

Tandetron Üzemeltetési Gyakorlat

Rajta István, Vajda István, Gyürky György

MTA Atomki, 4026 Debrecen, Bem tér 18/c

e-mail: rajta@atomki.mta.hu, ivajda@atomki.mta.hu, gyurky@atomki.mta.hu

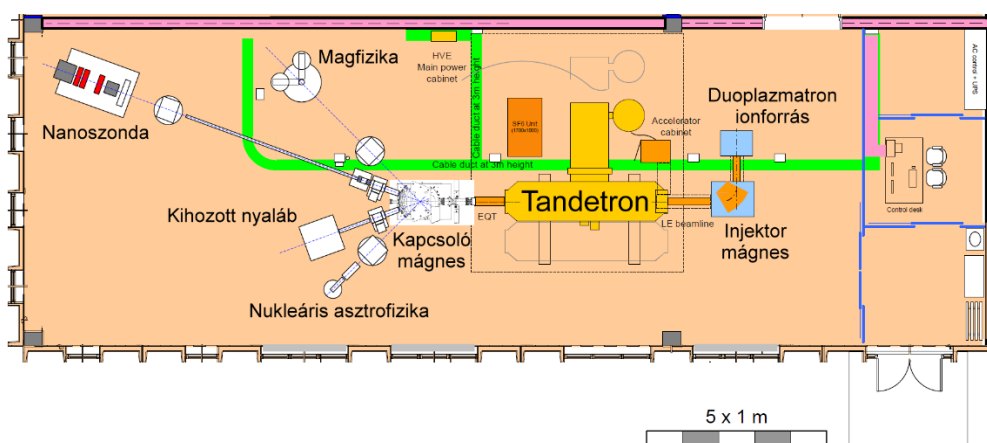
Bevezetés

Az MTA Atomki [1] az MTA Infrastruktúra Pályázatain elnyert támogatásokból 2014 májusában helyezte üzembe a High Voltage Engineering Europa B.V. [2] holland cég által gyártott Tandetron típusú részecskegyorsítót (1. ábra). 2015 januárban beüzemeltük a negatív hidrogén ionokat előállító duoplazmatron ionforrást az injektor mágnessel és egy egyszerű, ideiglenes kapcsolómágnessel. Ez az egyszerű első elrendezés azonnal lehetővé tette két kutatási nyálábvég megvalósítását: az ionnyaláb kihozatalát a levegőbe és egy nukleáris asztrofizikai nyálábvég összeállítását.



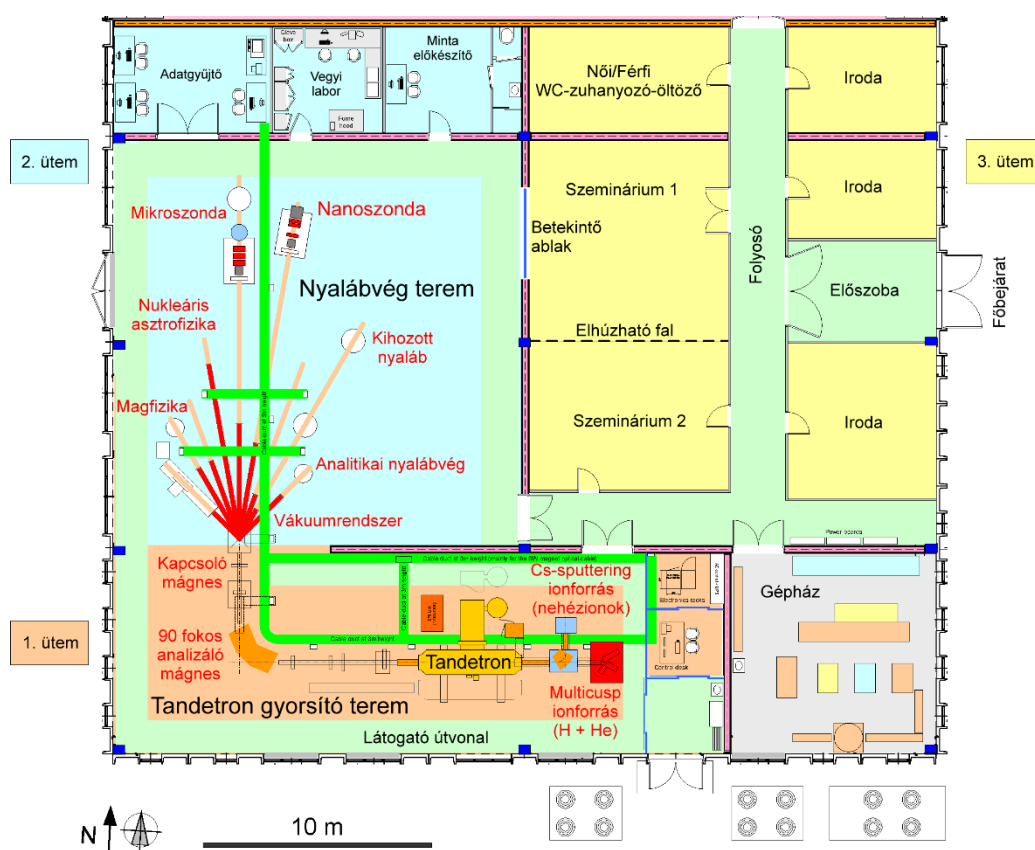
1. ábra: A Tandetron részecskegyorsító

A 2. ábrán látható a Tandetron Laboratórium alaprajza, középen a gyorsító. A duoplazmatron ionforrás és az injektor mágnes a jobb oldalon, a már működő és a beüzemelés alatt álló nyálábvégek a bal oldalon helyezkednek el. Időközben beszereztünk egy 9 nyálábvég csatlakoztatását lehetővé tévő professzionális kapcsolómágnessel is, szintén MTA Infrastruktúra támogatásból.



2. ábra: A jelenlegi elrendezés alaprajza

Az Atomki egy GINOP pályázattal támogatást nyert a projekt folytatására is. A projekt azonosítója GINOP-2.3.3-15-2016-00005, címe *"Világsszínvonalú kutatói környezet kialakítása az MTA Atomki új Tandetron Laboratóriumában"*. Egy multicusp ionforrás és egy 90 fokos analizáló mágnes beszerzésével a gyorsító elrendezése jelentősen átalakul és eléri az eredetileg tervezett végső formáját. A multicusp ionforrás (piros téglalappal jelölve) tartalmazni fog egy +/- 30 fokos eltérítő mágnest, ami lehetővé teszi a hidrogén vagy a hélium ionforrás kiválasztását. A duoplazmatron ionforrást át fogjuk alakítani cézium sputtering ionforrássá, ami lehetővé teszi nagy tömegszámú negatív ionok előállítását. A Tandetron nagyenergiás oldalára kerül majd a 90 fokos analizáló mágnes. A meglévő kapcsoló mágnest a jelenlegi (ideiglenes) helyéről át fogjuk telepíteni az analizáló mágnes kimenetére. A nanoszondát is átköltöztetjük az új helyére, a kapcsoló mágnes jobb oldali 10 fokos kimenetére. A mikroszonda is át fog ide költözni a régi Van de Graaff gyorsítótól, ezáltal sokkal jobb minőségű ionnyalábot fog kapni (stabilitás, nyalábméret, stb). Az új analitikai nyalábvég a kapcsoló mágnes egy másik kimenetére kerül. További nyalábvégék kifejlesztése is lehetővé válik a jelenlegi és a jövőbeli belső és külső felhasználók számára. Az ehhez szükséges vákuumrendszer helyét piros vonalakkal mutatja az ábra. A tervezett elrendezést a 3. ábra mutatja.



3. ábra: A tervezett elrendezés

A gyakorlat első részében a Tandetron részecskegyorsító felépítésével, üzemeltetésével fogunk megismerkedni. A második részben a proton nyaláb energiáját határozzuk meg – $\text{Al}(p,\gamma)$ magreakcióval, valamint $\text{Li}(p,n)$ magreakcióval – két különböző proton energiánál, így tehát megvalósítjuk a gyorsító energiahitelesítését.

