

GYORSÍTÓFIZIKAI KUTATÁSOK AZ ATOMKI NAGYFESZÜLTSGŰ GYORSÍTÓINAK FIZIKAI TERVEZÉSÉHEZ. ÚJSZERŰ ELVEK ALKALMAZÁSA ÉS HATÁSAIK ELLENŐRZÉSE A FELÉPÍTETT BERENDEZÉSEINKEN

Az ATOMKI fizikus és műszaki kutatóinak egy csoportja több évtizeddel ezelőtt azt a feladatot vállalta magára, hogy az Intézet fundamentális és alkalmazott kutatási igényeit hosszabb távon és széles tematikai körben kielégítő gyorsító laboratóriumot építsen fel.

A Debrecenben korábban megszerzett saját (gyorsító építési, vákuumtechnikai, ionforrás-fejlesztési és elektronikai) tapasztalatokra és az elektrosztatikus gyorsítók fejlődését rögzítő, az irodalomban közölt általános ismeretek kritikai feldolgozására támaszkodva, csoportunk több területen újszerű megoldásokat alkalmazva általános fizikai és konkrét műszaki terveket dolgozott ki egy eredetileg tesztberendezésnek szánt 1 MV-os berendezésre. A felépített gyorsítón szerzett pozitív tapasztalatok alapján helyi, illetve hazai (ipari szintű) kivitelező kapacitások segítségével, létre hozta az eredeti célokra szánt egyvégű, 5 MV-os Van de Graaff típusú generátort. Mindkét berendezésnél többcélú ionnyalábot vezető rendszereket, kísérleti célberendezéseket építettünk ki.

Azóta ezek a gyorsítók az intézet alpműszer-parkjának tagjaiként, a tudományos fejlődés során felvetődő, egyre bővülő témakörökben szolgálják ki immár több kutató generáció kutatásait, szükség szerint fejlesztésekkel követve az egyre újabb igényeket.

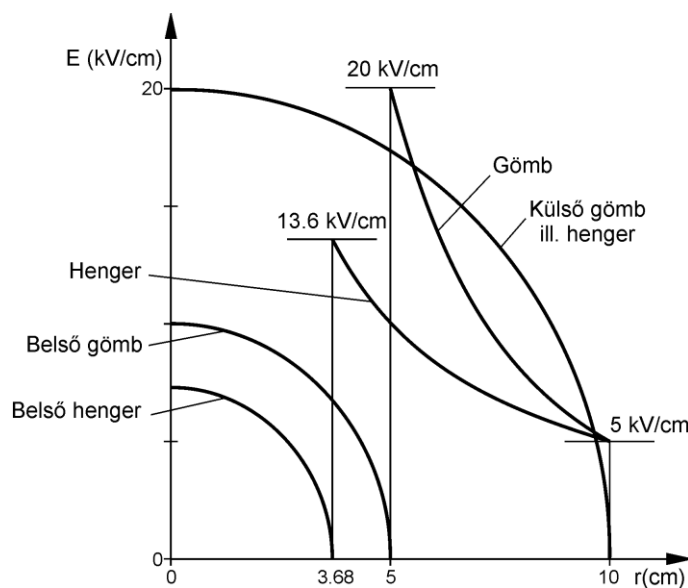
Az általunk bevezetett elvek és módszerek kimutathatóan hatást gyakoroltak más gyorsító laboratóriumok munkájára is.

A következőkben röviden áttekintjük a fontosabb gyorsító-fizikai fejlesztési területeink alapjait, s hivatkozunk néhány velük kapcsolatos nemzetközi közleményünkre is.

1. EGYVÉGŰ VAN DE GRAAFF GENERÁTOROK ELEKTROSZTATIKUS TERÉNEK OPTIMALIZÁLÁSA

1.1 Kiss Á., Koltay E., Szalay A., NIM 46 (1967) 130-135

A generátor legnagyobb üzemi feszültségét akkor érjük el, amikor a terminálon vagy annak közelében levő nagyfeszültségű elemen fellépő elektromos térerősség értéke - akár egy szűk területen is - azonos lesz a szigetelő gázközeg átütési szilárdságával. Emiatt ebben a tartományban úgy kell a téreloszlást optimalizálni, hogy kiküszöböljünk minden lokális térerő-maximumot. A hengeres, felül kosárfenék-görbe alakú fedéllel lezárt, nagynyomású tankba helyezett egyvégű generátorok, a tartály alakja miatt, klasszikus esetben a szigetelő oszlop gyűrűsorának átmérőjéhez csatlakozó hengeres terminált használtak, amelynek felső vége egy félgömb-süveggel volt lezárva.



