

A Sapientia Tudományegyetem Penning típusú ionforrásra (SaPIG) alapuló ionnyaláb előállító rendszere

Sapientia University Penning Ion Source (SaPIG) and Beam Line System

Sursa de ioini de tip Penning a Universității Sapientia (SaPIG) și sistemul de fascicul de ioni

Dr. KENÉZ Lajos, PAPP Sándor, JAKAB-FARKAS László

Sapientia-EMTE, Marosvásárhelyi Műszaki és Humántudományok Kar
Villamosmérnöki tanszék, Marosvásárhely (Koronka), Segesvári út 1C, 540485
Tel.: 0265-208181, Fax: 0265 - 20 62 11 www.ms.sapientia.ro

ABSTRACT

The aim of this article is to present the ion beam equipment of the Sapientia University. This ion beam equipment was planted in our university in collaboration with the Tokyo Institute of Technology. It contains a Penning type ion source (named SaPIG), a vacuum chamber, extraction and beam transport system, a deflector magnet and a beam line to analyze the deflected ion beam. The article describes the working principles from plasma ignition to analyzed beam measurement.

REZUMAT

Articolul are ca scop prezentarea sistemului de producere de fasciculi de ioni al Universității Sapientia. Echipamentul de cercetare a fost instalat în cadrul universității în strânsă colaborare cu Tokyo Institute of Technology din Japonia. Aceasta conține o sursă de ioni de tip Penning (numit SaPIG), o cameră de vid, un sistem pentru extragerea și transportarea fascicolului de ioni, un magnet de deflecție precum și o linie de vid pentru detectarea și măsurarea fascicolului analizat. Articolul descrie principiile de funcționare pornind de la producerea plamei până la măsurarea curentului ionic analizat.

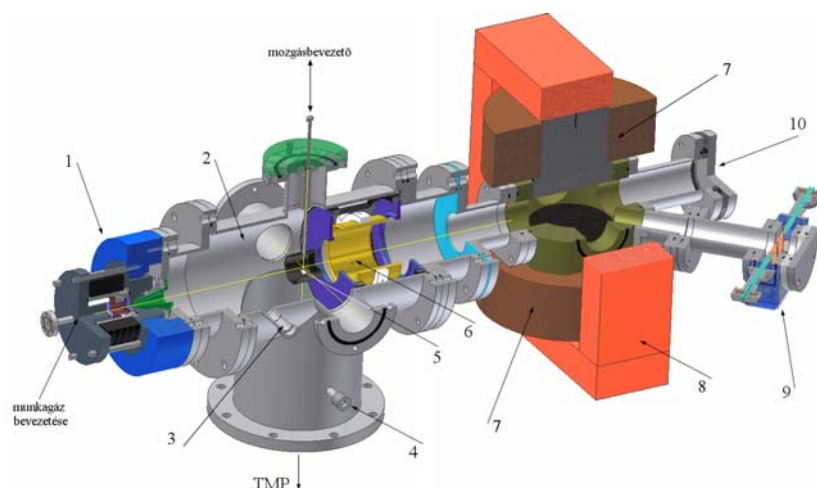
Kulcsszavak: ionforrás, plazma, kisülés, ionnyaláb, analizálás

1. Bevezetés. Az ionnyaláb előállító rendszer általános bemutatása

A Sapientia Tudományegyetem Marosvásárhelyi Műszaki és Humántudományok Kara, a Japán Tokyo Institute of Technology műszaki egyetemmel közösen egy fizikai kutatólaboratóriumot hozott létre Marosvásárhelyen. Az együttműködés keretében számos kutatási eszköz telepítésére került sor. Ezek közül a következőkben a Penning típusú ionforrást és az ionnyaláb kivonására, továbbítására és analizálására szolgáló vákuum-rendszert (1. ábra) mutatjuk be. A Penning típusú ionforrást néhány évtizede a fizikai kutatások és alkalmazások valamit egyéb mérnöki alkalmazások területén is megtaláljuk [1-4].