1. Üzemeltetés

1.1 Szigetelőgáz

A kén-hexafluorid (SF₆) szigetelőgáz, melyet a gyorsító tartályában használunk, szintelen, szagtalan, a levegőnél nehezebb gáz. Nem mérgező, de nem ajánlott a belégzése.

1.2 Sugárzás

A gyártó cég megfelelő műszaki megoldásokat alkalmazott a gyorsító berendezés által kibocsátott ionizáló sugárzás csökkentésére normál üzemi körülmények között. Így például, a gyorsító csövek mágneses szekunder elektron szupresszorokkal vannak ellátva a szekunder elektron energia növekedéséből származó röntgen sugárzás minimalizálásának érdekében.

1.3 Biztonsági rendszerek (Interlock)

A Tandetron biztonsági rendszere a személyzet és a berendezés védelmére hivatott, a nemkívánatos eseményekkel szemben. A rendszer kétféle Interlock-ot tartalmaz: személyi interlock (vezetékes megszakító), gépi biztonsági interlock. Ha egy nem kívánt esemény megtörténik, egy párbeszéd ablak automatikusan megjelenik a képernyőn egy hibaüzenettel, így a készüléket megvédi a (további) károsodástól.

2. Üzemeltető szoftver

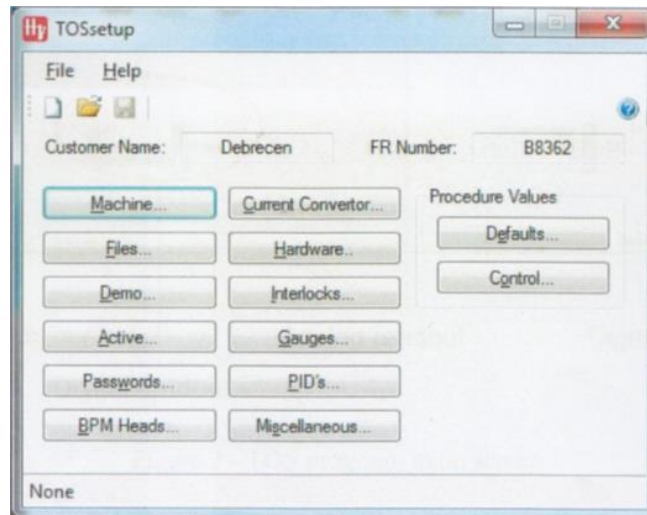
2.1 Vezérlő szoftver

A berendezést két különálló szoftver vezérli.

- **Tandetron Operating System setup** (TOS setup) kezeli a beállításokat.
- **Tandetron Operating System** (TOS) a fenti beállításokat használva vezérli a berendezést.

2.2 Tandetron konfigurációs program

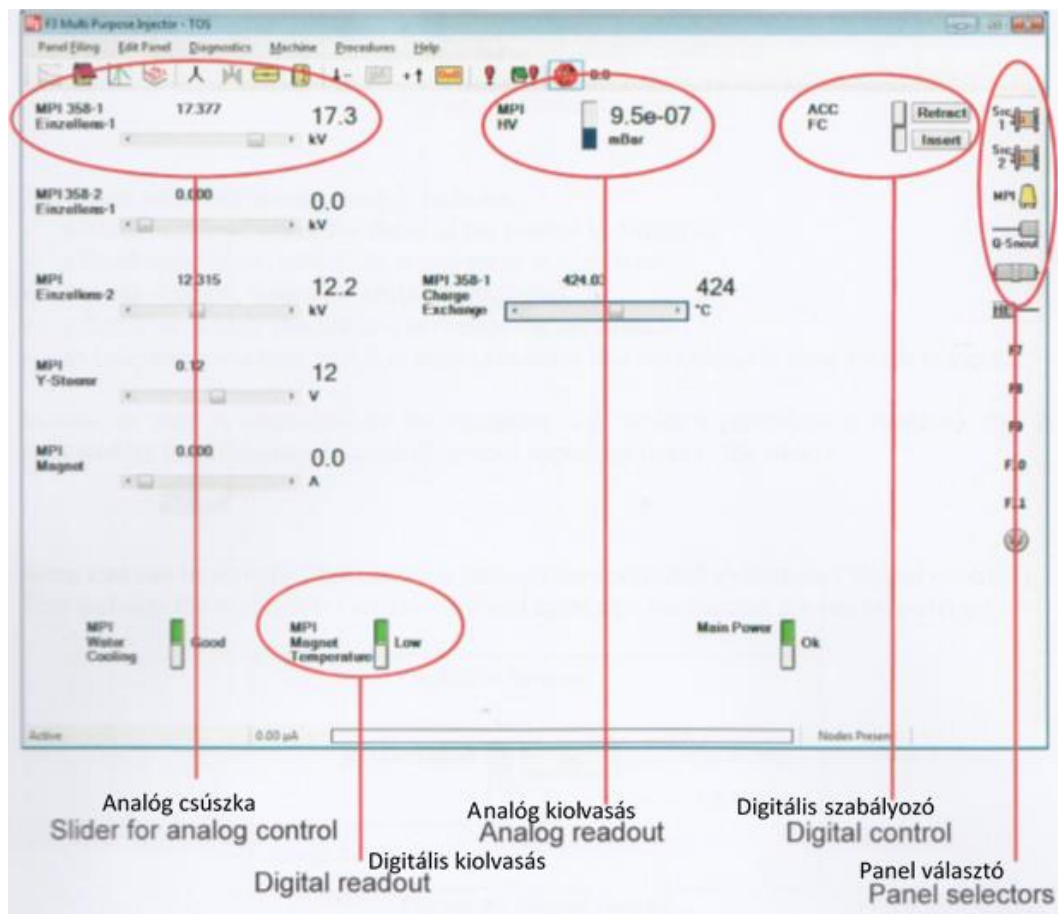
A TOS setup hozzáférést biztosít a különböző szabályozási paraméterekhez és beállításokhoz, melyet a fő TOS program használ. Például: A douplazmatron (Model 358) ionforrás alapértelmezett beállításai, úgymint az elérni kívánt Filament áram és kivonófeszültség a „Procedure Values” csoportban érhetők el a **Defaults** gombra kattintva, majd a **358 Startup** gombra kattintva. A konfigurációs program fő ablaka a 4. ábrán látható.



4. ábra: Konfigurációs program, főképernyő

2.3 Panelek

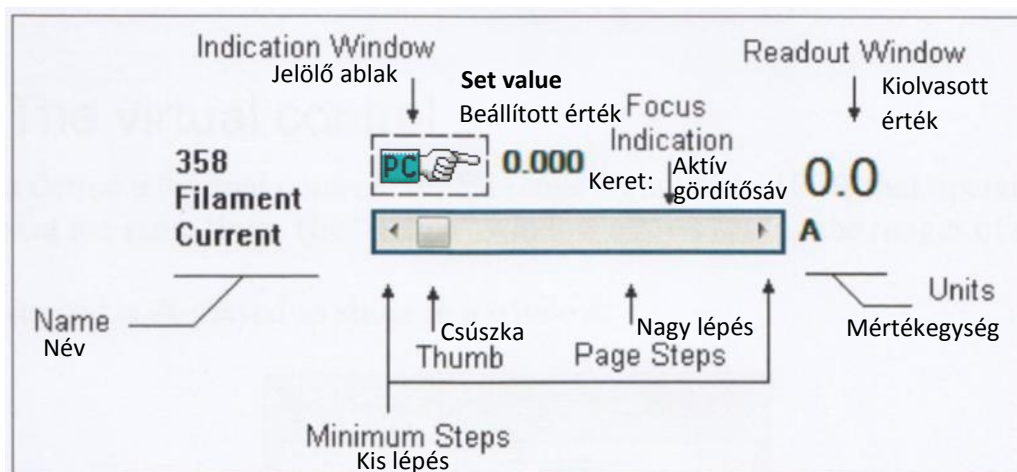
A berendezés vezérlésének szervezéséhez, a szoftver paneleket használ, ezekben a berendezés különböző részeinek megfelelően csoportosíthatók a vezérlő elemek (ld. 5. ábra). A panelek az F1 és F12 billentyűkkel nyithatók meg, vagy a panel választó sávban lévő gombokat használva. Ezek a panelek szabályozókból és kijelzőkből állnak. A szabályozók lehetnek folyamatosak vagy kapcsolhatóak, a kijelzők analóg illetve digitális értékeket adhatnak.



