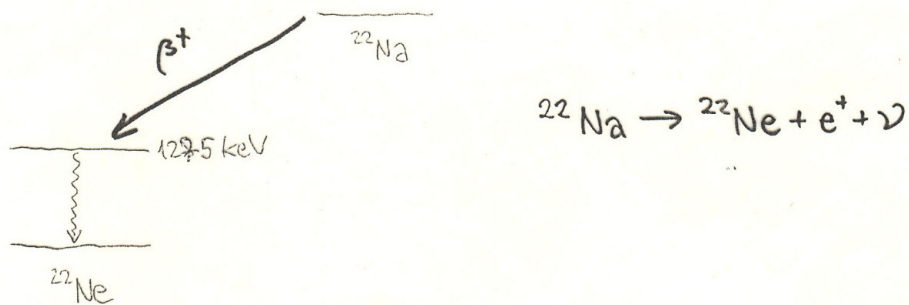


*NA49 TPC és TOF detektorok
CERN SPS*

Szcintillációs és félvezető detektorok felbontásának összehasonlítása



^{22}Na forrás spektruma $\left\langle \begin{matrix} \text{GeLi} \\ \text{NaI} \end{matrix} \right.$ detektorokkal

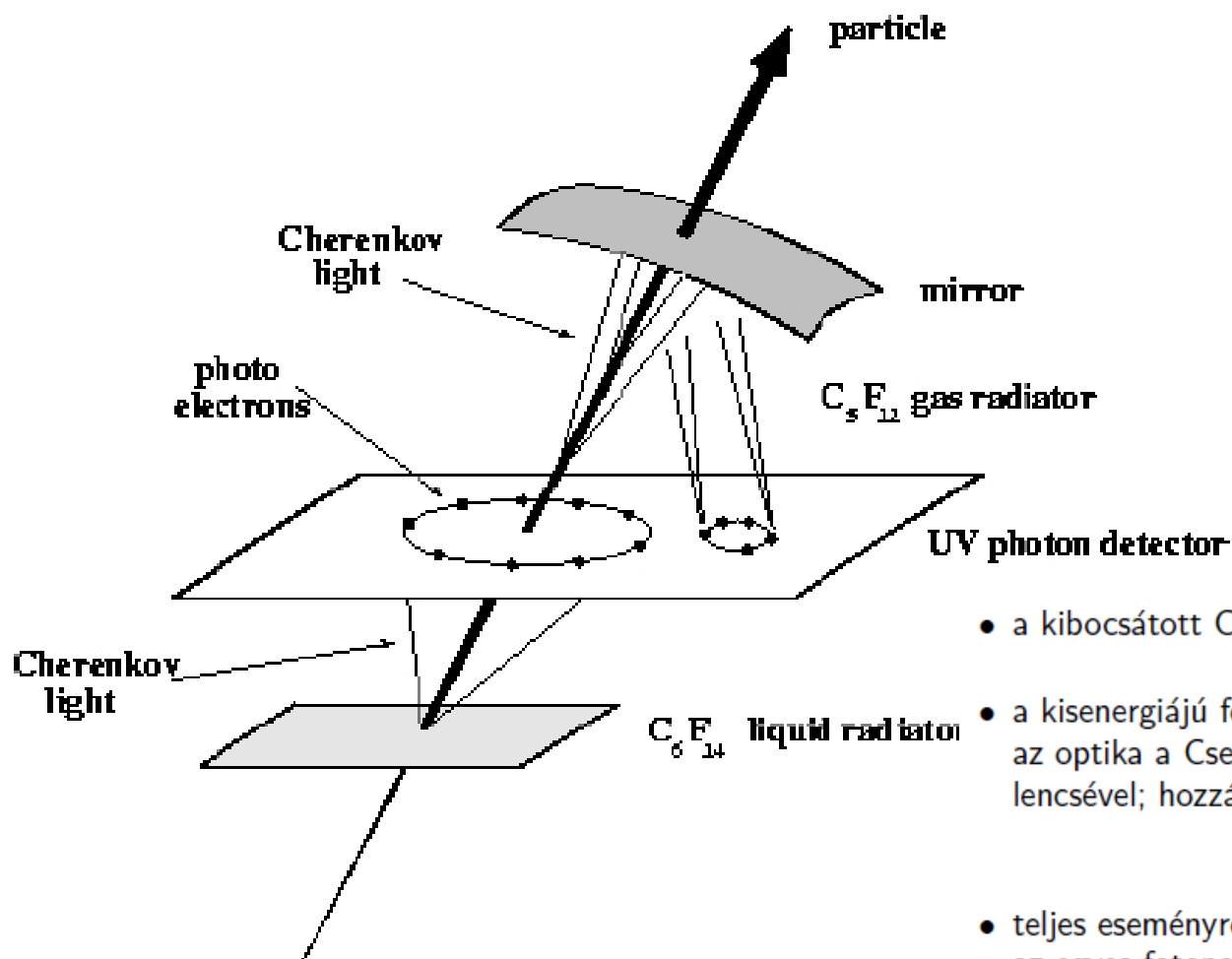


ANNIHILÁCIÓ

$$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma \quad E_\gamma = 511 \text{ keV} = m_e c^2$$

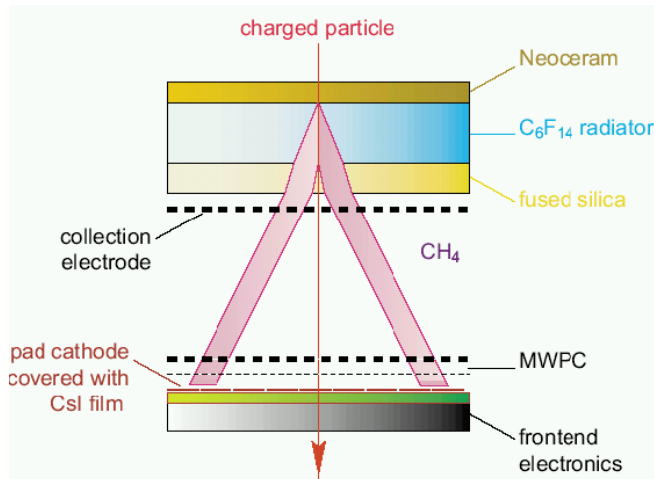
Cserenkov képképző detektorok

- Cserenkov sugárzás: már volt róla szó
- Közegbeli fénysebességnél gyorsabb töltött részecske esetén