Az 1. ábrán szemléltetett kísérleti berendezés különböző típusú alacsony lefosztású, nagy intenzitású ionnyalábok előállítására alkalmas [5].

Ahhoz, hogy ionnyalábot állíthassunk elő, plazmát kell létrehozni. A plazma Földi körülmények közötti létrehozása és megtartása nem egyszerű. Kísérleti berendezésünkben két vákuum-szivattyút használunk, egy rotációs, ún. elő vákuum-szivattyút (FVP – fore vacuum pump) és egy turbó-molekuláris (TMP – turbo molecular pump) nagyvákuum szivattyúból álló rendszer segítségével 10^{-7} torr nagyságrendű nyomást állítunk elő. Az ionforrás üzemeltetésekor, amely munkagáz bevezetését is feltételezi, a rendszerben a munkanyomás általában két nagyságrenddel nagyobb. A stabil, reprodukálható működés biztosítása érdekében a kísérleti berendezések vákuum-rendszere folyamatosan kell működjön. Ehhez biztosítani kell azt, hogy áramkimaradás vagy egyéb problémák esetén a szivattyúk álljanak le, és az elő vákuum-szivattyúban lévő vákuumolaj ne juthasson be a turbó-molekuláris szivattyún keresztül a vákuumrendszerbe. Ilyen esetekben egy pneumatikus szelep segítségével az elő vákuum-szivattyú elválasztható a turbó-molekuláris szivattyútól, így megakadályozva a rendszer vákuumolajjal történő szennyezését.



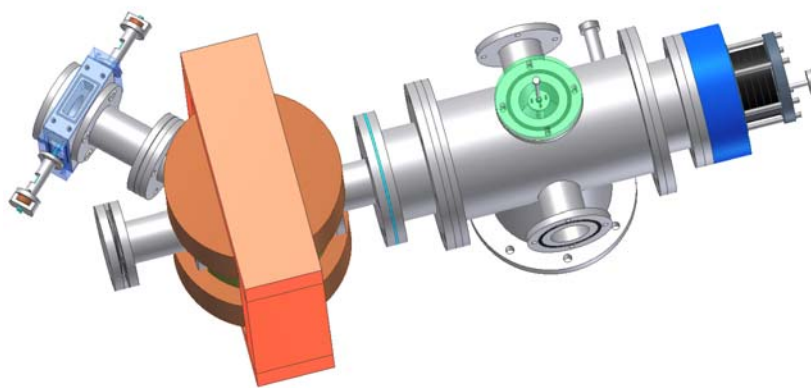
1. ábra

Ionnyaláb előállító rendszer. A kísérleti berendezés az ábrán jelzett alábbi összetevőkből áll:

1. Penning ionforrás, 2. Vákuum-kamra, 3. Ionizációs vákuum-mérő bevezetése, 4. Fellevegőző szelep, 5. Faraday csésze (árammérő), 6. Einzel-lencse (elektrosztatikus lencse), 7. Vasmagos tekercs, 8. Zárt mágneses kör,
9. 45°-os analizáló nyalábvég, 10. Egyenes nyalábvég.

Az ionnyaláb létrehozása a következő módon történik. Az (1) ionforrásban elektromos kisüléssel plazmát hozunk létre. A plazmába munkagázt vezetünk, melynek atomjai szintén ionizálódnak. Az ionizációs folyamatról bővebben a későbbiekben szólnunk. Az ionforrás egy elektromos szempontból szigetelő henger segítségével van a kamrához rögzítve. Az ionforrást elektromos szempontból pozitívabbá tesszük a kamrához képest, az így létrehozott elektromos térrel az előállított pozitív ionokat kivonhatjuk az ionforrás belsejéből. A kivont ionok nyaláb formájában haladnak tovább. Ez az ionnyaláb az ionok között fellépő taszító kölcsönhatások miatt széttartóvá válik. A nyaláb útjába helyezett, ún. Faraday csészével (5) összegyűjthetjük az ionokat és megmérhetjük az általuk létrehozott ionáramot. Megjegyezzük, hogy az ionáram mérése tulajdonképpen a fémfelületekre érkező pozitív töltéshordozók semlegesítéséhez szükséges elektronáram mérését jelenti! A Faraday csésze egy mozgatható tengelyre van szerelve és manuálisan kihúzható az ionnyaláb útjából. Ebben az esetben a széttartó nyaláb eljut az elektromos lencséhez (6).