5. ábra: TOS program, főképernyő

2.4 Vezérlés

A nyaláb beállításának fő elemei a megfelelő minimum és maximum értékek között változtathatóak. Ilyenek például az úgynevezett *steererek* (elektrosztatikus eltérítő lemezpárok) és lencsék, valamint az analízáló elemek például a mágnesek. Ezeket az elemeket a szoftverben csúszkák képviselik.



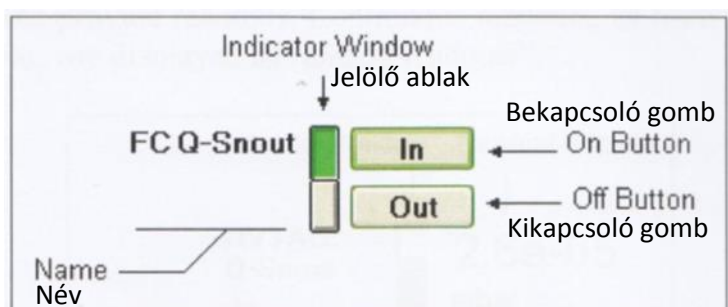
6. ábra: Analóg szabályozó

A 6. ábra egy analóg szabályozót mutat, mely tartalmaz:

- egy Name mezőt, ahol a szabályozó neve van feltüntetve
- egy Readout mezőt, ahol az aktuális kiolvasott érték van feltüntetve
- egy Units mezőt, ahol a mértékegység van megjelenítve
- egy Scrollbar-t (gördítősávot), mellyel megváltoztathatja a beállított értéket
- egy Indication mezőt, mely azt jelöli, hogy a TOS rendszer vezérli ezt az értéket (pl. Filament control a felfűtéskor)

Amikor egy értéket a TOS szoftver vezérel (pl. amikor egy Procedure [munkafolyamat] aktív), ezt a következő PC kontroll szimbólum mutatja a csúszka mellett a 6. ábrán szaggatott vonallal jelölt helyen.

Digitális szabályozókkal állíthatjuk be az olyan eszközöket, amelyeknek két állapota van, pl. Faraday-csészék, apertúrák, vákuum mérőfejek (ki vagy bekapcsolva).



7. ábra: Digitális szabályozó

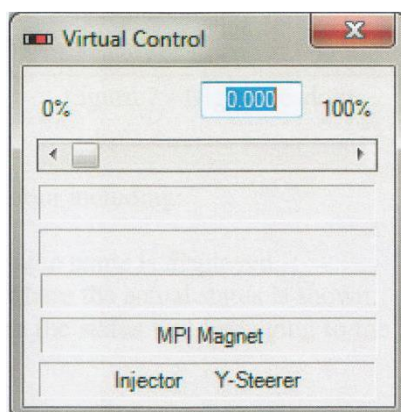
Ez az ábra egy digitális szabályozót mutat:

- egy Name (Név) mezőt, ahol a szabályozó neve van feltüntetve
- egy Indicator (Jelölő ablak) mezőt, ahol az aktuális állapot látható
- egy On (Bekapcsoló gombot), ami bekapcsolja az eszközt
- egy Off (Kikapcsoló gombot), ami kikapcsolja az eszközt

2.5 Virtuális vezérlés

A felhasználó „virtuális vezérlő” gördítősávokat hozhat létre, melyekkel 0% és 100% között be tud állítani legfeljebb 5 paramétert egyidejűleg. A „definiáló” ablakban beállíthatjuk ezen paraméterek határértékeit.

A virtuális vezérlő az alábbi ábrán látható:

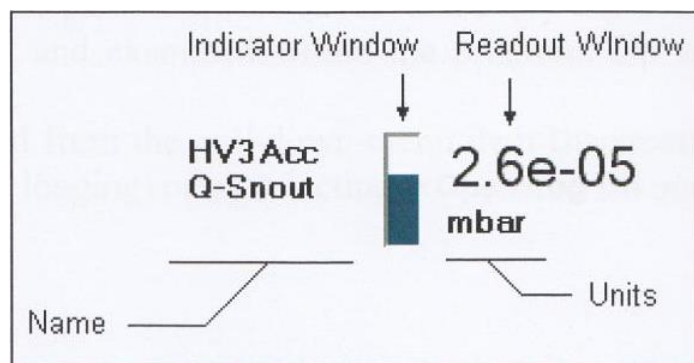


8. ábra: Virtuális vezérlési mód ablak

A virtuális vezérlő ugyanúgy használható nyomkövetésre és leképezésre, mint egy átlagos (analóg) vezérlő.

2.6 Kiolvasott értékek

A gépben lévő érzékelők szolgáltatják a kiolvasott értékeket. A folyamatosan mért értékek, a töltés mutatóktól a vákuummérőig, stb., „analóg kimenetként” vannak megjelenítve.

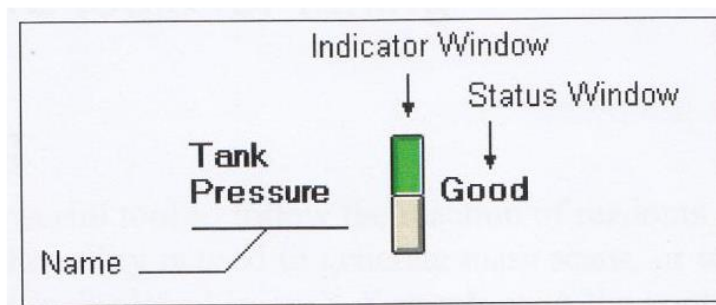


9. ábra: Analóg kiolvasott értékek

Az ábrán egy analóg kimenetet láthatunk, mely tartalmaz:

- egy Name (Név) mezőt, ahol a kimenet neve van feltüntetve
- egy Readout (Kimenet), ahol az aktuális érték van feltüntetve
- egy Units (Mértékegységek) mezőt, ahol a mértékegységek láthatók
- egy Indicator (Indikátor) mezőt, ami az aktuális értéktartományt mutatja

A két állapotú eszközök, mint például a vákuumszintek (jó, rossz) stb. „Digitális kimenetként” kerülnek kijelzésre:



10. ábra: Digitális kiolvasott értékek

Az ábrán egy digitális kimenet látható, mely tartalmaz:

- egy Name (Név) mezőt, ahol a kimenet neve van feltüntetve
- egy Indicator (Indikátor) mezőt, ami az aktuális állapotot mutatja
- egy Status (Állapot) mezőt, ahol az Indikátor aktuális állapotát jelölő szöveg kerül kijelzésre.

2.7 Diagnosztikai szoftvereszközök

Az üzemeltetői szoftver a rendszer állapotát jellemző diagnosztikai szoftvereszközöket is tartalmaz. Lentebb bemutatásra kerül néhány ilyen alkalmazás. Ezen eszközök részletes leírásával és paraméterezésével kapcsolatosan a Súly (Help) fájlok nyújtanak tájékoztatást.

2.8 Naplózás (Logging)

Minden analóg és digitális vezérlés illetve kimenet folyamatosan mentésre kerül egy naplófájlba. Minden második percben a fenti paraméterek mentésre kerülnek. Minden nap új Log fájl kerül kitöltésre. Ezek a naplózott értékek behívhatóak a merevlemezről és a program segítségével vizsgálhatóak. A szoftver öt paraméter egyidejű vizsgálatát teszi lehetővé.

A Naplózás eszköz **Diagnostics** → **Logging** → **Display Log** (ami az aktuális naplófájlt mutatja meg) vagy → **Open Log** (múltbeli naplófájlok megnyitásához) legördülő menüből hívható elő.

2.9 Trendvonalak

A trend segédprogram akár öt paramétert is képes figyelemmel kísérni. Bármelyik analóg vezérlő vagy kimenet választható, amely a rendszerből elérhetőek és lementhetőek ASCII fájlként. Az időalap 0.5, 1.0 vagy 10 másodperc/pixelként választható, a kijelző 400 pixel széles.

