

## Kozmikus részecskék vizsgálata

### Bevezetés

Kozmikus részecskék folyamatosan érkeznek a világűrből, melyek egy része eléri a Föld felszínét és ezáltal felszíni laborban mérhetővé válik. A kozmikus részecskék legtöbbször – a kisebb energiásaknak – a Nap a forrása; az Északi Fény jelensége látványosan bizonyítja jelenlétüket. A Föld vastag légköre viszont megakadályozza hogy a felszínt közvetlenül elérjék.

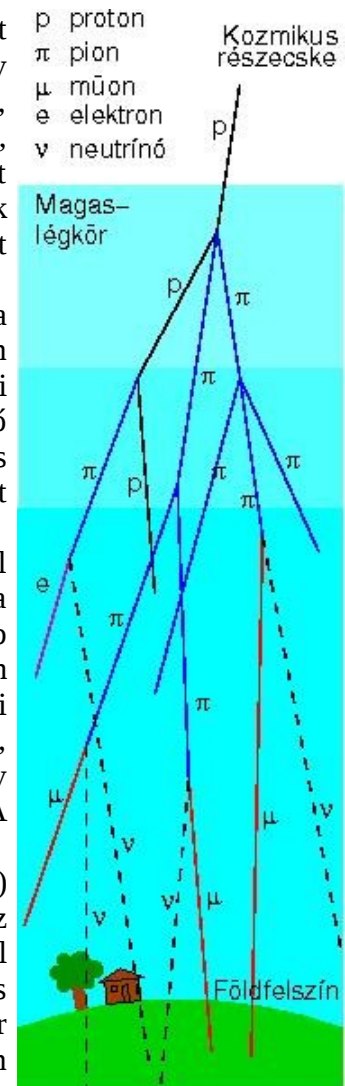
A kozmikus részecskék (régies nevükön kozmikus sugarak) legnagyobb része proton és hélium atommag (alfa részecske). A légkörön nem jutnak át, hanem ott kölcsönhatnak atommagokkal, részecskefizikai folyamatokat indítva be. Ha elegendően nagy az energiájuk (kb. 1 milliárd elektronvolt, azaz 1 GeV) akkor kelthetnek ún.  $\pi$  (pion) részecskét. A  $\pi$  részecske hamar elbomlik, általában egy  $\mu$  (műion) részecskére. Ha az eredeti kozmikus proton energiája kb. 10 GeV fölötti volt, akkor a műion jó eséllyel lejut a felszínre, ahol detektálhatjuk (az alábbi ábra szemlélteti a folyamatot).

Érdekes apróság, hogy a  $\mu$  részecske is elbomlik, még hozzá kb. 2.2 mikroszekundum ( $\mu$ s) alatt. Ha fénysebességgel haladna, ennyi idő alatt csak kb. 660 métert tenne meg átlagosan. Mégis, annak ellenére hogy tipikusan 15 km magasan keletkezik, nagyon jó eséllyel lejut a felszínre, anélkül, hogy elbomlana. Ez úgy lehetséges, hogy – mivel nagyon gyors, közel fénysebességű – számára lassabban telik az idő a relativitáselmélet jóslatának megfelelően. A kozmikus részecskék megjelenése tehát nem csak a világűr mozgalmasságát bizonyítja, hanem a relativitáselmélet helyességét is.

Azok a protonok vagy hélium atommagok, melyek akkora energiájúak, hogy mérhető műionokat keltsenek a Föld felszínén, jellemzően nem a Naptól származnak, hanem a Galaxis távolabbi vidékeiről. Egy régi szupernova robbanás gyorsan forgó, nagy mágneses térrel rendelkező maradványa, egy neutroncsillag, tipikus példája a kozmikus részecskegyorsítóknak, ahol a gyorsan változó mágneses tér által indukált elektromos télerősség óriási energiát ad a csillagközi atommagoknak.