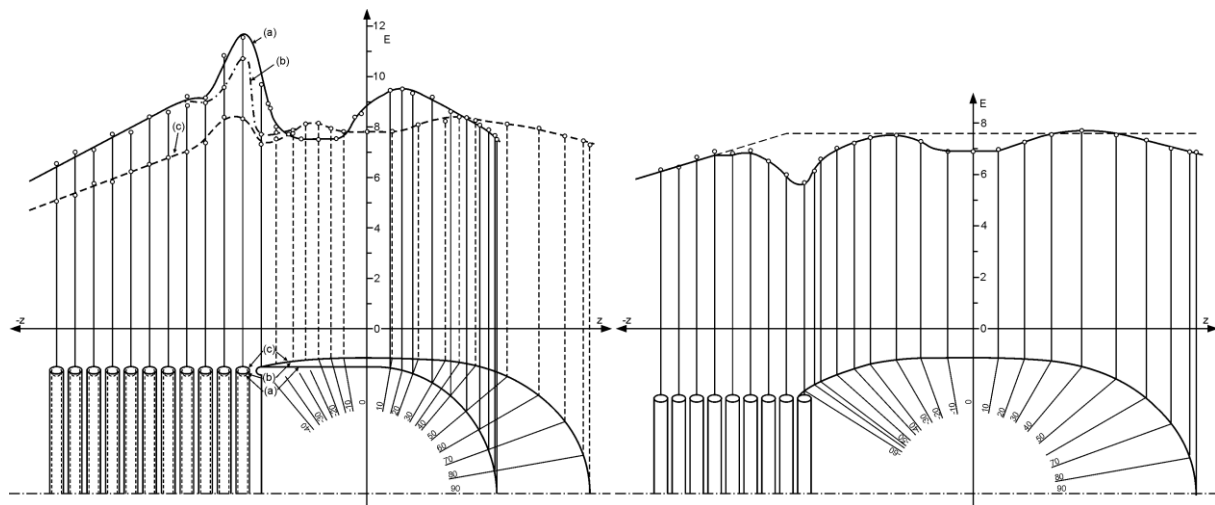
1. ábra

Az 1. ábra egy 10cm sugarú, 50 kV-ra töltött gömbkondenzátor illetve hengerkondenzátor modell belső fegyverzetén minimalizált térerőket szemlélteti. Gömbi esetben belső sugárként a külső sugár felé, hengeres esetben $1/e$ -szeresét kell választanunk. A vonatkozó térerők viszonya 1,47, azaz a klasszikus generátoroknál jelentős térerő-ugrás lép fel a kétféle geometria csatolásánál, ami lényegesen csökkenti a generátor adott méretviszonyainál elérhető maximális üzemi feszültséget, mert a meridiánsíkban a gömb görbületi sugara jelenik meg a hengeralkotó végtelen görbületi sugara helyett.

Ezeket a viszonyokat egy analóg modellezési eljárás alkalmazásával, elektrolit-tankban követtük nyomon a térerő-ugrás felmérése, illetve kiküszöbölése érdekében.

A 2. ábra (a) görbéje a klasszikus esetre szemlélteti a térerő menetét a terminál kontúrja mentén az 1 MV-os generátor méretviszonyainál. Új elektródformát találtunk kísérleteink során egy a terminált lezáró gömbsüveghez illesztett harmadrendű forgási paraboloid formájában, amelynél a meridiánsíkban sima átmenetet lehet biztosítani a görbület 0 értéke és a gömbsüveg görbülete között. Ilyen típusú megoldásokat használnak egyenes vonalak görbe ívekhez való sima csatlakoztatására a technika sok területén (pl. vasúti pályák építése). A (b) görbe lényegesen csökkenti a csatlakozás miatti térerő-ugrást. A végleges felépítésben megvalósított (c) görbe további javulást mutat abban az esetben, amikor a szigetelő oszlop ekvipotenciális gyűrűit kör-keresztmetszetű cső helyett optimális keresztmetszetű elliptikus csőprofilból készítettük el.

A 3. ábra az 5 MV-os generátor méretviszonyai mellett elérhető térerő-menetet szemlélteti. Itt a nagy tartályátmérő lehetővé tette, hogy az ekvipotenciális gyűrűk relatív átmérőjének csökkentésével a 2. ábra (a), (b) és (c) görbéin lépésenként lecsökkentett maximumok helyén térerő-minimumot érjünk el.