A trend eszközök a legördülő **Diagnostics** → **Trending** menüből választhatóak.

2.10 Finomhangolási szoftvereszközök

Nyomkövetés (Tracing)

A nyomkövető segédprogram egy hathatós eszközt nyújt számunkra, egy folyamatosan változtatott analóg vezérlő jelre adott válaszok nyomon követésére. Az eszköz használható például (ionok) tömeg szkennelésére vagy a gyorsító beállításának optimalizálására. Az eredmények egy X-Y grafikonon kerülnek bemutatásra, ahol az X tengely a változtatott analóg jel értékeit, az Y tengely pedig ennek hatására bekövetkező változásokat mutatja, ASCII fájl formátumban kimenthető módon. Maximum öt kimenő paraméter egyidejű bemutatása lehetséges.

A nyomkövető eszközt a **Diagnostics** → **Trace** menüből érhetjük el.

Kétparaméteres nyomkövetés (Mapping)

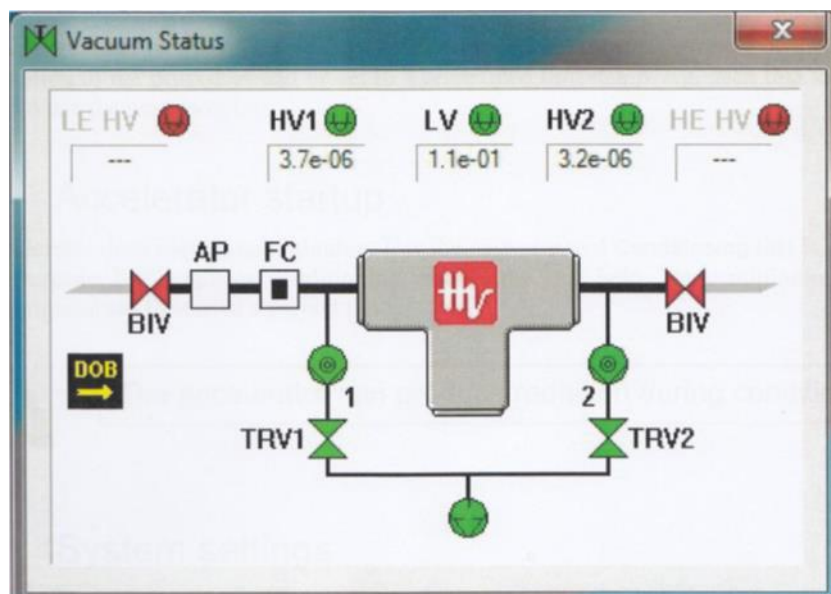
Két analóg vezérlő együttes hatásának vizsgálatára szolgál, lehetővé téve egy két-dimenziós nyomon követést bármilyen vezérlő kombinációra és egy kiolvasott értékre. Az eredmény egy három-dimenziós grafikon ahol az X, Y tengelyeken a bemenő változtatott értékek van feltüntetve, Z tengelyen pedig a megfigyelni kívánt harmadik paraméter értékei jelennek meg (X és Y együttes hatása Z-re). Ez ASCII fájlként menthető el. A térképezés befejezésekor egy kontúr görbét lehet generálni, ami a kapott értékek jobb vizualizálását szolgálja.

A térképező eszközt a **Diagnostics** → **Map** menüből érhetjük el.

3. Vákuumrendszer

A menü **Machine** → **Vacuum status** része a vákuumelemekre biztosít rálátást. Az egyes szelepek nyitását és zárását a vákuum panelek teszik lehetővé. A vákuummérő eszközök ki- és bekapcsolására használt gombok az operátori panelen vannak.

Az „All” (Mind) gomb a vákuum szintekre, a nyaláb szakaszoló zsilip, a visszahúzzható Faraday csészékre, apertúrákra a szivattyú rendszer állapotára vonatkozó információkra, elővákuum szelepekre biztosít rálátást. A 11. ábrán a Tandetron gyorsítóhoz biztosított vákuumállapot jelző ablak általános panel látható.



11. ábra: Vákuumrendszer áttekintő panel

4. A berendezés működtetése

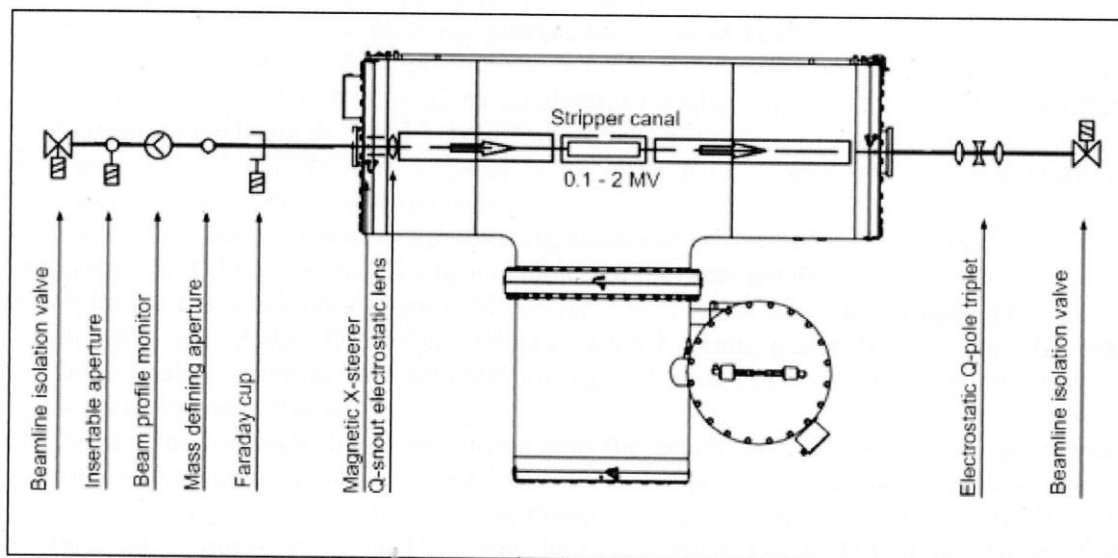
A gyorsító berendezés működtetéséhez néhány feltételnek teljesülnie kell. A hűtést, légnyomást és elektromosságot biztosítani kell. A vákuumszintnek az egész berendezésben végig megfelelőnek kell lennie. Az indításhoz szükséges feltételeket az operációs szoftver monitorozza. Probléma esetén az Interlock rendszer jelezni fogja a megfelelő üzenettel.

4.1 A gyorsító indítása

A gyorsító indításához bizonyos feltételeknek teljesülni kell. Használja a **Conditioning** szoftver eszközt, ami biztosítja ezeket a feltételeket. A kondicionáló szoftver eszköz programozható úgy, hogy egy előre beállított időben induljon.

4.2 Ionnyaláb transzport a gyorsítón keresztül

A 12. ábra mutatja a gyorsító és a nagyenergiás oldal áttekintő nézetét. Amikor nyalábot viszünk át a gyorsítón a főbb optikai komponensek a következők: ACC lencse (Q-snout), stripper csatorna, apertúrák, elektrosztatikus kvadrupól triplétt. A stripper csatornában a gáz nyomása változtatható az ionok lefosztásának (stripping) optimalizálása érdekében. A stripper gáz nyomás tipikusan 10^{-2} mbar tartományban megfelelő. A stripper után itt már pozitív ionnyaláb tovább gyorsul a nagyenergiás gyorsítócsőben. A gyorsítócső után az első ionoptikai elem az ACC Q-pole (elektrosztatikus kvadrupól lencse). Egy leválasztó zsilip található az ACC és a HE rész között. A Q-snout lencse célja az ionoptikának a gyorsító akceptanciájához való illesztése. A gyorsító átvitele tipikusan 60% vagy jobb a 600 kV - 2 MV tartományban, HVE injektor rendszerrel.