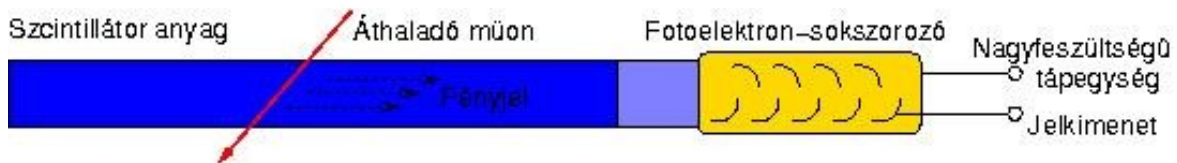
Amennyiben detektáljuk a kozmikus részecskéket, be kell bizonyítanunk, hogy Földi eredetű radioaktív sugárzás nem adhat jelet a detektorunkban. Ennek módja az lesz, hogy megköveteljük: egyszerre több detektor szólaljon meg (ezt koincidenciának nevezik), melyeken ugyanazon részecske halad át. A detektor olyan vastag (3 cm műanyag) hogy Földi eredetű sugárzás nem haladhat rajta keresztül úgy, hogy jelet hagyna (alfa, béta sugárzás nem tud keresztülhaladni, gamma sugárzás pedig nem hagy egyszerre két detektorban jelet, csak abban amelyikben elnyelődik). A mérés lényeges eleme lesz ennek a koincidenca-rendszernek a vizsgálata.

A nagyon nagy energiás (sokmilliárdszor milliárd eV energiás) kozmikus részecskék kutatása ma a fizika élvonalába tartozik, mivel az ilyen részecskék csak „egzotikus” extragalaktikus forrásokból származhatnak. Ezek detektálására, tekintve, hogy nagyon ritkák, hatalmas rendszereket használnak, több száz négyzetkilométeren elszórva sokezer detektort, melyek folyamatos működéssel néhány évente találnak ilyen rendkívüli energiájú részecskét.

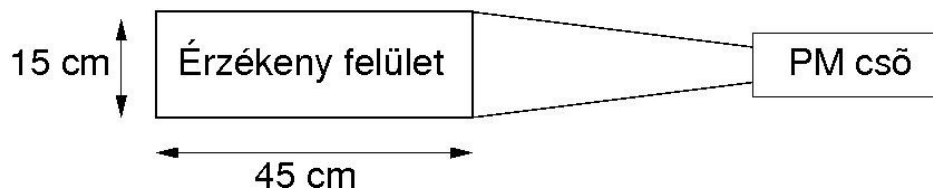


### A mérési összeállítás

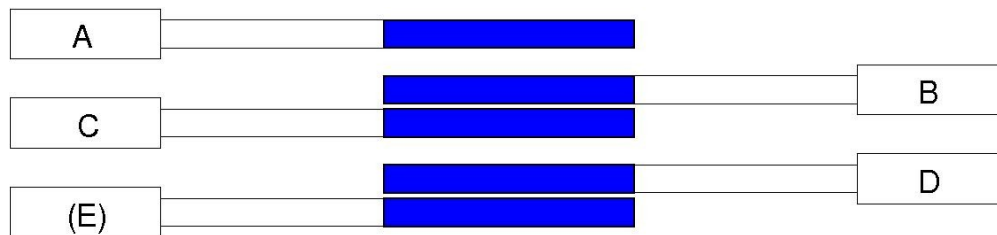
A mérés összeállítása a klasszikus módszert követi. A kozmikus müon fényfelvillanást kelt egy megfelelően kezelt műanyag tömbben (szcintillátorban), melyet fotoelektron-sokszorozóval detektálunk. A gyenge fényfelvillanás ezáltal mérhető elektromos jellé alakul (ld. alábbi ábra).



A szcintillátor geometriai felépítését az alábbi ábra szemlélteti. Az érzékeny rész 15cm x 45 cm, a hozzá csatlakozó elnyült háromszög alakú fényvezető nem ad fényjelet.



Az alábbi oldalnézeti ábra szerint négy (plusz egy tartalék) berendezést helyezünk el egymás mellett.



Az elektromos jelet „szép” impulzussá formáljuk: mivel a jel amplitúdója széles tartományban változhat, választunk egy küszöbszintet, és ha a jel fölötte van, kiadunk egy impulzust; ha kisebb akkor nem. Ezt a lépést diszkriminációnak (idegen szóval a választás, döntés) nevezik. Az impulzus szélessége tipikusan 1  $\mu$ s, melyet oszcilloszkópon is megvizsgálhatunk.