2. ábra

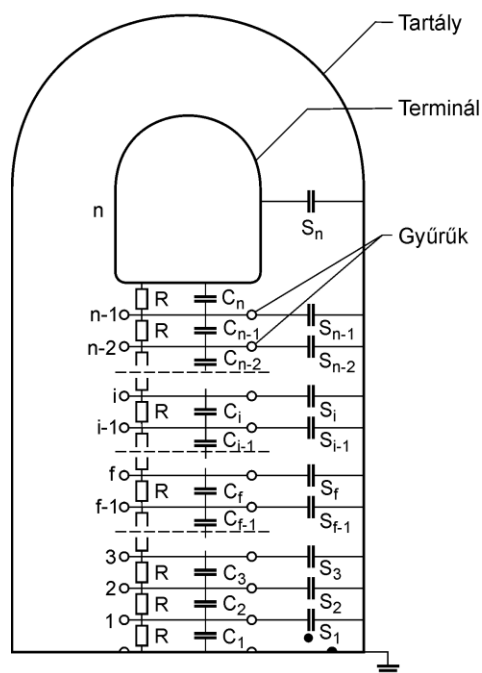
3. ábra

2. TRANZIENS FESZÜLTÉSGLÖKÉSEK ÁTÜTÉSEKNÉL

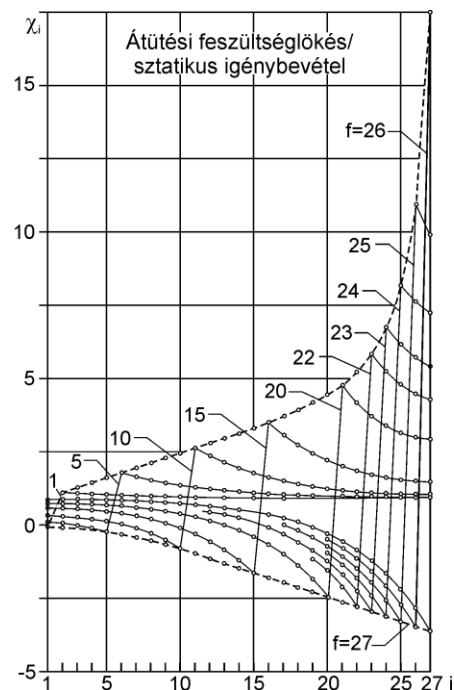
2.1. Kiss Á.Z., NIM 92 (1971) 361-363

A gyorsító nagyfeszültségű elemei (a terminál, a földelt tartály, valamint a szomszédos tartóoszlop és gyorsítócső-szakasz elemei) által alkotott kapacitások nagy mennyiségű töltést tárolnak üzem közben. Ha bármilyen ok miatt egy kezdő átütés lép fel a generátorban, kisülési lánc fut végig az összes elemen. A VDG-1 konfigurációjára számításokkal nyomon követtük ezt a folyamatot (4. ábra), a gyorsítócső feszültségosztó ellenállását is magába foglaló RC helyettesítő kapcsolás modellje alapján.

Mint az az 5. ábrán jól látható, az oszlop mentén, az abszcisszán jelzett gyűrűszám szerint változó, feszültséglökés fut végig: az amplitúdó annál nagyobb, minél magasabban elhelyezkedő (az ábrán f paraméterrel jelzett) elektróda üt át a tartályhoz. Ha maga a terminál üt át, esetünkre a gyorsítócső legfelső szigetelő gyűrűjén átfutó feszültséglökés 17,5-szeresen meghaladja a normál működésnél fellépő sztatikus igénybevételt. A szigetelőgáz átütési szilárdságánál jóval alacsonyabb az átívelési szilárdság a szigetelőlábak külső és a gyorsítócső szigetelőinek külső illetve belső felületén. Emiatt ezeken a felületeken az átütések során erős eróziós hatások léphetnek fel, az átütéseket pillanatnyi vákuumromlás is kíséri. E hatások csökkentésére törekedtünk a terminál alsó ívelt szakaszának az 1. illetve 2. ábrán látható erőteljes meghosszabbításával. A VDG-1 kis méretei mellett csak az **(a)** és **(b)**. görbén látható itteni maximumok nagyságát sikerült lényegesen csökkenteni. A VDG-5 esetén kifejezett csapdába tudtuk helyezni a legkárosabb hatásokra vezető legfelső gyűrűket. Ennek tudhatjuk be, hogy az 5 MV-os generátor 60000 órát megközelítő teljes üzemideje alatt alig találtunk mechanikailag sérült szigetelő elemeket a csőben, illetve az oszlop szigetelőlábaiban.



4. ábra



5. ábra

3. GYORSÍTÓ CSÖVEK IONOPTIKÁJA

- 3.1. Koltay E., *Physics Letters* 4 (1963) 66-68
- 3.2. Gyarmati, B., Koltay E., *NIM* 66 (1969) 253-260
- 3.3. Kiss, Á., Koltay, E., Szabó, Gy., *IEEE 81CHI639-4* (1981) 103-106
- 3.4 Kiss Á. Z., Koltay., Papp I., Szabó., Félserfalvi J., Nyilas I. *NIM* 268 (1989) 253-260
- 3.5. Bartha L. , Kiss Á. Z., Koltay E., Nagy A., Szabó Gy., *Félserfalvi J. NIM* 328 (1993) 253-260
- 3.6. Bartha, L., Koltay, E., Móri, Gy., *NIM B* 111 (1996) 157-160