12. ábra: Releváns ionoptikai eszközök sematikus rajza

4.3 Rendszer finomhangolás

Ebben a fejezetben bemutatjuk a rendszer finomhangolási eljárást. Ez segít a felhasználónak az elsőrendű hangolásban. A megvalósítandó kísérlettől függően lehetnek eltérések az itt leírt eljárástól. A „nyaláb” kifejezés itt általánosan értendő, bármilyen fajta ionra érvényes, amit valamelyik ionforrásból a gyorsítón keresztül valamelyik nyalábvégig elvezetünk. A változók névleges bemenő értékei (az eltérítő lemezek feszültsége, a kivonó feszültség, elektrosztatikus analizátorok feszültsége, mágneses térerősségek, apertúra vagy rés méretek) analitikusan számolhatók. Mivel a gyorsító gyártójának nincs megfelelő rálátása arra nézve, hogy a felhasználó milyen injektort fog használni a gyorsítóhoz, ezért a felhasználó felelőssége a gyorsító számára megfelelő ionoptika biztosítása amennyiben az adott injektort nem a HVE cég gyártotta.

A következő bekezdésekben a nyalábtranszport különböző részeit elemezzük. Az eszközök áttekintő nézete a 12. ábrán látható.

Mielőtt bármilyen finomhangolás vagy nyalábvezetés történik, ellenőrizze a rendszer állapotát az Interlock Rendszer Ablakban és a Vákuum Státusz Ablakban.

Ionnyaláb transzmisszió optimalizálása

A következő lépések hajthatók végre annak érdekében, hogy optimalizálja a nyalábot a céltárgyig a nagyenergiás oldalon. A gyorsító bemenetére a következő lépésekkel készítjük elő a nyalábot.

1. A terminálfeszültség kondicionálása és beállítása.
2. Ha a vákuum szintek lehetővé teszik, nyissa ki a nyalábsatorna zsilipeket (BIV) ezzel lehetővé téve a nyaláb nagyenergiás oldalra jutását.
3. A Q-snout lencsét állítsa a legjobb ismert értékre. Általában nagyobb terminálfeszültség mellett nagyobb lencse feszültség lesz optimális.
4. Állítsa be az ACC Q-pole (elektrosztatikus kvadrupól) lencse fókuszát és asztigmatizmusát a legjobb ismert értékekre. A lencse beállítások a terminál feszültséggel lineáris összefüggésben

- állnak. Ha nincsenek ismert értékek, kezdje a fókuszálást 25% beállítással, és az asztigmatizmust -0,0% értékkel 1 MV energia töltés arányánál.
5. Állítsa be a stripper gáz nyomását. A tipikus értékek a 10^{-2} mbar tartományban vannak. Nagyobb terminálfeszültség mellett nagyobb stripper gáz nyomás lesz optimális.
 6. Állítsa be a Q-snout X-steerer mágnes áramát 0 mA gerjesztésre.
 7. Az injektor ionoptika beállításával fókuszáljon a BPM-re. Optimalizálja az ionnyaláb áramát a Faraday csészében mérve. Használja a visszahúzzható apertúrát a nyaláb X és Y pozicionálására a gyorsítás előtt.
 8. Ha egy analízáló mágnes van elhelyezve a gyorsító előtt, akkor a tömeg kiválasztó apertúra beépítésével kell kiválasztani a nem kívánt tömegeket.
 9. Ha a fentieket elvégeztük, akkor be lehet engedni a nyalábot a gyorsítóba.
 10. Húzza ki az ACC Faraday csészét. A nyalábot ezzel beengedjük a gyorsítóba.
 11. Optimalizáljuk a gyorsító Q-snout X-steerer mágnes áramát, a Q-snout lencsét, a stripper gáz nyomását és a gyorsító Q-pole lencsét a kívánt nyalábparaméterek eléréséhez a HE (nagyenergiás) oldalon. Ezen kívül optimalizáljuk a releváns ionoptikai eszközöket az injektorban, pl. steererek, lencsék és ionforrás.
 12. Mielőtt nagy ionáramot engedünk be a gyorsítóba, a gyártó cég erősen ajánlja, hogy az ionoptika finomhangolását kisebb ionáramokkal végezzük (kb 1 μ A negatív ionáram a Q-snout Faraday csészében mérve). Ezzel megelőzhető az, hogy 500 W-nál nagyobb teljesítmény nyelődjön el a berendezés olyan részeiben, amelyek nincsenek vízzel hűtve (pl. a stripper csatorna). Ha már van tapasztalata az ionnyaláb maximális transzmissziójára hangolásban, akkor már nagyobb negatív ionáramok (max. 250 μ A) injektálása is megengedett.

4.4 A berendezés leállítása

A vezérlő szoftver rendelkezik leállító procedúrával az ionforráshoz és a teljes gyorsítóhoz is.

A procedúra a leállítás (Shutdown) menüből hívható meg. A rutin időre programozva is indítható (később tervezett leállítás).

A gyorsító leállító procedúra automatikusan indítja az ionforrás leállító procedúrát is. Amikor az ionforrás ki van kapcsolva a rendszer paramétereit a szoftver a shutdown.sts file-ban elmentett értékekre állítja be. Ha ezt a file-t a felhasználó nem módosította, akkor minden tápegység nullára lesz beállítva. Végül, a gyorsító előtti és utáni vákuum zsilipek bezáródnak, továbbá a gyorsító driver tápegység reset állapotba kerül.

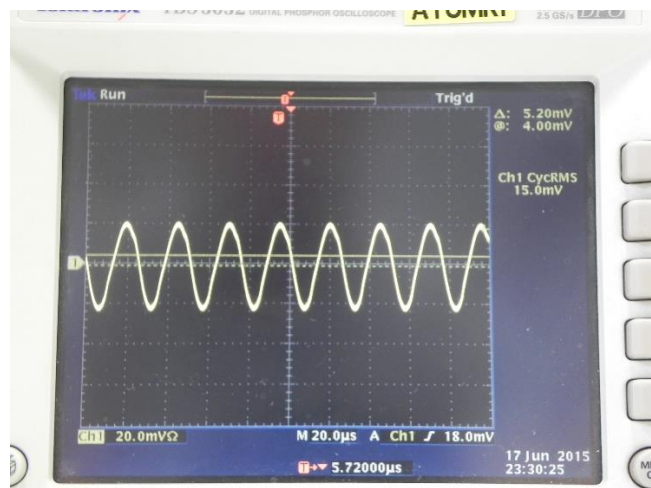
A gyorsító leállító procedúra hatására a vákuumrendszerek (vákuum mérőfejek, turbo és elővákuum szivattyúk) nem állnak le.

5. Mérési feladatok

5.1 TV ripple mérés

A terminálfeszültség a gyorsító feszültség generátorának működési elve (a feszültségsokszorozó kaszkád) miatt természetes fluktuációt mutat. Ez a fluktuáció mérhető, és ezt nevezzük TV ripple-nek.

A Capacitive Pickup Unit egy kondenzátor fegyverzet, amely a terminál elektróda felületén méri a feszültség gyors változását. Ezt egy oszcilloszkóppal az erre a célra szolgáló BNC kimeneten mérhetjük. A TV ripple a gyártó specifikációja szerint $< 25 V_{RMS}$. Ellenőrizni fogjuk, hogy a gyorsító megfelel-e a gyári specifikációnak. (Ld. 13. ábra.)