A jeleket a mérődoboz négy bemeneti csatornájának bármelyikére adhatjuk (A,B,C,D), az ezekhez tartozó diszkriminált kimenetek bármelyikét vizsgálhatjuk oszcilloszkópon, vagy a beütéseket megszámlolhatjuk a számlálóval (ld. Alább). (Az E jelű detektor tartalék, a mérésnél nem használjuk).

A koincidencia-egység (ld. alább) segítségével vizsgálhatjuk, hogy vannak-e pontosan egyidőben megszólaló szcintillátorok, azaz a müon áthaladt-e több detektoron. Láthatunk olyan eseteket is, mikor mind a négy detektor megszólal.

### A nagyfeszültségű egység használata

A rendszer nagyon fontos eleme a nagyfeszültségű egység: ez bármelyik kimenetére kötött fotoelektron-sokszorozóra billentyűzettel vezérelhető feszültséget ad ki. Ennek kezelését csak **nagy odafigyeléssel** végezzük (jóllehet egyszerűen használható). A berendezés ára jelentősen magasabb mint egy közép kategóriás új gépkocsié.

**Mindegyik fotoelektron-sokszorozóra rá van írva a tipikus javasolt használati feszültség: ennél maximum 50 V-tal nagyobb feszültséget lehet a csövekre adni, ennél nagyobbakat nem!!!** (és a mérések során természetesen nem is kell).

A nagyfeszültségű egységet a hátulján levő kapcsolóval lehet bekapcsolni, ami után kb. fél perc alatt elindul. A továbbiakban az egyes csatornák bekapcsolását, illetve feszültségeit az előlap nyomógombjaival vezérelhetjük. Keressük meg az egyes vezérlőgombokat a kezelés előtt:

ON, OFF: Összes engedélyezett csatorna bekapcsolása, kikapcsolása.

ENABLE, DISABLE: engedélyezés, illetve tiltás. Az egyes csatorákat, melyek között a fel/le nyilakkal manőverezhetünk, egyenként engedélyezhetjük vagy tilthatjuk. Nagyfeszültség csak az engedélyezett csatornákra kerülhet. Egy-egy csatorna ki/bekapcsolása ezzel a módszerrel a legegyszerűbb.

Bal, jobb, fel, le nyilak: az egyes csatornák egyes adatai között ezekkel a gombokkal lépkedhetünk. Ezek a kijelzőn megjelennek, ilyen sorrendben:

1. Csatorna száma (Channel) (0.0 – 0.11)
2. Engedélyezés (S) (kis kör jelzi, változás közben nyilacska)
4. A kiadott áramerősség (Meas uA) mikroamperben – tipikusan 800 és 1300 között
3. Nagyfesz tényleges értéke (Meas U)
5. Beállított feszültség (Target U) ezt változtathatjuk beállításkor

A rendszer a 0 – 3-ig jelzett nagyfeszültségű kimenetekre vannak kötve, sorrendben A-tól D-ig. A nagyfeszültséget úgy változtathatjuk, hogy

- rámegyünk a “Beállított feszültség” (Target U oszlopában) értékre az adott csatornánál
- a számgombokkal beírjuk a kívánt feszültséget
- az “ENTER” gombbal bevisszük az értéket
- (hiba esetén a “BACKSPACE” gombbal korrigálhatunk)

Ezután leolvashatóan elkezd változni a kiadott nagyfeszültség, ami néhány másodperc alatt eléri a kívánt feszültséghez közeli értékét. A kijelzőn leolvashatjuk az egység által leadott áramerősséget is, ami igazolja, hogy a fotoelektronsokszorozó helyesen van csatlakoztatva.

Használat után a kijelző egy idő után pihenőmódba kapcsol (>HV OK< ...) innen a kijelzést bármelyik gombbal (SELECT, ENTER vagy nyilak) visszahívhatjuk.