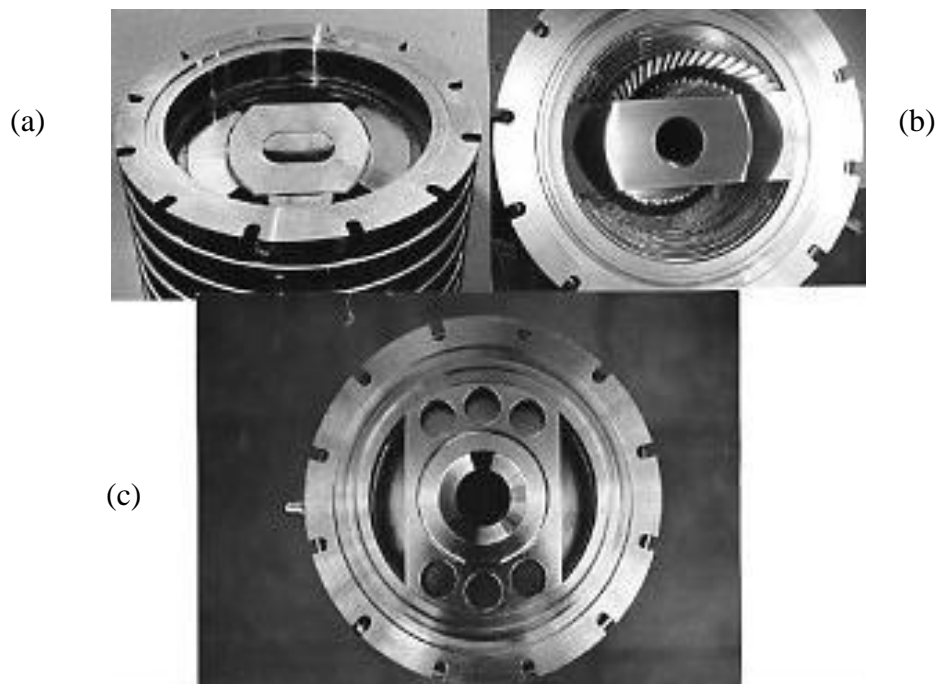
A gyorsítócső felépítése a generátor teljesítőképességét lényegesen befolyásolja. Mechanikailag ellenáll a tartálynomás és a cső belső nagyvákuuma közötti erőhatásnak, elektrosztatikusan a hossza mentén fellépő átívelési igénybevétel korlátainak. Rövid (esetünkben 30mm magasságú) szakaszokra bontott szerkezete kettős elektronoptikai

feladatot tölt be. Egyrészt a csőbe injektált ionok gyorsítása során az ionokat előírt méretű tengelyhez közeli nyalábra fogja össze. Másrészt korlátozza a nyalábból kiszóródó ionok által a cső maradék gázában és a szerkezeti elemeken keltett, a csőben visszafelé gyorsuló szekundér elektronok radiális kitérésével a becsapódásukkor keletkező fékezési röntgensugárzás maximális energiáját és intenzitását, valamint a generátorral elérhető maximális feszültséget csökkentő áramerhelést. Utóbbi célra a tengely menti térkomponensre merőleges, csőszakaszonként ellentett irányú kitérítő komponensek alkalmazhatók, amelyek a kis tömegű és gyakorlatilag nulla energiával induló elektronokra erőteljes kivonást fejtenek ki. A nehezebb és gyorsabb ionok pályáira gyakorolt kisebb perturbáló hatást az egymást követő szekciókban felváltva ellentett irányú eltérések korlátok között tartják. A cső menti axiális gradiens néhány rövidre zárt térmentes szakaszon beiktatott modulációjával az elektronok számára szórólencse-hatást hozunk létre, így az iontrajektóriák transzverzális kitérése nélkül érjük el az elektronok becsapódását.

A fent leírt feladatok optimális megoldása érdekében különböző elektronoptikai elvű elektródelrendezéseket szokás alkalmazni. Az 6. ábra (a), (b) illetve (c) képei az 5 MV-os generátorunkban a felváltva használt ferde terű, spirálszektor terű, illetve az axiális potenciálgradiens-modulációt hasznosító elektródrendszereit mutatják be.

A kiszóródó ionok egy része felületi töltéseket építhet fel a cső szigetelő falán, és ezzel a nyaláb helyzetét kiszámíthatatlan ingadozásokkal módosíthatja. Ez ellen esetenként a csőfalat alkotó szigetelőgyűrűket leárnnyékoló elektródokkal védekeztünk.

A fenti elrendezések elektronoptikai viselkedését ion-és elektrontrajektóriák számítása alapján igyekeztünk optimalizálni. Modellszámításaink eredményeit a különböző verziók tényleges megvalósítása útján ellenőriztük, illetve meghatároztuk, hogy adott nyalábalkalmazások céljaira melyik típust célszerű használni. A térszerkezet egyszerű megváltoztatását azáltal értük el, hogy a szigetelők közé beragasztott fém-közgyűrűk belső oldalán ültető hornyokat alakítottunk ki, ezekben a különböző konfigurációk elektródbetétei egyszerűen bepattinthatók.



6. ábra

Ezzel a felépítéssel egyúttal elérhetővé vált, hogy több tízezer órás használat után a belső szigetelő felületen kialakult szennyező lerakódásokat szilícium-karbid szemcsefúvós technológia alkalmazásával eltávolításuk, minthogy az elektródbetétektől megszabadított csőszakaszokban nagy átmérőjű csatorna vált szabaddá a művelethez. Ezzel a tisztítással megtöbbszörözhető egy gyorsítócső hasznos élettartama.