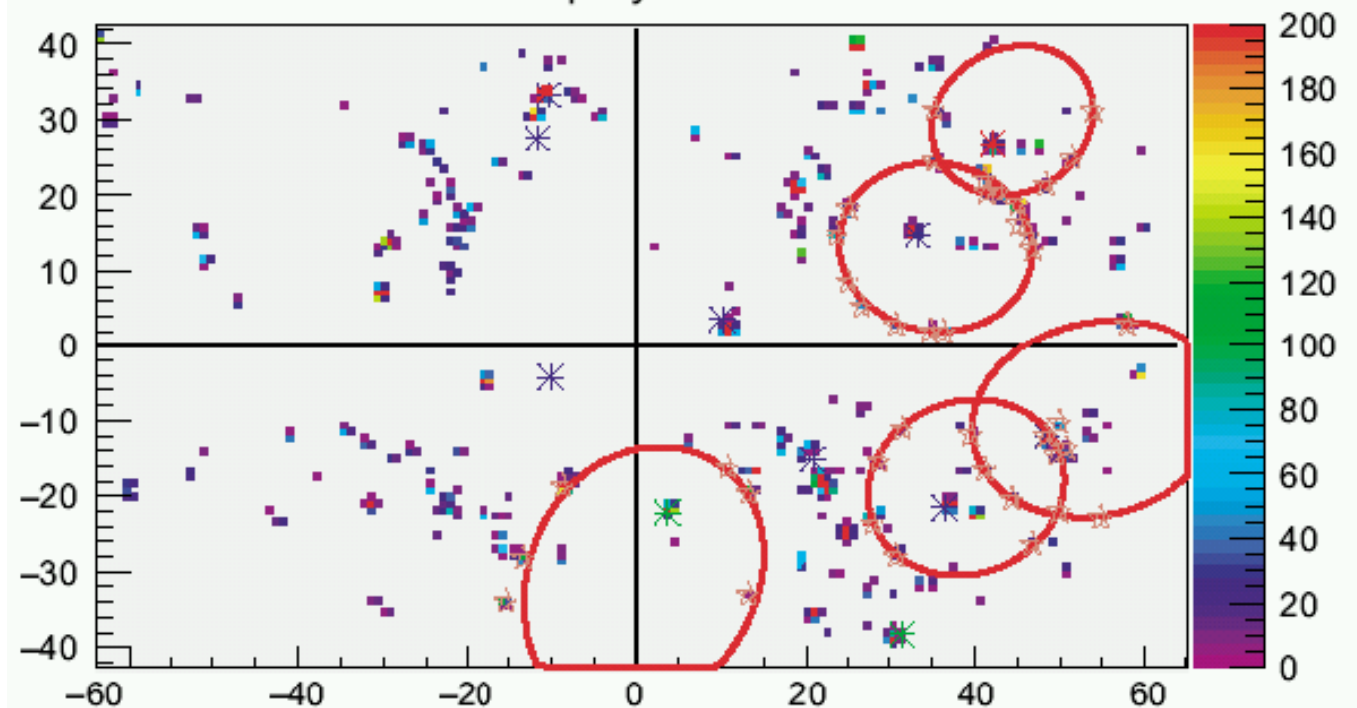


- a kibocsátott Cserenkov-fotonok gyűrűket alkotnak
- a kisenergiájú fotonokat egy detektorra "képezik le" az optika a Cserenkov-kúpot körre vetíti lencsével; hozzávetőleges fókusztávolság; apró lyukon keresztül
- teljes eseményrekonstrukció is lehetséges: nagy víztartályok az egyes fotonok hely- és időmérése felhasználásával