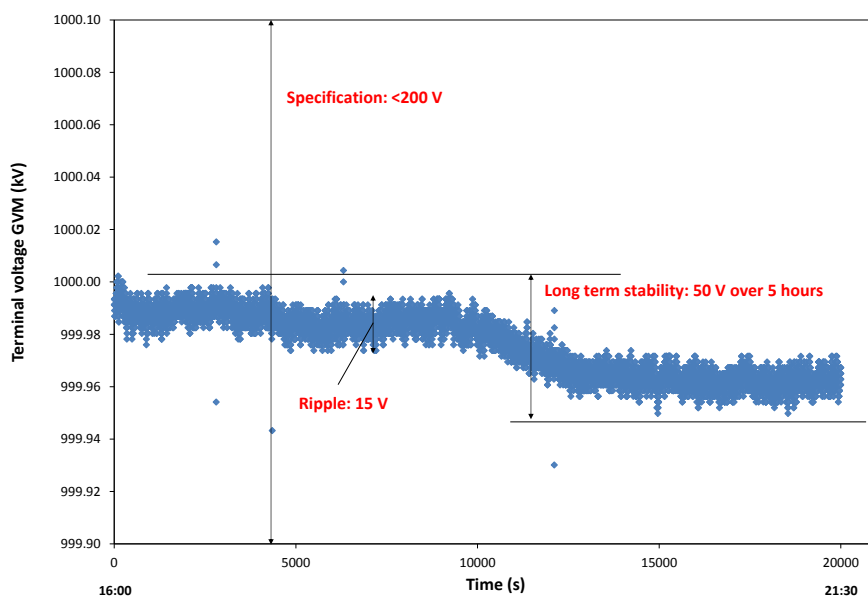


13. ábra: A TV ripple mérés tipikus eredménye

5.2 Hosszú távú stabilitás mérés

A terminálfeszültség hosszú távú stabilitása is nagyon fontos a ripple mellett. Ezt egy rotációs voltmérővel tudjuk mérni. A rotációs voltmérő egy olyan eszköz, amelyet MV nagyságrendű feszültségek mérésére fejlesztettek ki. Egy álló és egy forgó részből áll, a kimenő váltófeszültség abból adódik, hogy a szigetelt elektróda az egyik félperiódusban látja, a másikon pedig nem látja a terminál elektródát. Így a mért váltófeszültség amplitúdója arányos lesz a terminál feszültséggel. Ezt a gyártó a terminál feszültségre kalibrálta. A gyakorlat eredményeképpen áttetelezen ellenőrizhetjük, hogy a GVM gyári kalibrációja elegendően pontos-e.

A GVM kimenetét egy BNC csatlakozóval egy μV érzékenyséű (SANWA típusú) műszerrel mérjük, az adatokat jó időfeloldással PC-vel naplózzuk. A gyári specifikáció szerint 1500 kV terminálfeszültség mellett a GVM stabilitás $\pm 200 \text{ V} / \text{óra}$. Ezt célszerű több órán át mérni, ezért ezt a mérést éjszakára fogjuk elindítani, a gyorsító felügyelet nélkül is üzemelhet (ehhez megfelelő gyártói engedély van). Így a gyakorlat második napjának reggelén állítjuk le ezt a mérést. Egy ilyen korábbi mérés tipikus eredményét mutatja a 14. ábra.



14. ábra: A terminálfeszültség stabilitás mérés tipikus eredménye

6. Gyorsító energiahitelesítés $\text{Al}(p,\gamma)\text{Si}$ magreakcióval

A részecskegyorsítók egyik fontos paramétere a szolgáltatott részecskenyaláb pontos energiája, illetve az energia bizonytalansága. Ezek az értékek jól ismert tulajdonságú magreakciók, például ismert energiájú, éles rezonanciát mutató reakciók vizsgálatával meghatározhatók. Egy ilyen, energiahitelesítésre használható reakció a $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ reakció, melyben több alkalmas rezonancia is található. Ezek közül az egyik legerősebb az $E_p = 992$ keV-es rezonancia. A laborgyakorlat elsődleges célja az Atomki új Tandetron gyorsítójának energiahitelesítése ennek a rezonanciának a mérésével. A rezonancia mérését a ^{28}Si mag legerjesztődése során kibocsátott gamma-sugárzás detektálásával lehet elvégezni.

A Tandetron gyorsító – ahogy az elnevezés is mutatja – tandem elven működő elektrosztatikus gyorsító. Az ionforrás ezért a gyorsító kisenergiás oldalán, földpotenciálon van elhelyezve, és negatív ionokat állít elő. A gyorsító a nagyfeszültségű terminálja és a föld közötti potenciálkülönbséget kihasználva a negatív ionok a terminálfeszültség (TV) és az elemi töltés szorzataként számítható energiára tesznek szert. Az Atomki Tandetron gyorsítója esetén ennek a feszültségnek a maximuma névlegesen 2 millió Volt (a valóságban az elérhető maximum 2,2 millió Volt körüli, amit a gyorsítócső kondicionálására használunk). Így egyszeres töltésű negatív ionok esetén a terminál elektródába érkező ionok maximális energiája 2 MeV. A terminál elektróda belsejében nincs elektrosztatikus térerősség, így nincs további gyorsulás, viszont egy 8 mm átmérőjű, 80 cm hosszú lefosztó (stripper) csatornában kis nyomású argon gáz hatására a negatív ionok elveszítik egy vagy több elektronjukat. Ha egy negatív ion csak egy elektronját veszítette el, akkor semlegessé válik, így tovább már nem fog gyorsulni, hanem az aktuális sebességével tovább repül és a gyorsító nagyenergiás oldalára érkezik változatlan energiával. Nagyobb valószínűséggel történik egynél több elektron lefosztása, így az ionok áttöltődnek pozitív töltésűre. Hidrogén esetében a 2 elektron elvesztése után csak a proton marad, ami tovább gyorsul. Így a gyorsító nagyenergiás végénél már 2TV energiájuk lesz, tehát a maximális névleges energia esetünkben 4 MeV lesz. Nehéz ionok nagyobb töltésállapotot is elérhetnek, így az elérhető maximális ionenergia $(1+n)\text{TV}$ lesz, ahol n a nagyenergiás oldalon kilépő ion töltésállapota.

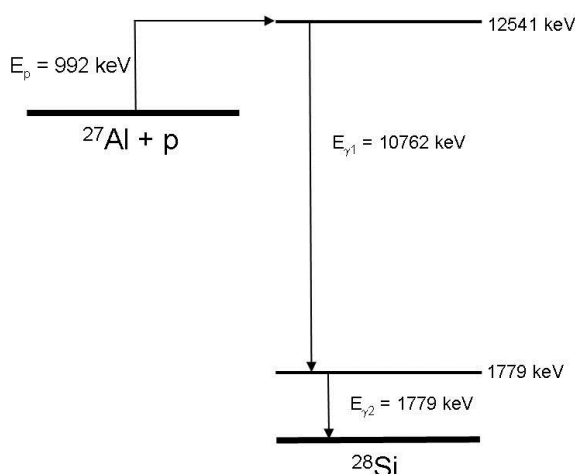
A részecskenyaláb energiájának pontos (keV pontosságú) meghatározására nem elegendő a gyorsító által előállított potenciálkülönbség mérése, annak ugyanis általában elég nagy a bizonytalansága, valamint a gyorsítócsővön végigfutó primer nyalábnak nagy lehet az energiaszórása is. Jól meghatározott energiájú részecskenyaláb előállításához általában analízátor mágneset használnak, amiben mágneses tér révén a részecskenyaláb adott sugarú pályán eltérül. A mágneses tér erősségének mérésével és a mágnes geometriájának ismeretében elvben meghatározható a nyaláb energiája.

Az Atomki Tandetron gyorsítója esetén jelenleg az első részben bemutatott kapcsoló mágneset használjuk az ionnyaláb semlegestől való elválasztására, illetve nehézionok esetén a kívánt töltésállapot kiválasztására. Ahogy azt szintén már írtuk az első részben itt is lesz egy 90-fokos analízáló mágnes, amivel a jelenlegi energiastabilitás kb egy nagyságrenddel javulni fog. A mágneses tér erőssége a tekercsekben folyó áram segítségével szabályozható. A jelenlegi konfigurációban a terminálfeszültséget rotációs voltmérővel (GVM) mérjük, és ebből számítjuk ki az ionok energiáját. A 90-fokos analízáló mágnes telepítése után a mágnesben a térerősséget NMR szondával [3] fogjuk mérni, és ebből pontosabban tudjuk meghatározni az energiát. Mindkét esetben szükséges, hogy független mérésekből meghatározzuk a gyorsító energiakalibrációját. Később egy felhasználó által kívánt energia értéket a kalibrációs paraméterek ismeretében be tudjuk állítani.

A gyorsítócső, s főként a mágnes geometriájában beállt bármilyen változás azonban elronthatja ennek a táblázatnak a pontosságát. (Ilyen változás tipikusan a mágnes kilépő és belépő réseinek módosítása.) Ezért minden, pontos energiaismeretet igénylő felhasználás esetén célszerű a gyorsító energiahitelesítésének elvégzése.