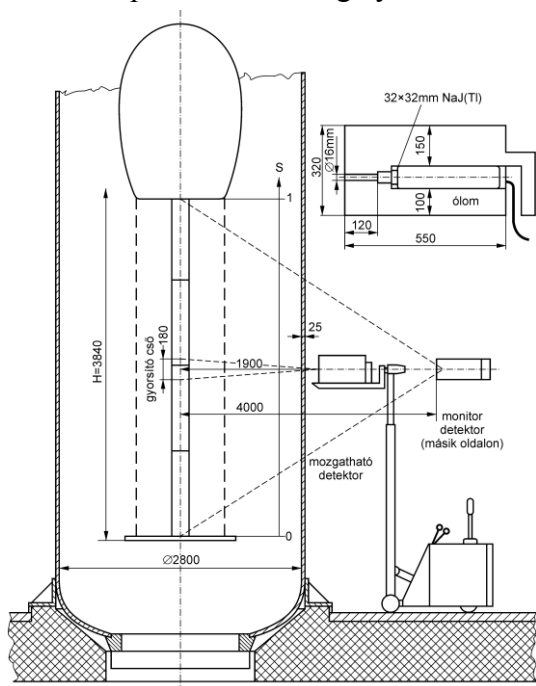
4. FÉKEZÉSI SUGÁRZÁSI HÁTTÉR VIZSGÁLATA

4.1. Kiss, Á.Z., Koltay E., Szabó Gy., NIM 117 (1974) 325-329

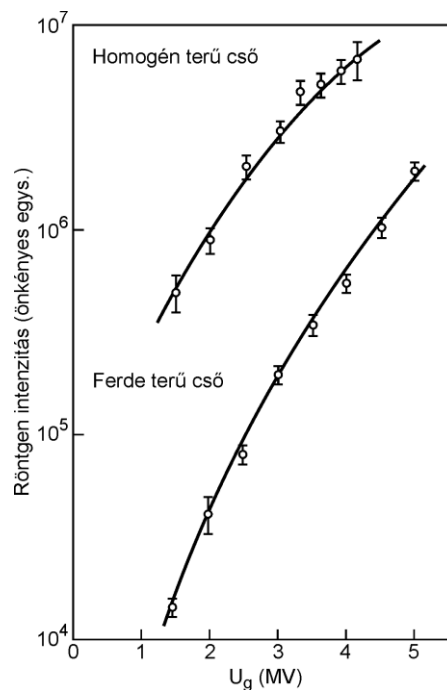
4.2. Kiss, Á.Z., Koltay E., Papp, I., Szabó Gy., Félserfavi. J., Nyilas I. NIM A268 (1988) 382-385,

4.3. Friedrich, M., Günzel, R., Kiss, Á. Z, Koltay E., Félserfalvi J. NIM A234 (1985) 1-5

A szekundér elektronok által keltett fékezési sugárzási háttérnek a gyorsítócső hossza mentén kialakuló eloszlását a különböző kivonási tulajdonságú, előbbiekben tárgyalt elektródsziszterek esetében közvetlen sugázmérésekkel követtük nyomon. Erre a célra a tartályon kívül hidraulikus emelőre felépített erősen kollimált szcintillációs detektort és a tartály falán a csőhöz közeli alkotó mentén sűrűn elhelyezett termoluminescens (TLD) kapszulákat használtunk. Az első rendszerrel a fékezési sugárzás intenzitásának mérését illetve a spektrumok kiértékelése alapján a csőben befogott elektronok végponti energiájának becslését tudtuk elvégezni. A második esetben abszolút dózisintenzitásokat tudunk mérni. A tartályfal abszorpciós hatásának kiküszöbölésére a tartályon belüli *in situ* dózisintenzitásokat is feltérképeztük a cső tengelyétől 20cm távolságra elhelyezett (TLD) kapszulákkal.