RICH – „Ring Imaging” Cserenkov detektorok



STAR-RICH Event Display



Átmeneti sugárzás detektorok (transition radiation, TRD)

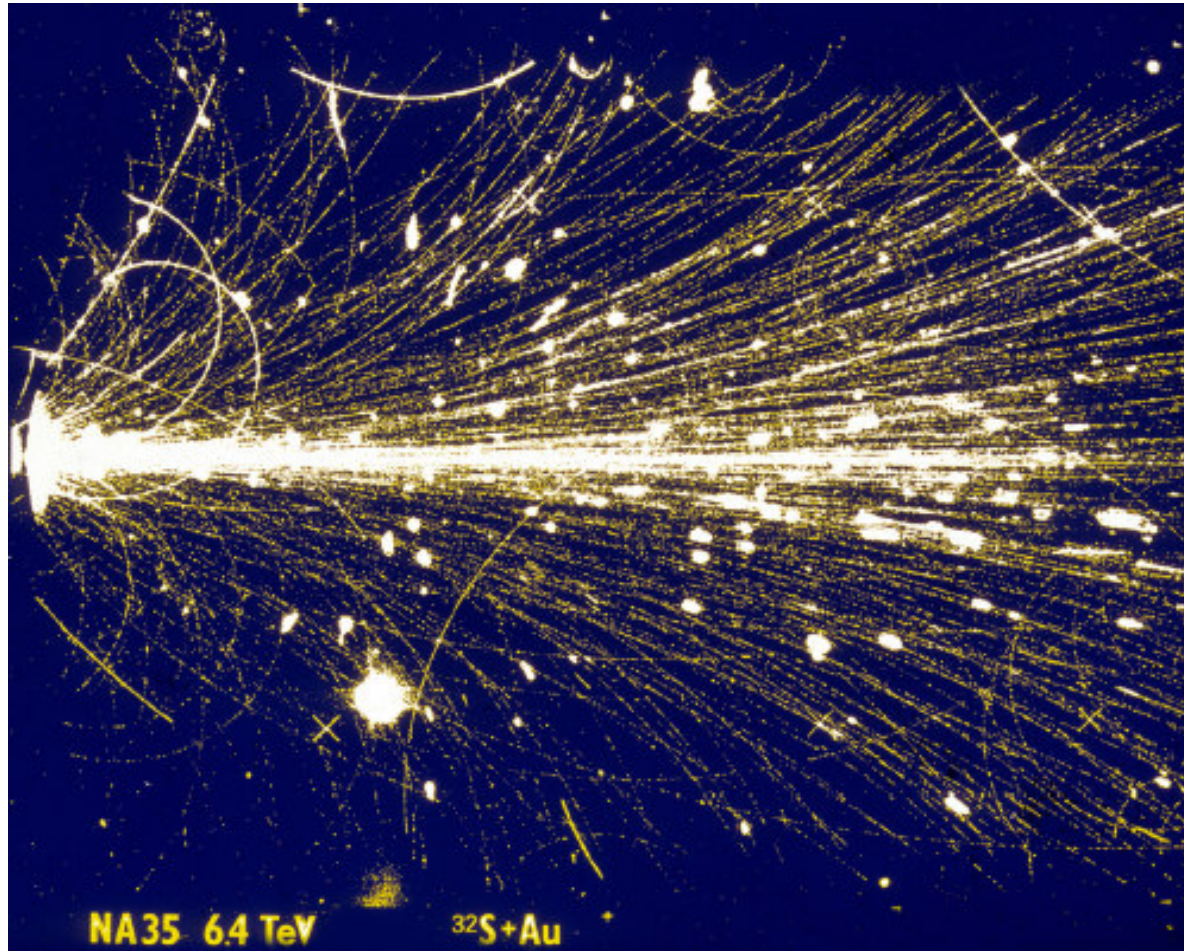
- a részecske két különböző anyag (vákuum és anyag) közti határon halad át
- kisugárzott energia $I \propto z^2 \gamma \omega_p$
- spektruma logaritmikusan divergál a kis energiák irányába

