

# Elektronspektrométer-elemek elektronoptikai tulajdonságainak vizsgálata

Természettudományi egyetemi  
doktori értekezés

Benyújtotta:

**Tőkési Károly**

a Debreceni Kossuth Lajos Tudományegyetem

Természettudományi Karához

**Témavezető: Dr Varga Dezső**

A fizika tudomány

kandidátusa

*Készült: az MTA Atommagkutató Intézetében*

*Debrecen, 1991.*

# Tartalomjegyzék

|                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Bevezetés</b>                                                    | <b>3</b>  |
| <b>2. A fotoelektron-spektroszkópia módszere és kísérleti eszközei</b> | <b>5</b>  |
| 2.1. A fotoelektron-spektroszkópia alapelve<br>és alkalmazási területe | 5         |
| 2.2. A fotoelektron-spektrométer                                       | 7         |
| 2.2.1. Gerjesztő forrás                                                | 8         |
| 2.2.2. Minta                                                           | 9         |
| 2.2.3. Az elektronokat transzportáló elemek                            | 9         |
| 2.2.4. Analizátor                                                      | 9         |
| 2.2.5. Detektor                                                        | 10        |
| 2.2.6. Vákuumrendszer                                                  | 10        |
| 2.2.7. Mérésvezérlő és adatgyűjtő rendszer                             | 10        |
| <b>3. A kísérleti berendezések elektronoptikai tervezése</b>           | <b>11</b> |
| 3.1. Az elektrosztatikus terek potenciáeloszlásának számítása          | 13        |
| 3.1.1. Numerikus módszerrel, síkproblémára                             | 14        |
| 3.1.2. Sorfejtéssel                                                    | 16        |
| 3.2. Az elektrosztatikus térben mozgó elektronok<br>mozgásegyenlete    | 19        |
| <b>4. Analizátorok</b>                                                 | <b>21</b> |
| 4.1. Az elektrosztatikus analizátorok                                  | 21        |
| 4.1.1. Általános fogalmak                                              | 21        |
| 4.1.2. A diszperzív analizátorok leggyakoribb<br>típusai               | 23        |
| 4.2. Kúpos lezárású, torzított terű<br>hengertükör analizátor          | 27        |
| 4.3. Nem koaxiális hengertükör típusú<br>elektrosztatikus analizátor   | 32        |

|                                                                                  |           |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>5. Lencserendszerek</b>                                                       | <b>39</b> |
| 5.1. Az elektrosztatikus lencsék jellemző tulajdonságainak áttekintése           | 39        |
| 5.1.1. Általános fogalmak                                                        | 39        |
| 5.2. Háromelemes, doboz típusú lencsék                                           | 42        |
| 5.3. Ötelemes, doboz típusú lencsék                                              | 48        |
| 5.4. XPS lencserendszer                                                          | 50        |
| 5.4.1. Előlencse                                                                 | 51        |
| 5.4.2. Fékező lencse                                                             | 52        |
| 5.4.3. Utólencse                                                                 | 54        |
| 5.4.4. Lencserendszer a mintától az analizátor bemenetéig                        | 56        |
| 5.4.5. A lencserendszer kísérleti ellenőrzése                                    | 59        |
| 5.5. UPS lencserendszer                                                          | 61        |
| 5.5.1. Elő-gyorsító lencse                                                       | 61        |
| 5.5.2. Utólencse                                                                 | 64        |
| 5.5.3. Lencserendszer a mintától az analizátor bemenetéig                        | 64        |
| 5.5.4. A lencserendszer kísérleti ellenőrzése                                    | 66        |
| <b>6. Összefoglalás</b>                                                          | <b>68</b> |
| <b>7. Summary</b>                                                                | <b>70</b> |
| <b>8. Függelék</b>                                                               | <b>72</b> |
| 8.1. Formulák a véges differenciák módszere, változó méretű rácshálózat eseteire | 72        |
| 8.2. Optimalizálандó függvények az elektronoptikai számításaimban                | 73        |
| 8.3. Táblázatok a háromelemes doboz típusú lencsék jellemző paramétereivel       | 74        |
| <b>9. Köszönetnyilvánítás</b>                                                    | <b>83</b> |
| <b>10. Irodalomjegyzék</b>                                                       | <b>84</b> |
| <b>11. Közleményeim és előadásaim jegyzéke</b>                                   | <b>91</b> |

## 1. Bevezetés

Az elektronspektroszkópia alapvető berendezése az energiaanalizátor. Régebben a  $\beta$  spektroszkópiában kizárólag mágneses elektronspektrométereket használtak. Amikor az érdeklődés a magspektroszkópiában a kisenergiájú konverziós vonalak tanulmányozása felé fordult, új típusú spektrométerek kifejlesztése vált szükségessé. A kisenergiájú elektronspektrométerek fejlődésének új lendületet adott a fotoelektron-spektroszkópia (XPS [X-ray Photoelectron Spectroscopy - röntgengerjesztéses fotoelektronspektroszkópia], UPS [Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy - ultraibolya foton-gerjesztéses spektroszkópia] rendszerek) iránti érdeklődés. Ma már a  $10 - 20\text{KeV}$  alatti energiatartományban szinte csak elektrosztatikus elektronspektrométereket alkalmaznak. Ezek sok előnyös tulajdonságban különböznek a mágneses spektrométerektől: a teret sokkal egyszerűbb a spektrométeren belülre lokalizálni, kisebb a méretük és súlyuk, a Föld mágneses terét viszonylag könnyen leárnyékolhatjuk, végül az átvitt energia a spektrométerben alkalmazott feszültségek lineáris függvénye.

A minta és az analizátor között általában még jelentős távolság lehet, néhány centimétertől akár néhányszor tíz centiméterig. Az itt elhelyezhető elektronoptikai elemeknek kulcsszerepe van a megépült berendezésekben. Ezeket az elemeket, transzport és fékező lencséknek nevezzük ([SEP-67], [KEL-65]). Legfontosabb feladatuk a mintából kilépő elektronok minimális veszteséggel történő leképezése az analizátor bemeneti részére úgy, hogy a lencse kimenetén az elektronok energiája megegyezzen, nagyobb (gyorsító lencse), vagy kisebb (fékező lencse) legyen, mint a mintából kilépő elektronok energiája. Ezenkívül nagy szerepük van a nyalábformálásban is. A transzportelemek általában nem energiadiszperzív elemek, de átviteli hatásfokuk függ az energiától. Spektrum felvétele közben a belépő elektronenergiától függően, valamilyen függvény szerint változó feszültséggel kell táplálni őket. A lehetséges elemek bő választékát megtalálhatjuk az irodalomban. Hozzá kell tenni azonban, hogy ezek az elemek az adott rendszer speciális részei, így univerzális transzport elemet nem tudunk gyártani, minden egyes berendezéshez külön-külön meg kell tervezni és le kell gyártani.

A jelenlegi munkában, a csoportunk által kifejlesztett és megépített két új anyagvizsgálati berendezés (XPS, UPS), energiadiszperzív (az elektronok energiaanalízisére használható elektronoptikai rendszerek) és transzport (hengerszim-

metrikus lencsék) elektronspektrométer elemekre vonatkozó számításaimat ismertetem.

Az analizátorokkal kapcsolatos számításaimban két új elektrosztatikus analizátor vizsgálatával foglalkozom. Mindkettő egy korábbi analizátor típus általánosításából származik.

A transzport elektronoptikai elemek vizsgálatát a háromelemes lencsékkel, mint a legegyszerűbb fókuszáló feszültséggel rendelkező lencsékkel kezdtem, majd néhány lencseméret esetén megnéztem az ötelemes lencsék tulajdonságait. Ezekben a számításokban szerzett tapasztalatok felhasználásával megterveztük, és kiviteleztek a két fotoelektron-spektrométer (XPS, UPS) lencserendszerét. Az XPS berendezés lencserendezése fékező, az UPS-é gyorsító típusú.

## 2. A fotoelektron-spektroszkópia módszere és kísérleti eszközei

### 2.1. A fotoelektron-spektroszkópia alapelve és alkalmazási területe

Fotoelektron-spektroszkópiának általában a monoenergetikus fotonokkal gerjesztett fotoelektronok energiaeoszlási spektrumának mérésén alapuló vizsgálati eljárásokat nevezzük. Az alkalmazott gerjesztő sugárzás jellegétől függően beszélünk ultraibolya gerjesztéssel dolgozó UPS (Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy), illetve röntgensugárzás-gerjesztést használó XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy), más néven ESCA (Electron Spectroscopy for Chemical Analysis) módszerekről. Az XPS (ESCA) módszert Siegbahn ([SIE-67]), az UPS-t Turner ([TUR-70]) és Spicer ([SPI-71]) fejlesztette ki.

Amikor fotoelektronokat gerjesztünk, akkor a közvetlen fotoionizációs folyamatra a következő egyszerű energiaegyenlet érvényes:

$$h\nu = E_{kin} + E_k \quad (2.1.1.)$$

ahol  $h\nu$  a gerjesztő sugárzás kvantumának energiája,  $E_{kin}$  a fotoelektron kinetikus energiája és  $E_k$  a vizsgálandó héj kötési vagy ionizációs energiája, ez aszerint módosul, illetve foglal több tagot magába, hogy röntgen- vagy ultraibolya-gerjesztésről van-e szó és hogy a minta gáz, folyadék vagy szilárd halmazállapotú-e. A 2.1.1. egyenletben a visszalökődési energiát elhanyagoltuk, ami a becslések szerint még a legkisebb atomok esetében is jogos.

Az egyes elektronívók a 2.1.1. egyenlet szerint határozott csúcsokat adnak, a kötési energiáknak megfelelő sorrendben és távolságban. Mivel a törzselektronok kötési energiái jellemzők az egyes elemekre, a mért fotoelektron-spektrumokból felvilágosítást kaphatunk a vizsgált szilárd test elemi összetételére. A kvalitatív, illetve a kvantitatív analízis ([CAR-74], [EBE-76]) azonban a fotoelektron-spektroszkópiának csak az egyik alkalmazási területe.

Az atom különböző vegyértékállapotának, molekuláris kötésének és környezetének megfelelően megváltoznak a szóban forgó atom belső héjaira vonatkozólag az árnyékolási viszonyok, ami a kötési energia kisebb mértékű megváltozását jelenti. Ennek megfelelően a fotoelektron-vonalak eltolódnak az elektronspektrumban. A kötési energiában, a kötésállapot megváltozásából adódó változást

*kémiai eltolódás*nak nevezzük. Az eltolódás mértéke, amely  $\sim 0.1\text{eV} \div 10\text{eV}$  tartományban változhat, egyértelmű korrelációban van a vegyértékállapottal, ahol ez definiálható, vagy az elektronegativitással. A kémiai eltolódásból, például következtetni lehet a minta elemeinek oxidációs állapotára illetve ionosságára ([RAM-69], [BAH-70], [SCW-70], [MOS-71], [VAS-71], [BRI-74], [EBE-75]). A fotoelektron-spektroszkópia az atomi kötésiállapotok vizsgálatának alapvető módszere.

A fotoelektron-spektroszkópia másik kiemelkedően fontos alkalmazási területe a molekulapályák vizsgálata. A molekulapályák mind az úgynevezett XPS, mind az UPS módszerrel vizsgálhatók. Felvilágosítást kaphatunk a molekulapályák elhelyezkedéséről és természetéről (szigma-, vagy pi-pályáról van-e szó, a pálya úgynevezett nemkötő vagy gyengén kötő-e).

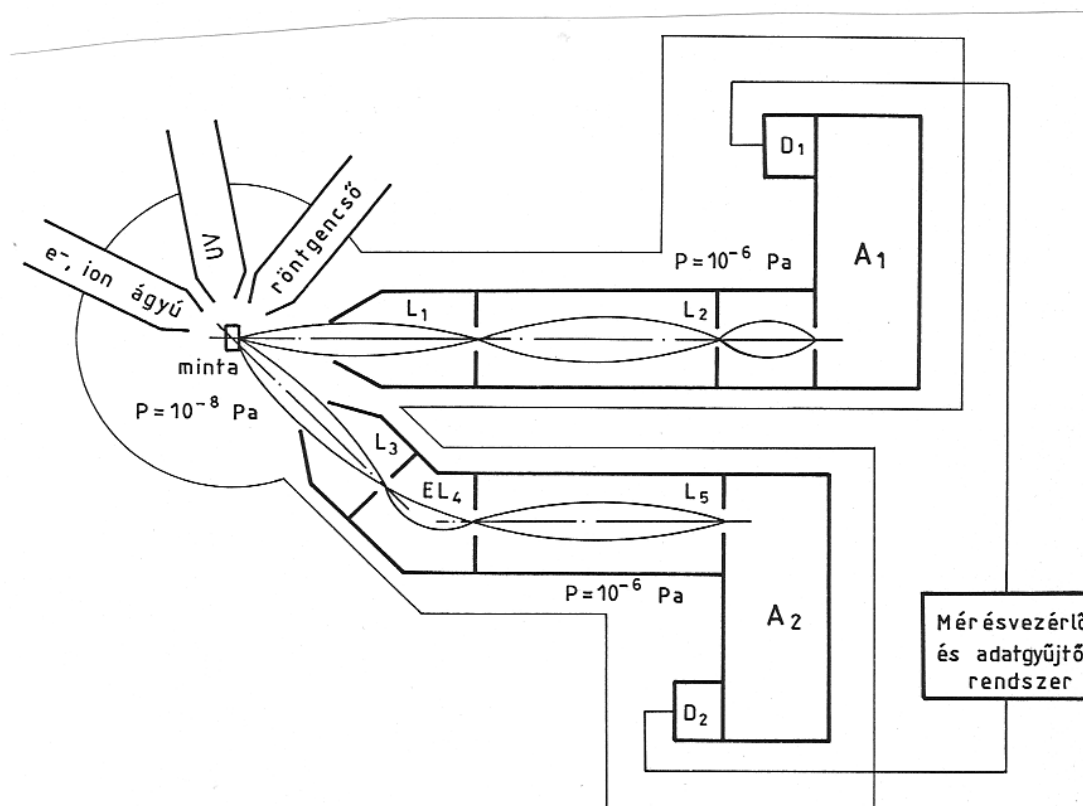
A röntgensugárzás behatolási mélysége  $\mu\text{m}$ , míg a fotoelektronok kilépési mélysége  $\text{nm}$  nagyságrendű (ez függ a kilépő elektronok energiájától), ezért a módszer a minta felületén lévő vékony réteg vizsgálatára alkalmas. A méréssel analizálható felületi rétegvastagság az elektron kilépési szögének változtatásával meghatározott határok között változtatható. Egy másik lehetőség a mélyebben elhelyezkedő rétegek analizisére az ionmarásos eljárás ([HOL-81]), amikor a minta felületét néhány keV energiájú és néhány  $\mu\text{A}$ -es áramú ionnyalábbal bombázzuk. Az ionmarásos eljárásban a felületre becsapódó ionnyaláb ionjai a szilárdtest felületén lévő atomokkal ütköznek, amelynek eredményeképpen a felületi ionok, atomok elhagyják a felületet. A folyamat impulzusátadás következtében megy végbe. Ez az eljárás használható a felületen megtapadt szennyező rétegek eltávolítására is. Az ionmarást általában Ar ionnyaláb segítségével végzik el. Az ionmarás mélysége függ az ionnyaláb energiájától, áramától és az ionmarás idejétől. Ha a mérést és az ionmarásos eljárást egymás után többször megismételjük, akkor a vizsgált minta egyes összetevőinek mélységi koncentráció eloszlását térképezhetjük fel (mélységi koncentráció analízis). E lehetőségek révén az alkalmazások kibővültek a katalízis ([BRI-74]), a diffúzió, a korrózió területére is.

A fotoelektron-spektroszkópia módszerével eredményesen vizsgálhatók a felületen elhelyezkedő atomoknak mind a törzs- ([FAD-74]), mind a vegyértékelektronjai ([BER-76]). Mivel az  $50\text{eV}$  körüli energiájú fotoelektronok szabad úthossza, és így kilépési mélységük minimális, a felületi vegyérték állapotok tanulmányozására az a UV-gerjesztés alkalmasabb, mint a röntgen-gerjesztés ([ABE-82]).

Végül megjegyzem, hogy a fotoelektron-spektroszkópia egyáltalán nem korlátozódik a szilárd minták vizsgálatára, bár kétségtelenül ez a legjellemzőbb. Léteznek gázokat és folyadékokat is vizsgáló fotoelektron-spektroszkópiai rendszerek is.

## 2.2. A fotoelektron-spektrométer

A fotoelektron-spektroszkópiában használt rendszerek általában bonyolult felépítésű, több mérési módszer megvalósítására alkalmas berendezések, egy készülék elvi vázlatát az 2.2.1. ábra szemlélteti.



**2.2.1.ábra** Fotoelektron-spektrométer elvi vázlata.  $A_1, A_2$ =analizátor,  $D_1, D_2$ =detektor,  $L_1, L_2, L_3, L_5$ =transzport elemek,  $EL_4$ =eltérítő elem.

A működési funkciók szerint egy fotoelektron-spektrométer főbb alkotó részei: a gerjesztő forrás, a minta, az elektronokat transzportáló elemek, az analizátor, a detektor, a vákuumrendszer, a mérést vezérlő és adatgyűjtő rendszer, a vezérelt tápegységek és egyéb kiszolgálók elemek.

Az 2.2.1. ábrán vázolt berendezés működését a következőkben foglalhatjuk össze: a vizsgálni kívánt mintából a gerjesztő forrás segítségével (UV, röntgencső)

elektronokat váltunk ki. Az emittált elektronok egy elektrontranszport rendszeren keresztül ( $L_1, L_2$  vagy  $L_3, EL_4, L_5$ ) eljutnak egy analizátorba ( $A_1, A_2 :=$  energiadiszperzív elemek), ahol kinetikus energiájuk szerint analizáljuk és elektrondektorról detektáljuk ( $D_1, D_2$ ) őket, majd a mért adatokat számítógép segítségével regisztráljuk.

Egy modern fotoelektron-spektrométerrel szemben két fő követelményt támasztunk: 1. nagy energiafelbontóképesség és 2. nagy érzékenység.

A továbbiakban tekintsük át az egyes főbb szerkezeti elemek funkcióját.

### 2.2.1. Gerjesztő forrás

A gerjesztő forrás energiájának megválasztását elsősorban a kutatás céljából kitűzött elektronok kötési energiája határozza meg. Míg például az ultraibolya (UV) sugárzással a vegyértékelektronok vizsgálhatók, a röntgengerjesztés lehetővé teszi az atom-, iontörzs- és vegyértékelektronok vizsgálatát is. A sugárforrás megválasztását másodsorban a kívánt energiafelbontás motiválja, ami függ a gerjesztő sugárzás természetes szélességétől. Az XPS esetében, kis félértékszélességük miatt sugárforrásként általában az  $AlK_\alpha(0.8\text{eV})$ , illetve a  $MgK_\alpha(0.7\text{eV})$  sugárzást alkalmazzák ([FEL-74]). A karakterisztikus  $K$ -sugárzás mellett ritkábban  $L$ - és  $M$ -sugárzást is használnak. Az  $AlK_\alpha$  és a  $MgK_\alpha$  vonalakat általában monokromátor nélkül alkalmazzák. Monokromátor alkalmazásával a vonalszélesség és a fékezési sugárzásos háttér csökkenthető, de a felbontóképességben nyert előnyök csak az érzékenység rovására érhetők el.

Az UV gerjesztő források ([POO-74], [SAM-67]) vonalszélessége több nagyságrenddel kisebb. A szokásos UV-lámpák esetében a vonalszélességek meV nagyságrendbe esnek. A legtöbbször használt  $HeI_\alpha$  sugárzást (a He  $1s \rightarrow 2p$  gerjesztést követő visszarendeződéskor keletkező foton) elsősorban gázkisülési csövekben állítják elő. A kisülési nyomás kb.  $10^2 \text{ Pa}$ . Mivel a mérőtérben, szilárd minták esetén ultranagy vákuumra (UHV,  $p \leq 10^{-8} \text{ Pa}$ ) van szükség, az UV gerjesztő források alkalmazása bonyolult differenciális szívást tételez fel.

Az UV- és röntgenforrások mellett szinkrotronsugárzást is alkalmaznak gerjesztő forrásként [GOD-69], aminek a segítségével 10 eV és 10 KeV között folytonosan hangolható fotonforrás áll a rendelkezésünkre. Hátránya, hogy intenzitása 5-10-szer kisebb, mint a röntgenforrásoké.

### 2.2.2. Minta

A fotoelektron-spektroszkópiai vizsgálatok céljára mintaként gáz, folyadék és szilárd mintát használhatunk.

A szilárd minták néhány milliméter kiterjedésűek, fontos követelmény a mintával szemben a felület tisztasága. A fémek, ötvözetek felületén az előállításakor a technológiai folyamatok során, vagy a tárolás közben a tömbanyag összetételétől lényegesen eltérő összetételű felületi fedőréteg alakulhat ki. Ez a fedőréteg a fotoelektron-spektroszkópiai vizsgálatokat nagymértékben zavarhatja. Emiatt a mérések előtt a minták felületét argon ionnyaláb segítségével ionmarásos eljárással meg szokták tisztítani, vagy a mintapreparálás teljes egészében nagyvákuumban történik.

Gáz (gőz) minták esetén vékony kapilláris csőből készült fúvókán keresztül jut a minta a gerjesztési térfogatba, vagy gázcellát helyeznek el a gerjesztő sugárzás útjába. Cellákat használnak a folyadék fázisú minták esetében is.

### 2.2.3. Az elektronokat transzportáló elemek

A transzportelemek feladata az, hogy a mintából kirepülő elektronokat energia-vesztés nélkül, vagy meghatározott energiára történő fékezéssel, gyorsítással az analizátor bemenő részére juttassák úgy, hogy a transzportálás során fellépő veszteség minimális legyen, és az analizátor által megkívánt feltételeknek eleget tegyen. A fentiekén kívül a transzportelemeknek komoly szerepük van a nyaláb-formálásban is.

A lehetséges elemek bő választékát megtalálhatjuk az irodalomban. Meg kell jegyeznünk azonban, hogy univerzális transzport elem nem ismeretes az irodalomban, minden berendezéshez külön-külön meg kell tervezni és le kell gyártani.

### 2.2.4. Analizátor

Az analizátorban történik meg az elektronok energia szerinti szétválasztása. A fotoelektron-spektroszkópiában felhasználható analizátoroknak számos típusát fejlesztették már ki. Nagy számuk miatt a diszperzív típusú analizátoroknak csak rövid áttekintését adom a 4.1.2. fejezetben.

### 2.2.5. Detektor

Az elektrondetektor az energiaanalizátor kimeneti részéhez (vagy kimenetére) csatlakozik. Elektrondetektorként leggyakrabban csatorna elektronsokszorozót használnak, ami nem más mint egy hajlított üvegcső, aminek a felülete jó szekunder emisszióképességű bevonattal van ellátva (erősítése  $\sim 10^6 - 10^8$ . Működésük leírását a ([SZM-78],[GEL-74]) találhatjuk.

Modernebb berendezésekben elterjedtek a helyzetérzékeny detektálási rendszerek, amelyekkel nem egy energiapontot, hanem egy energiasávot lehet detektálni. Ezeket a detektorokat olyan analizátor típusoknál tudjuk előnyösen használni, amelyek rendelkeznek fókuszsíkkal. A helyzetérzékeny detektálás lehetőségeinek részletes elemzését [GEL-74]-ben találhatjuk.

### 2.2.6. Vákuumrendszer

A fotoelektron-spektroszkópiai mérések vákuumigényét a felületi szennyező rétegek kialakulási sebessége szabja meg. A vákuumtechnika fejlődése jelentette a 70-es évek közepén a felületfizikai kutatásokban tapasztalható nagy ugrást, amikor  $p \leq 10^{-8} \text{ Pa}$  nyomást sikerült létrehozni. Ilyen vákuumszintnél a szennyező réteg kialakulásának sebessége kb. 1000 másodperc/monoréteg ([FUG-77],[GEL-74]).

Az UHV (ultra nagy vákuum) körülményeket gyakran csak a minta környezetében teremtik meg a kifűthető mintakamra és a spektrométer differenciális szívásával.

Ahhoz, hogy az elektronok a mintától a detektorig eljussanak, elegendő akkora vákuum, amelynél az elektronoknak a maradékgáz molekuláival, atomjaival történő ütközés átlagos szabad úthossza nagyobb, mint a spektrométer méretei. Ez kb.  $p=10^{-5} - 10^{-6} \text{ Pa}$  nyomásnak felel meg egy átlagos berendezés esetében.

### 2.2.7. Mérésvezérlő és adatgyűjtő rendszer

A 2.2.1-2.2.6 pontban vázolt fotoelektron-spektroszkópiai rendszer elemeinek működését hangolja össze a mérésvezérlő rendszer, mérés során vezérli az analizátor és a többi elektronoptikai elem tápegységeit, ügyel arra, hogy a bekapcsolt berendezések csak az üzemeltetésükhöz szükséges feltételek mellett dolgozzanak (biztonsági rendszer). Az adatgyűjtő rendszer feladata, hogy a detektorból, a különböző jelerősítőkön keresztül jövő jeleket fogadja és eltárolja. E komplex feladat ellátására napjainkban számítógépeket használnak.

### 3. A kísérleti berendezések elektronoptikai tervezése

Az elektronspektroszkópiában a különböző kísérletek gyakran nagyon eltérő igényeket támasztanak a berendezésekkel szemben. Univerzális, minden igényt optimálisan kielégítő berendezés nincs, minden eszköz valamilyen kompromisszumot képvisel a többé-kevésbé ellentmondó feladatok megoldásában.

Az elektronspektroszkópiai berendezések tervezésénél arra törekednek, hogy egy berendezésben minél többféle módszerrel lehessen megvizsgálni a mintát (sok besugárzó forrás [felületkutatás], többféle minta bemenet [gáz, gőz, folyadék, szilárd minták]). Mivel az egyes spektrométerelemek valós térbeli kiterjedéssel rendelkeznek, nagyon nehéz ezeket a minta közelében optimálisan elhelyezni. Már a 2.2.1. ábrán látható elrendezésnél sem sikerült a helyes ábrázolás, mivel az elektron és ionágyút már csak a minta mögé tudtuk elhelyezni. Ez a térbeli elhelyezésnél is hasonló gondokat jelent, mivel a minta köré úgy kell elhelyezni a besugárzó forrásokat, lencsét, egyszerű XPS berendezések esetén az ionmarásos eljáráshoz szükséges ionágyút, hogy egymást ne zavarják és mégis jó hozzáférést adjanak a mintához, ami ráadásul csak néhány milliméter átmérőjű. Ezért kézenfekvő megoldást a kúpos elemek használata jelent, valamint a relatíve nagy távolságba elhelyezett analizátor (pl. félgömb analizátor), vagy az analizátornak is kúpos kiképzésűnek kell lenni.

A mérőberendezéssel szemben támasztott egyéb követelmény lehet például a nagy intenzitás vagy a nagy energiafelbontás elérése. A nagy intenzitás elérése az elektronok nagy térszögből való gyűjtését jelenti, ami azt is jelenti, hogy nagy helyet foglalunk el a minta környezetében. Ez újból elhelyezési gondot okoz. A nagy energiafelbontás elérésében kulcsszerepe van az analizátornak. Vagy olyan analizátor típust választunk, amellyel a kívánt energiafelbontás elérhető, vagy az analizátor elé egy fékező lencsét teszünk és így az analizátor+fékező lencsével együtt érjük el a kívánt energiafelbontást.

Az energia-analizátorok esetében például egy-két besugárzó forrás típus használata esetén megfelelő megoldást nyújthat a torzított terű hengertükör ([VAR-78], [VAR-85]). Van azonban olyan kutatási terület - a felületfizika - ahol a sokféle módszer alkalmazása egy berendezésben még szabadabb hozzáférést igényel a mintához, mint ami a hengertükörrel elérhető. További követelmény az állandó vonalszélesség (az úgynevezett fix analizátorenergia üzemmód), ami változó fékezést

nyújtó lencserendszert igényel az analizátor előtt. Ennek megoldása hengertükrök esetén meglehetősen nehéz, eddig csak fékezőrácsos megoldások születtek. Ezért célszerűbb ilyen feladatra már más analizátort választani - például félgömböt - amely önmagában ugyan még rosszabb hozzáférést nyújtana a mintához, de sokkal könnyebb feladat a lencserendszert megtervezni hozzá, mint a hengertükrökhöz. Sokszor tehát az elektronoptikai lencsék, mint rugalmas közbenső elemek szerepelnek a spektrométerekben.

Az analizátor előtt elhelyezett lencséknek, lencserendszereknek tehát komplex feladatot kell megoldaniuk. Nem elég ezeknek egyszerűen transzportálni két pont között az elektronokat, hanem a spektrum felvétele közben folyamatosan változó bemenő elektronenergiát a kimeneten azonos energiára kell fékezni (vagy gyorsítani), megtartva a kép helyét, esetleg lineáris nagyítását is. Elképzelhető olyan eset is, hogy a spektrum felvétele közben minden elektronenergiát arányosan csökkenteni kell a fékező lencsének (fix fékezésű lencse). Ezzel javíthatjuk a berendezésünk abszolút feloldását, mivel az elektrosztatikus analizátoroknál a relatív feloldás, azaz  $\Delta E/E$ , széles energiatartományban konstans.  $E$ , (vagy  $E_p$ ) az analizátoron átmenő elektron energiája. Így egy adott felbontású analizátornál az eredeti (fékezés előtti) energiára vonatkoztatott relatív feloldás javítható. Léteznek olyan lencsék is, amelyek mind a két üzemmódban képesek dolgozni, azaz az arányos fékezési és a változó fékezési üzemmódban is. A 2.2.1. ábrán szerepel még egy speciális elem ( $EL_4$ ), amelyben a fókuszálás eltérítéssel is kombinálódik. Ilyen feladat gyakran felmerül, ha azonos mintáról két analizátorral szeretnénk gyűjteni egyidejűleg az információt (pl. koincidenca mérések, ld. 2.2.1. ábra).

A vázolt problémák alapján képet kaphatunk egy elektronoptikai rendszer tervezésekor felmerülő nehézségekről. Az elektrosztatikus rendszerek tulajdonságait meghatározhatjuk, ha ismerjük a rendszer potenciáeloszlását és az elektronok mozgását ebben a potenciáltérben.

A tervezésnél több módszer közül választhatunk. Legegyszerűbb, ha analitikusan megoldható potenciáltereket keresünk, azaz ha olyan elektróda rendszert választunk, amelynél analitikusan megoldható az elképzelt elektróda elrendezés potenciáeloszlása és így számolhatók ki a potenciáltérben mozgó elektronok pályái. Ez nemcsak kényelmi szempont, hanem a pályákat leíró függvények elemzésével, a matematikailag egyszerűen megfogalmazható feltételek (pl. az  $\alpha$  szög szerinti fókuszálás feltétele elsőrendben: az  $L$  repülési távolság deriváltja  $\alpha$

szerint,  $\partial L/\partial \alpha = 0$ ) alapján az elektronoptikai tulajdonságok (pl. várható felbontás, hasznos térszög) könnyen megismerhetők, az optimális paraméterek értékei könnyen megtalálhatók.

Könnyen kezelhető az olyan elektróda elrendezés is, amelynél a potenciáeloszlás analitikusan számolható és a pályaszámolás numerikus módszerrel megoldható. Erre az esetre példa a 4.3. fejezetben leírt analizátor típus.

A valóságban nagyon nehéz analitikusan leírható és adott feladat megoldására alkalmas elrendezést találni, ezért a potenciáeloszlást is általában numerikus módszerrel (3.1.1. fejezet) számolják ki (ezt a nagyobb teljesítményű számítógépek megjelenése is elősegítette), vagy kedvező elektróda elrendezés esetén sorfejtéssel (3.1.2. fejezet) közelítik a potenciáeloszlást. A potenciáeloszlás numerikus módszerrel történő meghatározása gyakorlatilag bármilyen elektróda elrendezés esetére lehetséges ([SHA-89]). Hátránya, hogy összetett rendszerekben, ahol több (5-10) elektróda van (pl. lencserendszer), egy-egy elektróda feszültség megváltoztatása új potenciáeloszlás és pályaszámolást igényel és csak a végeredmény ismeretében folytatható az optimális paraméterek keresése. Természetesen megadhatók a programokban optimalizálási feltételek (ha nem is mind egyszerre), mégis a gyakorlatban szükséges menetközben a gép-operátor kapcsolat. Ebből a szempontból jelentős fejlődést hoztak a személyi számítógépek (PC-k), amelyek már elegendő memóriával, gyorsasággal rendelkeznek és felhasználói kézben működnek. Munkám kezdetén jelentek meg az első PC-k az intézetünkben. Az elektrosztatikus rendszerekkel kapcsolatos elektronoptikai számításokban felhasználjuk azt, hogy az elektronok pályái azonosak, ha az energiájukkal arányos feszültségeket kapcsolunk az elektródákra.