### **A koincidencia-egység**

A berendezés négy bemenettel rendelkezik, ezeket A-tól D-ig jelöljük. A BNC koax csatlakozósor bal oszlopa felel meg a bemeneteknek. Amennyiben jel érkezett, a diszkriminált impulzus megjelenik a kimeneten, a koax csatlakozósor középső oszlopában. Ezzel minden egyes detektort függetlenül vizsgálhatunk. Amennyiben koincidenciát szeretnénk megfigyelni, a jobb oldali oszlopot kell használnunk: ezeken akkor jelenik meg jel, ha bizonyos kombinációban egyszerre szólal meg két detektor. A kombinációk a következők (sorrendben felülről):

A D  
A C D  
A B

## A B C D

A koincidencia-egység kimenőjelei (diszkriminált és koincidencia) oszcilloszkópon kb. 0.5 V-os jelet adnak. A kimenőjelek mindegyike alkalmas arra hogy a beépített számlálót léptesse.

### A számláló használata

A számláló egyszerű CMOS logikára épülő rendszer, két függetlenül számolt bemenettel. Alap esetben a „Reset” nullázza mindkét kimenetet (kijelzett számot), a „Run / Stop” választógomb értelemszerűen indítja-megállítja a számlálást mindkét bemeneten (újraindítható szükség esetén, de ezt a lehetőséget általában nem érdemes használni). A 2. számlálónál lehetőség van egy belső órajel számlálására, tehát ilymódon idővel arányos mennyiséget mérhetünk, ez a „Clock” kapcsolóval választható. Az órajel 10000-ig való számlálása kb. 2 perc 14 másodpercnek (134 sec) felel meg; érdemes ilyen időtartam-egységekben számolni, hiszen ekkor nem kell stoppert használni.

A számláló hasznos lehetősége a „Preset”, azaz az előre beállított számig való számlálás: ez csak a 2. számlálóra használható, 100, 1000 vagy 10000-ig lehet beállítani. Bekapcsolása után nyomjuk meg a Reset gombot; ezután a 2. számláló a beállított számig számol majd megáll. Ez akkor kényelmes, ha a két számláló által mutatott értéket arányítani szeretnénk, hiszen az 1. számláló értéke közvetlenül adja az arányt.

A számlálóra bármelyik közvetlen vagy koincidencia-kimenetet ráköthetjük.

### A felvillanó LED-sor

A rendszer működésének gyors ellenőrzését, és egyben a jelenség laikusok számára az alapfelállásnál (azaz oszcilloszkópon jelek, számláló számol...) nagyságrendekkel érdekesebb demonstrációját jelenti a rendszerhez tartozó LED-sor. A három LED mindegyike akkor villan fel, ha két egymás alatti szcintillátor koincidenciában jelet ad (két egymás melletti LED tehát akkor villan együtt, ha három egymás alatti szcintillátor ad jelet). A mérésnél segít, ha biztosak lehetünk abban, hogy a rendszer megfelelően működik.

### A mérés kiértékelése

A berendezést a fentieknek megfelelően kell bekapcsolni (nagyfeszültségű egység, koincidencia-egység). A nagyfeszültségű egység tényleges bekapcsolása (0. feladat) előtt érdemes átnézni, hogy helyesen van-e összekötve a rendszer (nagyfesz 0 –4-ig kimenetei az A – D szcintillátorokra van kötve; lehetséges hogy egy tartalék detektor is be van kötve) illetve a szcintik helyesen kapcsolódnak a koincidencia-egységhez. Fontos ellenőrizni, hogy helyesek-e a nagyfeszültség értékek – ezeket az előző mérés alkalmával átállíthatták. Ha minden rendben, ki lehet adni a nagyfeszűt a csövekre (HV ON).

Az első feladat a szcintillátorok diszkriminált (azaz a koincidencia-egység közvetlen kimenetein megjelenő) jeleinek vizsgálata tároló oszcilloszkóppal. Érdemes két egymás melletti csatornát, például az A és B kimeneteket vizsgálni, mert ezek gyakran szólnak meg együtt.