Felhasználás: részecske-azonosítás ott, ahol az időmérés és a fajlagos ionizáció módszerek már nem működnek

Röntgen tartomány

Sok réteget alkalmaznak (sok sugárzás)

Streamer kamra (szikrakamra)



Fémlemezek, köztük nemesgáz

Trigger (pl. szcintillátor, nyalábdetektor) hatására hirtelen nagyfeszültség kapcsolódik be
Az ionizációk helyén szikra alakul ki.

Elektromágneses záporok

- párkeltés és fékezési sugárzás
- hosszanti kiterjedés: sugárzási hossz, X_0 , $t = x/X_0$
- transzverz kiterjedés: Molière sugár, $R_M = X_0 E_s / E_c$
 $E_s \approx 21 \text{ MeV}$, E_c kritikus energia

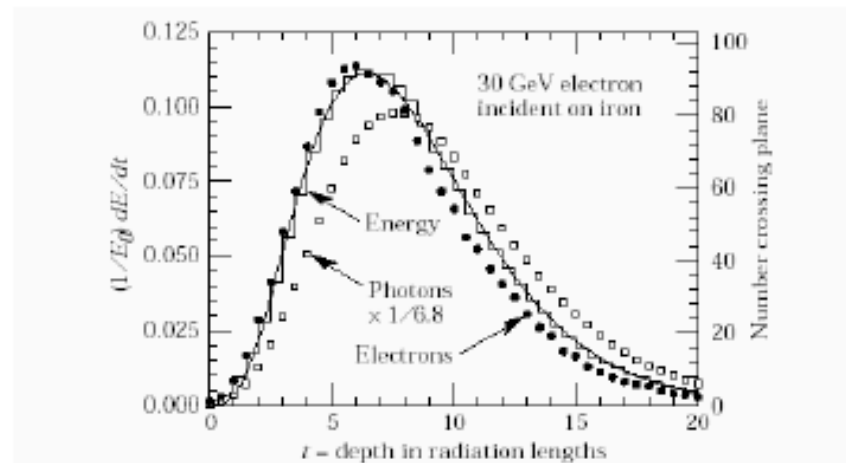
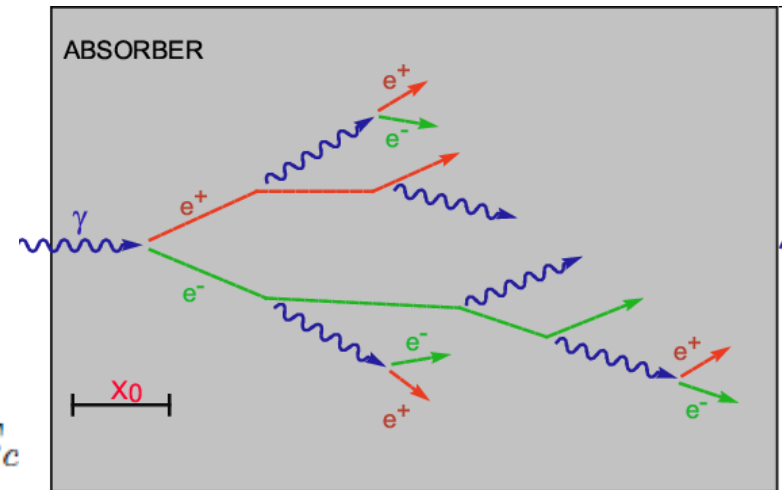
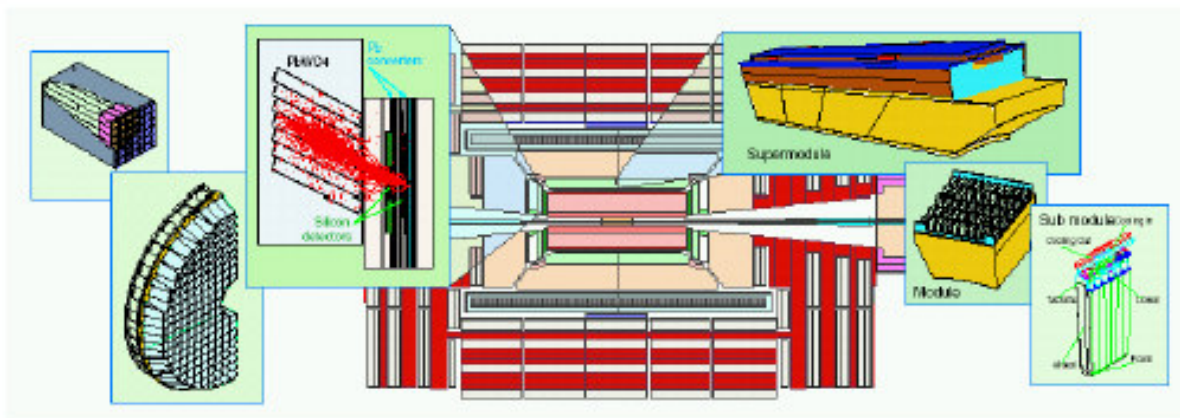


Figure 27.17: An EGS4 simulation of a 30 GeV electron-induced cascade in iron. The histogram shows fractional energy deposition per radiation length, and the curve is a gamma-function fit to the distribution. Circles indicate the number of electrons with total energy greater than 1.5 MeV crossing planes at $X_0/2$ intervals (scale on right) and the squares the number of photons with $E \geq 1.5 \text{ MeV}$ crossing the planes (scaled down to have same area as the electron distribution).