### 3.1. Az elektrosztatikus terek potenciáeloszlásának számítása

Az elektrosztatikus terek potenciáeloszlását konzervatív erőterek, és tértöltésmentes esetben a Laplace egyenlet megoldása szolgáltatja ([KEL-65], [SIM-67]):

$$\Delta U(r) = 0 \quad (3.1.1)$$

ahol  $r=|\vec{r}|$  a helyvektor abszolút értéke. Ehhez járulnak még a megfelelő határfeltételek (az elektródák geometriája és potenciálja), melyek a potenciáeloszlást teljesen meghatározzák. Számításaim során a potenciáeloszlás meghatározására két

módszert választottam. Az analízátor potenciáeloszlását numerikus módszerrel, a véges differenciák szukcesszív overrelaxációs módszerével [KLE-71], a hengeres lencsékben a tér adott pontján a potenciálértékeket az axiális potenciáeloszlás ismeretében, sorfejtéssel határoztam meg [GEL-74].

### 3.1.1. Numerikus módszerrel, síkproblémára

A numerikus módszerek közül a véges differenciák szukcesszív overrelaxációs módszerét használtam fel. Ennek lényege, hogy a megoldandó (3.1.1) differenciálegyenletet megfelelő differenciaegyenlettel helyettesítjük, és azt oldjuk meg. Ezt az adott problémára hengerszimmetrikus rendszerben végeztem el, így hengerkoordinátarendszerben dolgozva a  $\theta$  koordináta nem játszott szerepet, a koordinátarendszer  $(r, z)$  síkjában dolgoztam. A 3.1.1 egyenletet a következő formába írhatjuk:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial^2 r} + \frac{\partial^2 U}{\partial^2 z} = -\frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} \quad (3.1.1.1)$$

A megoldás során a hengerszimmetrikus rendszernek a tengelyén átmenő, a tengelyt magába foglaló síkmetszetét négyzetrácseshálózattal fedtem le, a potenciálértékeket a négyzetrácseshálózat metszéspontjaiban határoztam meg iteratív úton, kiindulva a határmenti rácspontokban megadott potenciálértékekből.

Megoldásom során az ötpontos egyenletrendszert ([KOM-77],[RED-79],[ZOM-79], [VAJ-86]) használtam, azaz a rácshálózat bármely  $P_0(r_0, z_0)$  pontja  $V_0$  potenciáljának kiszámításához a négy szomszédos  $P_1, P_2, P_3, P_4$  pontbeli potenciálértékeket használtam fel (3.1.1.1 ábra).

A  $P_1, P_2, P_3, P_4$  pontbeli  $V_1, V_2, V_3, V_4$  potenciálokat a  $P_0$  körüli Taylor sorfejtésből kapjuk.

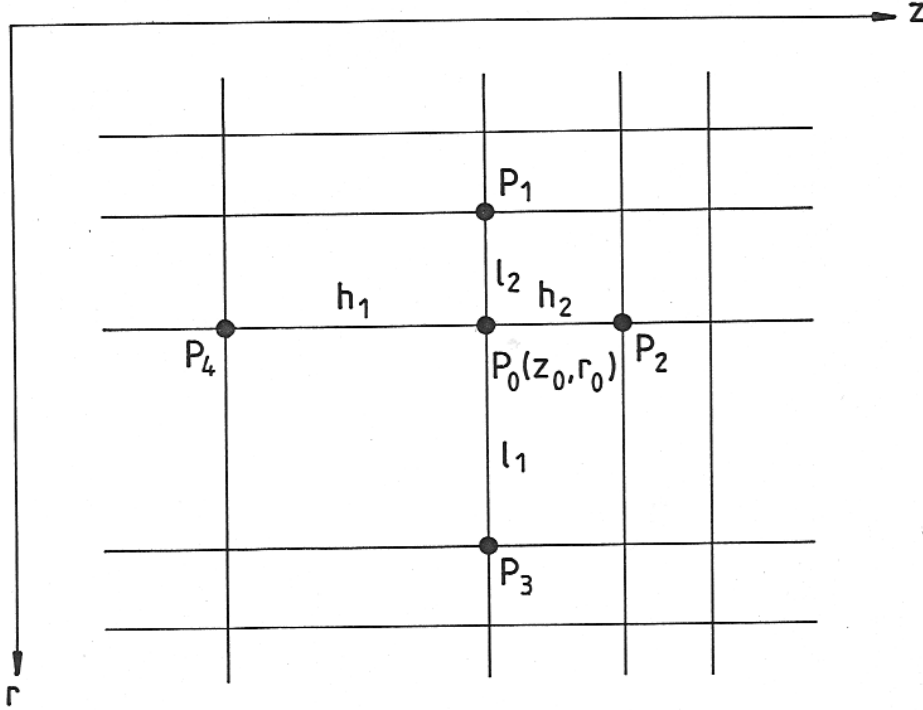
$$V_1 = V_0 + \frac{\partial V}{\partial r} l_2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial^2 r} l_2^2 + \dots \quad (3.1.1.2)$$

$$V_2 = V_0 + \frac{\partial V}{\partial z} h_2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial^2 z} h_2^2 + \dots \quad (3.1.1.3)$$

$$V_3 = V_0 - \frac{\partial V}{\partial r} l_1 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial^2 r} l_1^2 - \dots \quad (3.1.1.4)$$

$$V_4 = V_0 - \frac{\partial V}{\partial z} h_1 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial^2 z} h_1^2 - \dots \quad (3.1.1.5)$$

A sorfejtésben a másodrendűnél magasabb hatványú tagokat elhanyagoljuk. Szorozzuk meg a 3.1.1.2 egyenletet  $l_1$ -gyel, a 3.1.1.4 egyenletet  $l_2$ -vel és adjuk össze



**3.1.1.1.ábra** Rácspontok elhelyezkedése ötpontos egyenletrendszer használatakor

a két egyenletet (3.1.1.6). Szorozzuk meg a 3.1.1.3 egyenletet  $h_1$ -gyel, a 3.1.1.5 egyenletet  $h_2$ -vel és adjuk össze a két egyenletet (3.1.1.7).

$$V_1 l_1 + V_3 l_2 = V_0(l_1 + l_2) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial^2 r} l_1 l_2 (l_1 + l_2) \quad (3.1.1.6)$$

$$V_2 h_1 + V_4 h_2 = V_0(h_1 + h_2) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial^2 z} h_1 h_2 (h_1 + h_2) \quad (3.1.1.7)$$

Szorozzuk meg a 3.1.1.2 egyenletet  $l_1^2$ -tel és a 3.1.1.4 egyenletet  $l_2^2$ -tel, majd vonjuk ki egymásból a két egyenletet. Átrendezés után a 3.1.1.8 egyenletet kapjuk.

$$\frac{\partial V}{\partial r} = \frac{V_1 l_1^2 - V_3 l_2^2 - V_0(l_1^2 - l_2^2)}{l_1 l_2 (l_1 + l_2)} \quad (3.1.1.8)$$

Szorozzuk meg a 3.1.1.6 egyenletet  $h_1 h_2 (h_1 + h_2)$ -vel, a 3.1.1.7 egyenletet  $l_1 l_2 (l_1 + l_2)$ -vel és adjuk össze a két egyenletet. A 3.1.1.1, 3.1.1.8 egyenletek felhasználásával, átrendezés után a  $V_0$ -ra a következő kifejezést kapjuk.

$$V_0 = Q_1 [Q_3 V_1 l_1 + Q_4 V_3 l_2 + Q_2 (h_1 V_2 + h_2 V_4)] \quad (3.1.1.9)$$

$$Q_1 = \left[ h_1 h_2 + l_1 l_2 + \frac{h_1 h_2 (l_1^2 - l_2^2)}{2r_0 (l_1 + l_2)} \right]^{-1} \quad (3.1.1.10)$$

$$Q_2 = \frac{l_1 l_2}{h_1 + h_2} \quad (3.1.1.11)$$

$$Q_3 = \frac{h_1 h_2}{l_1 + l_2} \left( 1 + \frac{l_1}{2r_0} \right) \quad (3.1.1.12)$$

$$Q_4 = \frac{h_1 h_2}{l_1 + l_2} \left( 1 - \frac{l_2}{2r_0} \right) \quad (3.1.1.13)$$

A 3.1.1.9-nél egyszerűbb formulákat kapunk, ha egy vagy több rácsbeosztás megegyezik. Az így előállítható formulákat a 8.1 függelékben találhatjuk meg. Egyenközü rácsbeosztás esetén  $h = h_1 = h_2 = l_1 = l_2$ . Az iterációs eljárást meggyorsíthatja az overrelaxációs módszer ([SEP-67], [COL-74],[GER-79]), amelyben az előző iterációhoz viszonyított javítást minden pontban egy  $\omega$  számmal ( $1 < \omega < 2$ ) megszorozzuk és ezt adjuk az előző iterációbeli értékhez, ekkor az  $m$ -edik iteráció után a  $P_0$  pont potenciálja:

$$V_0^m = V_0^{m-1} + \omega \Delta V_0^{m-1} \quad (3.1.1.14)$$

Iteratív módon ezt az eljárást addig folytatom, míg valamely iteráció során a megfelelő potenciálértékek eltérése az előző iterációval kapott potenciálértékektől egy előre megadott kis konstans értéknél kisebb nem lesz.

### 3.1.2. Sorfejtéssel

Az általunk használt lencsék jórészt azonos átmérőjű, különböző hosszúságú hengerekből állnak, az elektródák elrendezése hengerszimmetrikus, célszerű a hengerkoordináták bevezetése, mivel feltehető, hogy a tér is hengerszimmetrikus lesz. A Laplace-egyenlet hengerkoordinátákban felírt, hengerszimmetrikus esetre vonatkozó 3.1.1.1. formuláját írjuk fel a következő képpen:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (3.1.2.1.)$$

A szimmetriatengely a  $z$  tengely, a  $\varphi$  potenciál csak az  $r$ -nek és a  $z$ -nek a függvénye, vagyis:

$$\varphi = \varphi(r, z) \quad (3.1.2.2.)$$

Keressük a 3.1.2.1. egyenlet megoldását a következő alakban:

$$\varphi(r, z) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n(z) r^{2n} \quad (3.1.2.3.)$$

Figyelembe véve, hogy  $r$ -nél, és  $-r$ -nél a potenciálértékek megegyeznek, a  $\varphi(r, z)$

3.1.2.3. hatványsorában  $r$ -nek csak páros számú hatványai szerepelnek.

A 3.1.2.3. alakú hatványsort helyettesítsük vissza a 3.1.2.1. egyenletbe. Elemi számítások után, az  $r$  változó hatványaihoz tartozó együtthatók értékéből, az  $A_n$  együtthatókra a következő egyenletet kapjuk:

$$\frac{\partial}{\partial z^2} A_{n-1}(z) + (2n)^2 A_n(z) = 0 \quad (3.1.2.4.)$$

A 3.1.2.3. egyenletből tudjuk, hogy az  $r$ -nak a nulladik hatványához tartozó együttható értéke a szimmetriatengelyen adja meg a potenciáleloszlását, vagyis

$$\varphi(0, z) = A_0(z) = \Phi(z) \quad (3.1.2.5.)$$

A 3.1.2.4. és a 3.1.2.5. egyenleteket felhasználva az  $A_n$  együtthatókra a következő képletet kapjuk:

$$A_n(z) = \frac{1}{2^{2n}} \frac{(-1)^n}{(n!)^2} \Phi^{(2n)}(z) \quad (3.1.2.6.)$$

A  $\varphi(r, z)$ -re tehát, a tengelymenti potenciáleloszlás ismeretében, a hengerszimmetrikus tér bármely  $(r, z)$  pontjában a következő sorfejtéses megoldást kapjuk:

$$\varphi(r, z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(n!)^2} \Phi^{(2n)}(z) \left(\frac{r}{2}\right)^{2n} \quad (3.1.2.7.)$$

A hengeres lencsék által létrehozott térbeli potenciáleloszlás kiszámítására a 3.1.2.7. formulát szeretnénk felhasználni. Ezért vizsgáljuk meg két a sugarú félvégtelen henger potenciálterét, a hengerek tengelyében, amikor az egyik félvégtelen henger potenciálja  $V_1$ , a másiké  $V_2$  és a rés a  $z = 0$  pontban van (a résszélesség infinitezimálisan kicsi). Ekkor [GEL-74] és [Wan-77] szerint a potenciáleloszlást a következő formula írja le:

$$\Phi(z) = \frac{(V_1 + V_2)}{2} + \frac{(V_1 - V_2)}{2} \tanh\left(\frac{\omega z}{a}\right) \quad (3.1.2.8)$$

ahol

$$\omega \approx 1.318355 \quad (3.1.2.9)$$

A terek szuperpozíciós elmélete szerint tehát egy  $m$  elemű elektrosztatikus lencse axiális terét jó közelítéssel leírja a következő formula.

$$\Phi(z) = \frac{V_0 + V_{m+1}}{2} + \sum_{i=1}^{m+1} \frac{V_i + V_{i-1}}{2} \tanh\left(\frac{\omega(z - z_i)}{a_i}\right) \quad (3.1.2.10)$$

A 3.1.2.7. formulában szereplő sorfejtésben, egyre magasabb rendű tagokat figyelembe véve egyre pontosabban kapjuk meg a potenciáeloszlást. A hengeres lencsék potenciáeloszlás számításaiból kiderült, hogy elegendő a tizedrendű tagokig számolni. Így a potenciáeloszlás már 0.1% -os pontossággig megközelíthető [BEV-69] a lencse geometriai tengelyének közelében, ez a pontosság megfelelt a további számítások elvégzésére, a végső geometriai adatok megadására, mivel a gyártás során ez volt a megkívánt pontosság.

Számításoknál a lencse sugarát ( $R$ ) egységnyiinek választottam [GEL-74]. A rések helyei:  $z_1 < z_2 < \dots < z_m < z_{m+1}$ .

A potenciálértékek meghatározására a következő normálást használtam fel:

$$\Phi(z_1) = 1 \quad (3.1.2.11)$$

$$\Phi(z_{m+1}) = V \quad (3.1.2.12)$$

A potenciál zérus helyét ott választottuk, ahol a részecske kinetikus energiája nullával egyenlő. Az elektródák potenciálértékéből a megfelelő feszültségértékeket a következő képlet segítségével számolhatjuk ki:

$$U_i = (V_i - 1)E_0 \quad (3.1.2.13)$$

ahol  $U_i$ , az  $i$ -edik elektróda feszültsége,  $V_i$ , az  $i$ -edik elektróda potenciálértéke és  $E_0$ , a részecske kezdeti kinetikus energiája.

### 3.2. Az elektrosztatikus térben mozgó elektronok mozgásegyenlete

Az energiaanalizátor és lencserendszerek tulajdonságainak számítására felhasználható módszerek közül az elektron mozgásegyenlete numerikus integrálásának a módszerét alkalmaztam [Stu-55].

Számításaimat Descartes- és hengerkoordináta-rendszerben végeztem, így a mozgásegyenleteket e két koordináta-rendszerben határoztam meg. A pályae egyenleteket a probléma Euler-Lagrange egyenleteiből határoztam meg (3.2.1), független koordinátának a  $z$  ( $z$  a rendszer szimmetria tengelye) koordinátát választva.

$$\frac{d}{dz} \frac{\partial m}{\partial q'_i} = \frac{\partial m}{\partial q_i} \quad i = 1, 2 \quad (3.2.1)$$

ahol  $m$ , az elektrosztatikus tér Lagrange függvénye,  $q_i$ , általános koordináták,  $q'_i$ , általános sebességek.

Descartes-koordináta rendszerben:

$$q_i := x, y \quad i=1, 2$$

$$q'_i := \frac{dx}{dz}, \frac{dy}{dz} \quad i=1, 2$$

hengerkoordináta rendszerben:

$$q_i := r, \theta \quad i=1, 2$$

$$q'_i := \frac{dr}{dz}, \frac{d\theta}{dz} \quad i=1, 2$$

továbbá:  $m = \sqrt{\varphi[q_1(z), q_2(z), z]} \frac{ds}{dz}$ , ahol  $\frac{ds}{dz}$  az ívelem kifejezése a megfelelő koordináta rendszerben.

A mozgásegyenletek Descartes-koordináta rendszerben :

$$\frac{d^2 x}{dz^2} = \frac{1 + \left(\frac{dx}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dz}\right)^2}{2\varphi} \left[ \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \frac{dx}{dz} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right] \quad (3.2.2)$$

$$\frac{d^2 y}{dz^2} = \frac{1 + \left(\frac{dx}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dz}\right)^2}{2\varphi} \left[ \frac{\partial \varphi}{\partial y} - \frac{dy}{dz} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right] \quad (3.2.3)$$

A mozgásegyenletek hengerkoordináta rendszerben :

$$\frac{d^2 r}{dz^2} = r \left( \frac{d\theta}{dz} \right)^2 + \frac{1 + \left(\frac{dr}{dz}\right)^2 + \left(\frac{d\theta}{dz}\right)^2}{2\varphi} \left[ \frac{\partial \varphi}{\partial r} - \frac{dr}{dz} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right] \quad (3.2.4)$$

$$\frac{d^2 \theta}{dz^2} = -\frac{2 \frac{dr}{dz} \frac{d\theta}{dz}}{r} + \frac{1 + \left(\frac{dr}{dz}\right)^2 + \left(\frac{d\theta}{dz}\right)^2}{2\varphi} \left[ \frac{1}{r^2} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} - \frac{d\theta}{dz} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right] \quad (3.2.5)$$

A mozgásegyenletek integrálására a másodrendű RUNGE-KUTTA ([BEV-69], [KEL-65], [RAL-69]) módszerét használtam.

Bár elektronoptikai számítások elvégzésére több programcsomag létezik, ezek közül egy sem állt rendelkezésemre a munkám kezdetén, ezenkívül a konkrét számítások egy részét ezek segítségével sem tudtam volna elvégezni. Ezeknek a programoknak a segítségével kiszámolható a potenciáeloszlás, valamint az elektronok (ionok) pályamenetei ebben a potenciáltérben. Hátrányuk, hogy gyors és nagy memóriájú számítógépeket igényelnek a számítások elvégzésére, valamint a kezdeti feltételek és az elektródák geometriai adatai bonyolult módon adhatók meg.

Első feladatomban tehát a programok kifejlesztése volt. A programokat FORTRAN programozási nyelven írtam meg és ezek IBM PC,XT,AT számítógépeken futnak.

Komplex programcsomag megírására nem vállalkozhattam, mivel az első számítógép, amivel elektronoptikai számításokat kellett végezni, egy IBM kompatibilis XT volt, ami nem elég gyors és a memóriakapacitása is kicsi. A programcsomagom ezért önálló programok összessége, amelyek között vannak olyanok például, amivel adott geometriájú elektronoptikai rendszerek potenciáeloszlását határozhatjuk meg. Az azonos csoportba tartozó programok általában nem sokban térnek el egymástól. Ezért ha valamilyen adott felépítésű elektrosztatikus rendszer tulajdonságait akarjuk kiszámolni, ami a korábbi számításoktól eltér, akkor ez könnyen megtehető, ha a meglévő programokon kis módosításokat hajtunk végre. Ezek alapján a programcsomag képes bármilyen elektróda elrendezés tulajdonságainak a meghatározására, korlátot a számítógép sebessége és memóriakapacitása jelent.

## 4. Analizátorok

### 4.1. Az elektrosztatikus analizátorok

A kisenergiájú elektronspektroszkópia alapvető berendezése az energia analizátor. Az elektrosztatikus analizátoroknak két csoportját különböztetjük meg. Az egyik csoportja diszperzív, azaz adott energiájú elektronokat fókuszál, a másik csoport fékezőteres és az adott energiánál nagyobb energiájú elektronokat regisztrálja [TAY-69]. A továbbiakban csak a diszperzív analizátorokkal foglalkozom.

Az első diszperzív analizátorok (hengerkondenzátor [HUG-29], sík-tükör [HAR-55]) megjelenése óta a kutatások igényei jelentősen megnövekedtek az analizátorokkal szemben támasztott követelményeket: így például az XPS ([WAN-77], [GEL-84], [LEC-87], [CHO-87], [WIN-88], [LEC-90]) vizsgálatokhoz  $\sim 10^{-3}$ -es felbontás szükséges (ha nem használunk előtte fékező teret), az UPS ([ABE-82]) követelménye pedig a néhány  $eV$ -es energiájú elektronokra  $\sim 0.01eV$ -es félértékszélesség, a radioaktív izotópok vizsgálata pedig nagy fényerőt és kiterjedt forrás alkalmazhatóságát kívánja meg.

#### 4.1.1. Általános fogalmak

Az analizátorok elektródái időben állandó elektrosztatikus tereeloszlást alakítanak ki. A tér különböző tulajdonságainak megfelelően különféle fókuszálás alakulhat ki. Ha a kilépési pontra helyezünk két egymásra merőleges síkot, akkor a részecskék pályája az alábbi fókuszálási tulajdonságokkal jellemezhető.

a. Ha ezek a pályák az egyik síkban metszik egymást, a másikban nem, akkor ez a nyaláb "vonalas" leképezését - vagy másképp: *egyirányú fókuszálását* jelenti.

b. Ha a pályák mindkét síkban metszik egymást, de különböző pontokban - akkor *kétirányú asztigmatikus fókuszálásról* beszélünk.

c. Ha a két síkban a metszéspontok egybeesnek, ezt nevezik kétirányú szigmatikus - vagy röviden *kettős fókuszálásnak*. Mindkét síkra nézve teljesül a *Helmholtz-Lagrange törvény* ([KEL-65], [SEP-67]),

$$M\Gamma = \sqrt{\frac{\Phi_0}{\Phi_i}} \quad (4.1.1.1.)$$

ahol  $M$  a lineáris (ld. 5.1.1.a. pont),  $\Gamma$  szög szerinti nagyítás (ld. 5.1.1.b. pont),  $\Phi_0$  és  $\Phi_i$  a potenciál értéke a tárgy és a kép helyén ( $\Phi = 0$  azon a helyen, ahol a részecskék sebessége is nulla).

Pontosabb közelítésben számolva kiderül, hogy az egy pontból induló elektronpályák metszéspontja tulajdonképpen egy "elkent" szélű folt. Például egy négyzet oldalai a leképezés után különbözőek lesznek, sőt alakja is torzul. Ezeket *aberrációs hibáknak* szokás nevezni.

Szeretném megjegyezni, hogy az energia-analizátorokban nem a pontos leképezés, hanem a nyaláb maximális összegyűjtése a fontos - a nyaláb minimális keresztmetszetének helye pedig gyakran nem esik egybe a kép helyzetével - de annak közelében van.

Jellemző tulajdonsága az elektrosztatikus analizátornak, hogy a részecskéket energiájuk szerint különbözteti meg (nem pedig sebességük szerint). Így egyaránt használhatók elektronok és ionok vizsgálatára.

A diszperzív analizátorok sajátsága, hogy ha az elektródákon megváltoztatjuk az adott monoenergetikus ( $E$ ) nyaláb fókuszálásához szükséges potenciált, akkor a nyaláb nem szóródik szét, csak a kép helyzete ( $x$ ) tolódik el. Az eltolódás mértékét, ami fontos jellemzője az analizátornak, *diszperzió*nak ( $D$ ) nevezzük.

$$D = E \frac{dx}{dw} \quad (4.1.1.2.)$$

ahol  $x$  iránya megegyezik az elmozdulás irányával,  $x = 0$  a kép alaphelyzetével esik egybe,  $w$  a potenciál és a spektrométerkonstans szorzata. Ha a fókusz síkban rögzítjük a kimenő rés helyzetét és változtatjuk az elektródák potenciálját, változik a résen áthaladó elektronok száma  $-I(w)$ . Ez a függvény jellemző az adott analizátorra - izotróp sugárzó forrás esetében csak egy konstans szorzóban tér el az ugynevezett *spektrométer függvény*től ( $A(w)$ ).

Az *analizátor felbontását*,  $R = \Delta E/E$ , az  $A(w)$  függvény maximumának felénél levő pontok távolságából kellene meghatároznunk, azonban ennek számítása igen nehéz, helyette inkább a vonal talpszélességére vonatkozó felbontást,  $R_t$  szokás megadni, amely

$$R_t = \frac{Ms_1 + s_2 + \Sigma}{D} \quad (4.1.1.3.)$$

ahol  $s_1$  a bemenő,  $s_2$  a detektor előtti rés szélessége,  $\Sigma$  a leképezési hibák összege.  $R$  értéke általában közel egyenlő  $R_t/2$ -vel. A felbontó képesség  $1/R$ -el azonos.

Az analizátorok egyik jellemző paramétere a bemeneti *térszög* ( $4\pi$  százalékában kifejezve), amely általában nem állandó értékű a forrás felületének minden pontjára nézve. A középponthoz tartozó térszöget szokás *fényerő*nek nevezni. Még fontosabb

paraméternek tekinthető a *luminozítás*, amely egyenlő a forrás területének és a fényerőnek szorzatával - ha az utóbbi a forrás minden pontjában azonos.

Ismeretes, hogy a feloldás javítása és a luminozítás növelése egymásnak ellentmondó követelmények. Az analizátorok paramétereinek optimalizálásával mégis elérhető, hogy például adott felbontás esetén a luminozítás maximális legyen. Ehhez azonban szükség van a leképezési tulajdonságok részletes ismeretére - kiszámítására vagy kísérleti meghatározására.

A ma használatos analizátorok többségében egy fékező lencsét alkalmaznak a forrás és az analizátor bemenete között. Ilyenkor több üzemmód lehetséges. Ha a lencsére adott feszültség konstans, az analizátor a szokásos módon működik, csak kisebb energiatartományban. Ha az analizátor feszültsége állandó, akkor a fékezés változtatásával méri a spektrumot és a spektrométer függvény szélessége minden csúcra nézve azonos. Előfordul a kettő kombinációja, az arányos fékezés is.

A fékezés felhasználható vagy a felbontás további javítására (mivel  $\Delta E/E$  konstans és kisebb energiánál kisebb a csúcs szélessége), vagy hasonló résszélesség és adott felbontásnál a luminozítás növelésére. Ahhoz azonban, hogy a fékezéssel a felbontás és a luminozítás lényegesen jobb kompromisszumát érhesük el a fékező lencse és az analizátor gondos elektronoptikai "illesztésére" van szükség - ugyanis a fékezés szög szerinti vagy lineáris nagyítással jár (lásd a 4.1.1.1 egyenlet) és a kettő közül csak az növelhető, amelyiket az analizátor méretei, résrendszere nem korlátoz.

#### 4.1.2. A diszperzív analizátorok leggyakoribb típusai

a. *Sík-tükör* (4.1.2.1.a. ábra): ([YAR-49], [HAR-55], [GRE-70], [PRO-70], [SCH-72], [BIT-72], [AKS-73]) egyszerű konstrukciójú analizátor, egyirányú fókuszálással. Diszperziója elég nagy a jó felbontás eléréséhez. Elsősorban tengelyirányban hosszú források esetén célszerű alkalmazni, pontszerű forrásokra nézve kicsi a luminozítása. Széleffektusok (a téreloszlás torzulása az elektródák szélénél) nem nagyok, viszonylag könnyen csökkenthetők, a forrás és a detektor elhelyezése kedvező.

b. *Henger-kondenzátor* (4.1.2.1.b. ábra): ([MAT-61], [WOL-65a], [WOL-65b], [THE-68], [ROY-71a], [ROY-71b], [ARN-72], [PRA-75], [ARN-76]) viszonylag egyszerű konstrukciójú analizátor, kedvező forrás - detektor elhelyezéssel. Egyirányú fókuszálással rendelkezik, de luminozítása hosszú forrásoknál is elmarad a sík-tüköré mögött. A szélhatások is jóval erősebbek.

c. *Hengertükör* (4.1.2.1.c. ábra): ([HAF-68], [AKS-70], [RIS-71], [RIS-72], [AKS-72], [ARN-72], [VAM-73], [REN-75], [DRA-77], [HOO-80b], [KNA-82]) elektródáinak alakja viszonylag egyszerű, a szélhatás könnyen kiküszöbölhető. Egyirányban fókuszál, de a hengerszimmetria kihasználásával ez a kettős fókuszáláshoz hasonló. Lehetőség van másodrendű fókuszálásra is. Fényereje igen nagy, különösen alkalmas kisebb forrásméreteket esetén, de paraméterei kiterjedt forrásokra nézve is jók. A forrás körüli teret korlátozza a belső henger mérete.

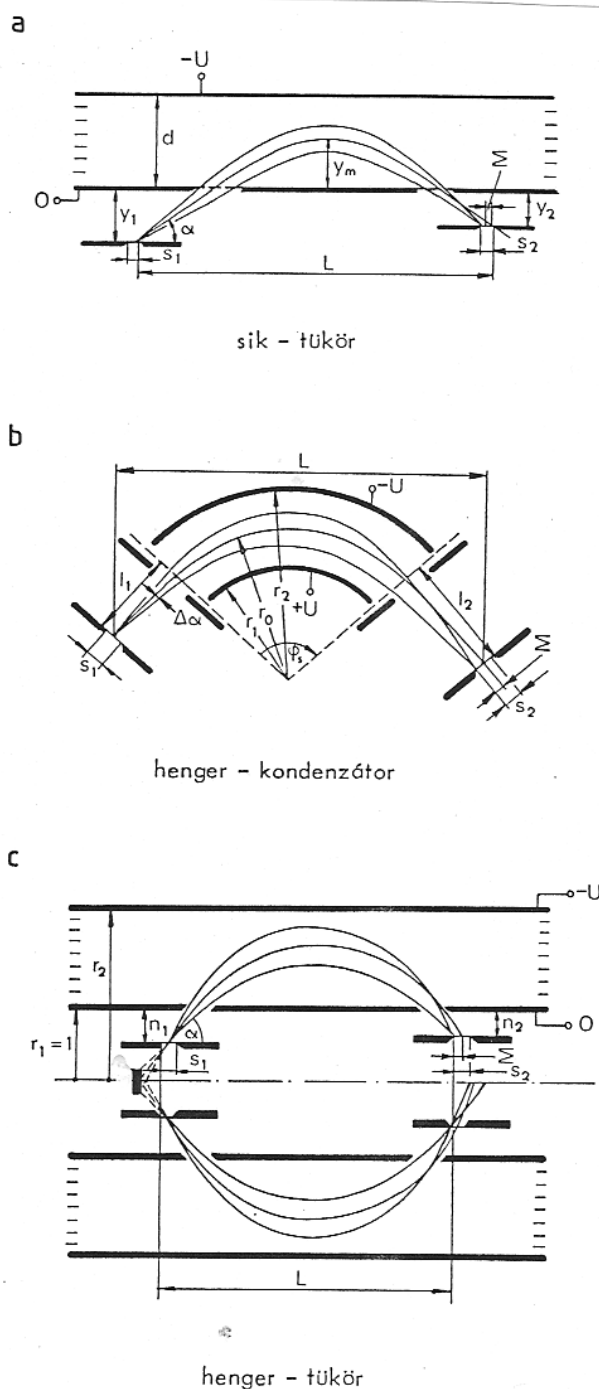
d. *Gömb-kondenzátor* (4.1.2.2.a. ábra): ([PUR-38], [KUY-67], [ROY-70], [BAS-72], [GIB-75]) az elektródák elkészítése bonyolult, a forrás és detektor elhelyezése kedvező. Kettős fókuszálású, fényereje kisebb, mint a hengertüköré, de luminozitása nagy. A szélhatás erősebb, mint a henger-kondenzátornál. A félgömb típusú analizátor ezen analizátor típus speciális esete, amikor a  $\varphi_s$ , a gömbszektor szöge 180 fokkal egyenlő.

e. *Prízma típusú analizátorok* (4.1.2.2.b. ábra): ([SHP-68], [PET-72]) egyszerű elektródák, kényelmes forrás-detektor elhelyezés jellemzi, mégis a kollimátor és fókuszáló lencsékkel együtt bonyolult konstrukció. Fényereje kicsi, de a felbontás javulásával kevésbé csökken, mint a többi típusnál.

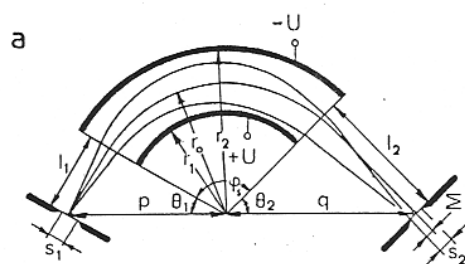
f. *Gömb-tükör* (4.1.2.2.c. ábra): ([PAO-67], [THE-69], [CHA-73], [KEM-73], [POO-73]) bonyolult elektróda és nagyon kényelmetlen forrás-detektor elhelyezés jellemzi, így igen jó paraméterei ellenére alig nyert felhasználást.

A felsoroltakon kívül, még további típusok is léteznek, de vagy csak egy-két példányban léteznek, vagy az elektronoptikai számításokat még nem követte kivitelezés. Valójában a hengertükör, a gömb-kondenzátor és a sík-tükör a legelterjedtebb, de az elektronoptikai lehetőségek még korántsem merültek ki. További fejlesztést igényel még az analizátorok és a fékező illetve transzport lencsék pontosabb elektronoptikai illesztése, paramétereik optimalizálása.