A második feladatban kísérletileg igyekszünk demonstrálni, hogy a számlálás mérésének pontossága  $\sqrt{N}$ . Nyolc adott idő alatt felvett mérés (ezek eredményei  $d_i$ ) átlagát nyilván triviális kiszámítani. A nyolc mérés szórásán az egyes mérések átlagtól való eltérés-négyzetének átlagának gyökét értjük, pontosabban,

$$\sigma^2 = \sum \frac{(d_i - \bar{d})^2}{N-1} \quad \text{ahol természetesen} \quad \bar{d} = \frac{1}{N} \sum d_i$$

ahol  $N-1$ -gyel azért osztunk  $N$  helyett, mert az átlag maga is pontatlan, értékét pedig épp úgy határoztuk meg, hogy a szórás minimális legyen. Statisztikai számításokkal (ld. BSc Statisztika előadás anyaga) belátható hogy az  $N-1$ -gyel való osztás után a szórás várható értéke a „valódi”, végtelen sok mérés alapján kapható szórással egyenlő. Jellemző, hogy az így kapott szórás is fluktuál, hol nagyobb, hol kisebb, mint az igazi, négyzetgyökös hiba (az átlag négyzetgyöke).

A harmadik feladat olyan, amit nagyenergiás magfizikai vagy részecskefizikai mérésekben tipikusan elvégeznek. Az A, C és D szcintillátorok egymás alatt vannak, a C a másik kettő között. Ha az A és D koincidienciában megszólal, akkor biztos, hogy egy müon keresztülhaladt rajtuk. Ekkor az is *biztos*, hogy a közöttük elhelyezett *C szcintillátoron is áthaladt*. Ezáltal mérhetővé válik a C szcintillátor hatásfoka, azaz, egy müon áthaladásának detektálási valószínűsége.

A feladatban a C cső nagyfeszültségét kell változtatni a nominális (ráírt) érték alatt 250, 200, 150, 100, 50 V-tal, illetve a nominális feszültségen, és a nominális fölött 50 V-tal (tehát hét mérési pontban). **A nominálisnál nem szabad 50V-nál jobban fölé menni**, még véletlenül sem! A mérésben nem is kell ekkora értéken mérni!). Ezekben a feszültségeken kell meghatározni, hogy 100 müonból (A – D koincidencia) hányat detektálunk a C-n is (A – C – D koincidencia). Érdekes ehhez a számláló 2. bemenetére kötni az AD jelet, az 1. bemenetre az ACD jelet, majd a Preset-et 100-ra állítani (és a Clock-ot kikapcsolni). A számláló leállása után közvetlenül kapjuk a hatásfokot, százalékban. A mérést egy adott feszültségen kétszer végezzük.

A negyedik feladatban azt feszegetjük, hogy mekkora eséllyel történik meg, hogy két szcintillátor „véletlenül” együtt szólal meg, akkor, ha nem halad át rajtuk müon. A probléma abból ered, hogy a fotoelektron-sokszorozó az ún. sötét-zaja miatt akkor is ad néha jelet, ha nem történt fényfelvillanás – valójában az ilyen jelek száma nagyobb, mint az áthaladó müonok száma. A kérdést kétféleképpen is megközelíthetjük. Vagy elérjük, hogy ne haladjon át müon a szcintillátorokon – messze rakjuk őket – és megszámoljuk, hányszor adnak koincidienciát (ideális esetben soha). Vagy a zajok számát növeljük jelentősen, és megnézzük, mennyit változik a koincidenenciák száma. Ez utóbbi praktikussága abban rejlik, hogy nem kell mozgatni a detektorokat. Mi ezt a módszert követjük, a zajokat radioaktív forrással „szimulálva”.

(Ehhez a méréshez a **nominális feszültségre** állítsuk az **A** és **B** szcintillátort).

Legyen  $N_A$  és  $N_B$  a beütések száma adott  $T$  idő alatt az A és B szcintillátoron (zajokkal együtt).

Ezek közül a valódi koincidenencia-párok számát jelöljük  $K$ -val (és tegyük fel, hogy  $K \ll N_A, N_B$ ).

Véletlen koincidenenciát akkor kapunk, ha az egyik csőből épp akkor jön beütés, mikor a másikban is ott van, a jel szélességének megfelelő  $t$  idő alatt (ld. 1. feladat). Annak a valószínűsége, hogy épp jön jel az 1. csőből,

$$p_A = N_A \frac{t}{T}$$

Eszerint a véletlen koincidenenciák száma  $V = N_B p_A = N_B N_A \frac{t}{T}$  hiszen az  $N_B$  beütésből véletlenszerűen olyanokat is kapunk ahol az A detektor is megszólalt.