Elektromágneses kaloriméterek

A fotonok, elektronok teljes energiáját elnyelik, a teljes energiával arányos jelet adnak.
Energiatartomány: 1 GeV – 1 TeV



- az átlagos záporokat képletekkel leírhatjuk, de részletes és megbízható eredmények szimuláción alapulnak (EGS, GEANT)
- kétféle
 - homogén: az egész térfogat érzékeny, jelet ad
szervetlen, nehéz szcintilláló kristályok (BGO, CsI, NaI, PWO)
nem szcintilláló Cserenkov sugárhólyok (ólomüveg, ólom fluorid)
 - mintavevő: aktív anyag (szcintillátor, "nemes" folyadék, gáz, félvezető) és passzív elnyelő (ólom, vas, réz, urán) síkok egymás után

Hadron kaloriméterek



NA49, CERN SPS

Hadron kaloriméterek

- két komponens: azonnali elektromágneses, π^0 miatt lassabb az alacsony energiás hadronikus összetevő
- az elektromágneses és hadronikus energia eltérő hatásokkal alakul át elektronikus jellé: belső e/h arány
- $e/h = 1$ esetén a kaloriméter "kompenzáló"
- Ha e/h 5 vagy 10 %-kal eltér, a záporok π^0 tartalmának ingadozása miatt torzított jeleloszlás, energiafelbontás arányos $|1 - h/e|$ -vel.
- általában $e/h > 1$ emiatt teljesen érzékeny detektor (szcintillátor vagy üveg) sohasem lehet kompenzáló