Rezonanciák a $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ reakcióban

A gyorsító energiahitelesítésére többek között rezonáns magreakciók használhatók. Egy sugárzásos befogási reakció rezonanciát mutat, azaz a befogási hatáskeresztmetszet jelentősen megnő, amennyiben a befogódó részecske energiája éppen megfelelő arra, hogy a keletkező végmag egy adott gerjesztett állapotban jöjjön létre. Ezt szemlélteti a $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ reakció 992 keV-es rezonanciája esetén a 15. ábra.



15. ábra: Az $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ reakció 992 keV-es rezonanciája és a keletkező gerjesztett állapot bomlása

A reakció Q-értéke, azaz a befogott proton kötési energiája a ^{28}Si magban 11585 keV. A ^{28}Si mag egyik gerjesztett állapotának energiája 12541 keV. Ennek megfelelően a $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ reakció rezonanciát mutat a következő protonenergiánál:

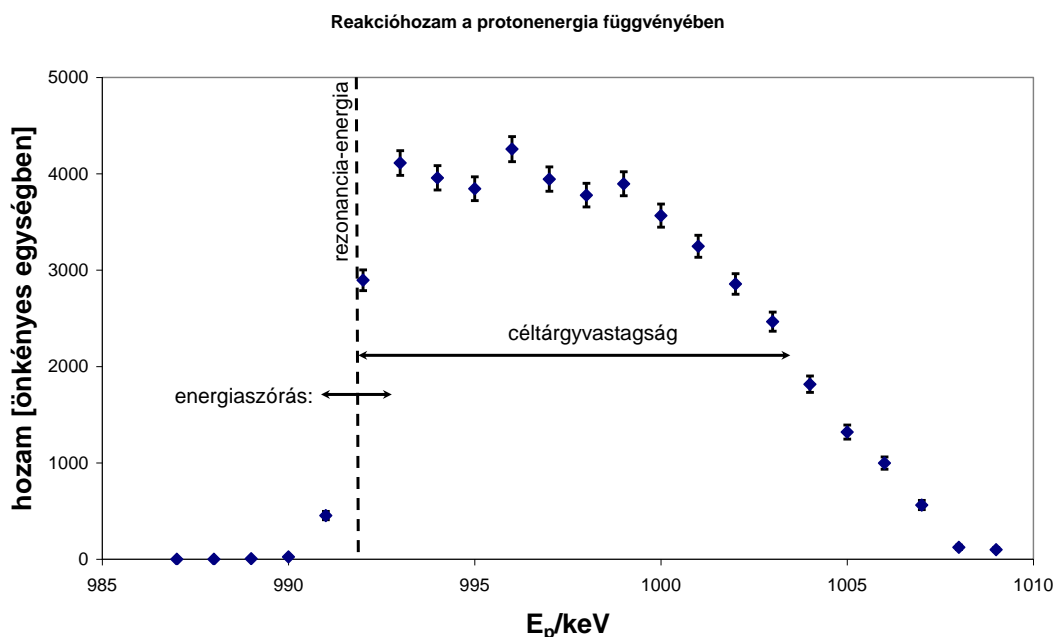
$$E_p = \frac{28}{27}(12541 \text{ keV} - 11585 \text{ keV}) = 992 \text{ keV}$$

ahol az első hányados a tömegközépponti rendszerről laborrendszerre való átszámításhoz szükséges. Ha tehát a reakció hatáskeresztmetszetét mérjük a protonenergia függvényében, akkor 992 keV energiánál egy ugrást kell tapasztalnunk. Az ugrás helyének a táblázat alapján mért energiáját összevetve az irodalmi, 992 keV-es energiával, a gyorsító energiahitelesítése (legalábbis közelítőleg 1 MeV energiájú protonnyaláb esetén) elvégezhető.

A rezonanciában keletkező gerjesztett állapot bomlása szintén látható a 15. ábrán. A gerjesztett állapot legvalószínűbben az ábra szerinti két egymást követő gamma-foton kibocsátásával bomlik a ^{28}Si mag alapállapotába. Elsőként egy 10762 keV energiájú gamma-sugárzás kibocsátása révén a mag 1779 keV-es első gerjesztett állapota jön létre, majd ez egy 1779-es gamma-foton kibocsátásával bomlik alapállapotba. Ennek a két gamma-sugárzásnak a detektálásával lehet a reakció hozamát mérni, s így a rezonancia helyét meghatározni.

A rezonanciagörbe felvétele

A reakció relatív hozamát (azaz az egy beeső részecskére jutó reakciók számát) a protonenergia függvényében ábrázolva a rezonanciagörbe felvehető. Egy ilyen tipikus görbe látható a 16. ábrán.



16. ábra: A 992 keV-es rezonancia hozamgörbéjének várható alakja és a belőle nyerhető információk

A felvett hozamgörbéből több különböző információ is kinyerhető. A görbe felfutó élének pozíciója (pontosabban a felfutó élre illesztett hibafüggvény [4] inflexiós pontjának helye) adja meg a rezonancia energiáját, azaz ennek az értéknek az irodalmi értékkel (992 keV) való összevetése jelenti a tényleges energiahitelesítést. A felfutó él szélessége (általában az $\frac{1}{4}$ és $\frac{3}{4}$ magasság közötti energiatávolságot véve) adja a nyaláb energiaszórását. Ez azért lehetséges, mert a vizsgált rezonancia természetes szélessége igen kicsi (eV nagyságrendű), tehát a felfutó él véges szélességét csak a nyaláb energiaszórása okozhatja. A hozamgörbe teljes szélességéből pedig a céltárgy vastagságára következtethetünk.

A relatív hozam méréséhez ismernünk kell a lejátszódó reakciók számának és a céltárgyra jutó protonok számának a hányadosát. A protonok számát a céltárgyra jutó töltés mérésével tudjuk meghatározni. Ehhez nyalábarám-integrátort használunk. A lejátszódó reakciók száma pedig arányos a mért gamma-spektrumban az 1779 keV-es, vagy pedig a 10762 keV-es csúcsok területével, így ezek meghatározása szükséges (a gamma-detektálásról részletek alább).

A gamma sugárzás detektálása

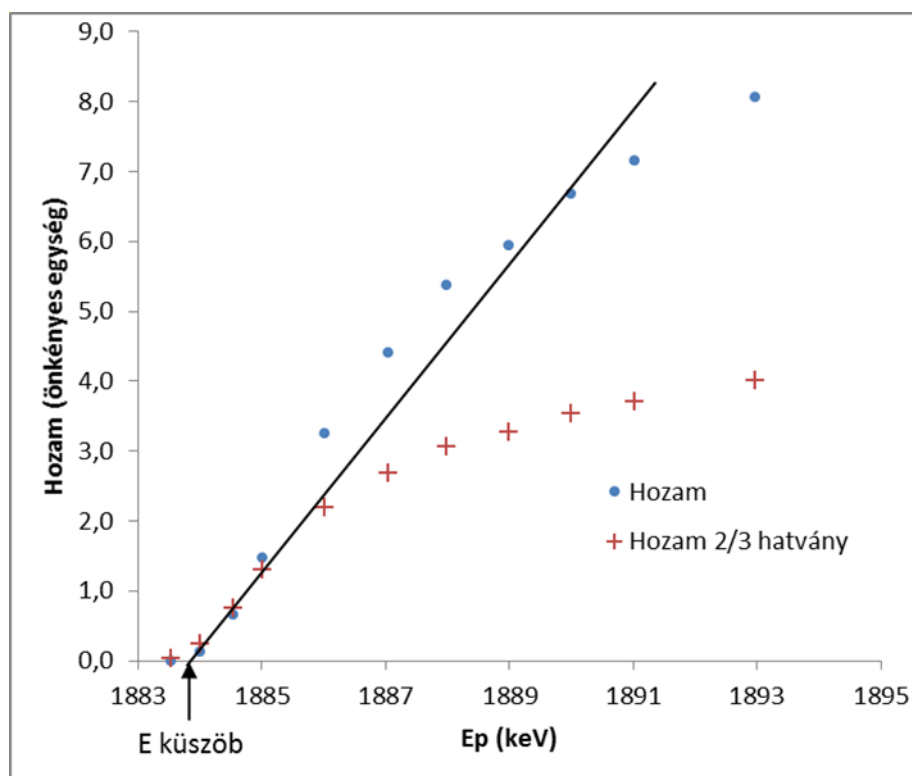
A reakcióban keletkező gamma-sugárzás detektálására egy 40% relatív hatásfokú Canberra gyártmányú nagy tisztaságú germánium félvezető detektort (HPGe [5]) használunk. A detektorból (illetve az azzal egybeépített előerősítőtől) származó, a gamma-sugárzás detektorban leadott energiájával arányos amplitúdójú elektromos jeleket egy spektroszkópiai erősítő után egy ADC-be vezetjük, ami után a mérésvezérlő számítógépen megjeleníthető a gamma-spektrum. A spektrumok felvételére az ORTEC MAESTRO szoftvert használjuk [6]. A spektrum gyűjtésén kívül a szoftver néhány alapvető kiértékelési művelet, mint például energiakalibráció, vagy csúcsterület-meghatározás is alkalmas.