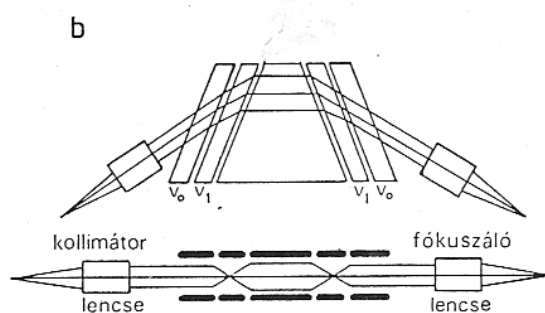
Az elektrosztatikus analizátoroknak csak rövid, kvalitatív áttekintését kíséreltem meg. Az igen gazdag irodalomból kiemelkedik Afanaszjev és Jávor könyve [AFA-69], amelyben a szerzők ismertetik a fókuszálás, diszperzió és aberrációk elméleti alapjait. Jól kidolgozott kritériumok alapján összehasonlítják a különböző típusok tulajdonságait, a további tájékozódást pedig körülbelül háromszáz irodalmi hivatkozással könnyítik meg.



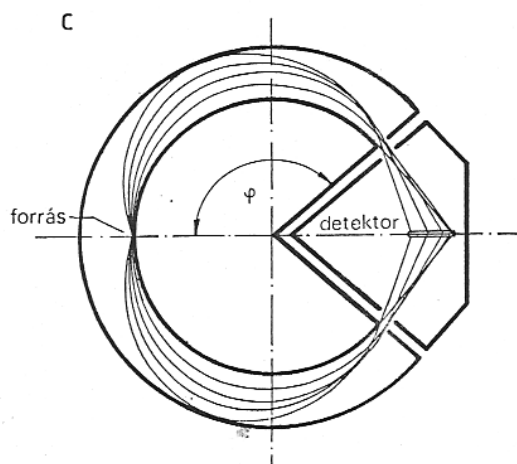
4.1.2.1. **ábra** Elektrosztatikus analizátorok I. (I.a.: sík-tükör, I.b.: henger-kondenzátor, I.c.: hengertükör. Jelölések:  $d$  - az elektródák távolsága,  $L$  - fókusztávolság,  $y_m$  - maximális pályamagasság,  $s_1$  - a bemenő rés mérete,  $s_2$  - a detektor előtti rés mérete,  $\alpha$  - az analizátorba belépő elektronnyaláb szöge az analizátor tengelyéhez képest,  $\Delta\alpha$  - az  $\alpha$  szög körüli azon szögtartomány, amely mellett a leképezési hiba 1% relatív energia változásnak felel meg,  $\Sigma$  - a leképezési hibák összege,  $y_1, y_2, l_1, l_2, n_1, n_2$  - az elektronpálya térmentes szakaszának megfelelő vetülete,  $r_1$  - a belső elektróda sugara,  $r_2$  - a külső elektróda sugara,  $r_0$  - közép sugár,  $\varphi_s$  - a hengerszektor szöge,  $U$  - elektróda potenciál



gömb - kondenzátor



prizma



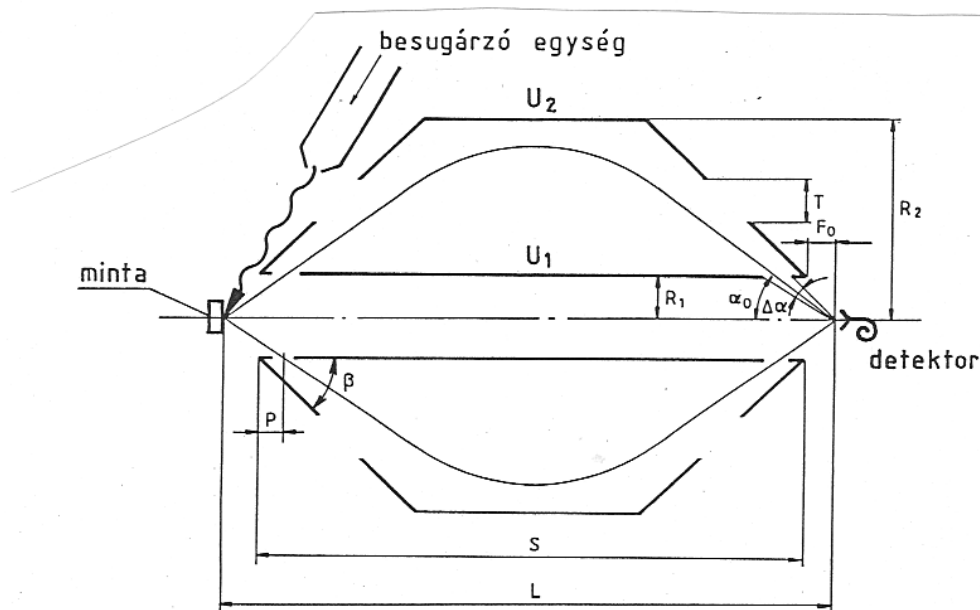
gömb - tükör

4.1.2.2. **ábra** Elektrosztatikus analizátorok II. (II.a.: gömb-kondenzátor, II.b.: prizma, II.c.: gömb-tükör. Jelölések:  $s_1$  - a bemenő rés mérete,  $s_2$  - a detektor előtti rés mérete,  $\Sigma$  - a leképezési hibák összege,  $l_1, l_2$  - az elektronpálya térmentes szakaszának megfelelő vetülete,  $r_1$  - a belső elektróda sugara,  $r_2$  - a külső elektróda sugara,  $r_0$  - közép sugár,  $\varphi_s$  - a gömbszektor szöge,  $U$  - elektróda potenciál,  $\theta_1, \theta_2$  - a minta és a detektor oldali kiegészítő szögek,  $p, q$  - a minta és a detektor távolsága a gömb középpontjától,  $\varphi$  - az elfordulás szöge

## 4.2. Kúpos lezárású, torzított terű hengertükrös analizátor

A Magyar Tudományos Akadémia Atommag Kutató Intézete Elektronspektroszkópia és Alkalmazása Önálló Csoportjában nagy hagyományai vannak a spektrométer fejlesztéseknek. Több egyedi, a világon egyedülálló spektrométer került megtervezésre és kivitelezésre az elmúlt években, köztük hagyományos hengertükrös, amely a végtelen hosszú koaxiális hengerek által létrehozott egyszerűen leírható ( $\sim \ln(r)$ , ld. 4.3. fejezet) potenciáeloszlást használja fókuszálásra. Természetesen a működő analizátorokban véges hengerek vannak, azonban ezek hossza olyan, hogy az elektronpálya mentén már gyakorlatilag torzítatlan  $\sim \ln(r)$  potenciál van. Az így adódó hengerhosszúság okozza a típus hátrányát, a minta és a detektor a belső hengeren belül, nehezen hozzáférhető helyen van. Ezen javított a korábban kifejlesztett *ESA-13* ([VAR-85], [HER-85], [KÖV-88c]) amelynek hengereit sík tárcsák zárják le és így potenciáeloszlása az  $\ln(r)$ -hez képest természetesen torzított és csak numerikusan számolható. Az analizátor 1980-ban szabadalmaztatva volt ([SZA-1]).

Ez a spektrométer elektron-atom, ion-atom ütközésekből származó elektronok vizsgálatára szolgál. Diplomamunkámat ([TÖK-86]) és első méréseimet ([KÖV-87a], [KÖV-87b], [KÖV-87c], [KÖV-87d], [SAR-87a], [SAR-87b], [PÁL-87], [KÖV-88a], [KÖV-88b]) ezzel a spektrométerrel végeztem. Az itt szerzett tapasztalatok azt mutatták, hogy a síktárcsás lezárás javít a minta besugárzási geometriáján, de kiterjedt gerjesztő forrás használatakor már ez sem segít. A minta besugárzás lehetőségeit tovább javítja a 4.2.1. ábra szerint a hengereket kúpokkal lezáró változat, amely szintén szabadalmaztatásra került ([SZA-2], [TÖK-88b]). Változtatva a lezáró kúpok szögét, különböző konstrukciós szempontoknak megfelelő megoldás állítható elő, köztük a korábbi síktárcsás lezárású *ESA-13* is,  $\beta = 90^\circ$  megadásával.

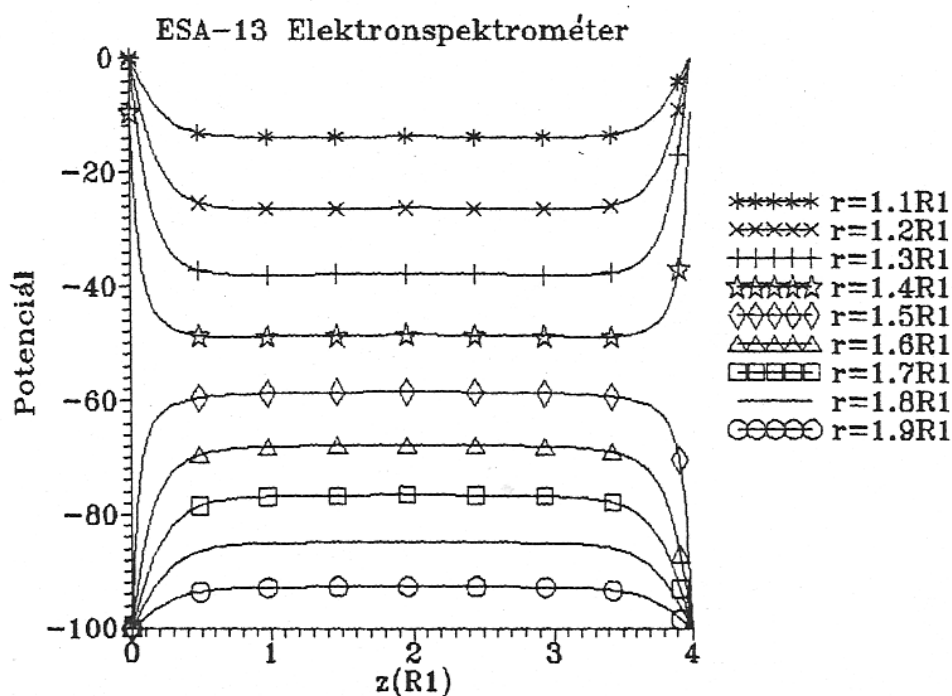


**4.2.1.ábra** A kúpos lezárású, torzított terű hengertükrő típusú analizátor vázlata, ahol  $F_0$  - az elektronforrás ill. a detektor távolsága a hengertükrőtől,  $\alpha_0$  - a hengertükrőbe belépő elektronnyaláb szöge a hengertükrő tengelyéhez képest,  $\beta$  - az analizátor kúpos elemének kúpszöge,  $\Delta\alpha$  - az  $\alpha_0$  szög körüli azon szögtartomány, amely mellett a leképezési hiba 1% relatív energia változásnak felel meg,  $P$  - az elektronnyaláb belépési helyének távolsága a belső henger peremétől,  $L$  - az elektronpálya tengelyvetülete,  $S$  - a hengertükrő hossza,  $R_1$  - a hengertükrő belső hengerének sugara,  $R_2$  - a hengertükrő külső hengerének sugara,  $T$  - a hengertükrő belső és külső peremes hengerei közötti körgyűrű alakú rés szélessége,  $U_1$  - a belső henger feszültsége,  $U_2$  - a külső henger feszültsége

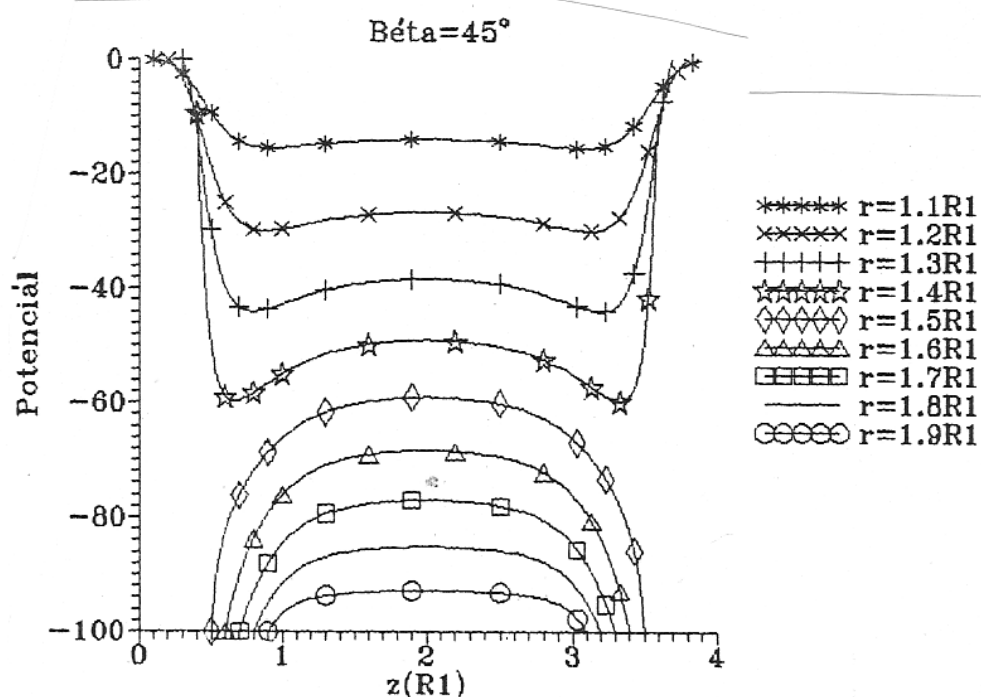
A 4.2.2. ábrán látható görbék az ESA-13 elektronspektrométer potenciáeloszlását mutatják, a 4.2.3. ábrán látható görbék a kúpos lezárású, torzított terű analizátor potenciáeloszlását mutatják, amikor  $r = \text{állandó}$  ( $r$  a relatív sugár).

A számításokat  $30^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ -ban kúposan lezárt torzított terű analizátorokra, az ESA-13 elektronspektrométer főbb geometriai adatait ( $R_2/R_1 = 2$  valamint kezdetben  $S/R_1 = 4$ ) megtartva végeztem el.

A számításoknál feltételül szabtuk meg a másodrendű fókuszálás teljesítését egy, az analizátor elem tengelyén elhelyezett pontforrásból az ugyancsak a tengelyen lévő pontba való fókuszálás esetén. A pontból-pontba való fókuszálás a modul középsíkjára nézve szimmetrikus pályák esetén lehetővé teszi bármilyen  $n$  számú analizátor elem egytengelyű sorbakapcsolását, ami az analizátor diszperziójának  $n$ -szeres növelését eredményezi. A kúpos modulok használata arra is lehetőséget ad,



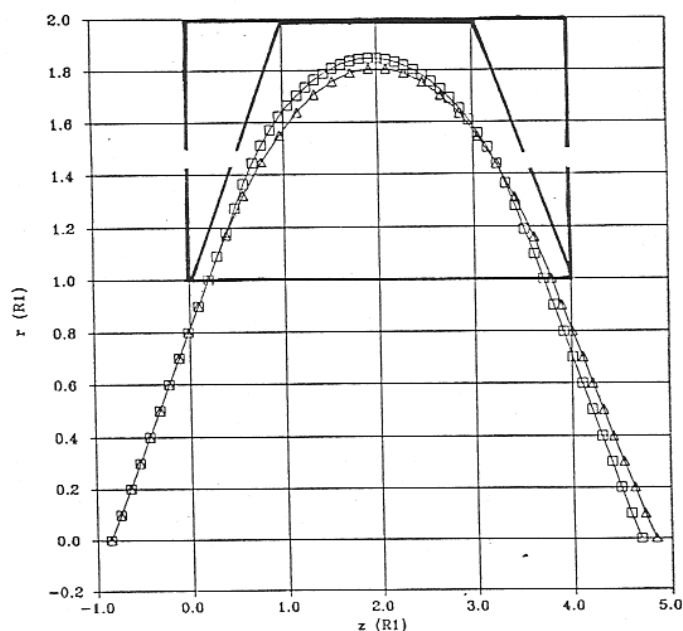
**4.2.2.ábra** Az ESA-13 elektron spektrométer  $z$  tengely menti potenciáeloszlása az  $r$  paraméter függvényében ( $U_1 = 0V, U_2 = -100V$ ,  $r$  - a tengelytől mért távolság)  $R_1$  - a hengertükrő belső hengerének sugara,



**4.2.3.ábra** A kúpos lezárású, torzított terű analízátor  $z$  tengely menti potenciáeloszlása az  $r$  paraméter függvényében ( $U_1 = 0V, U_2 = -100V$ ,  $r$  - a tengelytől mért távolság)  $R_1$  - a hengertükrő belső hengerének sugara,

hogy két modul közé helyezett minta esetén a két modul között is jó besugárzási geometria alakuljon ki (pl. koincidencia méréseknél).

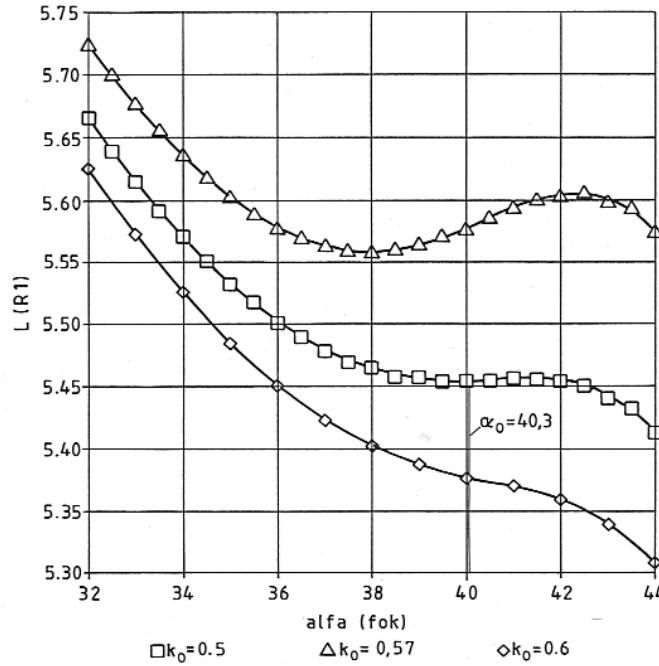
A 4.2.4. ábrán az  $\alpha = 43^\circ$ -os szög alatt az analizátorokba belépő elektronok pályáit láthatjuk. A 4.2.5 ábrán a kúpos lezárású, torzított terű analizátor esetén a belépési szög és a fókusz távolság összefüggését ábrázoltam, amely igazolja, hogy az analizátor rendelkezik másodrendű fókusszal (a másodrendű fókusz létezésének feltétele:  $\frac{\partial L}{\partial \alpha} = 0$ , és  $\frac{\partial L^2}{\partial \alpha^2} = 0$ , ahol  $L$  - az elektronpálya tengelyvetülete,  $\alpha$  - az analizátorba belépő elektronnyaláb szöge a hengertükör tengelyéhez képest)  $\sim 40^\circ$  belépési szögnél, pontból-pontba fókuszálás esetén.



**4.2.4.ábra** Az elektronspektrométerekbe  $43^\circ$ -os szög alatt belépő elektronok pályái:  
 $\Delta$  ESA-13 spektrométer,  $\square$  kúpos lezárású hengertükör típusú analizátor

A számítások alapján példaként megadjuk két kúposan lezárt torzított terű hengertükör spektrométer elem méreteit és fókuszálási paramétereit, valamint a határesetként kezelhető síktárcsás lezárásra ( $\beta = 90^\circ$ ) vonatkozó adatokat (4.2.1. táblázat).

A 4.2.1. táblázat adataiból megállapítható, hogy a kúpos lezárású torzított elektrosztatikus tér (ld. [SZA-2] szabadalmi leírásban) közel azonos minta-hengertükör



**4.2.5.ábra** A kúpos lezárású, torzított terű analizátor fókusz távolsága a belépésszög függvényében, különböző spektrométer konstansok ( $k_0$ ) esetén

távolság esetén hasonló fókuszálási tulajdonságokkal bír, mint a ([VAR-75],[VAR-85],[KÖV-88c])-ben leírt síktárcsás lezárású megoldás.

**4.2.1.Táblázat** Két kúposan lezárt, torzított terű hengertükrös spektrométer elem fókuszálási paraméterei, valamint a síktárcsás lezárásra ( $\beta = 90^\circ$ ) vonatkozó adatok az  $R_2/R_1 = 2$ ,  $T/R_1 = 0.11$  esetén, ahol  $F_0$  - az elektronforrás ill. a detektor távolsága a hengertükrőtől,  $\alpha_0$  - a hengertükrőbe belépő elektronnyaláb szöge a hengertükrő tengelyéhez képest,  $\beta$  - az analizátor kúpos elemének kúpszöge,  $\Delta\alpha$  - az  $\alpha_0$  szög körüli azon szögtartomány, amely mellett a leképezési hiba 1% relatív energia változásnak felel meg,  $P$  - az elektronnyaláb belépési helyének távolsága a belső henger peremétől,  $L$  - az elektronpálya tengelyvetülete,  $S$  - a hengertükrő hossza,  $R_1$  - a hengertükrő belső hengerének sugara,  $R_2$  - a hengertükrő külső hengerének sugara,  $T$  - a hengertükrő belső és külső peremes hengerei közötti körgyűrű alakú rés szélessége,  $\Omega$  - a  $4\pi$ -re vonatkoztatott bemeneti térszög:  $\sin(\alpha_0)\sin(\frac{\Delta\alpha}{2})$  -  $D_r$  - relatív diszperzió ( $\frac{E\Delta L}{\Delta E L}$ ),  $k_0$  - spektrométerkonstans [ $k_0 = \frac{U_0 q}{E}$  ahol  $E$  a fókuszálandó részecske kinetikus energiája (nem relativisztikus esetben),  $U_0$  - az analizátor hengerei közötti potenciálkülönbség,  $q$  a részecske töltése]

| $\beta$ | $S/R_1$ | $F_0/R_1$ | $P/R_1$ | $\alpha_0$ | $L/R_1$ | $k_0$  | $D_r$ | $\Delta\alpha$ | $\Omega(\%)$ |
|---------|---------|-----------|---------|------------|---------|--------|-------|----------------|--------------|
| 35      | 3.8     | 0.800     | 0.527   | 37         | 5.400   | 0.5922 | 1.130 | 7.13           | 3.742        |
| 45      | 3.9     | 0.820     | 0.372   | 40         | 5.540   | 0.5825 | 1.155 | 8.39           | 4.702        |
| 90      | 4.0     | 0.853     | 0.201   | 43.5       | 5.707   | 0.5810 | 1.202 | 9.65           | 5.790        |

Látható azonban, hogy míg  $\beta = 45^\circ \div 90^\circ$  tartományban a spektrométer elem hasznos térszöge  $\beta$  csökkenésével lassan csökken,  $\beta < 45^\circ$  esetén a csökkenés erősebbé válik. A találmány szerinti elrendezéssel lehetőség nyílik az elektrosztatikus elektronspektrométerek fő szerkezeti elemeinek - forrás, hengertükör, detektor - kedvező és variálható elhelyezésére. Például a minta-forrás elhelyezésére kedvezőbb feltételeket biztosít, hasonló fókuszálási tulajdonságok megtartása mellett (pl. másodrendű fókuszálás), mint a fent említett ESA-13 típusú elektronspektrométer. Előállításuk egyszerű és olcsó, ami nagy előnyt jelent a gömbtükör analízátorhoz képest.

#### 4.3. Nem koaxiális hengertükör típusú elektrosztatikus analízátor

Az előző fejezetben leírt analízátor a doboz típusú analízátorok egy általánosítása volt. Ebben a fejezetben az irodalomból jól ismert analízátor típus, a "végtelen", koaxiális hengerekből álló hengertükör típusú analízátor ([AFA-78], [DAH-73], [VAR-78], [VAR-79], [VAR-85]) általánosításával foglalkozom.

A "végtelen", koaxiális hengertükör típusú analízátor esetében az ekvipotenciális felületek koaxiális hengerek, és a potenciáeloszlást az

$$U = A \ln(r) + B \quad (4.3.1.)$$

írja le. A, B integrációs konstansok. Ha a potenciál értéke az  $r = r_a$  sugarú hengeren  $U_a$  és az  $r = r_b$  sugarú hengeren  $U_b$ , akkor

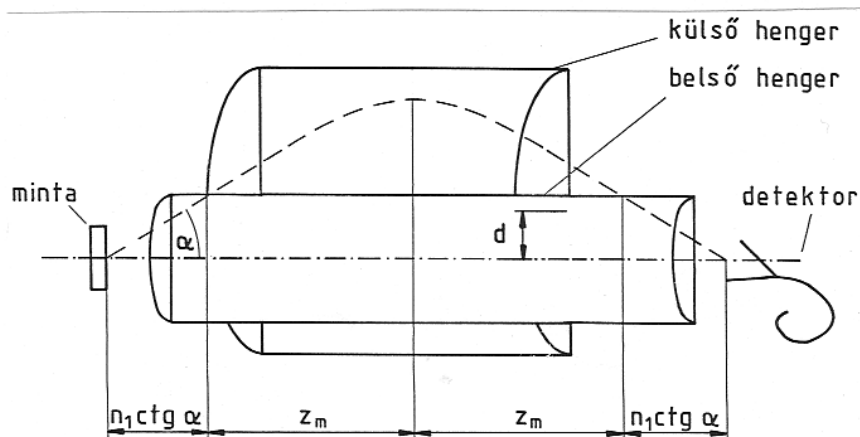
$$A = \frac{U_a - U_b}{\ln\left(\frac{r_a}{r_b}\right)} \quad (4.3.2.)$$

$$B = \frac{U_b \ln(r_a) - U_a \ln(r_b)}{\ln\left(\frac{r_a}{r_b}\right)} \quad (4.3.3.)$$

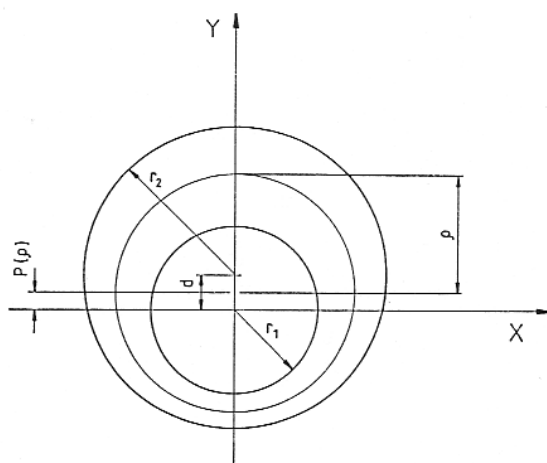
Vizsgáljuk meg a téreloszlást abban az esetben, amikor a két henger nem koaxiálisan helyezkedik el, hanem egy  $d$  excentricitással.  $d$  a belső és a külső henger szimmetria tengelye közötti távolság (4.3.1. ábra). A  $d$  excentricitás bevezetésével elveszítjük a hengerszimmetriát.

Feltételezzük, hogy az ekvipotenciális felületek szintén hengerek lesznek folyamatosan változó átmérővel és excentricitással. (4.3.2. ábra)

Az  $U$  potenciál kielégíti a Laplace-egyenletet.



**4.3.1.ábra** A nem koaxiális hengertűkőr típusú analizátor vázlatos ábrája, ahol  $d$  - a külső és a belső hengerek szimmetria tengelyének távolsága,  $n_1 \cot \alpha$  - az elektronpálya térmentes szakaszának az analizátor tengelyére eső vetülete,  $z_m$  - a maximális pályamagassághoz tartozó tengelyvetület



**4.3.2.ábra** Ekvipotenciális görbék elhelyezkedése a nem koaxiális hengertűkőr típusú analizátorban.  $r_1$  - a külső henger sugara,  $r_2$  - a belső henger sugara,  $d$  - a külső és a belső hengerek szimmetria tengelyének távolsága,  $\rho$  - a kiválasztott ekvipotenciális henger sugara,  $P(\rho)$  - az aktuális excentricitás, a belső henger szimmetria tengelye és a  $\rho$  sugaru henger szimmetria tengelye közötti távolság

$$\Delta U = \frac{\partial^2 U}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 U}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 U}{\partial^2 z} = 0 \quad (4.3.4.)$$

ahol feltevésünk szerint  $U = U(\rho(x, y, z))$  és

$$x^2 + (y - P(\rho))^2 = \rho^2 \quad (4.3.5.)$$

$\rho$  a kiválasztott ekvipotenciális henger sugara,  $P(\rho)$  az aktuális excentricitás, a belső henger szimmetria tengelye és a  $\rho$  sugaru henger szimmetria tengelye közötti távolság

A kezdeti feltételeket válasszuk meg úgy, hogy  $\rho = r_1 (= 1)$ , ekkor  $U_1 = 0$ ,  $\rho = r_2$ ,  $U = -U_0$ , és  $P(\rho = 1) = d$ . Ekkor a 4.3.4. és 4.3.5. egyenletek integrálása és a kezdeti feltételek figyelembe vétele után a potenciáeloszlást a következő kifejezés adja:

$$U = -\frac{U_0}{\ln\left(\frac{1+\sqrt{c_1^2 r_2^2+1}}{(1+\sqrt{c_1^2+1})r_2}\right)} \ln\left(\frac{\sqrt{1+c_1^2 \rho^2+1}}{(\sqrt{c_1^2+1}+1)\rho}\right) \quad (4.3.6.)$$

ahol

$$c_1^2 = \frac{4d^2}{(r^2 - 1 - d^2)^2 - 4d^2} \quad (4.3.7.)$$

A kiszámolt potenciáeloszlás helyességéről könnyen meggyőződhetünk. A  $d = 0$  helyettesítésre ( $c_1^2 = 0$ ), a klasszikus hengertükrő típusú analizátor potenciáeloszlását (4.3.1. egyenlet) adja vissza a 4.3.6. egyenlet.

A továbbiakban az úgynevezett extrém esettel foglalkozom, azaz azzal az esettel, amikor a külső és a belső hengernek van egy közös alkotója ( $d_{max} = r_2 - 1$ ). A potenciáeloszlást hengerkoordináta rendszerben az

$$U = -\frac{U_0 r_2}{r_2 - 1} \frac{r^2 - 1}{r^2 + 2r \cos(\theta) + 1}, \quad (4.3.8.)$$

Descartes-koordináta rendszerben az

$$U = -\frac{U_0 r_2}{r_2 - 1} \frac{x^2 + y^2 - 1}{(x+1)^2 + y^2} \quad (4.3.9.)$$

összefüggés írja le.

A mozgásegyenleteket a Lagrange egyenletekből kapjuk. Axiális, a tengelyen átmenő szimmetria síkban történő mozgás esetén a kezdőfeltételeket definiáljuk a következőképpen:

$$\begin{aligned} t = 0 &\Rightarrow x = 0; v_x = 0 \\ y &= 1; v_y = v_0 \sin(\alpha) \\ z &= 0; v_z = v_0 \cos(\alpha) \end{aligned}$$

A maximális pályamagasságot az

$$y_m = \frac{k + \sin^2(\alpha)}{k - \sin^2(\alpha)} \quad (4.3.10.)$$

adja, ahol  $k=1/K$

$$K = \frac{E_0}{eU_0} \frac{r_2 - 1}{r_2} \quad (4.3.11.)$$

$K$  a spektrométer konstans,  $E_0$  az analizátorba beropülő elektron kinetikus energiája,  $\alpha$  az elektron belépési szöge az analizátorba a belső henger tengelyéhez képest. A maximális pályamagassághoz tartozó  $z_m$  koordinátát a következő kifejezés adja.

$$z_m = \frac{\sin(2\alpha)}{a} + \frac{k}{a} \arctan\left(\frac{\sin(\alpha)}{\sqrt{a}}\right) \quad (4.3.12.)$$

ahol

$$a = k - \sin^2(\alpha) \quad (4.3.13.)$$

Az analizátor fókusztávolságát az  $L = 2z_m + n \cot(\alpha)$  összefüggés adja, ahol  $n \cot(\alpha)$  az elektronpályák térmentes szakaszának az analizátor tengelyére eső vetülete. Szokásos jelölés :

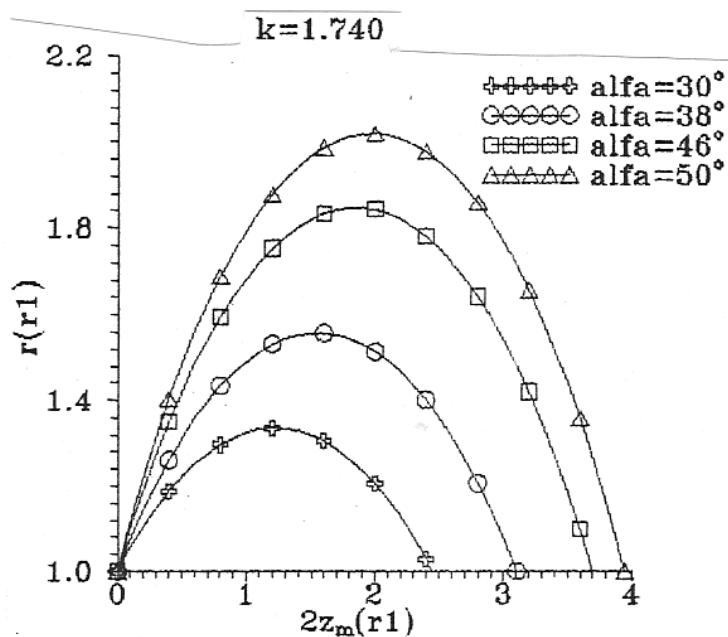
$$n = n_1 + n_2 \quad (4.3.14.)$$

ahol  $n_1$  a mintától az analizátor bemenetéig,  $n_2$  a analizátor kimenetétől a detektorig terjedő szakasza az  $n$ -nek (ld. 4.3.1. ábrát).