Hadron kaloriméterek

- jól kompenzált hadron kaloriméterek
 - ZEUS 2.6 cm vastag szcintillátorok 3.3 mm uránlapok között, $0.35/\sqrt{E}$ felbontás
 - ZEUS prototípus, 10 mm ólom lapok 2.5 mm szcintillátor síkok között
 - D0 4-6 mm uránlapok, 2.3 mm folyékony argon, $0.45/\sqrt{E}$
- gyengébb felbontás, de egyszerűbb szerkezet (LHC)
vaslapok szcintilláló szál kiolvasással (ATLAS)
 $0.46/\sqrt{E}$ felbontás, $e/h = 1.5 - 1.6$

CMS HF kaloriméter:
(RMKI-CERN)



VIZUÁLIS DETEKTOROK

BUBORÉK kamra

KÖD kamra

DIFFUZIÓS kamra

SZIKRA kamra

MAGEMULZIÓ

NYOMDETEKTOR

túlhevített folyadék

túlhűtött gáz (adiabotikus expanzió)

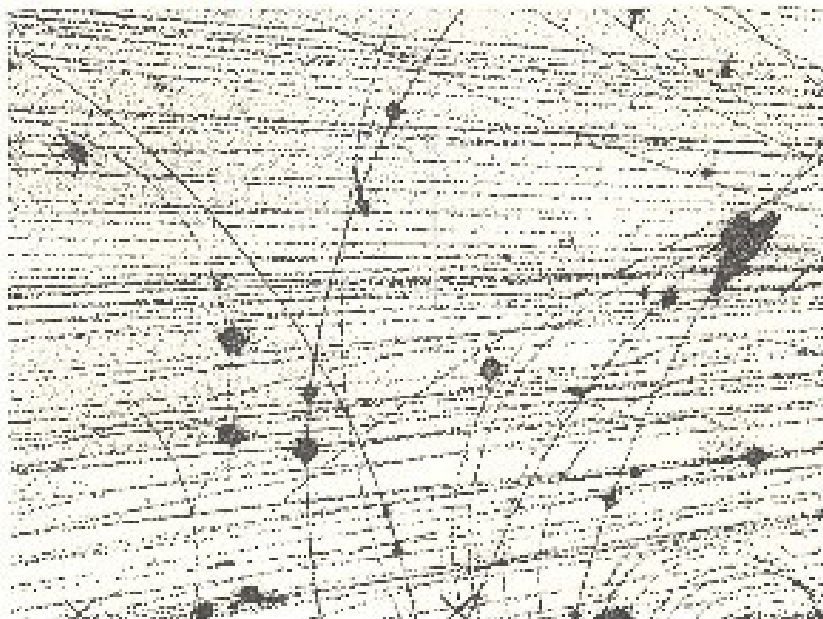
hőmérséklet gradiens

kiszülés

3 dimenziós pálya (ny. kizárás)

atomráis lokális roncsolása + maradás
nagy fajlagos ionizáció esetén

tipikus fénykép:



ábra:
CSATÓ R.
SIKLÉR F. &
Munkatársai
CERN kísérlet.

görbületi sugár \rightarrow

$$r = \frac{p}{eB}$$

{ energia
töltés (+, -)