A mérendő gamma-vonalak beazonosításához szükséges a detektor energiakalibrációja. Ezt a laboratóriumi háttérsugárzás legintenzívebb vonalai, vagy radioaktív kalibráló források segítségével lehet elvégezni.

7. Gyorsító energiahitelesítés Li(p,n)Be magreakcióval

A fentiekben leírt mérésnél lényegesen gyorsabban is elvégezhető az energiahitelesítés a ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ magreakcióval. Ehhez gamma sugárzás helyett neutronokat kell detektálni, azonban a detektált neutronok energiájának ismerete nem szükséges. A magreakcióban 1880 keV proton energiánál egy küszöb mérhető a hozamban, így ennek a meghatározásával a 992 keV proton energia mellett ennél a nagyobb energiánál is tudjuk ellenőrizni a proton energiát. A méréshez egy ún. long counter detetort használunk – egy BF₃ töltésű proporcionális számláló. A céltárgyon a töltést a detektorból pedig az össz beütésszámot mérjük, a kettő hányadosa adja a hozamot, amelynek az energiafüggését ábrázoljuk.

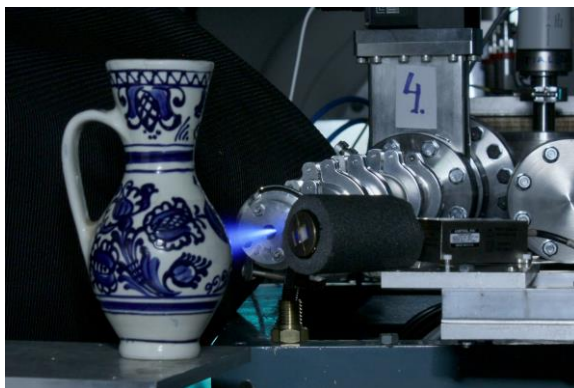
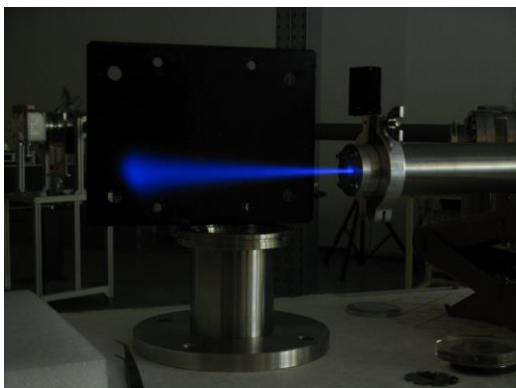
A küszöbenergia meghatározását az teszi lehetővé, hogy a megmért neutron hozam a keletkező neutron energia $3/2$ hatványától függ, megközelítően a $(E_{\text{bombázó}} - E_{\text{küszöb}})^{3/2}$ hatványától. A bombázó energiától függő hozam pontokat $2/3$ hatványra emelve kiválasztható egy lineárisan jól illeszthető szakasz mely segítségével $y=0$ -ban meghatározható a küszöb energia. (Ld. 17. ábra)



17. ábra: A Li(p,n) reakció rezonancia hozamgörbéjének várható alakja és a $2/3$ -os illesztés

8. Levegőre kihozott nyaláb demonstrálása

Amennyiben az idő engedi, az ionnyalábot ki fogjuk hozni levegőre. A kihozott nyaláb célja többértű, valamilyen okból nem lehet a besugárzandó mintát vákuumba helyezni, ekkor a nyalábot kell kihozni. Ilyen ok lehet régészeti minták esetén a méret, az anyagszerkezet (pl. porózus anyag), vagy biológiai minták esetén az, hogy a sejtek életben maradjanak (*in vivo* besugárzás), vagy például folyadék minták besugárzása (melynek hatására végbemenő kémiai változásokat figyelhetünk meg).

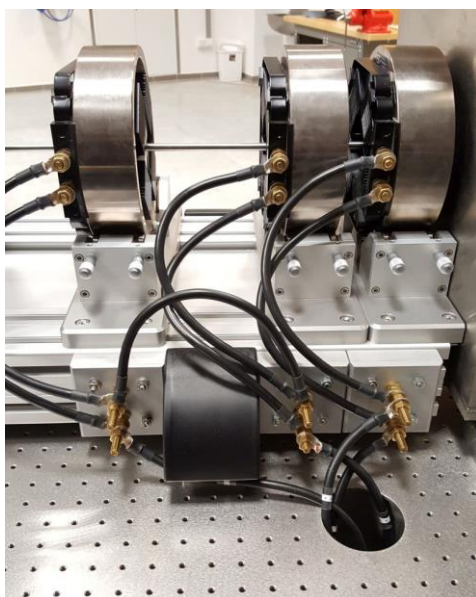


9. Nyaláb fókuszálási gyakorlat a nanoszondával

A régi Van de Graaff gyorsító mellett 1993 óta működik a pásztázó ionmikroszkop, amely jelenleg a VdG legintenzívebben használt nyalábsatornája, sok hazai és nemzetközi projekt fut rajta. Az elmúlt évtizedekben számos diplomamunka és PhD disszertáció is itt készült.

Az új Tandetron gyorsító egyik fontos paramétere, hogy a VdG-nél lényegesen jobb az energiastabilitása, ezért célul tűztük ki a mikroszkop továbbfejlesztéseként egy új pásztázó ion nanoszonda megépítését. (A Tandetron és a nanoszonda is MTA Infrastruktúra támogatásból jön létre.)

A gyakorlat során a hallgatók megtekinthetik a beüzemelés alatt álló rendszert.



Összefoglalás

A jelen leírásban ismertetet gyakorlat során a következő feladatok elvégzése szükséges:

1. Betekintés a Tandetron gyorsító üzemeltetésébe (természetesen felügyelet mellett). A terminálfeszültség ripple mérése a CPU eszközön. A terminálfeszültség hosszú távú stabilitásának mérése a GVM eszközön.
2. Az $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ reakció 992-es rezonanciának mérése: spektrumok gyűjtése különböző protonenergiáknál <1 keV-es (vagy akár <100 eV-es) lépésekkel, a spektrumok kiértékelése, a rezonanciagörbe felvételével.
3. A $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$ reakció hozam rezonancia mérése 1880 keV proton energiánál, a spektrumok kiértékelése, a rezonanciagörbe felvétele.
4. A rezonanciagörbék alapján a gyorsító energiahitelesítése, az energiaszórás meghatározása, az Al céltárgy vastagságának meghatározása és összevetése a gyári adattal.
5. A mérés jegyzőkönyvének elkészítése.

Hivatkozások

- [1] <http://www.atomki.hu/>
- [2] <http://www.highvolteng.com>
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_magnetic_resonance
- [4] <http://hu.wikipedia.org/wiki/Hibaf%C3%BCggv%C3%A9ny>
- [5] <http://www.canberra.com/products/465.asp>
- [6] <http://www.ortec-online.com/Solutions/applications-software.aspx> → MAESTRO-32