7. ábra

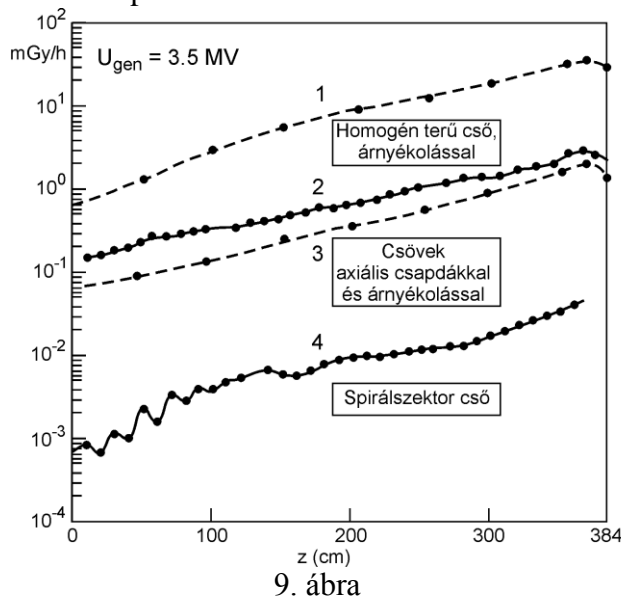


8. ábra

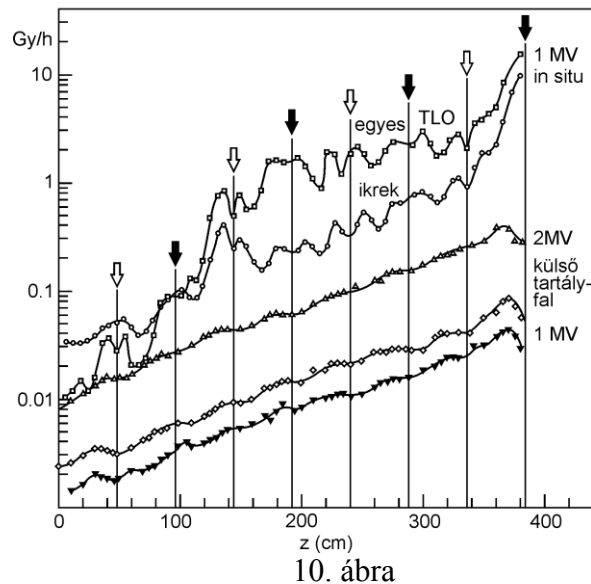
A 7. ábrán a szcintillációs detektoros elrendezést, a 8. ábrán a homogén terű (elektronkivonás nélküli) és ferde terű csőelrendezésben, a tartályon kívül, önkényes egységekben mért sugárzási intenzitásokat mutatjuk be. A 9. ábrán, a tartályon kívül TLD-vel mért abszolút dózisintenzitások láthatók árnyékoló hatású homogén és spirálszektor cső esetén, míg a 10. ábra két felső görbéje egy 8 szakaszban axiális csapdázással ellátott cső *in*

situ dózisintenzitás eloszlása: a mérések reprodukálhatóságának ellenőrzésére a felső görbét elektródonként egy-egy TLD kapszulával, a második görbét két-két egymás mellett elhelyezett kapszulával vettük fel. Jól kivehetők a csapdáknak befogott elektronok által keltett sugárzási maximumok. A tartályfalon kívül végzett méréseknél ezek a maximumok eltűnnek annak megfelelően, hogy az elektronok csak egynolcadnyi csőhosszakat tudtak befutni, s így a fékezési spektrumok alacsony, a fal által abszorbeálható átlagos energiával rendelkeznek.

Ezt a nyalábdiaosztikai eljárásunkat egy nemzetközi együttműködés keretében sikerrel alkalmaztuk a drezdai Magfizikai Intézet tandem generátorában működő ferde terű csövek elektronoptikai viselkedésének tesztelésében is.



9. ábra



10. ábra

5. ASZIMMETRIZÁLT KVADRUPOLENCSEK GYORSÍTÓINK IONTRANSPORT - RENDSZEREIBEN

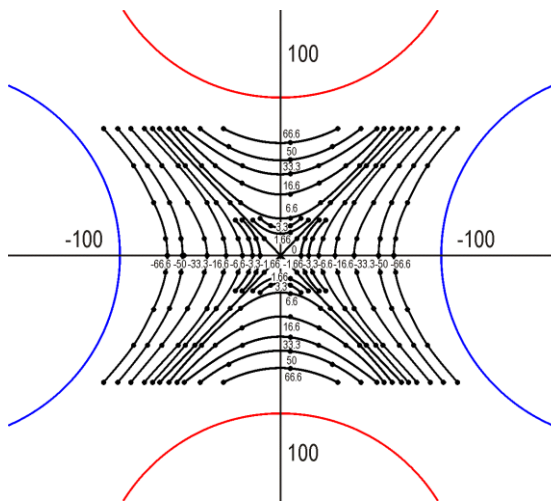
5.1. Koltay E., Szabó Gy., NIM 35 (1965) 88-92

5.2. Ovsyannikova, L., P., Yavor, S., Ya., Koltay E., Szabó Gy., NIM 74 (1969) 185-190

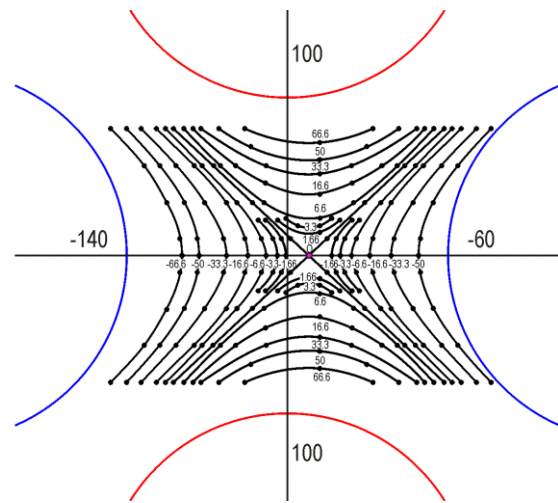
A gyorsítóból kilépő nyaláb pontos pozicionálásának és iránykitűzésének megoldása igen nagy jelentőségű a kísérleti alkalmazások pontossága és érzékenysége szempontjából. Különösen fontos ez a feladat az energia mérésére és stabilizálására szolgáló analízáló mágnes szűk résein történő átvezetés és a mikroszonda-alkalmazásokban használt tíz mikron nagyságrendű rések áteresztő képességének kihasználása, valamint a tengely menti nyalábvezetés elérése szempontjából.