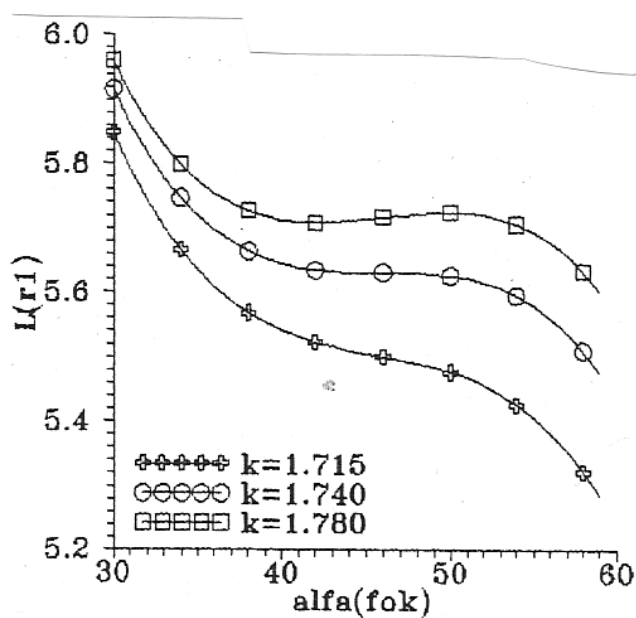
A 4.3.3.-4.3.4. ábrán látható görbék ábrázolják a nem koaxiális henger típusú analizátorba különböző szög alatt belépő, azonos energiájú elektronok pályáit (4.3.3. ábra), valamint a belépési szög és a fókusztávolság összefüggését (4.3.4. ábra), amely igazolja, hogy az analizátor rendelkezik másodrendű fókusszal.

Az 4.3.1. táblázat néhány belépési szögnél megadja a  $k$ ,  $2z_m$ , fókusztávolságot ( $L$ ) és a diszperzió ( $D$ ) értékeket.

A 4.3.4. ábrát valamint a 4.2.1. táblázat adatait figyelembe véve megállapíthatjuk, hogy a nem koaxiális hengertükör típusú analizátornak  $\alpha_0 = 46$  foknál (az  $\alpha_0$  pont olyan inflexiós pont, ahol  $\frac{\partial L}{\partial \alpha}_{\alpha=\alpha_0} = 0$ , és  $\frac{\partial L^2}{\partial \alpha^2}_{\alpha=\alpha_0} = 0$ , ahol  $L$  - az elektronpálya tengelyvetülete,  $\alpha$  - az analiztorba belépő elektronnyaláb szöge a hengertükör tengelyéhez képest), míg a klasszikus hengertükör típusú analizátornak  $\alpha_0 = 42.3$  foknál ([RIS-72]) van másodrendű fókusza, pontból-pontba fókuszálás esetén. A relatív diszperzió értékek 13.4%-kal nagyobbak a nem



**4.3.3.ábra** A nem koaxiális hengertükör analizátorba különböző szögek alatt belépő elektronok pályái,  $z_m$  - a maximális pályamagassághoz tartozó tengelyvetület,  $k$  - a spektrométer konstans reciproka



**4.3.4.ábra** A nem koaxiális hengertükör analizátor fókusz távolsága a belépési szög függvényében.  $k$  - a spektrométer konstans reciproka

koaxiális hengertükör típusú analizátor esetében és így ezen analizátor feloldása, hasonló részméreték mellett jobb, mint a koaxiális hengertükör típusú analizátoré. Előállítás olcsó, mivel egyszerűen megvalósítható. Két különböző átmérőjű hengert kell megmunkálni úgy, hogy a hengerek tengelyeinek a távolsága adott  $d$  érték legyen.

A nem koaxiális hengertükör képes  $2 \times (30^\circ \div 60^\circ)$  eltéríteni és fókuszálni a berepülő elektronnyalábot. A fentebb említett előnyös tulajdonságait kihasználva a nem koaxiális hengertükör a 2.2.1. ábrán látható elvi berendezésben analizátor-ként ( $A_2$ ), vagy eltérítő transzport elemként használható fel ( $EL_4$ ). Gyakorlati kivitelezése tervezés alatt van, a későbbiekben nyalábeltérítőként ( $EL_4$ ) kerül felhasználásra a felületvizsgálati *XPS* berendezésben (*ESA-31*).

**4.3.1. Táblázat** A nem koaxiális hengertükör típusú analizátor néhány jellemző paramétere a belépési szög függvényében. ( $r_2/r_1 = 2$ ,  $n_1=1.0$ ,  $n_2=1.0$ )  $\alpha$  - a hengertükörbe belépő elektronnyaláb szöge a hengertükör tengelyéhez képest,  $k$  - a spektrométer konstans reciproka,  $2z_m$  - a két henger között haladó elektronpálya tengelyvetülete,  $L$  - fókusz távolság,  $D$  - diszperzió értéke

| $\alpha$ | $k$   | $2z_m$ | $L$   | $D$    |
|----------|-------|--------|-------|--------|
| 34       | 1.491 | 3.414  | 6.379 | 4.641  |
| 35       | 1.530 | 3.401  | 6.257 | 4.663  |
| 36       | 1.566 | 3.395  | 6.148 | 4.696  |
| 37       | 1.599 | 3.395  | 6.049 | 4.742  |
| 38       | 1.629 | 3.401  | 5.961 | 4.800  |
| 39       | 1.655 | 3.414  | 5.884 | 4.871  |
| 40       | 1.678 | 3.434  | 5.817 | 4.957  |
| 41       | 1.697 | 3.460  | 5.761 | 5.057  |
| 42       | 1.713 | 3.493  | 5.714 | 5.173  |
| 43       | 1.725 | 3.533  | 5.678 | 5.307  |
| 44       | 1.733 | 3.580  | 5.651 | 5.461  |
| 45       | 1.738 | 3.636  | 5.636 | 5.636  |
| 46       | 1.740 | 3.699  | 5.630 | 5.834  |
| 47       | 1.738 | 3.771  | 5.636 | 6.059  |
| 48       | 1.733 | 3.853  | 5.653 | 6.313  |
| 49       | 1.725 | 3.944  | 5.683 | 6.601  |
| 50       | 1.715 | 4.046  | 5.725 | 6.928  |
| 51       | 1.701 | 4.160  | 5.780 | 7.297  |
| 52       | 1.686 | 4.287  | 5.849 | 7.716  |
| 53       | 1.668 | 4.427  | 5.934 | 8.193  |
| 54       | 1.648 | 4.583  | 6.036 | 8.735  |
| 55       | 1.626 | 4.755  | 6.155 | 9.355  |
| 56       | 1.603 | 4.946  | 6.295 | 10.065 |
| 57       | 1.579 | 5.157  | 6.455 | 10.881 |
| 58       | 1.553 | 5.390  | 6.640 | 11.823 |
| 59       | 1.527 | 5.649  | 6.851 | 12.914 |

## 5. Lencserendszerek

A gyakorlatban nagyon sok helyen használnak elektronoptikai lencsét (mikroszkóp, TV képcső stb.), itt csak az elektronspektrométerek körében használatos lencsék néhány típusával fogok foglalkozni. Ennek a témakörnek nagyon kiterjedt irodalma van, sőt sok kézikönyv is napvilágot látott már ([HOO-80a], [ENG-81], [POL-81], [KIS-82], [BOE-88], [WIL-50], [KEL-65], [HAW-70], [JAC-75], [GRA-83], [ALL-72]).

Csoportunkban egy felületkutatásra szánt berendezés (XPS) építésével kapcsolatban került sor egy fékező lencse tervezésére, amelyet a differenciális szívás miatt még egy elektronokat transzportáló elő- és utólencsével is ki kellett egészíteni (erősen fókuszáló lencsék), továbbá egy kisenergiájú tartományban működő analizátorhoz (UPS) egy másik, gyorsító-fékező lencserendszert kellett tervezni, amelynél a nyalábvezetési szempontok éppen ellenkezőek voltak ("lágyműködés" fókuszálási lencsék).

Az általános fogalmak rövid ismertetése után e két fejlesztésről lesz szó ebben a fejezetben.

### 5.1. Az elektrosztatikus lencsék jellemző tulajdonságainak áttekintés.

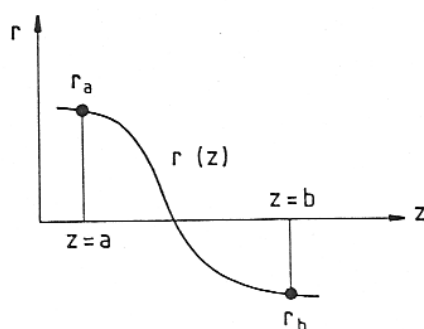
Az elektronoptikában különös figyelmet fordítanak a hengersizimetriával rendelkező hosszirányú terekre ([SEP-65], [KEL-65], [HAW-89a], [HAW-89b]), mivel ezek a terek elektronlencseként működnek. Az elektronoptika széles területéről csak olyan fogalmakról lesz röviden szó, amelyekre az elektrosztatikus lencsékkel foglalkozva szükségünk volt.

#### 5.1.1. Általános fogalmak

##### 5.1.1.a. Lineáris nagyítás

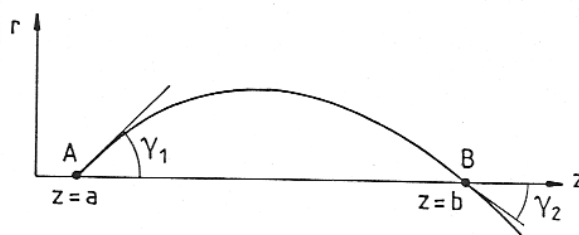
Tekintsük az  $r(z)$  elektronpályát, melynek kezdete megegyezik a tárgy tengelyétől  $r_a$  távolságra lévő elektronpálya ponttal, a vége pedig az ennek megfelelő kép tengelyétől  $r_b$  távolságra lévő elektronpálya pont (5.1.1.1. ábra). Az  $M$  lineáris nagyítást a következő képlet definiálja.

$$M = \frac{r_b}{r_a} \quad (5.1.1.1.)$$



**5.1.1.1.ábra** Vázlatos elektronpálya menet. A pálya a tárgy  $r_a$  pontjából indul és a kép  $r_b$  pontjába érkezik.

#### 5.1.1.b. Szögnagyítás



**5.1.1.2.ábra** Vázlatos elektronpálya menet. A pályának a  $z$  tengellyel alkotott szöge az  $A$  tárgyponban  $\gamma_1$ , az ennek megfelelő  $B$  képpontban  $\gamma_2$ ,

Tekintsük az  $r(z, \gamma)$  elektronpályát, amelynek kezdete megegyezik a tárgynak a tengelyen elhelyezkedő  $A$  pontjával, a vége pedig az ennek megfelelő  $B$  képponttal (5.1.1.2. ábra). A  $\Gamma$  szögnagyítást a pályának az  $A$  és  $B$  pontban a tengellyel alkotott  $\gamma_1$  és  $\gamma_2$  hajlásszögei tangensének viszonya adja.

$$\Gamma = \frac{\tan \gamma_2}{\tan \gamma_1} \quad (5.1.1.2.)$$

### 5.1.1.c. Emittancia

A nyalábot a  $z$  tengely mentén - például egy-egy elektronoptikai elem után - adott  $z$  pontban jellemzik méretei ( $r$ ) és szögszórása ( $\alpha$ ). Szokásos módon ábrázolva  $r$  és  $\alpha$  (ld. például a 5.2.4. ábrát) tartományait (emittancia ábra), a nyaláb részecskéi által az  $r, \alpha$  koordinátarendszerben elfoglalt terület méretéről kaphatunk információt, ahol  $r$  a nyalábnak az elektronoptikai elem  $z$  tengelyétől mért távolsága,  $\alpha$  pedig a nyalábnak az elektronoptikai elem  $z$  tengelyével bezárt szöge. Ezen területek lehetséges méretváltozásaira a 4.1.1.1. egyenlet ad információt (fékezésnél nő, gyorsításnál csökken a terület).

### 5.1.1.d. Akceptancia

Az emittancia a nyalábot jellemzi. A nyalábot fogadó kísérleti berendezés jellemzésére viszont az úgynevezett akceptancia szolgál - lényegében az analizátor bemenő részének méretét és szögtartományát jellemzi

A lencserendszer akkor működik jól, ha a kimenetén a képsíkban az emittancia ábra egybeesik az analizátor akceptancia ábrájával, vagy hiánytalanul letakarja azt.

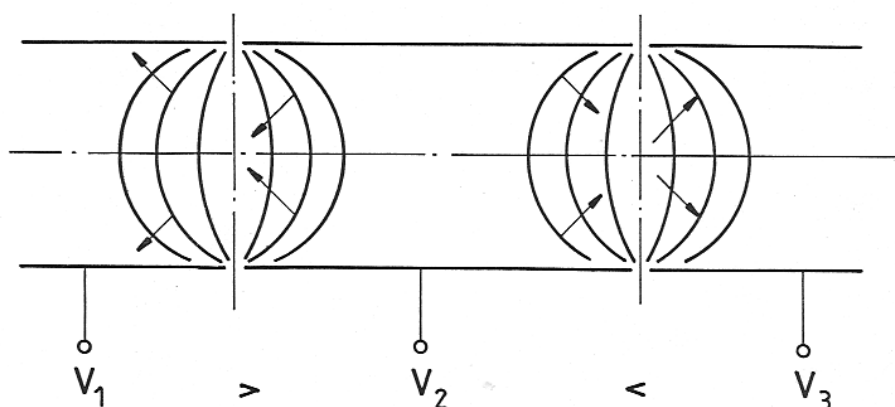
### 5.1.1.e. Az elektrosztatikus lencsék főbb jellemzői

Az elektrosztatikus lencsék és az optikai lencsék alapfogalmai hasonlóak, de míg az optikai lencsék esetében élesen változik a törésmutató a különböző közeghatárokon, addig az elektrosztatikus lencsék egy folytonosan változó törésmutatójú közegnek felelnek meg, így a tört egyenesekkel való közelítések természetesen nem esnek egybe az elektronpályák "lágyabb" vonalaival. Az 5.1.1.3. ábrán az elektrosztatikus lencsék főbb jellemzőit ábrázoltam.

Ezen jellemző adatok ismeretében a tengely közelében mozgó nyaláb esetén megszerkeszthető a tárgy képe, kiszámolható a lineáris (ld. 5.1.1.a. pont) és szőgnagyítás (5.1.1.b. pont). Ezekből nem érzékelhető a nyalábtorzulás, a leképezési hibák mértéke. Bár a spektrométereknél nem fontos a pontos képalkotás, mégis fontos a nyalábmenet ismerete azért, hogy a változó fékezés (gyorsítás) mellett is a lencse mindig kitöltse az analizátor által befogadható nyalábméretet és szögtartományt. Ezért számoltunk nyalábmenetet, emittanciát - ezek segítenek a lencsék méretezésében és az átviteli hatások becslésében.

Hengerekből álló lencsék méretezésénél a henger(ek) átmérőjét vagy sugarát (mi ez utóbbit választottuk) tekintik egységnyinek, így adják meg az elemek hosszát.





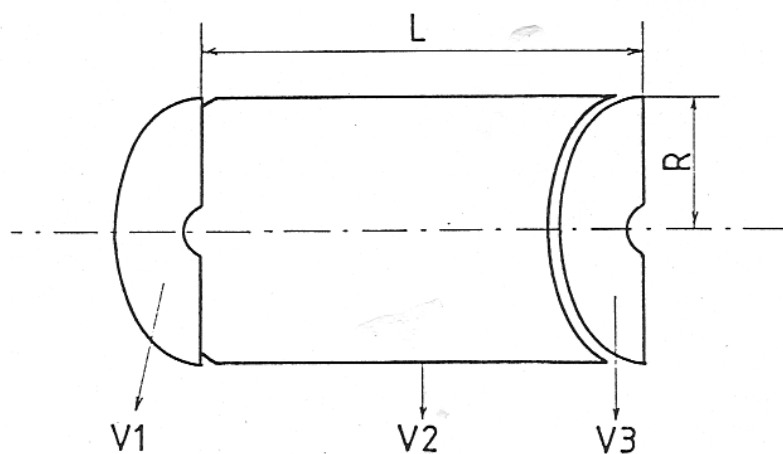
**5.2.1.ábra** A háromelemes lencsék vázlatos ábrája

Másrészről a lencsék potenciáeloszlásának a 3.1.2. fejezetben ismertetett számolási módja a lencsék tengelyéhez közel ad jó közelítést. Ha a kitöltési tényezőt adott tárgy és képtávolság mellett csökkenteni akarjuk, akkor a lencse átmérőjét növelni kell. Az 5.2.1. ábrán megfigyelhető, hogy az ábrán feltüntetett potenciálviszonyok mellett defókuszáló erők, az elektronokat a tengelytől eltávolító erők is fellépnek a lencsében. Ha a kitöltési tényezőt adott geometriai adatok mellett akarjuk csökkenteni, akkor felmerül az a kérdés, hogy milyen módon lehetne a háromelemes lencsét erősebben fókuszálónak tenni.

Az 5.2.1. ábrán látható háromelemes lencséből vágjuk ki a két függőleges vonallal határolt részt. A lencse ezen tartományában csak fókuszáló erők (az elektronokat tengelyhez szorító erők) működnek, ami erősebb fókuszálást jelent, azaz rövidebb fókusz távolságot várhatunk, mint a hasonló geometriai és potenciálértékekkel jellemzett hagyományos háromelemes lencsék esetében. Ezt a feltevésünket a számításaink igazolták.

A fent leírt új típusú lencse, ami az irodalomban eddig nem volt ismeretes, a gyakorlatban úgy valósítható meg, hogy a hagyományos háromelemes lencsét "dobozosítjuk" ([TÖK-89a]). Az aberrációs hibák csökkentése mellett konstrukciós okok is arra késztettek, hogy a hagyományos háromelemes lencsét dobozosítsuk.

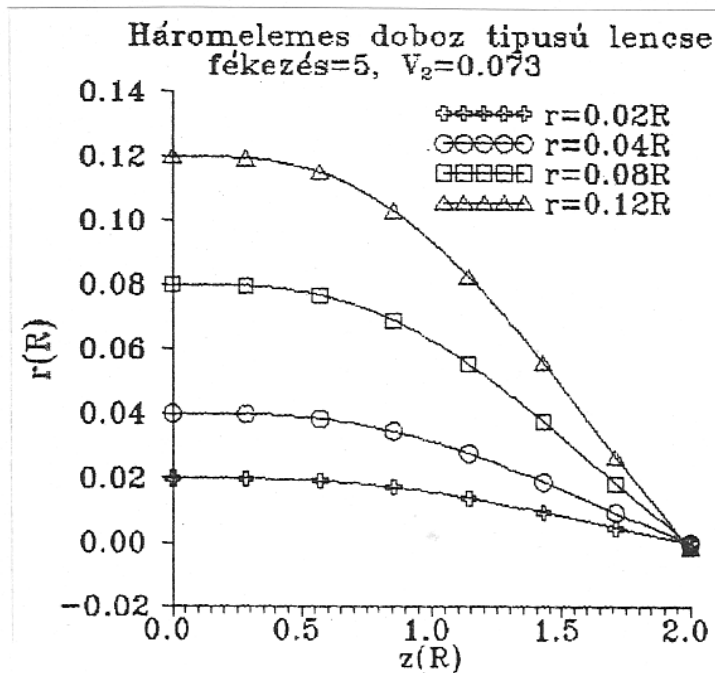
A háromelemes, doboz típusú lencse nem más, mint mindkét végén síktárcsákkal lezárt henger (5.2.2. ábra).



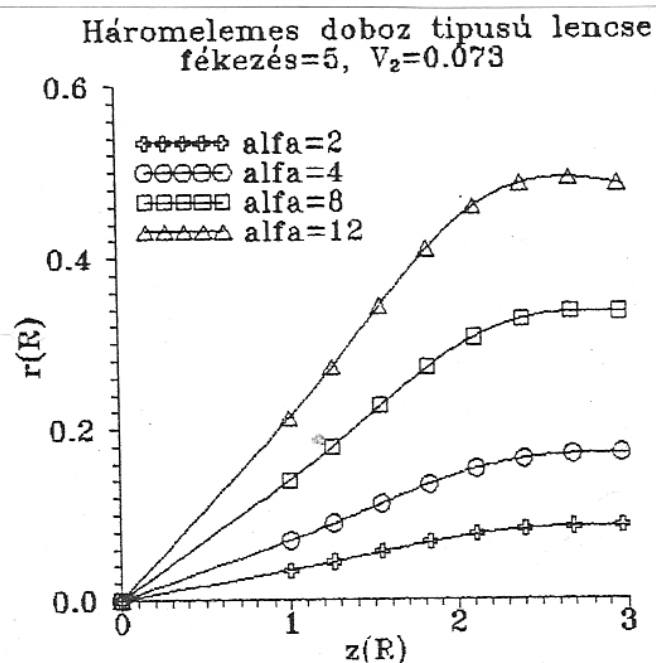
**5.2.2.ábra** A háromelemes, doboz típusú lencse vázlata.  $R$  - a lencse sugara,  $L$  - a lencse fókuszáló elektródájának a hossza,  $V1, V2, V3$  - a lencse elektródáinak potenciálértékei

A 5.2.3.-5.2.4. ábrákon a háromelemes, doboz típusú elektrosztatikus fékező lencsében mozgó elektronok pályáira mutatok be példákat: a lencserendszer tengelyével párhuzamosan, a minta különböző pontjaiból a lencsébe lépő elektronok (5.2.3. ábra), illetve az azonos pontból, különböző szög alatt belépő azonos energiájú elektronok eseteit (5.2.4. ábra). A fékezési tényező ( $F$  = fékezési tényező [a lencsébe belépő és a lencséből kilépő elektron kinetikus energiájának az aránya]) mindkét esetben 5.

A három elemből álló, doboz típusú lencsék átvitele az emittancia ábra elfordításában nyilvánul meg, ennek az alakját kis mértékben változtatja. Emiatt a nyalábvezetési tulajdonságaik kedvezőek. A háromelemes lencsék kedvező tulajdonságait látva, e lencsék szélesebb geometriai tartományára meghatároztuk a háromelemes doboz típusú lencsék főbb tulajdonságait. Néhány fókuszáló elektróda hossza, a 8.3. függelék táblázataiban mutatom be részletesebben is a jellemző paramétereit. Ezek a táblázatok hasznos segítséget adnak a tervezési munkákban, a közelítő számítások elvégzésében. Segítségükkel megszerkeszthetők az elektronpályák menetei az elképzelt elektrosztatikus lencsében vagy a lencsék összekapcsolásából született lencserendszerben.

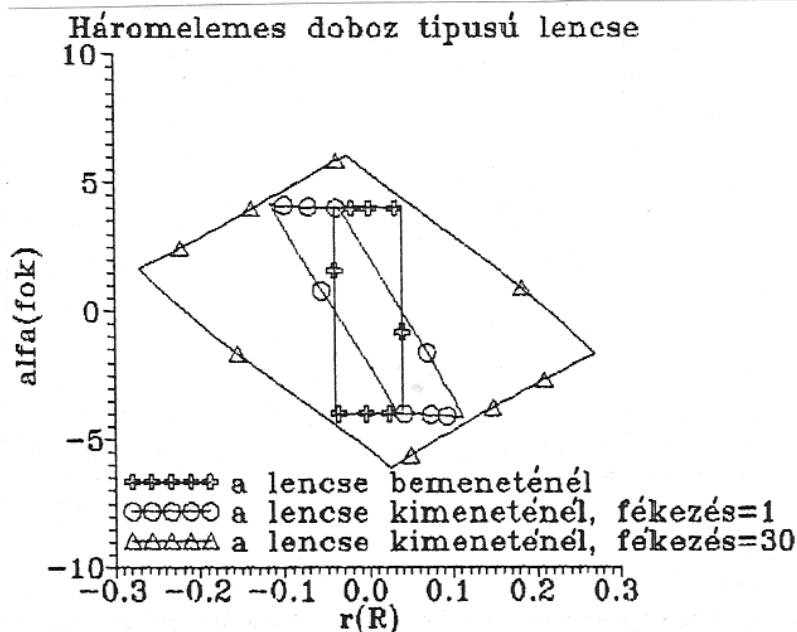


**5.2.3.ábra** Elektronpályák a háromelemes, doboz típusú elektrosztatikus lencsében különböző belépési helyek, és a lencse szimmetria tengelyével párhuzamos belépés esetén ( $L=2R$ , a lencse első elektródája a  $z/R=0$ -nál, az utolsó a  $z/R=2$ -nél van)



**5.2.4.ábra** Elektronpályák a háromelemes, doboz típusú elektrosztatikus lencsében azonos belépési hely és különböző belépési szögek esetén ( $L=2R$ , a lencse első elektródája a  $z/R=1$ -nél, az utolsó a  $z/R=3$ -nál van)

Az 5.2.5. ábra különböző fékezési tényezők mellett kapott emittancia ábrákat mutat.



**5.2.5.ábra** A háromelemes, doboz típusú elektrosztatikus lencse emittancia ábrái 1-es és 30-as fékezési tényezők mellett ( $L=2R$ )

Hasonlóan a hagyományos (nyitott végű) háromelemes lencsékhez, a doboz típusú lencsénél is mód van arra, hogy modulszerűen rakjuk össze őket. Sőt, egy fokkal nagyobb szabadsági fokot jelent az, hogy az elemeket nem kötelező úgy összerakni, hogy az egyik lencse utolsó eleme a másik lencse első eleme legyen, hanem köztük tetszőleges térmentes rész hagyható. Az ilyen tervezéseket segítve, a háromelemes, doboz típusú lencsék esetén különböző lencsehosszakra olyan  $V_2$  (optimális) potenciálértékeket kerestem, amelyek :

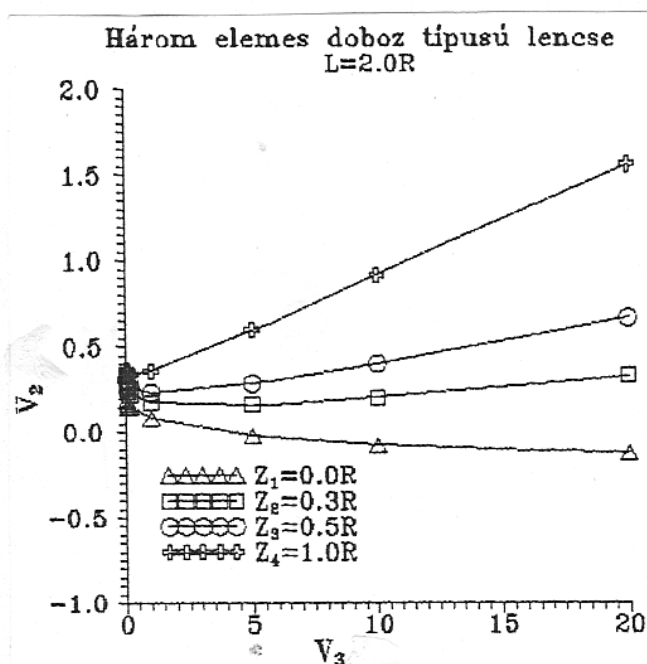
a, a lencse bemenetére párhuzamosan érkező elektronnyalábot a lencse harmadik elemétől adott  $z$  távolságra fókuszálják (5.2.6. ábra)

b, a lencse első elemétől adott távolságból ( $z$ ), adott szög alatt ( $4^\circ$ ) induló elektronnyalábot a lencse kimenetén párhuzamos elektronnyalábbá alakítja (5.2.7. ábra).

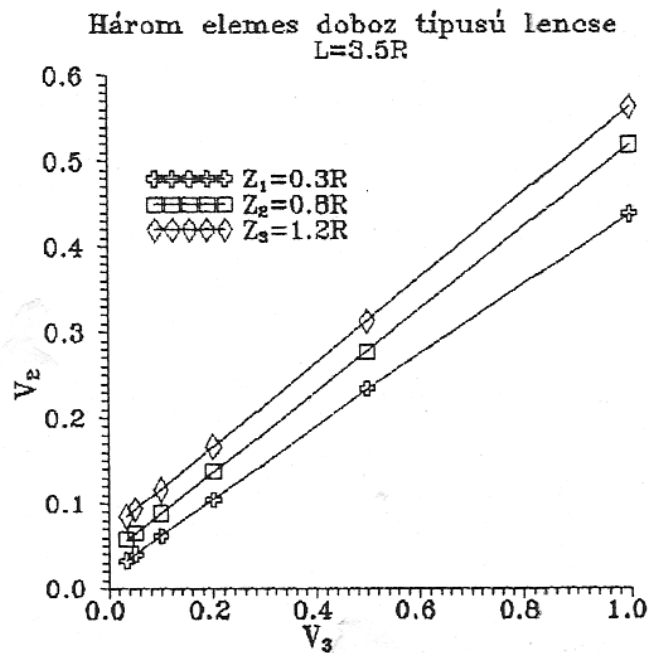
Az 5.2.6. és az 5.2.7. jellegű ábrák a lencserendszer tervezésekor nemcsak a megfelelő  $V_2$  potenciálértékek kiválasztásában igazítanak el, hanem segítséget adnak az optimális tárgy és képtávolság megtalálásában is. A háromelemes doboz típusú lencsével egy könnyen megvalósítható, erősen fókuszáló lencse típust kapunk, amivel egyszerűen megvalósítható az afokális beállítás is (ld. 5.3. fejezet és

5.4.3.1 ábra, [HED-71]). Az afokális beállítás a hagyományos háromelemes lencsék esetén csak jóval nagyobb fókuszáló elemhossz és jóval kisebb fókuszfeszültség mellett valósítható meg, mint a hasonló geometriai paraméterekkel jellemzett háromelemes doboz típusú lencséknél.

Összefoglalva: Az aberrációs hibák csökkentése, vagyis a kitöltési tényező csökkentése, és konstrukciós okok vezettek el bennünket a hagyományos háromelemes lencsék dobozosításához. (A hagyomáson háromelemes lencsék esetén - az általam számolt lencsékre - a kitöltési tényező  $\sim 50-60\%$ , míg a doboz típusú változat esetén a kitöltési tényező kisebb mint  $30\%$ .) A háromelemes doboz típusú lencsével egy könnyen, és olcsón megvalósítható, modulszerűen felépíthető erősen fókuszáló lencsét kaptunk, - az afokális beállítás is könnyen elérhető - amivel gyakorlatilag bármilyen minta-analizátor távolság esetén megvalósítható a kis veszteséggel járó leképezés.



**5.2.6.ábra** A háromelemes,  $2R$  ( $R$  a lencse sugara) hosszú, doboz típusú lencse, adott képtávolság esetén, a  $V_2$  elektróda potenciáljának változása a  $V_3$  elektróda potenciáljának a függvényében



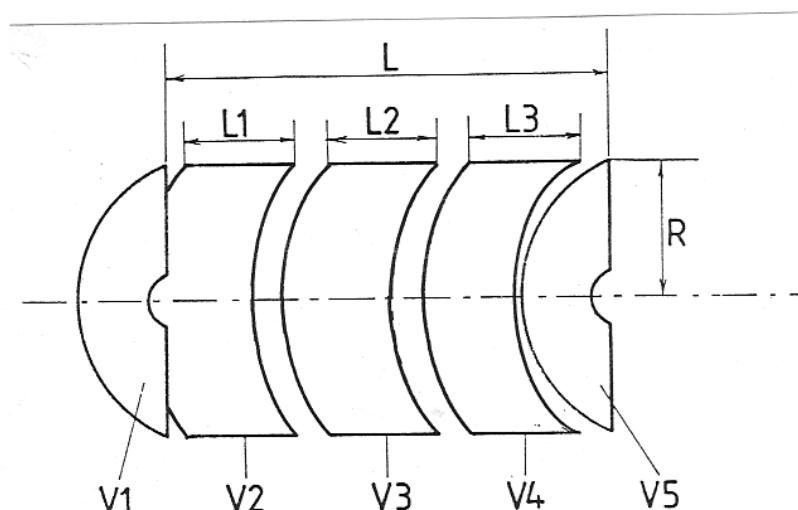
**5.2.7.ábra** A háromelemes,  $3.5R$  ( $R$  a lencse sugara) hosszú, doboz típusú lencse esetén, a  $V_2$  elektróda potenciáljának változása a  $V_3$  elektróda potenciáljának a függvényében, adott tárgy távolság mellett párhuzamos nyaláb kimenetet megkövetelve

### 5.3. Ötelemes doboz típusú lencsék

A háromelemes lencsének adott kezdeti és végpotenciál esetén egy paramétere van ( $V_2$ ), ami kevés egy rögzített képtávolság és nagyítás megtartásához, amikor a fékezési tényező változhat. A háromelemes doboz típusú lencsék kedvező tulajdonságait ismerve, elhatároztuk a hasonló (dobozos) ötelemes lencsék vizsgálatát. Az ötelemes doboz típusú lencse nem más, mint három henger egymás után, és az egészet a két végét síktárcsa zárja le (5.3.1. ábra).