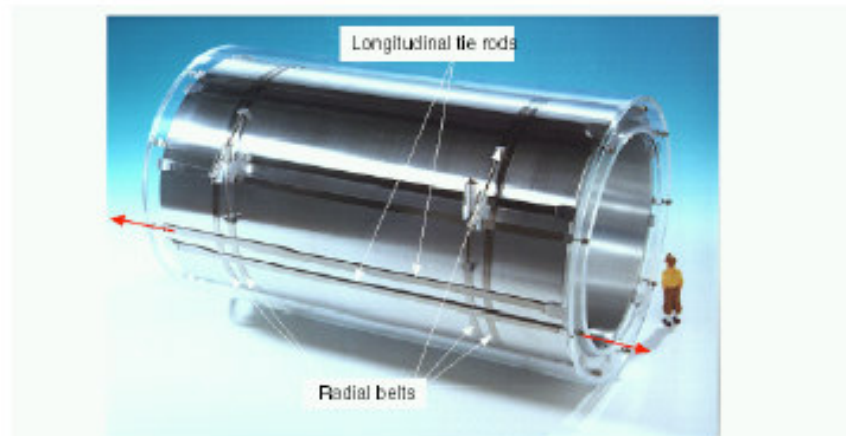
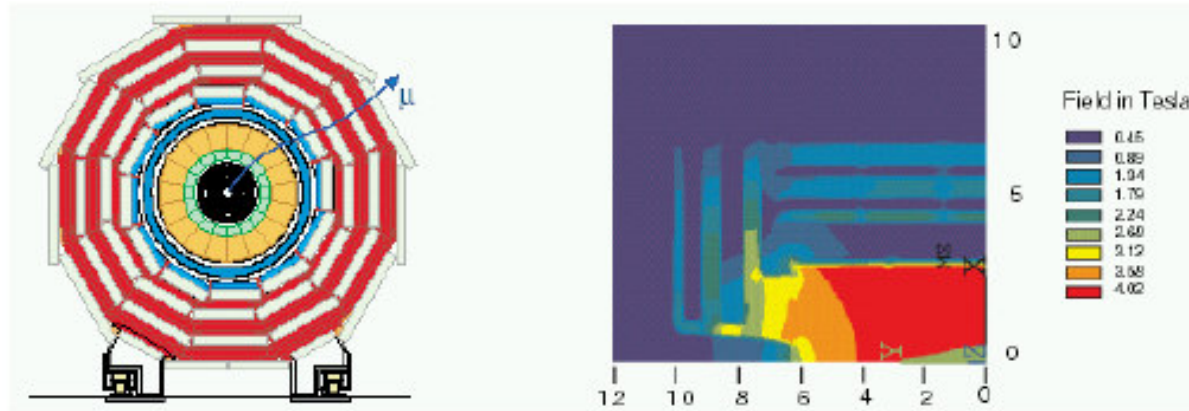
Makroszkopikus metastabil állapotot kell fenntartani (túlhűtés, túlfűtés, stb)

Ionizáló részecske hatása makroszkópikus változást okoz (buborékok, szikrák, feketedés...)

Termolumineszcens doziméter:
Ionizáció hatására ideiglenesen egy metastabil energiaszintre gerjesztés. Lejönni csak fűtés hatására tud, látható fotont bocsát ki, ezt PMT-vel mérjük.
PI. Pille doziméter (Mir űrállomás).
(labor, Atomfiz. Tsz.)



Szupravezető mágnesek



The magnetic yoke contains the muon chambers while the barrel part of the hadron calorimeter, HB, of the electromagnetic calorimeter, EB, and the tracker are situated inside, and supported from the inner shell of the vacuum tank