A nyaláb helyzetének és irányának két transzverzális irányban történő független szabályzására két-két elektrosztatikus vagy mágneses ionoptikai elem szükséges. Az egyes nyalábcatornáknak különböző távolságban elhelyezett képpontokba történő asztigmatikus leképzés csatornánként két fókuszáló elemet igényel. Ezt a hat paraméteres szabályzási feladatot általában két-két, páronként egymásra merőleges irányú síkkondenzátor és egy kvadrupollencse-dublett alkalmazásával szokás megoldani. A mi berendezéseinknél a két funkciót – nyalábirányítást és fókuszálást – oly módon egyesítettük, hogy egy-egy kvadrupollencse négy pólusát a lencseerősség szabályzása érdekében a szokásos szimmetrikus módon tápláltuk, majd egy-egy szemközti póluspárra, ezt a szimmetriát megbontva, a kvadrupoltérre egy-egy változtatható erősségű dipólteret szuperponáltunk. Mint a 11, 12 és 13. ábrák mutatják, ez az aszimmetrizálás optikai szempontból azonos hatású a lencse egy- vagy kétirányú transzverzális eltolásával. Ezt az elrendezést a dublett mindkét lencsére

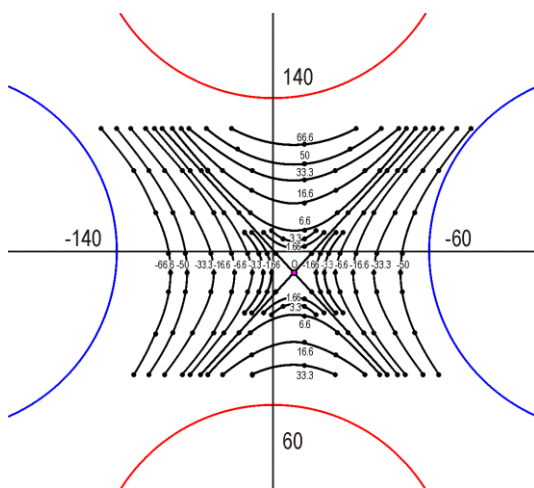
elvégezve mindössze két optikai elem alkalmazásával megkaptuk a fent leírt hat paraméteres szabályzási lehetőséget. Az egyik síkban kapott nyalábeltérítési távolságok lineáris függését egy dublett δ_1 és δ_2 aszimmetriaparaméterétől, a 14. ábra szemlélteti.



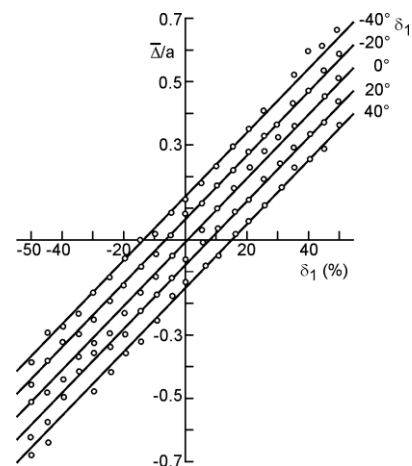
11. ábra



12. ábra



13. ábra



14. ábra

Az analízáló mágnes előtt egy aszimmetrizált elektromos, a kapcsolómágnes előtt és az egyes nyalábcsatornákon egy-egy aszimmetrizált táplálású mágneses kvadrupoldubletet alkalmaztunk.

Részletes elméleti ionoptikai vizsgálatokat végeztünk arra vonatkozóan, hogy a szokásosan minimalizált aberrációval kialakított fókuszáló lencsék leképző tulajdonságait mennyiben torzítja az aszimmetrizálással bevitt járulékos aberráció. Mind a számítások, mind a kísérleti tapasztalatok meggyőztek arról, hogy a nyalábirányítás és fókuszálás egyesítésére általunk bevezetett szerkezeti egyszerűsítés nem zavarja lényegesen az optikai leképzést.