Az irodalomban ismert a *2db* hagyományos, háromelemes lencséből összeállított ötelemes lencsék néhány variációja ([HED-84], [TRA-90a], [TRA-90b]).

Feladatunk a  $V_2, V_3, V_4$  potenciálértékek meghatározása volt úgy, hogy a lencsék lineáris nagyítása  $-1$  legyen, és a lencsék bemenetére párhuzamosan érkező elektron-nyaláb a lencsék kimenetén párhuzamos nyalábként jelenjen meg (afokális jelleg - ld. [HED-71]). Ez két feltételt jelent, a fékezési tényező függvényében, két potenciálértékkel kielégíthető a feladat megoldása. A harmadik elektróda ( $V_3$ ) potenciálértékének megválasztását, a fix tárgy és képtávolság megtartására hagytuk szabadon változó paraméternek. (Szabad paramétereknek tekinthetők, a potenciálértékek mellett, a fókuszáló elektródák hosszai is.) Egyszerűsítendő



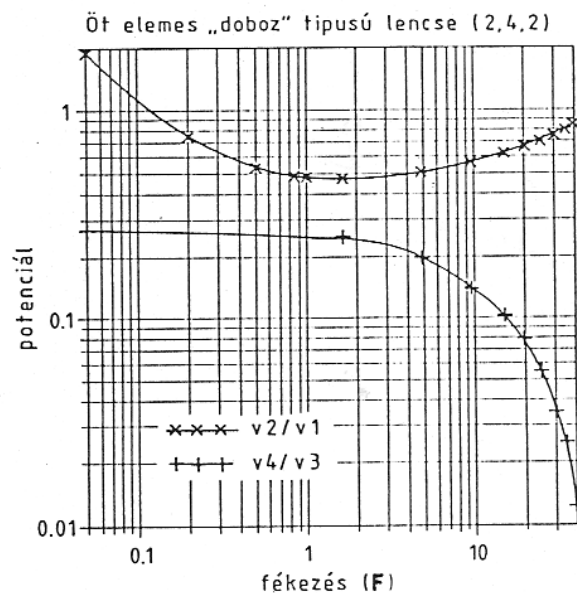
**5.3.1.ábra** Az öt elemes doboz típusú lencse vázlatos ábrája.  $R$  - a lencse sugara,  $L_1, L_2, L_3$  - a lencse fókuszáló elektródáinak a hossza,  $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5$  - a lencse elektródáinak potenciálértékei

a problémát, a  $V_3$  potenciálértéket a fékezési tényező függvényében lineárisnak választottam (gyakorlati megvalósítás esetén a  $V_3$  feszültséget osztólánc segítségével kaphatjuk a mérőtápegységről). Ezekhez a  $V_3$  potenciálértékekhez kerestem a fenti feltételeket kielégítő  $V_2, V_4$  potenciálértékeket. Az optimalizálási feladatot több lencseméretre végeztem el. (Az optimalizálandó függvények ([JAM-72]) a 8.2. függelékben találhatók).

Az 5.3.2. ábrán a  $8R$  teljes hosszúságú, ötelemes doboz típusú lencse (az első elem  $2R$ , a második elem  $4R$ , a harmadik elem  $2R$  hosszúságú)  $V_2/V_1$  és  $V_4/V_3$  függvénye látható a fékezési tényező ( $F = V_1/V_5$ ) függvényében.

Mivel a  $V_2$  és  $V_4$  potenciálértékekből származtatott fókuszfeszültségek nem lineárisak, a gyakorlati kivitelezés során ez a megoldás két független tápegységet igényel a  $V_3$  és  $V_5$  feszültségeket adó tápegységeken kívül. Ha a független tápegységek számát csökkenteni akarjuk, akkor eljuthatunk az egy tápegységes változathoz, ami azt jelenti, hogy a  $V_3$  potenciálértéket szolgáljuk ki egy független tápegységgel, a  $V_2, V_4$  potenciálokat lineáris osztón keresztül állítjuk elő a  $V_5$  potenciálértékből. Ilyen megoldás kapható a  $(2R, 2.5R, 2R)$ ,  $(2R, 2R, 2R)$  és a  $(2R, 1.5R, 2R)$  elemhosszúságú változatok esetén egy-egy tárgy és képtávolság mellett.

A  $(2R, 2R, 2R)$  változatban a további számolások azt mutatták, hogy egy adott tárgytávolság esetén a huszas gyorsítási és a negyvenes fékezési tartományban a



**5.3.2.ábra** A  $8R$  teljes hosszúságú öt elemes doboz típusú lencse  $V_2/V_1$  és  $V_4/V_3$  potenciál értékei a fékezési tényező ( $F = V_1/V_5$ ) függvényében, konstans tárgy és képtávolság esetén

lencse kiszolgálásához szükséges potenciálok jó közelítéssel lineárisan változnak a fékezési vagy gyorsítási tényező függvényében (a nonlinearitás kisebb mint 1%). Így az öt potenciálérték osztóláncokon keresztül adható.

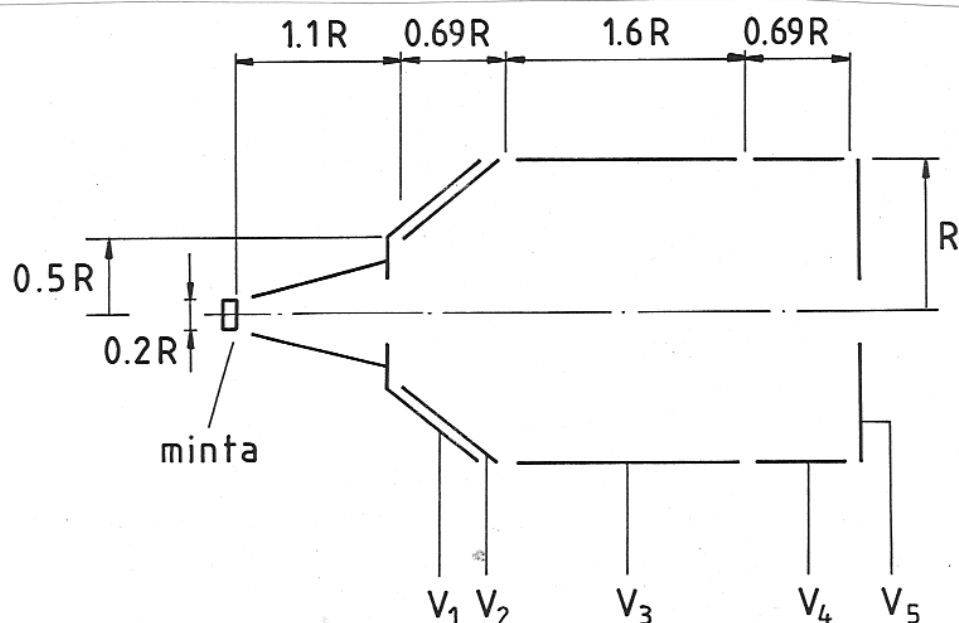
#### 5.4. XPS lencserendszer

Feladatunk adott forrás - analizátor távolság esetén olyan lencserendszer megtervezése volt, amelynek lineáris nagyítása  $-1$ , adott pontból adott pontba képes vinni az elektronnyalábot, és a lencse geometriai tengelyével párhuzamosan érkező elektronnyalábot párhuzamos elektronnyalábként továbbítja az analizátor bemeneti részére, függetlenül a fékezési tényezőtől, ha a fékezési tényező  $F=1-40$  között változik. További konstrukciós követelményeket támasztott a differenciális szívás megvalósítása, közbenső rés elhelyezése az analizátor előtt. Ezen követelmények tovább nehezítették az amúgy is többparaméteres feladat megoldását, ezért a feladatot, és a lencserendszert is három részre bontottuk, és a számításokat három külön-külön specifikált lencsére végeztük el. Ezt követően a külön-külön kapott megoldásokból összeállított teljes lencserendszerre nézve is lefuttattuk

a pálya és emittancia számolásokat. Ezek a számítások a külön-külön kapott számolási eredmények tesztelését jelentették. Másrésről a lencserendszer működésének jellemzésére a mintától az analizátor bemeneti részéig történő számítások adnak teljes felvilágosítást.

#### 5.4.1. Előlencse

Az előlencse feladata, hogy a mintából kilépő elektronokat energiaváltozás nélkül a fékező lencse bemenetére juttassa, (ahol a mintával azonos méretű blende van, az analizátor kamra és a minta kamra differenciális szívás lehetőségeit kielégítő elválasztása miatt) azaz párhuzamos nyaláb bemenetnél párhuzamos nyaláb kimenet legyen, az akceptancia és emittancia görbék közel fedésben legyenek egymással. Ez a jó átvitel jellemzője.



5.4.1.1. ábra Az XPS berendezés előlencsájének vázlatos ábrája

Az 5.3. fejezetben mutatott számítások alapján ez viszonylag könnyű feladat, megoldását az tette munkaigényessé, hogy a jó minta elhelyezés érdekében az előlencse első két elemét kúpos alakúra választottuk (5.4.1.1. ábra), ami több közelítést és numerikus ellenőrző számítást igényelt.

A megoldásként kapott elrendezés és méretek az 5.4.1.1. ábrán láthatók. A lencse lineáris nagyítási tényezője -1, a táplálása egyszerű, a mérőtápegységről osztólánccal megoldható.

#### 5.4.2. Fékező lencse

Mivel az elektrosztatikus analizátoroknál a relatív feloldás, azaz  $\Delta E/E$ , széles energiatartományban konstans, az abszolút feloldás alacsonyabb energiákra történő fékezéssel javítható. Ez természetesen intenzitásvesztéssel jár, de kevessebbel, mint ha az analizátor résszélességét csökkentenénk. Másik indok a fékező lencsék használatára, az analizátor fix  $E_p$  ( $E_p$ :=az analizátoron áthaladó elektronok energiája) üzemmódjának megvalósítása.

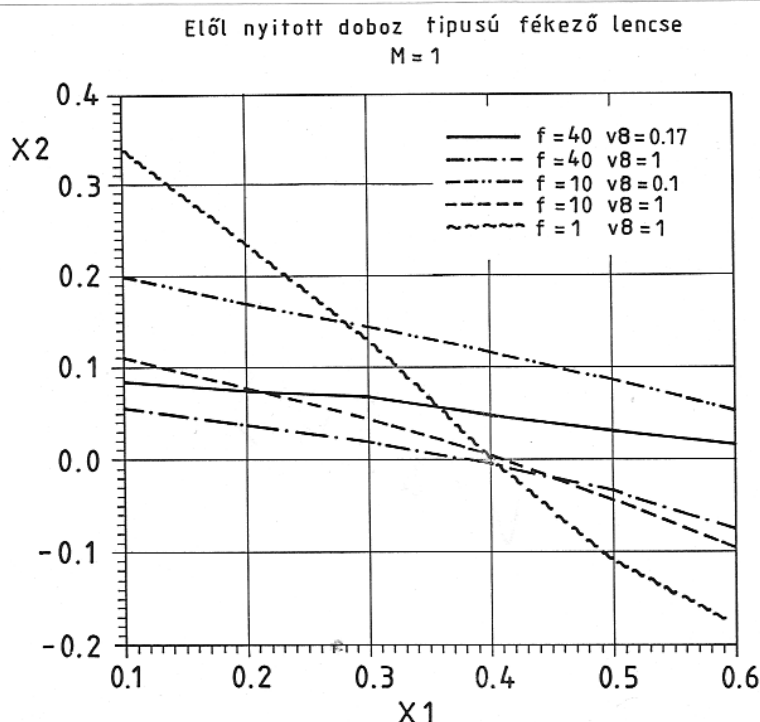
A fékező lencse tervezésénél a korábban ismertetett ötelemes, doboz típusú lencséből indultunk ki, amelynek végül a viszonylag nagy tárgytávolság miatt, az elől félig nyitott változata valósult meg (5.4.2.2. ábra). A fékező lencse potenciálértékei a következők:  $V_6, V_7, V_8, V_9, V_{10}$ .

Feladatom a  $V_7, V_8, V_9$  potenciálértékek meghatározása volt úgy, hogy a lencse bemenetére párhuzamosan érkező elektronnyaláb a lencse kimenetén párhuzamos nyalábként jelenjen meg, az egy pontból induló elektronnyalábot egy pontba fókuszálja a fékezési tényezőtől függetlenül, és a lencse lineáris nagyítása legyen egyenlő -1-gyel. Ez három feltételt jelent, három változó potenciálértékkel kielégíthető a probléma. A feladat megoldása egyszerűbb, ha a fenti három feltételes optimalizálási eljárást két feltételes optimalizálásra redukáljuk. Ez a következőképpen oldható meg. A  $V_8$  potenciálértékeknek egy  $V_8(min)$ ,  $V_8(max)$  sávját keressük meg, úgy hogy a  $V_7$  és  $V_9$  potenciálértékek mellett a lencse bemenetére párhuzamosan érkező elektronnyaláb a lencse kimenetén párhuzamos nyalábként jelenjen meg, és a lineáris nagyítás adott értékű ( $M=-1$ ) legyen a fékezési tényezőtől függetlenül (az optimalizálandó függvények a 8.2 függelékben találhatók). Ezután az  $X_1$  (a lencse első elemének és az elektronnyaláb kezdeti helyének távolsága a lencse geometriai tengelyén, az elektronok adott szögben indulnak erről a helyről) függvényében ábrázoljuk az  $X_2$ -t (a lencse utolsó elemének, és az elektronnyalábnak, a lencse geometriai tengelyével történő metszetének a távolsága) a kiszámolt  $V_7(min)$ ,  $V_8(min)$ ,  $V_9(min)$  és  $V_7(max)$ ,  $V_8(max)$ ,  $V_9(max)$  potenciálértékekre. A harmadik feltételt kielégítő  $X_1$  és  $X_2$  értékeket, (és az ennek megfelelő  $V_8$  potenciálértéket) azaz pontból pontba történő fókuszálást, a fentebb említett eljárás után kapott

5.4.2.1. ábra  $V_8(\min)$ ,  $V_8(\max)$  értékek közös részében kell keresni. Ha a  $V_8(\min)$ ,  $V_8(\max)$  közös része a fékezés függvényében elég széles, akkor akár változó hosszúságú lencserendszereket hozhatunk létre hasonló tulajdonságú fékező lencse esetén.

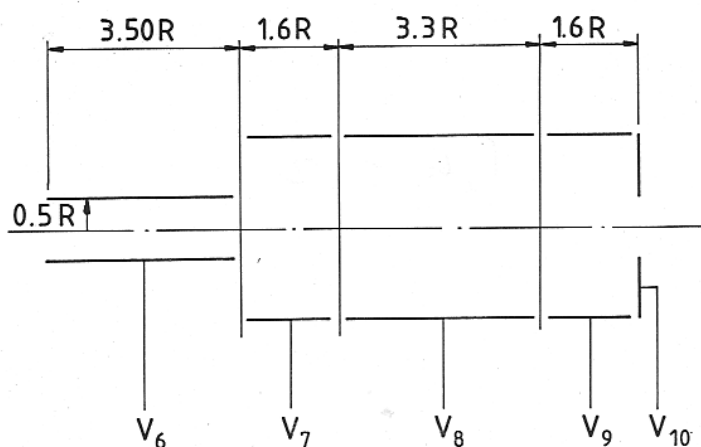
A számolásnál a gondot az okozta, hogy törekedtünk a kis kitöltési tényezőre. Minimális lencse hosszúságra  $9.8R$ -t kaptunk, de ennél az elrendezésnél, a számolásból adódó fókuszfeszültségek már a gyakorlatban rendelkezésünkre álló feszültségek határán voltak. Ezért a kicsit nagyobb hosszúságú  $(3.5 - 1.6R - 3.3R - 1.6R)$  elrendezést fogadtuk el megoldásnak, ezen méretekhez is megkerestük a megfelelő potenciálértékeket.

A 5.4.2.1. ábrán néhány fékezési tényezőnél az  $X_2(X_1)$  függvényét láthatjuk az  $(3.5-1.6-3.3-1.6)R$  geometriai méretekkel rendelkező fékező lencsére.



**5.4.2.1. ábra** Az  $(3.5-1.6-3.3-1.6)R$  fékező lencse  $X_2(X_1)$  függvénye néhány fékezési tényezőnél.  $X_1$  - a lencse első elemének és az elektronnyaláb kezdeti helyének távolsága a lencse geometriai tengelyén,  $X_2$  - a lencse utolsó elemének, és az elektronnyalábnak, a lencse geometriai tengelyével történő metszetének a távolsága

Az 5.4.2.2. ábrán láthatjuk a fékező lencse elvi vázlatát és geometriai adatait.



5.4.2.2. ábra Az XPS berendezés fékező lencséjének vázlatos rajza

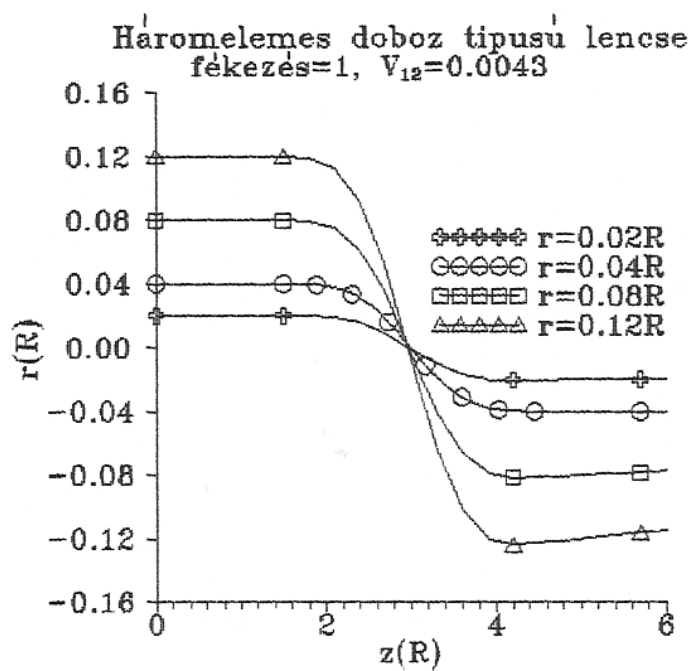
### 5.4.3. Utólencse

Az utólencse feladata, hogy fékezés nélkül (fékezési tényező=1) a fékező lencse után elhelyezett résből kilépő elektronokat az analizátor bemenetére juttassa, azaz párhuzamos nyaláb bemenetnél, párhuzamos nyaláb kimenet valósuljon meg, az akceptancia és emittancia görbék közel fedésben legyenek.

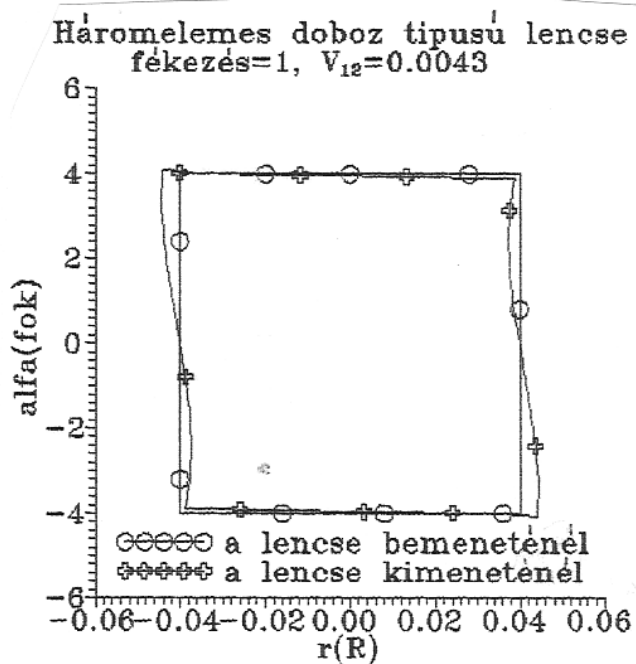
Ezt az úgynevezett három elemes doboz típusú lencsékkel valósítottuk meg, az 5.2. fejezetben ismertetett számítások alkalmazásaként, amikor a fókuszáló elektróda hossza  $3.16R$ . Az utólencse potenciálértékei:  $V_{11}, V_{12}, V_{13}$

Feladatom a  $V_{12}$  potenciálérték optimalizálása volt, hogy a kívánt paramétereket beállítsuk. Az általunk optimalizált utólencse fentebb említett tulajdonságait igazolják az (5.4.3.1-5.4.3.2) ábrák. A 5.4.3.1. ábrán néhány azonos energiájú elektron pálya látható  $0^\circ$ -os belépési szögben, különböző belépési helyeken (afokális jelleg), a 5.4.3.2. ábra az emittancia-akceptancia ábrát mutatja az optimalizált  $V_{12}$  potenciálértékekkel számolva, amit úgy kaptunk, hogy megkerestük azt a  $V_{12}$  (optimalizált  $V_{12}$ ) potenciálértéket, amely mellett a lencse bemenetére párhuzamosan érkező nyaláb a lencse kimenetén is párhuzamos nyalábként jelenik meg.

A lencse táplálása nagyon egyszerű, az analizátor átmenő energiáját ( $E_p$ ) definiáló tápegységről, osztólánccal történik.



5.4.3.1.ábra A háromelemes doboz típusú transzport lencsén áthaladó elektronok pályái  $0^\circ$ -os belépési szögnél, különböző mintahelyekről



5.4.3.2.ábra Az optimalizált  $V_{12}$  potenciálú utólencse emittancia-akceptancia ábrája

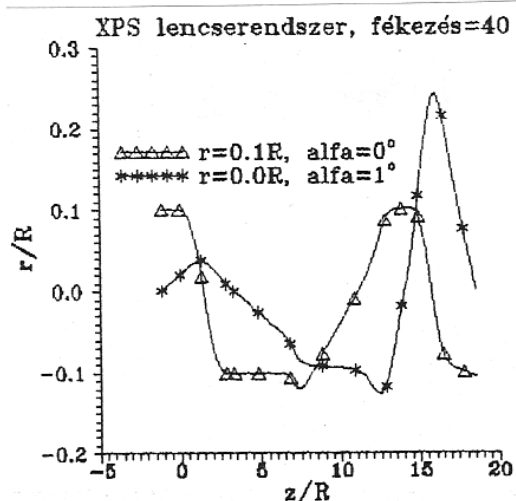
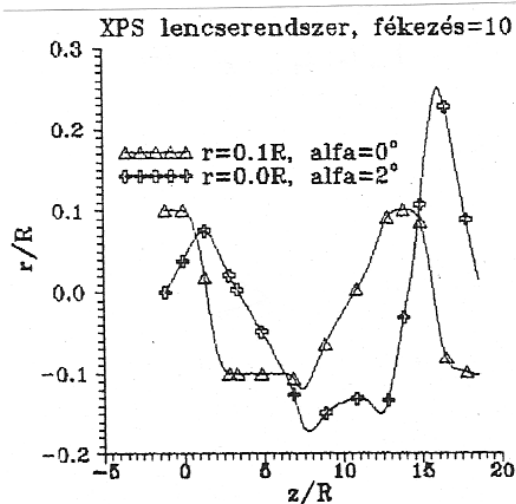
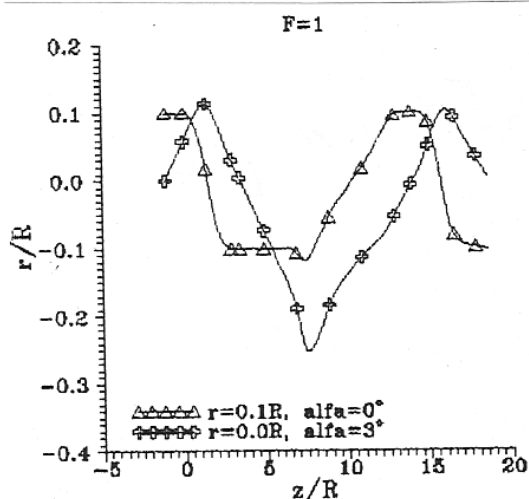
#### 5.4.4. Lencserendszer a mintától az analizátor bemenetig

Az egymást követő lencsékben a leképezési hibák valamilyen módon összeadódnak. A lencserendszer működését igazán a mintától az analizátor bemenő réséig számolt pályák, illetve az ezekből nyert emittancia ábrák jellemzik. Az ilyen számolások arra is jók, hogy a három elem külön optimalizált paraméterei közelében maradva, a végeredmény figyelésével, ezen paramétereket pontosabban határozzuk meg. Az 5.4.4.1.-5.4.4.2. ábrákon néhány jellegzetes elektron pályamentet és emittancia ábrát mutatok be, különböző fékezési tényezők mellett.

Az 5.4.4.3. ábrán *XPS* berendezés elő- és utólencsájének az 5.4.4.4. ábrán az *XPS* berendezés fékező lencsájének feszültségváltozásait láthatjuk, amikor az  $E_p = 50\text{eV}$ .

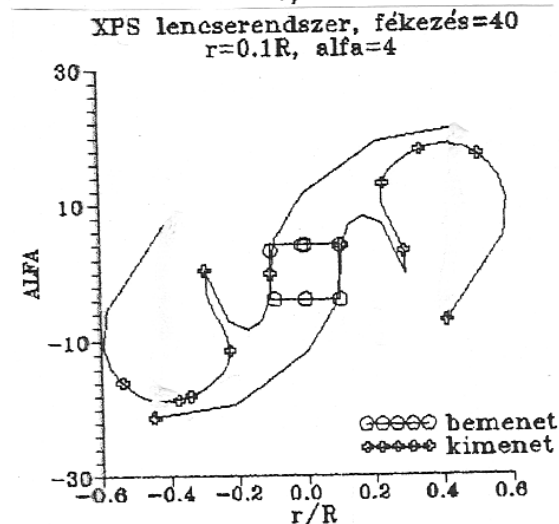
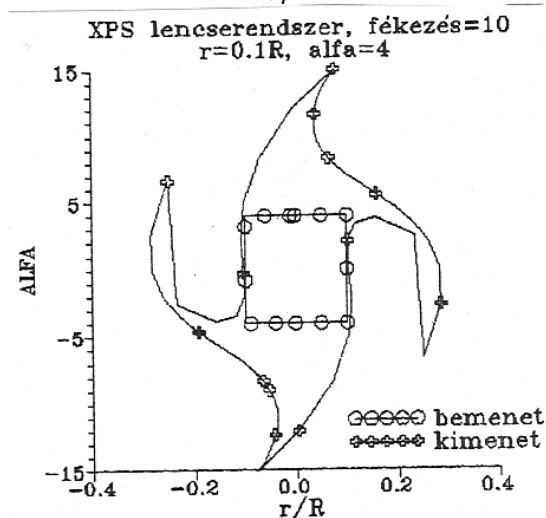
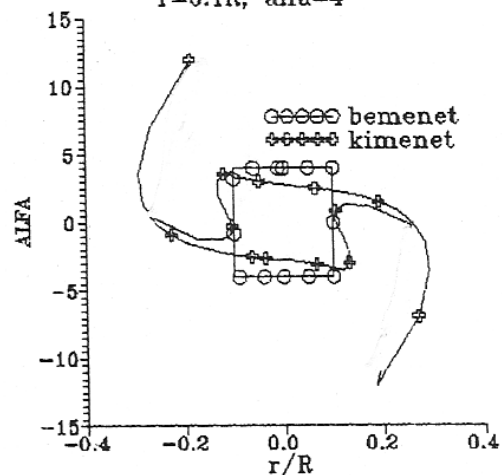
Az 5.4.4.1.-5.4.4.2. ábrák jól szemléltetik, hogy az *XPS* berendezés lencserendszere megvalósítja a kitűzött feladatokat. A kitöltési tényező, még az  $F=40$ -es fékezésnél sem éri el az 50%-ot, kisebb fékezéseknél pedig a kitöltési tényező 20% -30% között van. Az emittancia ábrákból látható, hogy az analizátor előtt elhelyezett rést teljesen, (5.4.4.2.b. és 5.4.4.2.c. ábrák) vagy majdnem teljesen (5.4.4.2.a. ábra) befedik a mintából érkező elektronok. Tehát a transzport elemek illesztéséből származó veszteségek minimálisak. Az 5.4.4.3. és 5.4.4.4. ábrák azt mutatják, hogy a lencserendszer kiszolgálása, az  $U_8$  feszültség kivételével, osztólánc segítségével, a mérőtápegységről történhet.

A lencserendszer modulszerűen épül fel. Az elemek kerámia szigetelőkkel vannak elválasztva, mivel az egyes elemekre keV nagyságrendű feszültségek kerülnek. A kerámia szigetelők miatt, a lencserendszer összerakása nagy óvatosságot és figyelmet igényel.

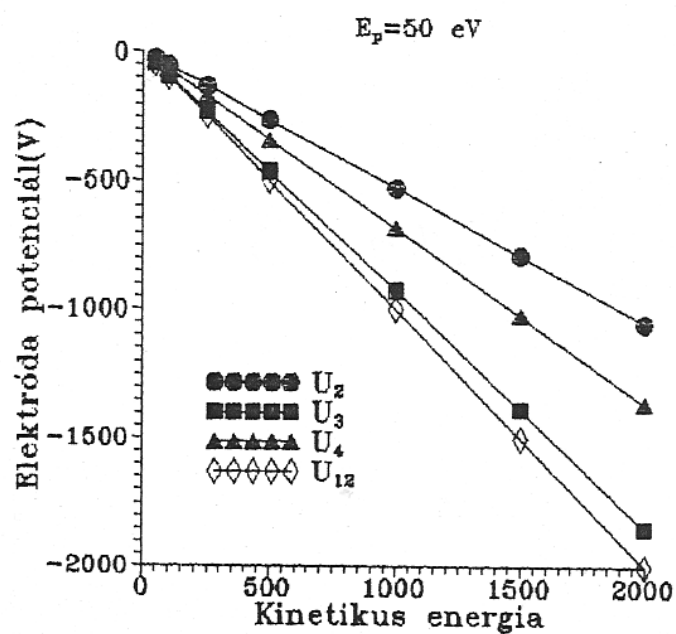


5.4.4.1.ábra Néhány jellegzetes elektron pályamenet az XPS berendezés lencserendszerében, a:  $F=1$ -es, b:  $F=10$ -es, c:  $F=40$ -es fékezési tényezőnél

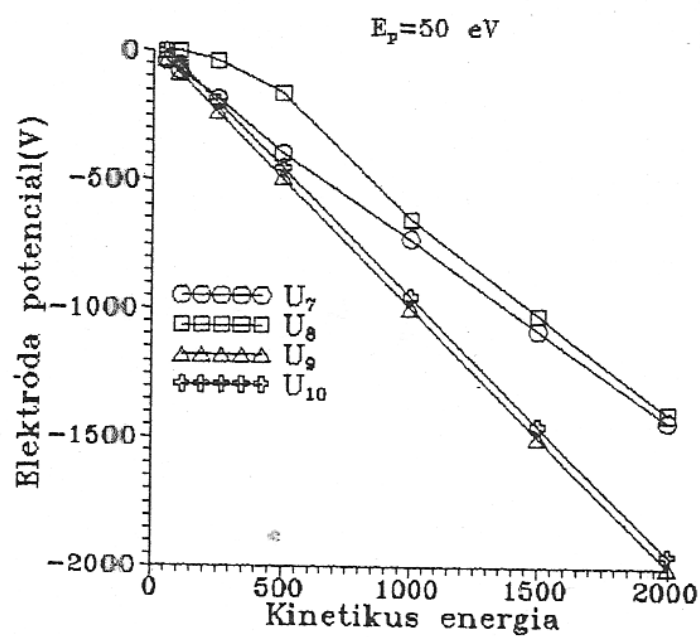
XPS lencserendszer, fékezés=1  
 $r=0.1R, \text{ alfa}=4$



5.4.4.2.ábra Emittancia ábrák az XPS berendezés lencserendszerében, a:  $F=1$ -es, b:  $F=10$ -es, c:  $F=40$ -es fékezési tényezőnél



5.4.4.3.ábra XPS berendezés elő- és utólencsájének feszültségváltozásai, amikor az  $E_p = 50 \text{ eV}$



5.4.4.4.ábra XPS berendezés fékező lencsájének feszültségváltozásai, amikor az  $E_p = 50 \text{ eV}$

### 5.4.5. A lencserendszer kísérleti ellenőrzése

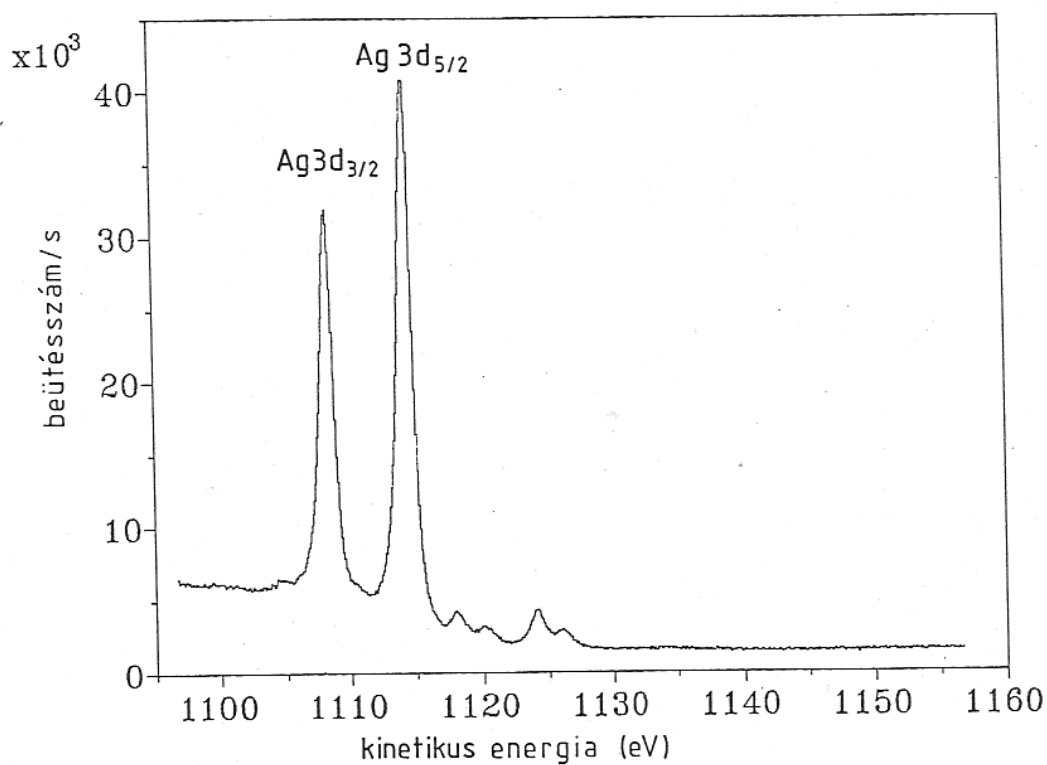
Az *XPS* lencserendszer 1990 októberében készült el. Valós méretei a következők:

- a lencserendszer sugara 29 mm
- a minta és az előlencse első elektródjának távolsága 32 mm
- az előlencse elektródáinak hosszai: 20 mm, 45 mm, 18.5 mm
- az előlencse helyigénye a mintától a fékező lencséig 131.6 mm
- a fékező lencse elektródáinak hossza 101.5 mm, 41.9 mm, 92.7 mm, 41.9 mm
- a fékező lencse helyigénye 307 mm
- az utólencse elektródjának hossza 85.9 mm
- az utólencse helyigénye 131 mm
- lencserendszer teljes hossza 569.6 mm

A lencserendszer kísérleti ellenőrzését úgy oldottuk meg, hogy a három különálló lencse potenciálértékeit nem egyszerre vizsgáltuk, hanem egymás után kötöttük be a lencsét. Először minden lencse potenciált földre kötöttünk (nem használunk lencsét), majd bekötöttük az utólencsét, majd a fékező lencsét és végül az előlencsét is, így néztük az  $Alk_{\alpha}$ , ( $E = 1486.67\text{eV}$ ) röntgen sugárzással gerjesztett  $Ag3d$  héjról kilökött fotoelektronok intenzitását (egy, a lencserendszer bemérésére használt spektrumot mutat az 5.4.5.1. ábra). A mért intenzitás arányokat összehasonlítottuk egy elemi térszög számolás útján nyert intenzitás arányokkal.