Szupravezető mágnesek

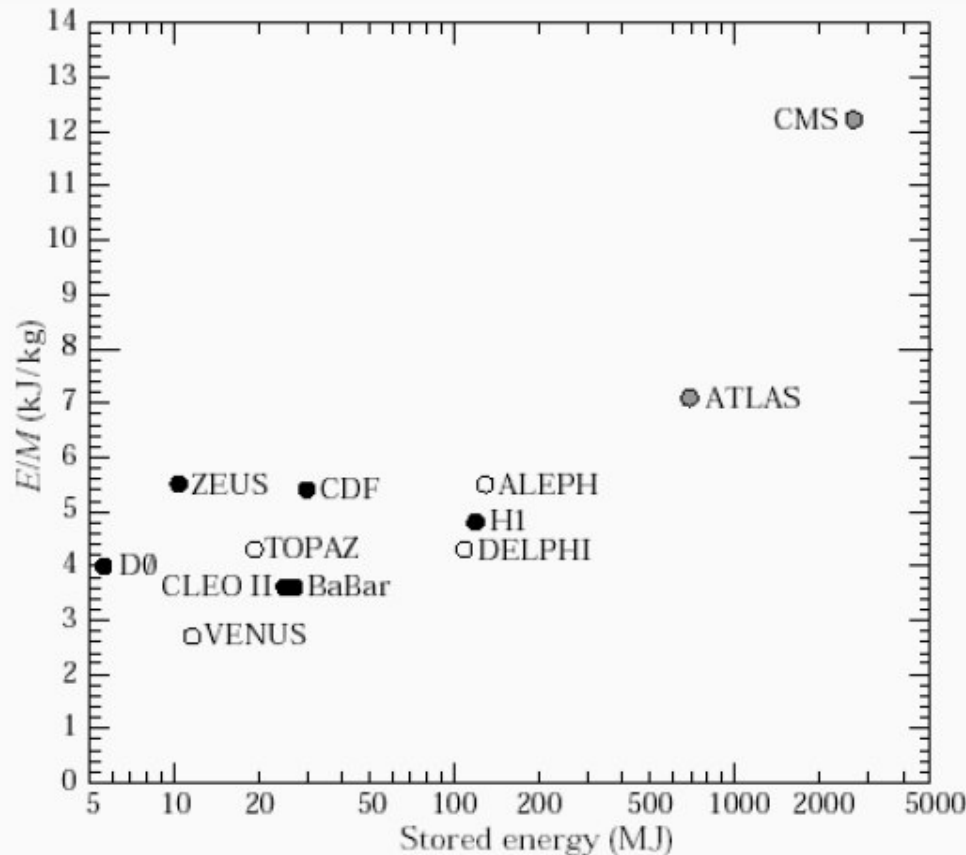


Figure 28.12: Ratio of stored energy to cold mass for existing thin detector solenoids. Solenoids in decommissioned detectors are indicated by open circles. Solenoids for detectors under construction are indicated by grey circles.

- Tárolt energia / hideg tömeg, vastagság \leftrightarrow hőmérsékletemelkedés
- 12 kJ/kg, megengedhető hőmérséklet 100 K alatt

$$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$$

$$1 \text{ MeV} = 1,602 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

$$1 \text{ kcal} = 4187 \text{ J}$$

$$1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2 = 100 \text{ fm}^2$$

$$1 \text{ ATE} = 931.5 \text{ MeV}$$

$$m_p c^2 = 938,2 \text{ MeV}$$

$$m_n c^2 = 939,5 \text{ MeV}$$

$$m_e c^2 = 511 \text{ keV}$$

$$(m_n - m_p - m_e) c^2 = 780 \text{ keV}$$

$$\hbar c = 197.33 \text{ MeV} \cdot \text{fermi}$$

$$\hbar c = 1241 \text{ nm} \cdot \text{eV}$$

$$\frac{ke^2}{\hbar c} = \frac{1}{137} = \alpha \quad (\text{finomszerkezeti \u00e1lland\u00f3})$$

$$ke^2 = 1,44 \text{ MeV} \cdot \text{fermi}$$

$$\tau_0 = 1,2 - 1,5 \text{ fm}$$

FEKF egy\u00fctthat\u00f3i:

$$\alpha = 15,75 \text{ MeV}; \beta = -17,8 \text{ MeV}; \gamma = -0,71 \text{ MeV};$$

$$\delta = -23,7 \text{ MeV}; \kappa = -34 \text{ MeV}$$

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \frac{\text{Boml\u00e1s}}{\text{sec}} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

$$N_A = 6 \cdot 10^{23} \quad (\text{Avogadro s\u00e1m})$$

$$e_{\text{elektron}} = 1,602 \text{ Cb}$$

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \quad (\text{Boltzmann \u00e1ll.})$$

$$\mu_B = 5,78 \cdot 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{T}} \quad (\text{Bohr magneton})$$

$$\mu_N = 3,15 \cdot 10^{-8} \frac{\text{eV}}{\text{T}} \quad (\text{mag magneton})$$

$$1 \text{ \u00e9V} = 3,07 \cdot 10^7 \text{ s}$$

**Fontos magfizik\u00e1ban \u00e9s
r\u00e9szecskefizik\u00e1ban haszn\u00e1lt
\u00e1lland\u00f3k**