6. KÖNNYŰ ATOMI ÉS MOLEKULÁRIS RÉSZECSKENYALÁBOK LÉTREHOZÁSA

6.1. Nagy J., *ATOMKI Közlemények* 7 (1965) 209

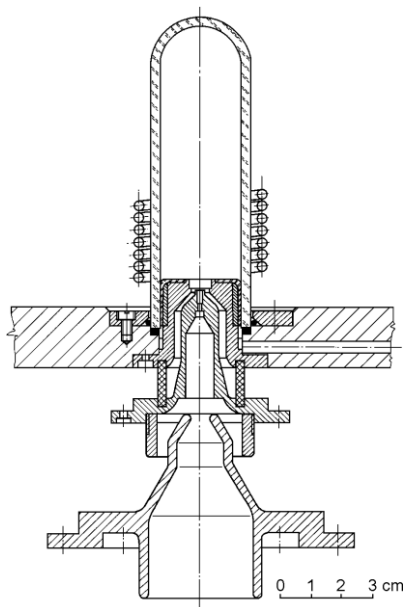
6.2. Kiss I., Koltay E., Bornemisza-Pausperl P., *Revue de Physique Appliquée* 12 (1977) 1481-1495

6.3. Bartha L., Kiss Á.Z., Koltay E., Szabó Gy., *NIM A287* (1990) 156-160

6.4. Bartha L., Kiss Á.Z., Koltay E., Szabó Gy., Zolnai L., Nyilas I., *NIM A244* (1986) 166-169

6.5. Hunyadi I., Kiss Á.Z., Kiss I., Koltay E., Szabó Gy., *NIM 220* (1984) 154-157

A Van de Graaff generátorokban szokásosan alkalmazott rádiófrekvenciás ionforrás Thonemann-féle ionkivonó rendszere helyett a Baily és Ward által javasolt katódlencsés kivonó rendszert használtuk. Ezzel a módosítással a ballon falát érő elektroeróziós hatástól és az előbbi rendszer fém-üveg forrasztásainál gyakran fellépő vákuumzárasi hibáktól sikerült megszabadulnunk. Másrészt a kivonó rendszer készítésénél elérhető nagy mechanikai pontossággal, méreteinek egyszerű változtatási lehetőségével és a használt katód csúcsok egyszerű cseréjével nagyfokú nyalábstabilitást és flexibilitást értünk el különböző munkagázok alkalmazása mellett. A forrás szerkezetét a 15. ábra szemlélteti.



15. ábra

Ion-atom ütközési folyamatok tanulmányozásánál gyakran van szükség meghatározott energiájú és töltésállapotú könnyű atomi és molekuláris részecskenyalábokra, esetenként semleges részecskékre is. Az atomi folyamatoknak a nukleárisokhoz képest igen nagy hatáskeresztmetszete megengedi, hogy itt *nanoAmper* nagyságrendű intenzitásokkal dolgozzunk.

Megmutattuk, hogy a Van de Graaff generátorainknál használt egyszerű rádiófrekvenciás ionforrást különböző töltőgázokkal s a szokásos 47,5 MHz-es gerjesztés helyett 78 MHz-es frekvenciával működtetve, egy sor atomi és molekuláris ionnyalábot állíthatunk elő a táblázatban bemutatott tipikus analízált intenzitásokkal.

Semleges nyalábokat úgy állíthatunk elő, ha a kívánt rendszámú ionnyaláb útjába vékony lefosztó fóliát, vagy fóliaablakkal lezárt – esetleg ablak nélküli – gáztargetet teszünk, s a semleges részecskéket mágneses eltérítéssel megtisztítjuk az áttöltő targetben fellépő töltéscsere folyamatokban velük együtt keletkező töltött részecskescsoportoktól.

ION	MUNKAGÁZ A FORRÁSBAN					
	He	N	Ne	CH ₄	CO ₂	Freon 12
3H ⁺	-	-	-	900	2,4	-
3H ²⁺				1		
2H ⁺		28		4000	2	
H ⁺	220	130	-	500	50	-
He ⁺	2800	-	-	-	-	-
2H ⁺ és He ²⁺	20	-	-	-	-	-
2C ⁺						40
C ⁺	-	-	100	10	150	40
C ²⁺	-	-	-	1,5	8	12
(C3H C2H) ⁺				270		
C4H ⁺				1300		
C3H ⁺				800		
C2H ⁺				400		
CH ⁺				10		
C3H ²⁺				1,7		
C2H ²⁺				3		
CH ²⁺				1,4		
C2O					1000	
3N ⁺	-	2,7	-	-	-	-
2N ⁺	-	1030	-	-	-	-
N ⁺	-	1300	80	-	25	-
N ²⁺	-	70	-	-	-	-
O ⁺	-	140	200		80	
O ²⁺	-	-		-	7	-
F ⁺	-	-	-	-	-	200
F ²⁺	-	-	-	-	-	50
2Ne ⁺	-	-	100	-	-	-
Ne ⁺	-	-	1000	-	-	-
Ne ²⁺	-	-	20	-	-	-
Cl ²⁺	-	-	-	-	-	22

1. táblázat

MEGJEGYZÉS

A gyorsító berendezések részletes technikai szintű leírása (Technikai Riport gyanánt) az ATOMKI Közlemények alábbi cikkeiben található:

VDG-5 **16** (1974) 181-192. **17** (1975) 121-145. **18** (1976) 1-23. **19** (1977) 379-396
20 (1978) 89-111, **20** (1978) 181-206, **20** (1978), 263-277
VDG-1 **11** (1969) 125-135

(Összeállította Koltay Ede)