A lencserendszer kísérleti ellenőrzésének eredményét az 5.4.5.1. táblázat tartalmazza, az intenzitásarányokat a lencse kikapcsolt állapotában kapott intenzitásokra normáltuk. A táblázat adataiból kitűnik, hogy a számolt intenzitás arányok, amit ideális esetre vonatkoztattunk, kisebbek a mért intenzitás arányoknál, ha a teljes lencserendszer be van kötve, vagy ha csak az előlencse feszültségértékei vannak leföldelve. Ennek a magyarázatát a mágneses tér zavaró hatásában találtuk meg. A méréseket  $E_p = 50\text{eV}$ -nél nagyobb átmenő energiáknál megismételve, a számolt és a mért intenzitásértékek eltérése kisebb, mint az 5.4.5.1. táblázaté.

A számolt potenciálértékek 2% – 8% hibahatáron belül megegyeznek a kísérletileg mért optimális értékekkel. Ez az eredmény a kísérleti és számolt potenciálértékek igen jó egyezését jelenti.



**5.4.5.1.ábra**  $AlK_{\alpha}$ , ( $E = 1486.67\text{eV}$ ) röntgen sugárzással az Ag 3d héjáról kilökött fotoelektronok spektruma,  $E_p = 50\text{eV}$

**Táblázat 5.4.5.1.** fékezési tényező=1,  $E_p = 50\text{eV}$

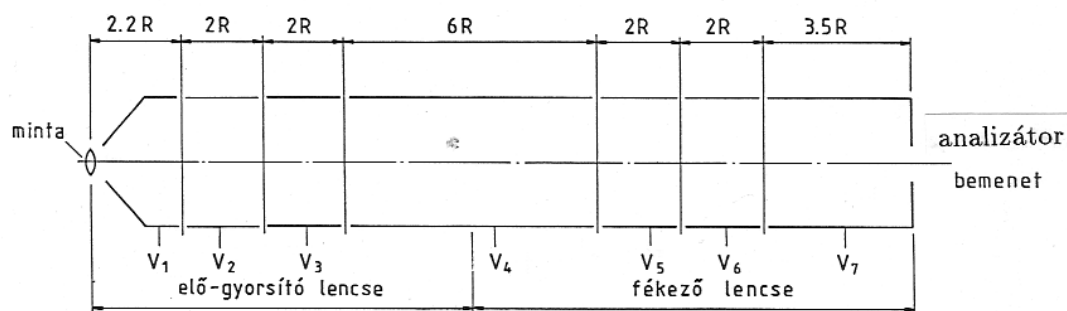
| a lencserendszer állapota       | mért intenzitás | számolt intenzitás |
|---------------------------------|-----------------|--------------------|
| a lencse kikapcsolva            | 1.00            | 1.00               |
| utólencse bekötve               | 2.23            | 2.40               |
| utó- és fékező lencse bekötve   | 24.3            | 16.1               |
| a teljes lencserendszer bekötve | 49.5            | 37.1               |

### 5.5. UPS lencserendszer

Feladatunk adott forrás - analizátor távolság esetén olyan lencserendszer megtervezése volt, amely adott pontból adott pontba képes szállítani az elektronnyalábot, ha a mintából kilépő elektronok energiája 2 eV és 50 eV között van, és az analizátor részénél az elektronok energiája energiája azonos (2 eV, 5 eV vagy 10 eV).

A feladat az *UPS* lencserendszer megvalósításában egészen más, mint az *XPS* berendezés esetében volt. A *XPS* berendezés lényegesen nagyobb energia tartományban működik, ezért az elektronokat kevésbé zavarja a maradék mágneses tér. Az *UPS* berendezésnek, a 2-20 eV-es tartományban való működtetése nagyobb óvatosságot igényel, azaz nem célszerű az elektronok amúgy is kicsi energiáját az egyes fókuszáló elemekben erősen csökkenteni. Másképpen: ez "lágyabb" nyalábvezetést jelent, elkerülve a tengelyen a csomópontokat a minta és az analizátor között.

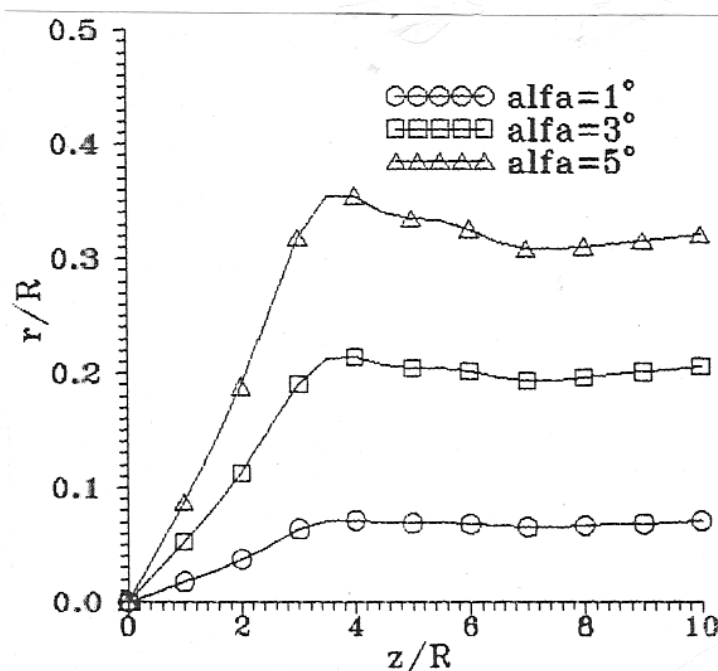
A sok paraméter egyidejű kezelését úgy kerültük el, hogy a feladatot, és a lencserendszert két részre bontottuk: az első fokozat (négyeleemes lencse) az adott pontból, adott energiával kilépő elektronokat 25 eV energiájú párhuzamos nyalábbá alakítja, a második fokozat (szintén négyeleemes lencse) ezt összegyűjti az analizátor bemenő részére és lefékezi a kívánt energiára (2 eV - 10 eV). Így a két négyeleemes lencse  $V_1$  és  $V_4$  (ill.  $V_4$  és  $V_7$ ) potenciálja a mérőtápegységek által adott, és a feladatok megoldására két-két potenciálérték,  $V_2$ ,  $V_3$  és  $V_5$ ,  $V_6$ , illetve a fókuszáló elemek hossza áll rendelkezésre (ld. 5.5.1. ábra).



**5.5.1. ábra** A minta és az analizátor között elhelyezhető *UPS* lencserendszer elvi vázlata

### 5.5.1. Elő-gyorsító lencse

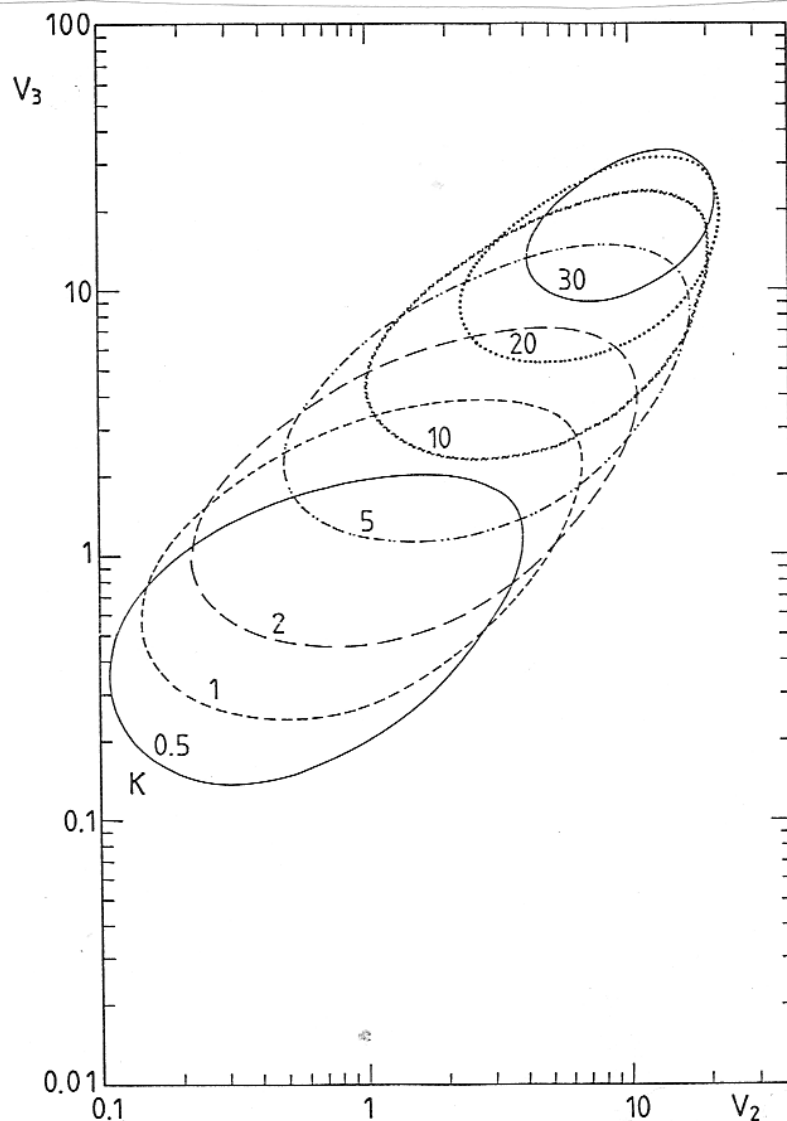
A lencse egy négyelemes lencse potenciálértékeinek optimalizálásával született. A négyelemes lencse feladata, hogy a mintából kirepülő, adott energiájú (2eV -50eV) elektronokból 25-es energiájú elektronokat csináljon úgy, hogy az egy pontból kilépő elektronnyaláb a lencse kimenetén párhuzamos elektronnyalábként jelenjen meg (ld. 5.5.1.1. ábra). A feladat megvalósításánál célul tűztük ki azt is, hogy a  $V_2, V_3$  fókuszpotenciálok lineáris függvényei legyenek a  $V_4$  potenciálnak.



5.5.1.1. ábra Elektron pályák az elő-gyorsító lencsében

Az optimalizálási eljárás a következő volt. Adott geometriai adatok mellett, változtatva a gyorsítási tényezőt, ( $K \div$  a fékezési tényező reciproka, potenciálértékekkel kifejezve:  $V_4/V_1$ ) meghatároztam a  $V_3(V_2)$  görbét, amelyeket úgy kaptam, hogy fix  $V_2$  potenciálértékekhez megkerestem azokat a  $V_3$  potenciálértékeket, amelyek a mintából, a lencse geometriai tengelyéből  $4^\circ$  szögből induló elektronnyalábot a négyelemes lencse kimenetén párhuzamos elektronnyalábra transzformálja. Az így kapott görbesereg burkoló görbéje között folytatva a keresést, a paraméterek jó választásával lineáris összefüggés kapható a  $V_2(K)$  és  $V_3(K)$  függvényekre. A választásunk a  $(2.2 - 2 - 2 - 4)R$  geometriai paraméterekkel jellemzett lencse görbeseregéből (5.5.1.2. ábra), a  $V_2 = 0.1052K + 0.0530$  és a  $V_3 = 0.4363K + 0.1802$  görbékre esett. Az 5.5.1.2. jellegű ábrák nagy segítséget

nyújtanak potenciálértékek megtalálásában, megmutatja, hogy milyen potenciáltartományban várható a célul kitűzött feladat megoldása. Az 5.5.1.2. ábrán látható, hogy adott  $V_2$  potenciálértékhez - a fent említett feltételeket kielégítve - két  $V_3$  potenciálérték is található. A megoldásom, a kisebb  $V_3$  potenciálértékek elemzéséből származik, mivel a rendelkezésünkre álló feszültségértékekkel a "felső ági" megoldásokat nem tudtuk kiszolgálni.



**5.5.1.2.ábra** A  $(2.2 - 2 - 2 - 4)R$  geometriai paraméterekkel jellemzett lencse fókuszfeszültségeinek változása, különböző gyorsítási tényezők ( $K$ ) mellett

### 5.5.2. Utólencse

Az utólencse feladata, hogy a fix 25 eV-es elektronnyalábot a lencserendszer után következő gömbtükör analizátor átmenő energiájára, (2, 5, 10) eV-re fékezze le úgy, hogy a párhuzamos elektronnyalábot adott helyen fókuszálja.

A fent leírt célkitűzést egy négyelemes lencsével valósítottuk meg. A második fokozat követelményei lazábbak, mint az első fokozaté voltak. A megoldandó feladat nehézségét az jelentette, hogy a rendelkezésre álló két szabad paramétert, ( $V_5$  és  $V_6$ ) leszámítva a lencse geometriai méreteit, lineáris függvényként akartuk előállítani, a lencse könnyű táplálása érdekében.

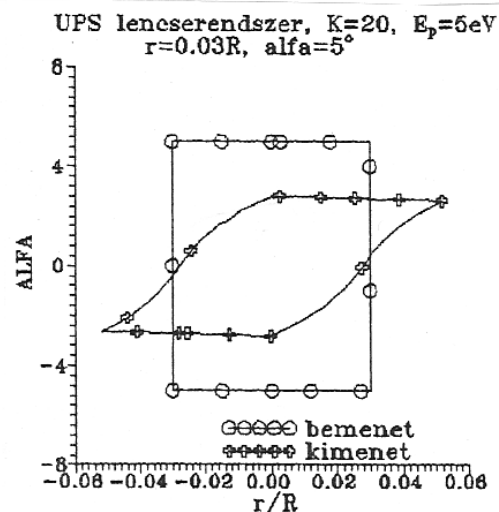
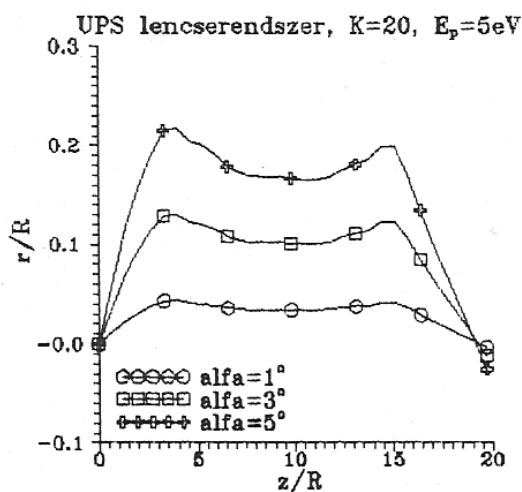
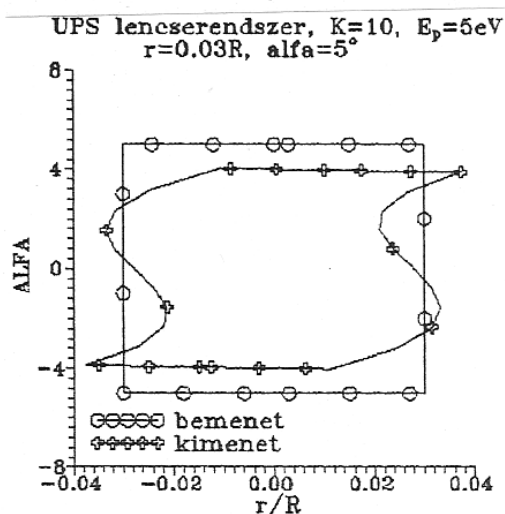
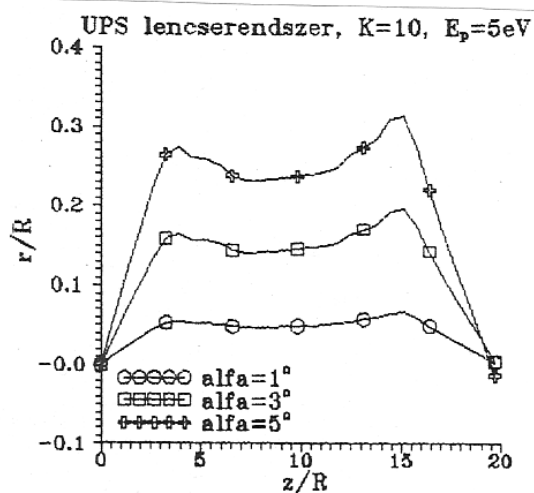
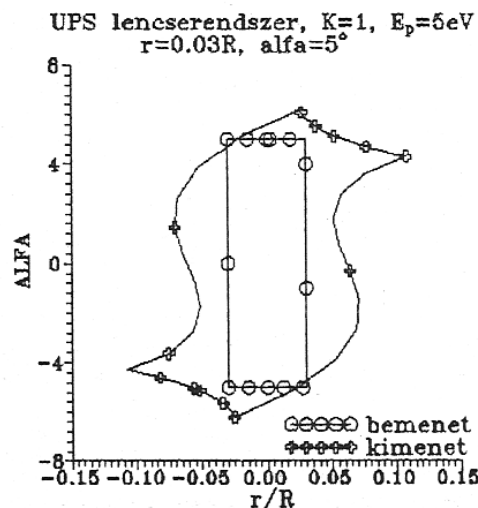
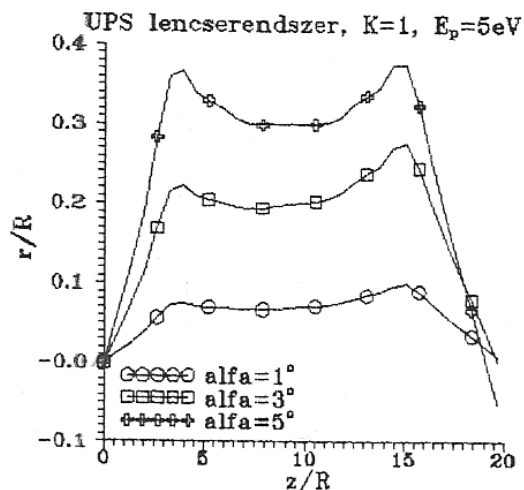
A számolás eredményeként választásunk a (2-2-2-3.5)R geometriai méretekkel jellemzett lencsére esett, ahol a  $V_5 = 0.3958K + 0.1094V_7 + 1$  és  $V_6 = 0.1317K$ . Az eredetileg kitűzött három fix kimenő energia helyett  $E_p$  2eV-10eV között folyamatosan változhat úgy, hogy a fókuszfeszültségek lineárisak maradtak.

### 5.5.3. Lencserendszer a mintától az analizátor bemenetéig

Az 5.5.1 és 5.5.2. fejezetekben leírt lencséből állítható össze az általunk használt *UPS* lencserendszer. Az 5.5.1. ábrán az *UPS* lencserendszer elrendezése és méretei láthatók.

Néhány jellegzetes elektron pályamenetet és emittancia ábrát mutatok be az 5.5.3.1.-5.5.3.2. ábrákon, különböző gyorsítási tényezők mellett.

Ezek az ábrák jól szemléltetik, hogy az *UPS* lencserendszer számára kitűzött feladatokat sikerült maradéktalanul megvalósítani. A kitöltési tényező maximális értéke  $K=1$ -nél 38 % , ez a gyorsítási tényező növekedtével csökken. Az emittancia ábrákból látható, hogy az analizátor rését sikerült optimálisan befedni a mintából kirepülő elektronokkal. Ezekből az ábrákból az is látszik, hogy a lineáris nagyítás közel -1, és a gyorsítási tényező függvényében lassan változik. Az  $M=-1$  értéket a  $K=10$ -es gyorsításnál éri el. A lencserendszer táplálása osztóláncról egyszerűen megoldható, a lencserendszer fókuszfeszültségei nem igényelnek külön, önálló tápegységet. Így az előállítása a lehető legolcsóbb. Összerakása egyszerű, az egyes elemek modulszerűen csatlakoznak egymáshoz. Az elemeket teflon szigetelés választja el.



5.5.3.1.ábra Néhány jellegzetes elektron pályamenet az UPS berendezés lencserendszerében, a:  $K=1$ , b:  $K=10$ , c:  $K=25$  gyorsítási tényező és  $E_p = 5\text{eV}$  mellett

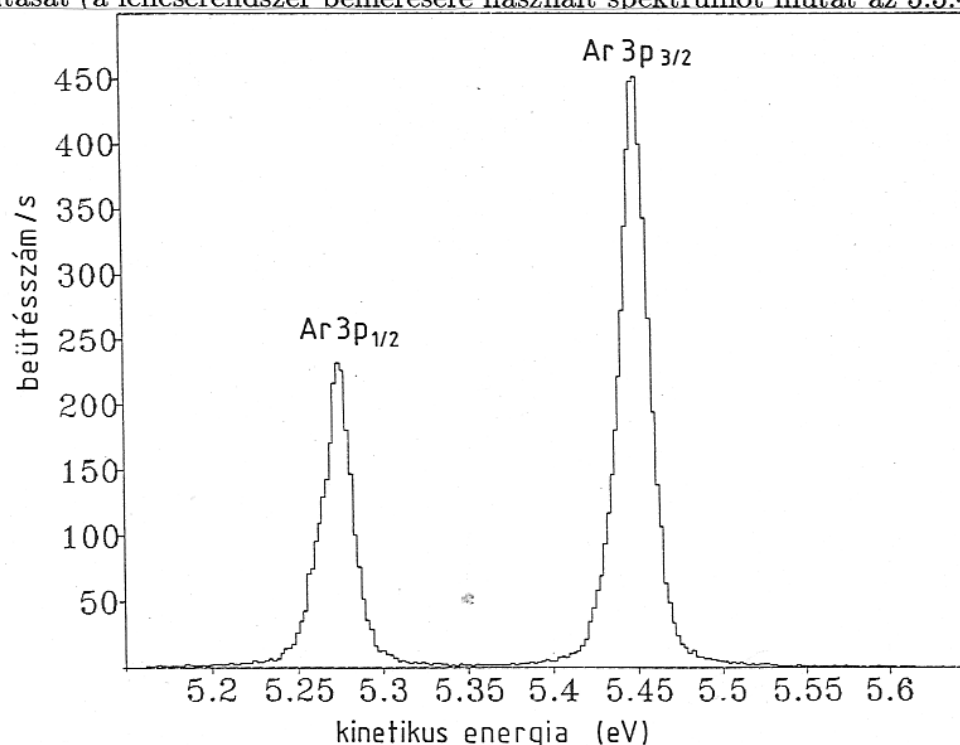
5.5.3.2.ábra Emittancia ábrák az UPS berendezés lencserendszerében, a:  $K=1$ , b:  $K=10$ , c:  $K=25$  gyorsítási tényező és  $E_p = 5\text{eV}$  mellett

#### 5.5.4. A lencserendszer kísérleti ellenőrzése

Az UPS berendezés lencserendszere 1990 novemberében készült el az ATOMKI-ban. Valós méretei a következők:

- a lencserendszer sugara 29 mm
- a minta és a lencse első elektródjának távolsága 22 mm
- a lencse elektródáinak hosszai: 40.8 mm, 56 mm, 56 mm, 172 mm, 56 mm, 56 mm, 84.5 mm
- a lencse teljes hossza 571.3 mm

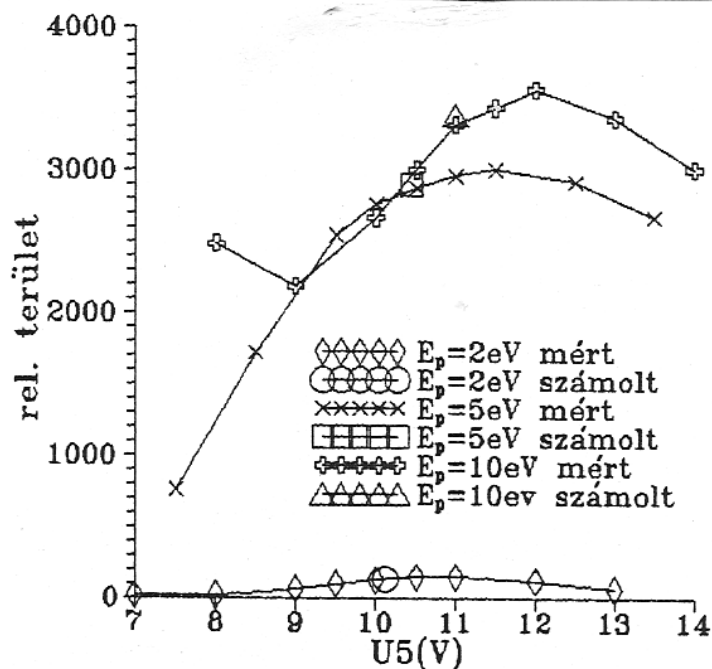
A lencserendszer kísérleti ellenőrzését úgy oldottuk meg, hogy a hételemes lencse potenciáljai közül hat elemre a számolt potenciálértékek kerültek, a hetedikre ( $V_5$ ) kívülről változtatható potenciálértéket adtunk és így néztük a  $HeI\alpha$ , ( $E = 21.218\text{eV}$ ) ultraibolya sugárzással az Ar 3p héjról kilökött fotoelektronok intenzitását (a lencserendszer bemérésére használt spektrumot mutat az 5.5.4.1. ábra).



**5.5.4.1. ábra**  $HeI\alpha$ , ( $E = 21.218\text{eV}$ ) ultraibolya sugárzással az Ar 3p héjról kilökött fotoelektronok spektruma, amikor az analizátoron átmenő elektronok energiája 2 eV ( $E_p = 2\text{eV}$ )

A lencserendszer kísérleti ellenőrzésének eredményét az 5.5.4.2. ábrán ábrázoltam. A számolt potenciálérték 5% - 7% -ra egyezik a kísérletileg mért optimális

értékkel. Ez az eredmény a kísérleti és számolt potenciálértékek igen jó egyezését jelenti, figyelembe véve, hogy az elkészült berendezésben az elektronpályákra a lencsén kívül valamilyen mértékben a mágneses tér is hat.



**5.5.4.2.ábra** 2,5 és 10 eV átmenő energián mért  $HeI\alpha$ , ( $E = 21.218\text{eV}$ ) ultraibolya sugárzással az Ar 3p héjról kilökött fotoelektronok relatív intenzitása, változó  $V_5$  potenciálértékek és a számolt potenciálérték mellett

## 6. Összefoglalás

Dolgozatomban két, viszonylag összetett fotoelektron-spektroszkópiai berendezés (XPS, UPS) tervezésével és építésével kapcsolatos elektronoptikai számításaimat, illetve a kísérleti bemérési eredményeimet ismertetem. Munkám első részét egy elektronoptikai programcsomag kifejlesztése képezte, amit a későbbiekben több, elemzést, optimalizálást segítő programmal egészítettem ki. A programcsomag lehetővé teszi a potenciáeloszlás sorfejtéssel és numerikus módszerrel történő kiszámítását, a kiszámított terekben az elektronpályák meghatározását, továbbá egy adott elektronoptikai elem paramétereinek különböző szempontok szerinti optimalizálását. Az említett programokat FORTRAN programozási nyelven fejlesztettem ki. A programok IBM AT, XT számítógépeken futnak.

A két berendezés energiadiszipatív elemeinek tervezésével kapcsolatban elvégeztem két új elektrosztatikus analizátor tulajdonságainak részletes elemzését.

Ezek közül az első az úgynevezett kúpos lezárású, torzított terű hengertükrös analizátor (4.2. fejezet) volt, amely kibővíti a hengertükrök alkalmazhatóságát a felületfizikai kutatásokban, mivel elektronoptikai tulajdonságai (fókuszálás, diszperzió) hasonlóak, mint a korábbi síktárcsás lezárású analizátornak, de a kúpos lezárás miatt kedvezőbb besugárzási feltételeket nyújt. Viszonylag nagy térszögű, könnyen gyártható, olcsó megoldású analizátor. Két ilyen analizátor összekapcsolása esetén a kedvező besugárzási geometria megtartásával, nagyon jól használható koincidencia mérésekhez, az előbb említett nagy térszöge miatt.

A második a nem koaxiális hengertükrös típusú analizátor (4.3. fejezet) volt, ami az irodalomból jól ismert analizátor, a "végtelen", koaxiális, hengerekből álló hengertükrös általánosításának eredményeként született. Számításaimból kiderült, hogy az új típusú hengertükrös rendelkezik első- és másodrendű fókusszal, a diszperziója nagyobb, a bemenő térszöge viszont kisebb, mint a klasszikus hengertükröké. Ezen tulajdonságai és egyszerű felépítése valamint olcsó kivitelezhetősége alkalmassá teszi analizátorként, nagyszögű eltérítő és fókuszáló elemként való alkalmazásra (ez utóbbi minőségben kerül felhasználásra a felületvizsgálati XPS berendezésben).

Az analizátorokat kiszolgáló transzport elemek tervezését az ismert háromelemes, hengeres lencsék vizsgálatával kezdtem, amelynek során, az aberrációs hibák csökkentésére törekedve, eljutottunk egy "dobozos" változathoz, ami nem más, mint a két végén síktárcsával lezárt henger. Mivel e változat elektronoptikai tu-

lajdonságai kedvezőnek bizonyultak (rövidebb fókusztávolságok, kisebb kitöltési tényező, illetve aberrációs hiba) és az irodalomban ilyen elrendezésű lencsék leírása eddig nem szerepelt, külön táblázatba foglaltam néhány fókusztávolságok, fősíkok, a fókuszfeszültség függvényében, a legfontosabb adatait (fókusztávolságok, fősíkok).

A fenti számításokat kiterjesztettem a hasonló elrendezésű ("doboz" típusú) ötelemes lencsékre, amelyek egyidejűleg több követelménynek tudnak eleget tenni (rögzített tárgy és képtávolság, konstans lineáris nagyítási tényező a változó fékezési vagy gyorsítási arány mellett). Gyakorlati szempontokból fontos eredmény, hogy a fókusztávolságok hosszának megválasztásával sikerült valamennyi fókuszfeszültséget lineárisra tenni a fenti követelmények teljesítése mellett.