Az összes koincidenenciák száma tehát a fentiek összege,  $K+V$ , hiszen ritkák a jelek:

$$K+V = K + N_A N_B \frac{t}{T}$$

A fenti egyenlet azt jósolja, hogy az  $N_A N_B$  szorzat függvényében a mért koincidenenciák  $K+V$  száma lineáris. A  $T$ -t válasszuk kényelmesnek, pl. 2 perc (stopperrel) vagy 2perc 13 másodperc (a beépített számlálóval a Clock-ot bekapcsolva és Preset-tel 10000-ig számolva a 2-es csatornán). A Cs137 forrás (melyet az oktatótól kell kérni, aláírás ellenében) a legfelső, **A szcintillátortól** való távolságával

változtatható a „zajok” száma, azaz az  $N_A N_B$  szorzat. A fenti szorzatot mérhetjük  $N_A$  és  $N_B$  közvetlen meghatározásával (a számlálóval és időmérésre egy stopperrel vagy a számláló beépített órajelével, a Preset funkcióval), a  $K+V$  értékét pedig pl. az A és B koincinciával.

A mérés során hat-hét pontban próbáljuk megmérni az  $N_A N_B$  szorzatot és ugyanilyen forrás-helyzet mellett a koincinciák számát (a szélsőséges esetek nyilván vagy az mikor nincs egyáltalán radioaktív forrás, illetve az mikor közvetlenül a szcintillátor tetejére, illetve a két szcintillátor közötti részbe helyezük). A két mennyiséget egymás függvényében ábrázolva egyenest várunk. Az egyenest illesszük az adatokra gnuplot-tal. Az egyenes meredekségéből ( $t/T$ ) meghatározhatjuk  $t$ -t (a jelek átlagos szélességét), amit összehasonlíthatunk az 1. feladat közvetlen eredményével.

## Mérési feladatok

0. Kapcsolja be a berendezést (esetlegesen az oktató segítségével). Győződjön meg róla, hogy minden eszköz alapvető működését, kezelését ismeri! Adjon a fotoelektron-sokszorozókra a rájuk írt értéknek megfelelő nagyfeszültséget! Figyelje meg a felvillanó LED-ek segítségével a szemmel is észrevehető koincinciákat (azaz, hogy az egymás melletti szcintillátorok gyakran egyszerre szólalnak meg).

1. Vizsgálja egymás alatti szcintillátorok jelét (a koincincia-egység közvetlen kimenetein) digitális oszcilloszkóppal! A mért jeleket rajzolja le olyan esetre vonatkozóan, mikor a két szcintillátor koincinciában van! Ehhez érdemes az idő-osztást 10 musec/osztásra állítani, majd ha középen megjelennek a jelek, 10-szeresen kinyújtani (kisebb gombbal, „X 10 MAG”), és középre állítani. Körülbelül milyen szélesek a jelek?

2. Adjon az A, B, C és D szcintillátorokra a rájuk írt értéknek megfelelő nagyfeszültséget! Mérje meg kb 1 percen keresztül (minden mérést ugyanannyi idő alatt), hogy hány müont detektálunk az ABCD koincinciában! A mérést ismétlje összesen nyolcszor! Számítsa ki ebből a szórást! Mennyire egyezik ez a jóval pontosabban becsülhető, négyzetgyökös hibával?

3. Nagyfesz függvényében határfok mérése: ACD/AD koincincia aránya. A mérést a nominális alatt 250V-tól indulva, 50V-os lépésekben, a nominálisnál 50V-tal nagyobb (de annál nem nagyobb) feszültségig kell mérni. Mekkora az elért határfok?

4. Mérhető koincinciák számának változása Cs137 forrással. Becslés a véletlen háttérre, a jel szélességének véletlen koincinciák alapján történő meghatározására. Teljesül-e a várt lineáris viselkedés? Forrás nélküli esetben a beütések hány százaléka véletlen koincincia (azaz mennyire pontatlan a mérőeszköz – ez az egyenes meredekségéből és a forrás nélküli  $N_A N_B$  szorzatból becsülhető).

5. (Még nem kell elvégezni.) Szcintillator érzékenysége a hely függvényében: Cs137 forrás változó helyel.

6. (Még nem kell elvégezni.) Abszorpció. Betéve – kivéve anyagot, a beütésszám változása, ebből becslés a müonok tipikus energiájára.