A három és ötelemes "doboz" típusú lencsék kombinálásával, valamint kisebb módosításával terveztem meg az XPS berendezés lencserendszerét, amelynek tárgy és képtávolsága, lineáris nagyítási tényezője ( $M=-1$ ) konstans az  $1\div 40$  fékezési tartományban, továbbá közbenső fókuszpont kialakításával lehetővé teszi a mintakamra és analizátorkamra vákuumterének szeparálását, valamint az analizátor fix átmenő energiájú üzemmódját.

Az UPS berendezés előzőektől eltérő konstrukciós követelményei miatt a lencserendszer is más elemekből épült fel. Közbenső fókuszpontok nélkül, két négyelemes lencse végzi a mintából kilépő elektronok fókusztávolságát az analizátor bemenetére. A spektrumok felvétele során az első fokozat a kiválasztott energiájú ( $E_0$ ) különböző szög alatt repülő elektronokat 25 eV energiájú párhuzamos nyalábbá alakítja, míg a második fokozat, az analizátornak megfelelő energiára ( $E_p$ ) fékezi az elektronokat, miközben valamennyi fókuszfeszültség az  $E_0$  vagy  $E_p$  energia lineáris függvénye.

Mindkét lencserendszer kísérleti ellenőrzése igazolta a számolási eredményeket. A számolt és a kísérletileg meghatározott potenciálértékek 2% - 8% -ra egyeznek meg.

## 7. Summary

Electronoptical calculations for the design and construction of two photoelectron-spectrometers (XPS, UPS), and the experimental testing of these instruments are described in this thesis. At the beginning of my work I had to develop a bunch of electronoptical programs. I computed the features of electronoptical systems on the basis of either their numerical potential distribution or the expansion of a given potential. The programs are capable of solving many different electronoptical problems (e.g. determination of the electron trajectories in the calculated field and/or optimization of the parameters of a given electronoptical element). These programs have been developed in FORTRAN language and run on IBM XT/AT computers.

Calculations related to the energy dispersive elements of the two instruments, include the investigation of two new types of electrostatic analyzers.

The first of the above analyzers is the so-called "conically ended electrostatic analyzer with distorted field". This kind of analyzers extends the applicability of the cylindrical mirror analyzers in surface physics, because their properties are similar to those of the former distorted field cylindrical analyzers. Moreover, due to the conical closure, the irradiation geometry becomes much better. Connecting two such elements while keeping the good irradiation geometry, they can be easily used in coincidence measurements.

The second type of analyzers investigated is a "noncoaxial cylindrical mirror analyzer". It is a generalization of the well-known "infinite", coaxial cylindrical mirror analyzer. This new type of cylindrical mirror analyzers has got a focus of both first and second order, and has a larger dispersion than the classical one. These characteristics and that it is simple to construct and is inexpensive to produce make it appropriate to be used as an analyzer or a large angle deflecting and focusing element. (It is planned to be used as a connecting deflector in XPS equipments.)

The design of the transport elements of the analyzers was started by the study of three-element lenses, because they are the simplest having a focussing potential. Our efforts to decrease the aberration coefficients (i.e. decrease of the filling ratio) and constructional reasons led us to form a traditional three-element lens of box-

like shape. The box type lens is a cylindrical type lens having coaxial discs at the ends. In this way we get strongly focussing lenses.

Perceiving the beneficial characters of the three-element box type lenses we have studied also the five-element ones. It is an important result, from practical point of view, that by choosing the lengths of the cylinders properly, it is possible to linearize all the focussing potentials while keeping

1. the object and image distance and
2. the linear magnification, for varying deceleration fixed.

The lens system of the XPS apparatus is able to transfer the electron beam from a fixed point to a fixed point, independently of the deceleration coefficient ( $1 \leq F \leq 40$ ), while the linear magnification of the lens system remains constant ( $M = -1$ ) and a parallel input beam is transformed in to a parallel output beam. We worked this lens system out by using three separated lenses. (prior- and post lenses (to transport the electrons), decelerating lens (to decrease the energy of the electrons))

The electrons, coming from the sample at a energy and angle are transformed in to a parallel electron beam having 25 eV energy by the help of the first part of the UPS lens system, while the second part of UPS lens system collects the electrons to the aperture of the analyzer and decelerates them to the final energy (2eV-10eV) corresponding to the pass energy of the analyzers.

The experimental results justified the calculations. The measured and computed potential values agreed with each other in 2% -8% .

## 8. Függelék

### 8.1. Formulák a véges differenciák módszere, változó méretű rácshálózat eseteire

A 3.1.1.1. ábra jelöléseit használva.

Ha  $h_1 = h_2 = h$ , és  $l_1 \neq l_2$

$$A_1 = \left[ (l_1 + l_2)(h^2 + l_1 l_2) + \frac{h^2(l_1^2 - l_2^2)}{2r_0} \right]^{-1} \quad (8.1.1)$$

$$A_2 = \frac{l_1 l_2 (l_1 + l_2)}{2} \quad (8.1.2)$$

$$A_3 = h^2 \left( 1 + \frac{l_1}{2r_0} \right) \quad (8.1.3)$$

$$A_4 = h^2 \left( 1 - \frac{l_2}{2r_0} \right) \quad (8.1.4)$$

$$V_0 = A_1 [A_3 V_1 l_1 + A_4 V_3 l_2 + A_2 (V_2 + V_4)] \quad (8.1.5)$$

Ha  $l_1 = l_2 = l$ , és  $h_1 \neq h_2$

$$B_1 = (l^2 + h_1 h_2)^{-1} \quad (8.1.6)$$

$$B_2 = \frac{l^2}{h_1 + h_2} \quad (8.1.7)$$

$$B_3 = \frac{h_1 h_2}{2} \left( 1 + \frac{l}{2r_0} \right) \quad (8.1.8)$$

$$B_4 = \frac{h_1 h_2}{2} \left( 1 - \frac{l}{2r_0} \right) \quad (8.1.9)$$

$$V_0 = B_1 [B_3 V_1 + B_4 V_3 + B_2 (V_2 + V_4)] \quad (8.1.10)$$

Ha  $l_1 = l_2 = l$ , és  $h_1 = h_2 = h$

$$C_1 = [2(l^2 + h^2)]^{-1} \quad (8.1.11)$$

$$C_2 = h^2 \left( 1 + \frac{l}{2r_0} \right) \quad (8.1.12)$$

$$C_3 = h^2 \left( 1 - \frac{l}{2r_0} \right) \quad (8.1.13)$$

$$V_0 = C_1 [C_2 V_1 + C_3 V_3 + l^2 (V_2 + V_4)] \quad (8.1.14)$$

Ha  $l_1 = l_2 = h_1 = h_2 = h$

$$D_1 = 1 + \frac{l}{2r_0} \quad (8.1.15)$$

$$D_2 = 1 - \frac{l}{2r_0} \quad (8.1.16)$$

$$V_0 = \frac{1}{4} (D_1 V_1 + D_2 V_3 + V_2 + V_4) \quad (8.1.17)$$

## 8.2. Optimalizálандó függvények az elektronoptikai számításaimban

Egy feltételes optimalizálás eseteire:

1. Adott pontba történő fókuszálás keresésére:

$$F_1 = |z_{ki} - z_f| \quad (8.2.1)$$

ahol  $z_{ki}$  a lencséből vagy az analizátorból való kilépés  $z$  koordinátája,  $z_f$  az "optimális" fókuszpont  $z$  koordinátája.

2. A párhuzamos nyalábmenet vizsgálatára:

$$F_2 = |b| \quad (8.2.2)$$

ahol  $b$  az elektronpálya adott szakaszára illesztett egyenes iránytangense.

3. A lineáris nagyítás beállítására:

$$F_3 = \left| M - \frac{r_{be}}{r_{ki}} \right| \quad (8.2.3)$$

ahol  $M$  a beállítani kívánt nagyítás értéke,  $r_{be}$  a lencsébe vagy analizátorba belépő elektronnyaláb  $r$  koordinátája,  $r_{ki}$  a lencséből vagy analizátorból kilépő elektronnyaláb  $r$  koordinátája.

4. Az átviteli függvény optimalizálására:

$$F_4 = |B| \quad (8.2.4)$$

ahol  $B$  az emittancia ábra  $(r_{konstans}, \alpha)$  oldalaira illesztett egyenes iránytangense.

5. Másodrendű fókusz keresésére:

$$F_5 = |bb| \quad (8.2.4)$$

ahol  $bb$  az  $(L, \alpha)$  görbe kiválasztott szakaszára illesztett egyenes iránytangense.

Több feltételes optimalizálás esetén a fenti egyenletekből előállított 8.2.6 típusú függvények szélsőértékét keresem.

$$F = \sum c_i F_i \quad (8.2.6)$$

ahol  $c_i$  a megfelelő függvények súlyfaktorai.

### 8.3. Táblázatok a három elemes doboz típusú lencsék jellemző paramétereivel

**8.3.1. Táblázat** A táblázat jelölései:  $f_1$  - tárgyoldali fókusz távolság,  $f_2$  - képoldali fókusz távolság,  $F_1$  - a tárgyoldali fókuszpont és a lencse geometriai középvonalának a távolsága,  $F_2$  - a képoldali fókuszpont és a lencse geometriai középvonalának a távolsága,  $p_1$  - az első fősík és a lencse első elemének távolsága,  $p_2$  - a második fősík és a lencse első elemének távolsága, (a lencse első eleme a koordináta-rendszer xy síkjában van, szimmetria tengely a z tengely)  $V_1, V_2, V_3$  - A három elemes lencse elektródáinak potenciálértékei, az adatok R egységekben értendők.

| $L = 2R, \quad V_3/V_1 = 0.1$ |        |         |        |         |        |        |
|-------------------------------|--------|---------|--------|---------|--------|--------|
| $V_2/V_1$                     | $f_1$  | $f_2$   | $F_1$  | $F_2$   | $p_1$  | $p_2$  |
| -1.000                        | 1.558  | 3.111   | 1.064  | 2.826   | 5.493  | 1.605  |
| -0.600                        | 2.111  | 6.775   | 1.560  | 2.002   | 5.551  | 0.227  |
| -0.500                        | 2.251  | 7.702   | 1.689  | 2.525   | 5.562  | -0.177 |
| -0.400                        | 2.391  | 8.619   | 1.819  | 3.102   | 5.572  | -0.517 |
| -0.300                        | 2.532  | 9.517   | 1.952  | 3.681   | 5.580  | -0.837 |
| -0.200                        | 2.672  | 10.391  | 2.086  | 4.262   | 5.586  | -1.129 |
| -0.100                        | 2.813  | 11.236  | 2.223  | 4.848   | 5.590  | -1.388 |
| 0.000                         | 2.953  | 11.410  | 2.361  | 5.426   | 5.591  | -0.984 |
| 0.100                         | 3.093  | 11.400  | 2.502  | 5.973   | 5.590  | -0.428 |
| 0.200                         | 3.232  | 11.432  | 2.645  | 6.496   | 5.587  | 0.064  |
| 0.300                         | 3.370  | 11.498  | 2.791  | 7.003   | 5.579  | 0.505  |
| 0.400                         | 3.507  | 11.594  | 2.938  | 7.498   | 5.568  | 0.903  |
| 0.500                         | 3.642  | 11.717  | 3.088  | 7.985   | 5.554  | 1.268  |
| 0.600                         | 3.775  | 11.865  | 3.241  | 8.469   | 5.534  | 1.604  |
| 0.800                         | 4.032  | 12.228  | 3.553  | 9.437   | 5.478  | 2.209  |
| 1.000                         | 4.272  | 12.677  | 3.875  | 10.423  | 5.397  | 2.746  |
| 1.100                         | 4.383  | 12.933  | 4.040  | 10.928  | 5.344  | 2.995  |
| 1.200                         | 4.488  | 13.211  | 4.206  | 11.445  | 5.281  | 3.234  |
| 1.300                         | 4.584  | 13.510  | 4.376  | 11.975  | 5.208  | 3.465  |
| 1.400                         | 4.670  | 13.833  | 4.547  | 12.522  | 5.123  | 3.689  |
| 1.500                         | 4.745  | 14.118  | 4.720  | 13.086  | 5.025  | 3.908  |
| 1.600                         | 4.806  | 14.549  | 4.894  | 13.671  | 4.912  | 4.122  |
| 1.800                         | 5.025  | 15.373  | 5.250  | 14.914  | 4.776  | 4.541  |
| 2.000                         | 5.332  | 16.318  | 5.626  | 16.273  | 4.707  | 4.956  |
| 2.500                         | 6.323  | 19.366  | 6.711  | 20.394  | 4.612  | 6.028  |
| 3.000                         | 7.794  | 22.390  | 8.157  | 26.175  | 4.637  | 7.278  |
| 4.000                         | 14.559 | 44.741  | 14.188 | 51.508  | 5.371  | 11.767 |
| 5.000                         | 97.590 | 298.359 | 84.555 | 352.533 | 18.036 | 59.174 |
| 8.000                         | 6.418  | 20.163  | 2.794  | 24.013  | 1.376  | 1.150  |
| 10.000                        | 3.844  | 12.240  | 0.395  | 14.220  | 1.551  | 3.020  |
| 15.000                        | 1.961  | 6.521   | 1.594  | 6.770   | 1.445  | 4.751  |
| 20.000                        | 1.315  | 4.628   | 2.420  | 4.092   | 1.264  | 5.536  |

8.3.2. **Táblázat** A táblázat jelölései megegyeznek a 8.3.1 táblázat jelöléseivel

| $L = 2R, \quad V_3/V_1 = 1$ |        |        |        |        |       |       |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| $V_2/V_1$                   | $f_1$  | $f_2$  | $F_1$  | $F_2$  | $p_1$ | $p_2$ |
| -0.400                      | 0.071  | 0.071  | 0.8624 | 0.8624 | 5.933 | 4.067 |
| -0.300                      | 1.462  | 1.462  | 0.104  | 0.104  | 6.358 | 3.642 |
| -0.200                      | 3.005  | 3.005  | 1.173  | 1.173  | 6.831 | 3.168 |
| -0.100                      | 4.743  | 4.743  | 2.370  | 2.370  | 7.373 | 2.627 |
| 0.000                       | 6.704  | 6.704  | 3.723  | 3.723  | 7.981 | 2.019 |
| 0.100                       | 8.617  | 8.617  | 5.273  | 5.273  | 8.344 | 1.656 |
| 0.200                       | 9.471  | 9.471  | 6.922  | 6.922  | 7.549 | 2.451 |
| 0.300                       | 10.707 | 11.071 | 8.741  | 8.741  | 6.966 | 3.034 |
| 0.400                       | 12.445 | 12.445 | 10.931 | 10.931 | 6.515 | 3.485 |
| 0.500                       | 14.945 | 14.945 | 13.795 | 13.795 | 6.150 | 3.850 |
| 0.600                       | 11.875 | 18.747 | 17.899 | 17.899 | 5.847 | 4.153 |
| 0.700                       | 25.130 | 25.130 | 24.540 | 24.540 | 5.590 | 4.410 |
| 0.800                       | 37.945 | 37.945 | 37.577 | 37.577 | 5.368 | 4.632 |
| 0.900                       | 76.455 | 76.455 | 76.282 | 76.282 | 5.173 | 4.827 |
| 1.100                       | 77.710 | 77.710 | 77.555 | 77.555 | 4.845 | 5.155 |
| 1.200                       | 39.187 | 39.187 | 38.893 | 38.893 | 4.705 | 5.295 |
| 1.300                       | 26.352 | 26.352 | 25.929 | 25.929 | 4.578 | 5.422 |
| 1.400                       | 19.936 | 19.936 | 19.397 | 19.397 | 4.461 | 5.539 |
| 1.500                       | 16.087 | 16.087 | 15.441 | 15.441 | 4.354 | 5.646 |
| 1.600                       | 13.522 | 13.522 | 12.776 | 12.776 | 4.254 | 5.746 |
| 1.800                       | 10.315 | 10.315 | 9.390  | 9.390  | 4.075 | 5.925 |
| 2.000                       | 8.389  | 8.389  | 7.308  | 7.308  | 3.919 | 6.081 |
| 2.500                       | 5.815  | 5.815  | 4.412  | 4.412  | 3.597 | 6.403 |
| 3.000                       | 4.518  | 4.518  | 2.863  | 2.863  | 3.345 | 6.655 |
| 4.000                       | 3.202  | 3.202  | 1.170  | 1.170  | 2.967 | 7.033 |
| 5.000                       | 2.527  | 2.527  | 2.163  | 2.163  | 2.689 | 7.311 |
| 6.000                       | 2.109  | 2.109  | 4.189  | 4.189  | 2.472 | 7.528 |
| 8.000                       | 1.609  | 1.609  | 1.247  | 1.247  | 2.144 | 7.856 |
| 10.000                      | 1.312  | 1.312  | 1.788  | 1.788  | 1.901 | 8.099 |
| 15.000                      | 0.896  | 0.896  | 2.632  | 2.632  | 1.473 | 8.527 |
| 20.000                      | 0.658  | 0.658  | 3.174  | 3.174  | 1.167 | 8.833 |

## 8.3.3. Táblázat A táblázat jelölései megegyeznek a 8.3.1 táblázat jelöléseivel

| $L = 2R, \quad V_3/V_1 = 10$ |         |        |         |        |        |        |
|------------------------------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|
| $V_2/V_1$                    | $f_1$   | $f_2$  | $F_1$   | $F_2$  | $p_1$  | $p_2$  |
| -0.100                       | 3.112   | 1.558  | 0.283   | 1.065  | 8.394  | 4.506  |
| 0.000                        | 11.410  | 2.953  | 5.426   | 2.362  | 10.985 | 4.409  |
| 0.100                        | 12.677  | 4.272  | 10.423  | 3.875  | 7.254  | 4.603  |
| 0.200                        | 16.318  | 5.332  | 16.273  | 5.626  | 5.044  | 5.293  |
| 0.300                        | 23.897  | 7.794  | 26.175  | 8.157  | 2.722  | 5.363  |
| 0.400                        | 44.741  | 14.559 | 51.508  | 14.188 | -1.767 | 4.629  |
| 0.500                        | 298.359 | 97.590 | 352.533 | 88.455 | -49174 | -8.036 |
| 0.600                        | 66.741  | 21.451 | 79.764  | 15.789 | 18.024 | 10.663 |
| 0.700                        | 30.652  | 9.812  | 36.695  | 5.798  | 11.043 | 9.014  |
| 0.800                        | 20.163  | 6.418  | 24.013  | 2.794  | 8.850  | 8.624  |
| 0.900                        | 15.166  | 4.797  | 17.875  | 1.305  | 7.709  | 8.491  |
| 1.000                        | 12.240  | 3.844  | 14.220  | 0.395  | 6.980  | 8.449  |
| 1.100                        | 10.317  | 3.215  | 11.776  | 0.231  | 6.459  | 8.446  |
| 1.200                        | 8.955   | 2.768  | 10.015  | 0.694  | 6.060  | 8.462  |
| 1.300                        | 7.939   | 2.433  | 8.679   | 1.056  | 5.740  | 8.489  |
| 1.400                        | 7.151   | 2.171  | 7.625   | 1.349  | 5.474  | 8.521  |
| 1.500                        | 6.521   | 1.961  | 6.770   | 1.594  | 5.249  | 8.555  |
| 1.600                        | 6.006   | 1.788  | 6.059   | 1.804  | 5.053  | 8.591  |
| 1.800                        | 5.213   | 1.518  | 4.940   | 2.146  | 4.727  | 8.664  |
| 2.000                        | 4.628   | 1.315  | 4.092   | 2.421  | 4.464  | 8.736  |
| 2.500                        | 3.667   | 0.971  | 2.641   | 2.934  | 3.973  | 8.905  |
| 3.000                        | 3.079   | 0.745  | 1.701   | 3.317  | 3.622  | 9.062  |
| 4.000                        | 2.382   | 0.436  | 0.516   | 3.927  | 3.135  | 9.362  |
| 5.000                        | 1.974   | 0.152  | 0.227   | 4.599  | 2.799  | 9.751  |

8.3.4. **Táblázat** A táblázat jelölései megegyeznek a 8.3.1 táblázat jelöléseivel

| $L = 3R, \quad V_3/V_1 = 0.1$ |        |         |        |         |        |         |
|-------------------------------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|
| $V_2/V_1$                     | $f_1$  | $f_2$   | $F_1$  | $F_2$   | $p_1$  | $p_2$   |
| -0.300                        | 1.825  | 0.129   | 0.746  | 3.037   | 10.071 | 4.334   |
| -0.200                        | 2.001  | 1.856   | 0.670  | 1.861   | 10.171 | 3.783   |
| -0.100                        | 2.177  | 3.843   | 0.516  | 0.550   | 10.194 | 3.107   |
| 0.000                         | 2.356  | 6.159   | 0.360  | 0.902   | 10.216 | 2.243   |
| 0.100                         | 2.537  | 8.776   | 0.201  | 2.462   | 10.237 | 1.185   |
| 0.200                         | 2.721  | 11.439  | 0.036  | 4.049   | 10.184 | 0.110   |
| 0.300                         | 2.905  | 13.737  | 0.127  | 5.567   | 10.279 | -0.669  |
| 0.400                         | 3.093  | 15.429  | 0.295  | 6.962   | 10.298 | -0.967  |
| 0.500                         | 3.283  | 15.235  | 0.466  | 8.205   | 10.317 | 0.470   |
| 0.600                         | 3.476  | 14.367  | 0.641  | 9.233   | 10.335 | 2.366   |
| 0.700                         | 3.671  | 13.795  | 0.819  | 10.121  | 10.352 | 3.826   |
| 0.800                         | 3.869  | 13.418  | 1.000  | 10.921  | 10.368 | 5.002   |
| 0.900                         | 4.069  | 13.177  | 1.186  | 11.661  | 10.383 | 5.985   |
| 1.000                         | 4.272  | 13.036  | 1.375  | 12.364  | 10.397 | 6.828   |
| 1.100                         | 4.477  | 12.972  | 1.568  | 13.041  | 10.409 | 7.569   |
| 1.200                         | 4.684  | 12.970  | 1.765  | 13.704  | 10.419 | 8.234   |
| 1.300                         | 4.893  | 13.019  | 1.966  | 14.358  | 10.427 | 8.839   |
| 1.400                         | 5.105  | 13.113  | 2.172  | 15.012  | 10.433 | 9.399   |
| 1.500                         | 5.318  | 13.246  | 2.382  | 15.669  | 10.436 | 9.923   |
| 1.600                         | 5.532  | 13.415  | 2.597  | 16.334  | 10.436 | 10.419  |
| 1.800                         | 5.964  | 13.852  | 3.041  | 17.705  | 10.423 | 11.353  |
| 2.000                         | 6.394  | 14.414  | 3.505  | 19.155  | 10.389 | 12.241  |
| 2.500                         | 7.399  | 16.395  | 4.766  | 23.334  | 10.134 | 14.439  |
| 3.000                         | 8.008  | 19.415  | 6.176  | 28.821  | 9.331  | 16.906  |
| 4.000                         | 10.227 | 32.013  | 9.615  | 49.484  | 8.111  | 24.971  |
| 5.000                         | 30.595 | 93.513  | 23.203 | 145.744 | 14.892 | 59.730  |
| 6.000                         | 32.321 | 105.979 | 17.091 | 163.564 | -7.730 | -50.085 |
| 8.000                         | 6.568  | 20.962  | 0.008  | 30.756  | 0.924  | -2.294  |
| 10.000                        | 3.755  | 12.016  | 2.159  | 16.339  | 1.586  | 3.177   |
| 15.000                        | 1.885  | 6.171   | 3.923  | 6.437   | 1.691  | 7.234   |
| 20.000                        | 1.280  | 4.341   | 4.682  | 3.088   | 1.538  | 8.752   |

## 8.3.5. Táblázat A táblázat jelölései megegyeznek a 8.3.1 táblázat jelöléseivel

| $L = 3R, \quad V_3/V_1 = 1$ |        |        |        |        |        |        |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $V_2/V_1$                   | $f_1$  | $f_2$  | $F_1$  | $F_2$  | $p_1$  | $p_2$  |
| -0.1000                     | 1.024  | 1.024  | 1.665  | 1.665  | 1.019  | 4.809  |
| 0.0000                      | 2.857  | 2.857  | 0.189  | 0.189  | 10.547 | 4.452  |
| 0.1000                      | 5.079  | 5.079  | 1.572  | 1.572  | 11.006 | 3.993  |
| 0.2000                      | 7.978  | 7.979  | 3.722  | 3.797  | 11.755 | 3.317  |
| 0.3000                      | 11.882 | 11.882 | 6.374  | 6.374  | 13.008 | 1.991  |
| 0.4000                      | 14.223 | 14.223 | 9.497  | 9.497  | 12.226 | 2.773  |
| 0.5000                      | 16.217 | 16.217 | 12.938 | 12.938 | 10.778 | 4.221  |
| 0.6000                      | 19.654 | 19.654 | 17.392 | 17.392 | 9.761  | 5.238  |
| 0.7000                      | 25.715 | 25.715 | 24.217 | 24.217 | 8.997  | 6.002  |
| 0.8000                      | 38.142 | 38.142 | 37.246 | 37.246 | 8.396  | 6.603  |
| 0.9000                      | 75.823 | 75.823 | 75.415 | 75.415 | 7.907  | 7.092  |
| 1.1000                      | 75.630 | 75.630 | 75.283 | 75.283 | 7.152  | 7.847  |
| 1.2000                      | 37.883 | 37.883 | 37.236 | 37.236 | 6.852  | 8.147  |
| 1.3000                      | 25.335 | 25.335 | 24.424 | 24.424 | 6.589  | 8.410  |
| 1.4000                      | 19.080 | 19.080 | 17.935 | 17.935 | 6.355  | 8.644  |
| 1.5000                      | 15.338 | 15.338 | 13.985 | 13.985 | 6.146  | 8.853  |
| 1.6000                      | 12.851 | 12.851 | 11.310 | 11.310 | 5.958  | 9.041  |
| 1.8000                      | 9.754  | 9.754  | 7.885  | 7.885  | 5.630  | 9.369  |
| 2.0000                      | 7.905  | 7.905  | 5.758  | 5.758  | 5.353  | 9.646  |
| 2.5000                      | 5.449  | 5.449  | 2.761  | 2.761  | 4.812  | 10.187 |
| 3.0000                      | 4.223  | 4.223  | 1.134  | 1.134  | 4.410  | 10.589 |
| 4.0000                      | 2.990  | 2.990  | 0.670  | 0.670  | 3.839  | 11.160 |
| 5.0000                      | 2.362  | 2.362  | 1.696  | 1.696  | 3.441  | 11.558 |
| 6.0000                      | 1.977  | 1.977  | 2.382  | 2.382  | 3.139  | 11.860 |
| 8.0000                      | 1.518  | 1.518  | 3.278  | 3.278  | 2.702  | 12.297 |
| 10.0000                     | 1.248  | 1.248  | 3.862  | 3.862  | 2.389  | 12.610 |
| 15.0000                     | 0.874  | 0.874  | 4.761  | 4.761  | 1.864  | 13.135 |
| 20.0000                     | 0.665  | 0.665  | 5.322  | 5.322  | 1.511  | 13.488 |

8.3.6. **Táblázat** A táblázat jelölései megegyeznek a 8.3.1 táblázat jelöléseivel

| $L = 3R, \quad V_3/V_1 = 10$ |         |        |         |        |         |        |
|------------------------------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
| $V_2/V_1$                    | $f_1$   | $f_2$  | $F_1$   | $F_2$  | $p_1$   | $p_2$  |
| 0.0000                       | 6.159   | 2.355  | 0.902   | 0.360  | 12.757  | 4.784  |
| 0.1000                       | 13.035  | 4.271  | 12.363  | 1.375  | 8.171   | 4.603  |
| 0.2000                       | 14.414  | 6.394  | 19.155  | 3.505  | 2.758   | 4.611  |
| 0.3000                       | 19.415  | 8.007  | 28.821  | 6.176  | -1.905  | 5.668  |
| 0.4000                       | 32.013  | 10.226 | 49.484  | 9.615  | -9.971  | 6.888  |
| 0.5000                       | 93.513  | 30.595 | 145.743 | 23.203 | -44.730 | 10.078 |
| 0.6000                       | 105.978 | 32.321 | 163.563 | 17.091 | 65.084  | 22.730 |
| 0.7000                       | 34.575  | 10.799 | 52.240  | 2.937  | 25.164  | 15.362 |
| 0.8000                       | 20.961  | 6.567  | 30.756  | 0.008  | 17.294  | 14.075 |
| 0.9000                       | 15.198  | 4.759  | 21.523  | 1.355  | 13.824  | 13.615 |
| 1.0000                       | 12.015  | 3.754  | 16.339  | 2.159  | 11.823  | 13.414 |
| 1.1000                       | 9.996   | 3.114  | 12.995  | 2.709  | 10.499  | 13.323 |
| 1.2000                       | 8.599   | 2.668  | 10.644  | 3.118  | 9.545   | 13.286 |
| 1.3000                       | 7.575   | 2.339  | 8.892   | 3.439  | 8.817   | 13.279 |
| 1.4000                       | 6.791   | 2.086  | 7.530   | 3.702  | 8.239   | 13.289 |
| 1.5000                       | 6.171   | 1.885  | 6.437   | 3.923  | 7.766   | 13.308 |
| 1.6000                       | 5.668   | 1.721  | 5.537   | 4.113  | 7.369   | 13.334 |
| 1.8000                       | 4.900   | 1.467  | 4.136   | 4.428  | 6.735   | 13.395 |
| 2.0000                       | 4.340   | 1.280  | 3.088   | 4.681  | 6.247   | 13.462 |
| 2.5000                       | 3.430   | 0.967  | 1.320   | 5.161  | 5.389   | 13.628 |
| 3.0000                       | 2.878   | 0.767  | 0.194   | 5.517  | 4.816   | 13.784 |
| 4.0000                       | 2.231   | 0.510  | 1.200   | 6.058  | 4.068   | 14.068 |
| 5.0000                       | 1.855   | 0.328  | 2.062   | 6.513  | 3.582   | 14.341 |
| 6.0000                       | 1.604   | 0.147  | 2.664   | 7.032  | 3.230   | 14.680 |

8.3.7. Táblázat A táblázat jelölései megegyeznek a 8.3.1 táblázat jelöléseivel

| $L = 4R, \quad V_3/V_1 = 0.1$ |        |        |        |        |        |         |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| $V_2/V_1$                     | $f_1$  | $f_2$  | $F_1$  | $F_2$  | $p_1$  | $p_2$   |
| -0.1000                       | 2.118  | 0.877  | 2.936  | 4.225  | 15.054 | 4.896   |
| 0.0000                        | 2.301  | 2.709  | 2.878  | 2.741  | 15.179 | 4.549   |
| 0.1000                        | 2.485  | 4.938  | 2.717  | 0.965  | 15.203 | 4.096   |
| 0.2000                        | 2.672  | 7.933  | 2.553  | 1.202  | 15.226 | 3.269   |
| 0.3000                        | 2.861  | 12.326 | 2.387  | 3.825  | 15.248 | 1.499   |
| 0.4000                        | 3.053  | 17.412 | 2.217  | 6.641  | 15.271 | -0.770  |
| 0.5000                        | 3.248  | 20.197 | 2.044  | 9.062  | 15.292 | -1.135  |
| 0.6000                        | 3.446  | 18.620 | 1.867  | 10.898 | 15.314 | 2.277   |
| 0.7000                        | 3.648  | 16.217 | 1.687  | 12.191 | 15.335 | 5.973   |
| 0.8000                        | 3.852  | 14.744 | 1.503  | 13.201 | 15.356 | 8.457   |
| 0.9000                        | 4.060  | 13.776 | 1.316  | 14.057 | 15.376 | 10.280  |
| 1.0000                        | 4.271  | 13.115 | 1.124  | 14.820 | 15.396 | 11.705  |
| 1.1000                        | 4.486  | 12.656 | 0.929  | 15.526 | 15.416 | 12.869  |
| 1.2000                        | 4.704  | 12.337 | 0.730  | 16.193 | 15.435 | 13.855  |
| 1.3000                        | 4.927  | 12.122 | 0.526  | 16.837 | 15.453 | 14.714  |
| 1.4000                        | 5.153  | 11.987 | 0.318  | 17.467 | 15.471 | 15.480  |
| 1.5000                        | 5.384  | 11.914 | 0.105  | 18.091 | 15.489 | 16.175  |
| 1.6000                        | 5.618  | 11.893 | 0.112  | 18.712 | 15.506 | 16.818  |
| 1.8000                        | 6.101  | 11.977 | 0.562  | 19.970 | 15.538 | 17.993  |
| 0.2000                        | 6.601  | 12.196 | 1.034  | 21.271 | 15.567 | 19.074  |
| 2.5000                        | 7.939  | 13.237 | 2.319  | 24.881 | 15.619 | 21.644  |
| 3.0000                        | 9.395  | 14.978 | 3.782  | 29.353 | 15.613 | 24.375  |
| 4.0000                        | 12.041 | 21.739 | 7.406  | 43.945 | 14.634 | 32.206  |
| 5.0000                        | 13.839 | 42.189 | 12.253 | 84.722 | 11.585 | 52.532  |
| 6.0000                        | 757.47 | 800.42 | 395.87 | 1563.6 | 371.60 | 773.209 |
| 8.0000                        | 7.348  | 23.626 | 2.381  | 42.063 | 0.269  | -8.436  |
| 10.0000                       | 3.746  | 11.995 | 4.663  | 18.796 | 1.589  | 3.199   |
| 15.0000                       | 1.738  | 5.697  | 6.398  | 5.603  | 1.862  | 10.093  |
| 20.0000                       | 1.140  | 3.903  | 7.168  | 1.555  | 1.690  | 12.347  |

## 8.3.8. Táblázat A táblázat jelölései megegyeznek a 8.3.1 táblázat jelöléseivel

| $L = 4R, \quad V_3/V_1 = 1$ |        |        |        |        |        |        |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $V_2/V_1$                   | $f_1$  | $f_2$  | $F_1$  | $F_2$  | $p_1$  | $p_2$  |
| -0.1000                     | 0.613  | 0.613  | 4.332  | 4.332  | 14.946 | 5.053  |
| 0.0000                      | 2.339  | 2.339  | 2.865  | 2.865  | 15.205 | 4.794  |
| 0.1000                      | 4.337  | 4.337  | 1.109  | 1.109  | 15.446 | 4.553  |
| 0.2000                      | 6.752  | 6.752  | 1.053  | 1.053  | 15.698 | 4.301  |
| 0.3000                      | 9.920  | 9.920  | 3.805  | 3.805  | 16.115 | 3.884  |
| 0.4000                      | 14.827 | 14.827 | 7.423  | 7.423  | 17.404 | 2.595  |
| 0.5000                      | 19.285 | 19.285 | 1.207  | 1.2074 | 17.211 | 2.788  |
| 0.6000                      | 21.951 | 21.951 | 17.327 | 17.327 | 14.624 | 5.375  |
| 0.7000                      | 27.544 | 27.544 | 24.632 | 24.632 | 12.912 | 7.087  |
| 0.8000                      | 39.651 | 39.651 | 3.797  | 3.7971 | 11.680 | 8.319  |
| 0.9000                      | 77.066 | 77.066 | 76.323 | 76.323 | 10.742 | 9.257  |
| 1.1000                      | 74.466 | 74.466 | 73.859 | 73.859 | 9.393  | 10.606 |
| 1.2000                      | 36.867 | 36.867 | 35.753 | 35.753 | 8.885  | 11.114 |
| 1.3000                      | 24.415 | 24.415 | 22.868 | 22.868 | 8.453  | 11.546 |
| 1.4000                      | 18.234 | 18.234 | 16.313 | 16.314 | 8.078  | 11.921 |
| 1.5000                      | 14.553 | 14.553 | 12.304 | 12.304 | 7.750  | 12.249 |
| 1.6000                      | 12.117 | 12.117 | 9.577  | 9.577  | 7.460  | 12.539 |
| 1.8000                      | 9.101  | 9.101  | 6.067  | 6.067  | 6.965  | 13.034 |
| 2.0000                      | 7.312  | 7.312  | 3.871  | 3.871  | 6.559  | 13.440 |
| 2.5000                      | 4.962  | 4.962  | 0.752  | 0.752  | 5.789  | 14.210 |
| 3.0000                      | 3.804  | 3.804  | 0.958  | 0.958  | 5.237  | 14.762 |
| 4.0000                      | 2.653  | 2.653  | 2.869  | 2.869  | 4.476  | 15.523 |
| 5.0000                      | 2.073  | 2.073  | 3.965  | 3.965  | 3.960  | 16.039 |
| 6.0000                      | 1.720  | 1.720  | 4.703  | 4.703  | 3.576  | 16.423 |
| 8.0000                      | 1.301  | 1.301  | 5.672  | 5.672  | 3.025  | 16.974 |
| 10.0000                     | 1.055  | 1.055  | 6.310  | 6.310  | 2.635  | 17.365 |
| 15.0000                     | 0.711  | 0.711  | 7.313  | 7.313  | 1.975  | 18.024 |
| 20.0000                     | 0.513  | 0.513  | 7.966  | 7.966  | 1.519  | 18.480 |

8.3.9. Táblázat A táblázat jelölései megegyeznek a 8.3.1 táblázat jelöléseivel

| $L = 4R, \quad V_3/V_1 = 10$ |        |        |        |        |         |         |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| $V_2/V_1$                    | $f_1$  | $f_2$  | $F_1$  | $F_2$  | $p_1$   | $p_2$   |
| 0.0000                       | 2.709  | 2.301  | 2.740  | 2.878  | 15.449  | 4.820   |
| 0.1000                       | 13.115 | 4.271  | 18.209 | 1.124  | 8.294   | 4.603   |
| 0.2000                       | 12.196 | 6.601  | 22.711 | 1.034  | 0.925   | 4.432   |
| 0.3000                       | 14.978 | 9.395  | 23.535 | 3.781  | -4.375  | 4.386   |
| 0.4000                       | 21.739 | 12.04  | 43.945 | 7.406  | -12.206 | 5.365   |
| 0.5000                       | 42.189 | 13.83  | 84.721 | 12.253 | -32.532 | 8.414   |
| 0.6000                       | 800.4  | 757.47 | 1563.6 | 395.87 | -753.20 | -351.60 |
| 0.7000                       | 48.009 | 14.655 | 89.993 | 1.657  | 51.983  | 22.998  |
| 0.8000                       | 23.626 | 7.348  | 42.062 | 2.381  | 28.436  | 19.730  |
| 0.9000                       | 15.829 | 4.944  | 26.541 | 3.849  | 20.711  | 18.794  |
| 1.0000                       | 11.995 | 3.746  | 18.796 | 4.663  | 16.800  | 18.410  |
| 1.1000                       | 9.716  | 3.028  | 14.120 | 5.205  | 14.404  | 18.233  |
| 1.2000                       | 8.205  | 2.547  | 10.972 | 5.605  | 12.767  | 18.153  |
| 1.3000                       | 7.129  | 2.202  | 8.696  | 5.920  | 11.567  | 18.123  |
| 1.4000                       | 6.323  | 1.942  | 6.967  | 6.179  | 10.643  | 18.121  |
| 1.5000                       | 5.697  | 1.738  | 5.603  | 6.398  | 9.906   | 18.137  |
| 1.6000                       | 5.196  | 1.574  | 4.497  | 6.588  | 9.300   | 18.162  |
| 1.8000                       | 4.443  | 1.323  | 2.802  | 6.907  | 8.358   | 18.230  |
| 2.0000                       | 3.903  | 1.140  | 1.555  | 7.168  | 7.652   | 18.309  |
| 2.5000                       | 3.041  | 0.836  | 0.507  | 7.678  | 6.451   | 18.515  |
| 3.0000                       | 2.528  | 0.642  | 1.795  | 8.073  | 5.676   | 18.716  |
| 4.0000                       | 1.934  | 0.383  | 3.369  | 8.723  | 4.696   | 19.107  |
| 5.0000                       | 1.593  | 0.162  | 4.330  | 9.417  | 4.076   | 19.579  |

## 9. Köszönetnyilvánítás

Mindenekelőtt Dr. Varga Dezsőnek, témavezetőmnek szeretném megköszönni az érdekesebbnél érdekesebb témák felvetését, tanácsait és azt az önzetlen szakmai és baráti segítséget amelyben nap mint nap részesített.

Megköszönöm Prof.Dr. Berényi Dénesnek, Dr. Kövér Lászlónak és Dr. Kövér Ákosnak a számtalanszor nyújtott szakmai segítséget és azt, hogy lépéseimet diplomamunkás korom óta figyelemmel kísérik.

Köszönettel tartozom Dr. Cserny Istvánnak, Dr. Végh Jánosnak Dr. Tóth Józsefnek a számítástechnikai problémák megoldásában nyújtott segítségükért.

Köszönet illeti Dr. Hock Gábort és Dr. Szabó Gyulát hasznos elméleti tanácsaikért.

Köszönettel tartozom Bene Lászlónénak a programjaim futtatásaiért és más technikai segítségéért.

Ezúton is szeretnék köszönetet mondani Dr. Halász Tibornénak a számtalanszor nyújtott áldozatkész, kedves segítségéért.

Megköszönöm továbbá a Nukleáris Atomfizikai Osztály valamennyi munkatársának a segítségét, akik közvetlenül vagy közvetve hozzájárultak ahhoz, hogy dolgozatom elkészülhessen.

Külön szeretném megköszönni Milos Rysavinak a hasznos szakmai megbeszéléseket és a programozási tanácsait.

Végül Vad Erzsébetnek szeretném megköszönni az ábrák gondos elkészítését.

## Irodalomjegyzék

- [ABE-82] T. Aberg, G. Howat, L. Karlsson, J. A. R. Samson, H. Siegbahn, A. F. Starace: Encyclopedia of Physics XXXI, Editor: W. Mehlhorn, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1982
- [AFA-78] B.P.Afanasjev, Elektrosztatikus eszközei energianalizátorok djal pucskov zárjázsen-nij császtyic Moszkva nauka, 1978
- [AKS-70] S. Aksela, M. Karras, M. Pessa, E. Souminen, Rev. Sci. Instr., **41**, (1970) 351
- [AKS-72] S. Aksela, Rev. Sci. Instr., **43**, (1972) 1350
- [AKS-73] S. Aksela, J. Phys. E: Sci. Instr., **6**, (1973), 545
- [ALL-72] J.D. Allen, Jr.J.P. Wolfe, G.K. Schweitzer, Int. J. Mass Spectrom. Ion Phys., **8**, (1972), 81-83
- [ARN-72] M. Arnow, D.R. Jones, Rev. Sci. Instr., **43**, (1972) 72
- [ARN-72] D.R. Arnott, J.A. Ramsey, Vacuum, **22**, (1972) 355
- [ARN-76] M. Arnow, J. Phys. E: Sci. Instr., **9**, (1976), 372
- [BAH-70] H. Basch, Chem. Phys. Letters **5** (1970) 337
- [BAS-72] P.J. Bassett, T.E. Gallon, M. Prutton, J. Phys. E: Sci. Instr., **5**, (1972), 1008
- [BER-76] U. Berg et. al., Phys. Stat. Sol.(b) **74** (1976) 341
- [BEV-69] Philip R. Bevington, Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences, Mc Graw-Hill New York, 1969
- [BIT-72] M. Bitter, G. Proca, Rev. Sci. Instr., **41**, (1973), 1365
- [BOE-88] L. Boesten, Rev. Sci. Instrum., **59(2)**, Febr. (1988), 233-237
- [BRI-74] J. S. Brinen, J. Electron Spectrosc. **5** (1974), 377
- [CAR-74] W. J. Carter, J. Electron Spectrosc. **5** (1974), 827
- [CHO-87] Y.C. Chou, M.J. Robrecht and B.P. Tonner, Rev. Sci. Instrum., **58(7)**, Jul. (1987), 1164-1172
- [CHA-73] L.M. Chase, Rev. Sci. Instrum., **44**, (1973), 998

- [COL-74] I. S. Colonias: Particle Accelerator Design: Computer Programs, Academic Press, New York and London 1974
- [DAH-73] Poul. Dahl, Introduction to Electron and Ion Optics Academic Press, New York and London; 1973
- [DRA-77] J.E. Draper and Cheng-yi Lee, Rev. Sci. Instrum., vol.**48**(7), Jul. (1977), 852-865
- [EBE-75] H. Ebel, H. Falk, Z. Anal. Chem. **273** (1975) 368
- [EBE-76] H. Ebel, R. Kaiser; Wiss. Z. Karl-Marx-Univ. Leipzig, Math.-Naturwiss. R., 25 (1976) 415
- [ENG-81] H.A. Engelhardt, W. B äck and D. Menzel, Rev. Sci. Instrum., **52**(6), Jun. (1981), 835-839
- [FAD-74] C. S. Fadley, J. Electron Spectrosc.**5** (1974), 725
- [FEL-74] H. Fellner-Feldegg: J. Electron Spectrosc.**5** (1974), 643
- [FUG-77] J. C. Fuggle, Handbook of X-ray and UV Photoelectron Spectroscopy, Editor: D. Briggs, Heyden. London, 1977, 273
- [GEL-74] U. Gelius, H. Fellner-Feldegg, B. Wannberg, A. G. Nilsson, E. Basilier, K. Siegbahn, UUIP-855, 1974
- [GEL-84] U. Gelius, L. Asplund, E. Basilier, S. Hedman, K. Helenelund and K. Siegbahn, NIM, **B1** (1984) 85-117
- [GER-79] Gergely J., Alkalmazott Matematikai Lapok **5** (1979) 211-231
- [GIB-75] P.C. Gibbons, J.J. Ritsko, S.E. Schnatterly, Rev. Sci. Instrum., **46**, (1975), 1546
- [GOD-69] R. P. Godwin: Springer Tracts in Modern Physics. **51** (1969) 1.
- [GRA-83] E.H.A Granneman, Transport, Dispersion and Detection of Electrons, Ions and Neutrals, Handbook on Synchrotron Radiation, vol. **1**, edited by E.E. Koch (1983)
- [GRE-70] T.S. Green, G.A. Proca, Rev. Sci. Instr., **41**, (1970), 1409
- [HAF-68] H. Hafner, J.A. Simpson, C.E. Kuyatt, Rev. Sci. Instr., **39**, (1968), 33
- [HAR-55] G.A. Harrower, Rev. Sci. Instr., **26**, (1955), 850
- [HAW-70] Quadrupoles in Electron Lens Design P.W. Hankes, (1970), Academic Press, New York and London

- [HAW-89a] P.W. Hawkes, *Advances in Electronics and Electron Physics*, Academic Press, INC. vol. **75**, 1989
- [HAW-89b] P.W. Hawkes, *Advances in Electronics and Electron Physics*, Academic Press, INC. vol. **76**, 1989
- [HED-71] D.W.O. Heddle, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **4**, (1971), 981-983
- [HED-84] D.W.O. Heddle and N. Papadovassilakis, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **17**, (1984), 599-605
- [HER-85] J. Herbák, Á. Kövér, E. Szmola, D. Berényi and I. Cserny, *Acta Phys. Hung.*, 58(1985)1187
- [HOL-81] P.H. Holloway and R.S. Bhattacharya, *Surf. and Interf. Anal.* **3**, (1981), 118
- [HOO-80a] H.A. Hoof, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **13**, (1980), 1081-1089
- [HOO-80b] H.A. Van Hoof and M.J. Van der Wiel, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **13**, (1980), 409-415
- [HUG-29] A. L. Huges, V. Rojansky, *Phys. Rev.* **34** (1929) 284
- [JAC-75] *Classical Electrodynamics* by John David Jackson (1975); John Wiley & Sons, Inc. New York-London Sydney-Toronto
- [JAM-72] F. James, *Function Minimization*, *Proceedings of the 1972 CERN Computing and Data Processing School*, Pertisau, Austria, 10-24 Sept., 1972 (CERN 72-21)
- [KEL-65] V.M. Kelman, *Elektronoptika*, Akadémiai kiadó, Budapest; 1965
- [KEM-73] P.C. Kemeny, A.D. McLachlan, F.L. Battye *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **44**, (1973), 1197
- [KIS-82] Erhard Kisker; *Rev. Sci. Instrum.*, **53**(1), Jan. 1982, 114-116
- [KLE-71] *Electron Optics* by O. Klemperer, 1971, Cambridge, at the University Press
- [KNA-82] J.A. Knapp, *Rev. Sci. Instrum.*, **53**(6), (1982), 781D784
- [KOM-77] Komlósi Gy., *Diplomamunka*, Debrecen ATOMKI, 1977
- [KÖV-87a] Á. Kövér, Gy. Szabó, L. Gulyás, K. Tökési, D. Berényi, O. Heil, and K.O. Groeneveld: *J. de Physique Colloque*, **48** (1987) 289
- [KÖV-87b] Á. Kövér, Gy. Szabó, L. Gulyás, K. Tökési, D. Berényi, O. Heil, and K.O. Groeneveld: IFKD46, Frankfurt, Institut für Kernphysik (1987) 21.

- [KÖV-87c] Á. Kövér, Gy. Szabó, L. Gulyás, K. Tőkési, D. Berényi, O. Heil, and K.O. Groeneveld: (Abstracts, Physik Verlag, **A15**, (1987) 4 Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft Frühjahrstagung, Göttingen, March 16-20, (1987)
- [KÖV-87d] Á. Kövér, Gy. Szabó, L. Gulyás, K. Tőkési, D. Berényi, O. Heil, K.O. Groeneveld; 14-th Int. Conf. on X-ray and inner-shell processes, X-87 Sept. 14-18, 1987, Paris (1987)
- [KÖV-88a] Á. Kövér, Gy. Szabó, L. Gulyás, K. Tőkési, D. Berényi, O. Heil, and K.O. Groeneveld: J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **21** (1988) 3231
- [KÖV-88b] Á. Kövér, Gy. Szabó, L. Gulyás, K. Tőkési, D. Berényi, O. Heil, K.O. Groeneveld: ATOMKI Annual Report 1987 (1988) 59
- [KÖV-88c] Á. Kövér, D. Varga, E. Szmola, Gy. Móri, L. Gulyás and K. Tőkési, (közlés alatt)
- [KUY-67] C.E. Kuyatt, J.A. Simpson, Rev. Sci. Instrum., **38**, (1967), 103
- [LEC-87] R.C.G. Leckey, Journal of Electron Spectr. and Related Phenomena, **43**, (1987), 183-214
- [LEC-90] R.C.G. Leckey, J.D. Riley and A. Stampfl, Journal of Electron Spectr. and Related Phenomena, **52**, (1990), 855-866
- [MAT-61] H. Matsuda, Rev. Sci. Instr., **32**, (1961), 850
- [MOS-71] C. M. Moser, Chem. Phys. Letters **12** (1971) 230
- [PAO-67] F.R. Paolini, G.C. Theodoridis, Rev. Sci. Instr., **38**, (1967), 579
- [PÁL-87] J. Pálinkás, L. Sarkadi, T. Papp, Á. Kövér, **K. Tőkési**, L. Gulyás D. Berényi: X. ISIAC, Bad Soden, July 30-31, 1987 (1987)
- [PET-72] I.A. Petrov, E.V. Shpak, S.Ya. Yavor, Nucl. Instr. Meth. **101**, (1972) 505
- [POL-81] J.E. Pollard, D.J. Trevor, Y.T. Lee and D.A. Shirley, Rev. Sci. Instrum., **52**(12), Dec., (1981), 1837-1846
- [POO-73] R.T. Poole, R.C.G. Leckey, J. Liesegang, J.G. Jenkin, J. Phys. E: Sci. Instr., **6**, (1973), 226
- [POO-74] R. T. Poole, J. Electron Spectrosc. **5** (1974) 773
- [PRA-75] R. Prange, Rev. Sci. Instrum., **46**, (1975), 278

- [PRO-70] G.A. Proca, T.S. Green, Rev. Sci. Instrum., **41**, (1970), 1778
- [PUR-38] E.M. Purcell, Phys. Rev. **54**, (1938), 818
- [RAL-69] Bevezetés a numerikus analízisbe; Anthony Ralston (1969) Műszaki könyvkiadó, Budapest
- [RAM-69] L. Ramquist, J. Phys. Chem. Solids **30** (1969) 1835
- [REA-76] Electrostatic Lenses by E. Harting and F.H. Read, (1976), Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford-New York
- [REA-79] F.H. Read, Radiation Effects, **44**, (1979), 129-136
- [RED-79] Redler L., Diplomamunka, Debrecen, ATOMKI 1979
- [REN-75] G.M. Renfro, H.J. Fishchbeck, Rev. Sci. Instrum., **46**, (1975), 620
- [RIS-71] J.S. Risley, Rev. Sci. Instrum., **42**, (1971), 267
- [RIS-72] J.S. Risley, Rev. Sci. Instrum., vol.**43**(1), (1972), 95-103
- [ROY-70] D. Roy, J.D. Carette, Appl. Phys. Lett. **16**, (1970), 413
- [ROY-71a] D. Roy, J.D. Carette, Rev. Sci. Instrum., **42**, (1971), 1122
- [ROY-71b] D. Roy, J.D. Carette, Rev. Sci. Instrum., **42**, (1971), 776
- [SAM-67] J. A. R. Samson: Techniques of Vacuum Ultraviolet Spectroscopy. Wiley, New York, 1967
- [SAR-87a] L. Sarkadi, J. Pálincás, Á. Kövér, K. Tökési, L. Gulyás, D. Berényi: (Abstracts of contributed papers. Ed. J. Geddes, *et al.* p.495) XV-th International Conference on the Physics of Electronic and Atomic Collisions, Brighton, UK, July 22-28, (1987)
- [SAR-87b] L. Sarkadi, J. Pálincás, Á. Kövér, K. Tökési, L. Gulyás, D. Berényi: ATOMKI Annual Report 1986 (1987) 30
- [SCW-70] M. E. Schwartz, Chem. Phys Letters **6** (1970) 631
- [SCH-72] W. Schmitz, W. Mehlhorn, J. Phys. E: Sci. Instrum., **5**, (1972), 64
- [SEP-67] A. Septier, Focusing of Charged Particles Academic Press, New York and London; 1967
- [SHA-89] N.G. Shakun, M. Rysavy, NIM, **A281**, (1989), 37-42

- [SHP-68] E.V. Shpak, S.Ya. Yavor, Ya.G. Lyubchik, Nucl. Instr. Meth. **64**, (1968) 97
- [SIE-67] K. Siegbahn: ESCA Atomic, Molecular and Solid Structure Studied by Means of Electron Spectroscopy, Almquist and Wiksells, Uppsala, 1967
- [SIM-67] Simonyi K.: Elméleti villamosságtan, Tankönyvkiadó, Budapest, 1967
- [SPI-71] W. E. Spicer: Electronic Density of States. NBS-Publication 323, Washington 1971., Editor: L. H. Bennett, 139
- [STU-55] P.A. Sturrock, Static and Dynamic Electron Optics, Cambridge, At the University Press; 1955
- [SZA-1] Dr. Kövér László, Dr. Móri Gyula és Dr. Varga Dezső, Spektrométer modul torzított terű elektrosztatikus elektronspektrométerhez és modulokból álló elrendezés, MTA Atommag Kutató Intézete, Debrecen; 181 212 1.sz 1980 Szabadalmi leírás.
- [SZA-2] Dr. Kövér László, Tőkési Károly és Dr. Varga Dezső, Kúpos lezárású torzított terű elektrosztatikus elektronspektrométer modul és modulok összekapcsolása, MTA Atommag Kutató Intézete, Debrecen; 1989 Szabadalmi leírás.
- [SZM-78] Szmola E., Kövér Á., ATOMKI Közlemények **20** (1978), 59
- [TAY-69] N. J. Taylor, Rev. Sci. Instr. **40** (1969) 792
- [THE-68] G.C. Theodoridis, F.R. Paolini, Rev. Sci. Instrum., **39**, (1968), 326
- [THE-69] G.C. Theodoridis, F.R. Paolini, Rev. Sci. Instrum., **40**, (1969), 621
- [TÖK-86] Tőkési K., Diplomamunka, Debrecen, ATOMKI, 1986
- [TÖK-89a] K. Tőkési, I. Cserny, D. Varga, ATOMKI Annual Report 1988, (1989), 80-81
- [TÖK-88b] K. Tőkési, L. Kövér, D. Varga, ATOMKI Annual Report 1988, (1989), 121-122
- [TRA-90a] C. Trager-Cowan, S.M. Kay and D.W.O. Heddle, Meas. Sci. Technol. **1**, (1990), 738-746
- [TRA-90b] C. Trager-Cowan, R.B. Miller, S.M. Kay and D.W.O. Heddle, Meas. Sci. Technol. **1**, (1990), 747-750
- [TUR-70] D. W. Turner: Molecular Photoelectron Spectroscopy. Wiley, New York, 1970
- [VAJ-86] Vajna T., Diplomamunka, Debrecen, ATOMKI, 1986

- [VAM-73] M.N. Varma, A. Joshi, M. Strongin, V. Radeka, Rev. Sci. Instrum., **44**, (1973), 1643
- [VAR-78] D. Varga, NIM, **157**, (1978), 477D483
- [VAR-79] Varga D. Kandidátusi értekezés, Debrecen, ATOMKI, 1979
- [VAR-85] D. Varga, NIM, **A238**, (1985), 393D395
- [VAS-71] G. Vassilev, J. Bandon, G. Rahmat, M. Barrat, Rev. Sci. Instrum., **42**, (1971), 1222
- [VES-71] C. J. Vesely, D. W. Langer, Phys. Rev. **B 4** (1971) 541
- [WAN-77] B. Wannberg and A. Sköllermo, Journal of Electron Spectr. and Related Phenomena, **10**, (1977), 45-78
- [WIL-50] Static and Dynamic Electricity by W.R. Smythe, 1950, Mc Graw-Hill Book Company, Inc., New York, Toronto, London
- [WIN-88] P.L. Wincott, N.B. Brookes, D. S-L. Law, G. Thornton and G.C. King, J. Phys. E: Sci. Instr., **22**, (1989), 42-47
- [WOL-65a] H. Wollnik, H. Ewald, Nucl. Instr. Meth. **36**, (1965) 93
- [WOL-65b] H. Wollnik, Nucl. Instr. Meth. **34**, (1965) 213
- [YAR-49] G.D. Yarnold, H.C. Bolton, J. Sci. Instr., **26**, (1949), 38
- [ZOM-79] Zombory L., Koltai M.: Elektromágneses terek gépi analízise, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979

## 10. Közleményeim és előadásaim jegyzéke

### Közleményeim jegyzéke

1. Á. Kövér, Gy. Szabó, L. Gulyás, **K. Tőkési**, D. Berényi, O. Heil, and K.O. Groeneveld: Electron Emission at Backward Angles from  $He^{2+}$ ,  $He^+$  (2 MeV)  $\rightarrow$  He,Ne,Ar Collision System, J. de Physique Colloque, **48** (1987) 289
2. L. Sarkadi, J. Pálinkás, Á. Kövér, **K. Tőkési**, L. Gulyás, D. Berényi:  $L_3$ -Subshell Alignment of Argon Following Charge-Changing Collisions with Protons, ATOMKI Annual Report 1986 (1987) 30
3. Á. Kövér, Gy. Szabó, L. Gulyás, **K. Tőkési**, D. Berényi, O. Heil, and K.O. Groeneveld : The electron loss process at backward observation angles in collision systems  $He^+(2MeV) \rightarrow$  He,Ne,Ar J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 21 (1988) 3231
4. Á. Kövér, Gy. Szabó, L. Gulyás, **K. Tőkési**, D. Berényi, O. Heil, K.O. Groeneveld: Electron ejection from  $He^+(2MeV) \rightarrow$  He,Ne,Ar collision systems into backward observation angles ATOMKI Annual Report 1987 (1988) 59
5. **K. Tőkési**, I. Cserny, D. Varga Bessel-box type lens for ESCA spectrometer ATOMKI Annual Report 1988 (1989) 80
6. **K. Tőkési**, L. Kövér, D. Varga A new type of electrostatic electron analyser ATOMKI Annual Report 1988 (1989) 121
7. Dr. Kövér László, **Tőkési Károly** és Dr. Varga Dezső, Kúpos lezárású torzított terű elektrosztatikus elektronspektrométer modul és modulok összekapcsolása, Szabadalmi leírás, MTA Atommag Kutató Intézete, Debrecen; 181 212 1.sz 1989
8. **K. Tőkési**, G. Hock CTMC calculations for 3-body collisions ATOMKI Annual Report 1989 (1990) 49
9. **K. Tőkési**, Á. Kövér, D. Varga The effect of real gaps in electrostatic spectrometer ATOMKI Annual Report 1989 (1990) 91
10. **K. Tőkési**, M. Rysavy Model calculation of X-ray tube ATOMKI Annual Report 1989 (1990) 93
11. **K. Tőkési**, S. Ricz, E. Takács and B. Sulik, L. Tóth and N. Takada;  $e^-$  impact energy dependence of the  $L_3$  subshell alignment of Ar, ATOMKI Annual Report 1990 (1991) 55-56
12. **K. Tőkési** and G. Hock; Classical trajectories during atomic collisions, ATOMKI Annual Report 1990 (1991) 63-64

13. **K. Tőkési** and G. Hock; Particle and antiparticle - H collisions, ATOMKI Annual Report 1990 (1991) 65-66
14. L. Kövér, D. Varga, I. Cserny, J. Tóth, **K. Tőkési**; Photon induced Auger-electron spectroscopy of solid surfaces using bremsstrahlung radiation ATOMKI Annual Report 1990 (1991) 71-72
15. D. Varga, L. Kövér, I. Cserny, J. Tóth, **K. Tőkési**; A high-energy electron spectrometer for multimethod surface analysis, ATOMKI Annual Report 1990 (1991) 117-118
16. Á. Kövér, D. Varga, E. Szmola, Gy. Móri, L. Gulyás, **K. Tőkési**; A distorted field cylindrical mirror electron spectrometer II. Performances and application for ion-atom collision research, NIM, Beküldésre előkészítve.
17. **K. Tőkési**, I. Cserny, D. Varga Box type lenses for ESCA spectrometer J. Phys. E., Közlésre előkészítve
18. **K. Tőkési**, L. Kövér, D. Varga Conically ended distorted field electrostatic electron analyser ECASIA-91 Konferencia, Közlésre előkészítve
19. D. Varga, L. Kövér, I. Cserny, J. Tóth, **K. Tőkési**; A photoelectron-spectrometer for high energy XAES J. Phys. E., Közlésre előkészítve
20. D. Varga, L. Kövér, I. Cserny, J. Tóth, **K. Tőkési**; Low energy photoelectron-spectrometer J. Phys. E., Közlésre előkészítve

## Előadásaim jegyzéke

1. Á. Kövér, Gy. Szabó, L. Gulyás, **K. Tőkési**, D. Berényi, O. Heil, and K.O. Groeneveld: Projectilisations Electrons unter Rückwärtswinkeln in asymmetrischen Stoss-systemen, IFKD46, Frankfurt, Institut für Kernphysik (1987) 21.
2. L. Sarkadi, J. Pálinkás, Á. Kövér, **K. Tőkési**, L. Gulyás, D. Berényi:  $L_3$ -subshell alignment of argon following charge-changing collisions with protons, (Abstracts of contributed papers. Ed. J. Geddes, *et al.* p.495) XV-th International Conference on the Physics of Electronic and Atomic Collisions, Brighton, UK, July 22-28, (1987)
3. Á. Kövér, Gy. Szabó, L. Gulyás, **K. Tőkési**, D. Berényi, O. Heil, and K.O. Groeneveld: The Electron Loss Peak at Backward Angles, (Abstracts, Physik Verlag, **A15**, (1987) 4 Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft Frühjahrstagung, Göttingen, March 16-20, (1987)

4. Á. Kövér, Gy. Szabó, L. Gulyás, **K. Tőkési**, D. Berényi, O. Heil, K.O. Groeneveld; Electron emission at backward angles from  $He^{2+}$ ,  $He^+$  (2 MeV)  $\rightarrow$  He, Ne, Ar collision system. 14-th Int. Conf. on X-ray and inner-shell processes, X-87 Sept. 14-18, 1987, Paris (1987)
5. Á. Kövér, L. Gulyás, **K. Tőkési**, Gy. Szabó, D. Berényi, K.O. Groeneveld, O. Heil, J. Kemmler: Electron Loss at 0 and Backward Angles, X. ISIAC, Bad Soden, July 30-31, 1987 (1987)
6. J. Pálincás, L. Sarkadi, T. Papp, Á. Kövér, **K. Tőkési**, L. Gulyás D. Berényi:  $L_3$ -subshell alignment in electron capture and in multiple ionization processes X. ISIAC, Bad Soden, July 30-31, 1987 (1987)
7. Á. Kövér, Gy. Szabó, L. Gulyás, **K. Tőkési**, D. Berényi, O. Heil, K.O. Groeneveld; Problems in the evaluation procedure of the electron loss peak in light-ion-atom collision systems at backward observation angles, 11-th International Conference of Atomic Physics. Paris, France, July 4-8 1988 (ELICAP) (1988)
8. **Tőkési K.**, Esettanulmányok a 3-test Coulomb CTMC számításokra MTA ATOMKI, Debrecen, 1990. március 8. (1990)
9. **K. Tőkési**, G. Hock, Case studies in 3-body Coulomb CTMC calculations, 1. Debrecen-Miskolc-Uzhgorod Triangle Seminar on Atomic Collision Processes, Debrecen, Hungary, 12 march, 1990 (1990)
10. **K. Tőkési** and G. Hock; Classical trajectories during atomic collisions, ATOMKI Report. 1990/1-R 7 (1990)
11. **K. Tőkési**, S. Ricz, E. Takács and B. Sulik;  $e^-$  impact energy dependence of the  $L_3$  subshell alignment of Ar, ATOMKI Report. 1990/1-R 12 (1990)
12. **K. Tőkési** and G. Hock; Particle and antiparticle - H collisions, ATOMKI Report. 1990/1-R 15 (1990)
13. **Tőkési K.**, Esettanulmányok a 3-test Coulomb CTMC számításokra MTA ATOMKI, Debrecen, 1991 február 27. (1991)