Ez egy elektrosztatikus lencse, amely működését tekintve épp olyan hatással van az elektromosan töltött részecskékre, mint egy hagyományos optikai lencse a fénysugarakra. Megfelelő elektróda elrendezéssel és elektromos előfeszítéssel elérhetjük, hogy a széttartó ionnyalábot megfelelő helyre fókuszálva továbbítsuk. Az 1. ábrán látható elrendezésben ez az egyenes nyalábvég (10) vagy a 45°-os analizáló nyalábvég (9) árammérő lehet. Mindkét esetben a nyaláb áthalad a (7) és (8) vasmagos tekercsekből és zárt mágneses körből álló, 45°-ban eltérítő elektromágnesen. Változtatva az elektromágneses áramát, a tekercs mágneses terében körpályára kényszerülő ionok pályasugara úgy befolyásolható, hogy minden iontípust rendre a 45°-ban elhelyezett mérőpontra irányíthatunk. A későbbiekben ezt a tömböt (9) részletesen is bemutatjuk. A 2. ábra a kísérleti berendezés felülnézeti rajzát szemlélteti.



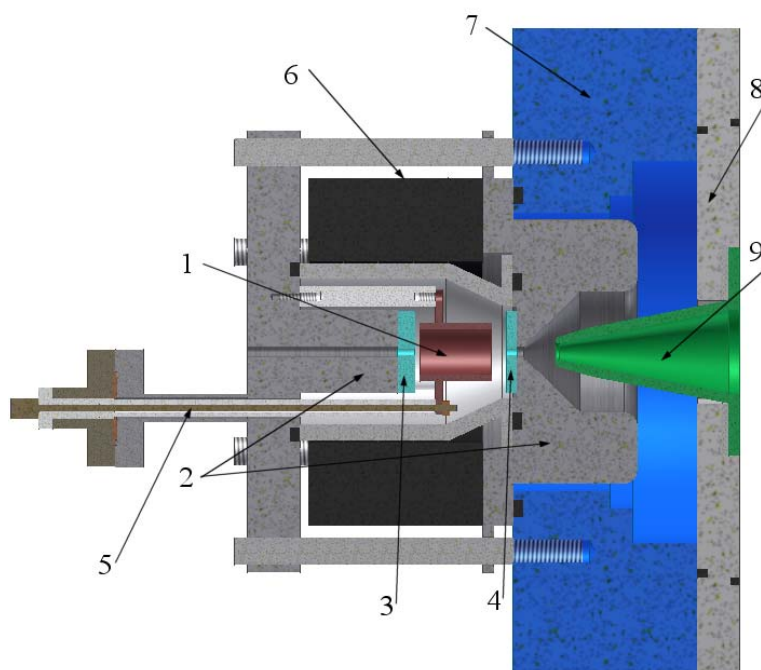
2. ábra

A kísérleti berendezés felülnézete.

2. A Penning ionforrás felépítése és működési elve

A Penning ionforrás (3. és 4. ábra) tulajdonképpen egy ionizációs vákuum-mérő továbbfejlesztett változata, melyet eredetileg a Philips gyár egyik mérnöke fejlesztett ki. Nevét is fejlesztőjéről kapta. Működését tekintve egy olyan eszköz, melyben szokványos elektromos ívkisülést hozunk létre egy speciálisan kialakított anód (1) és katód (2) között. Ezt az elektromos kisülést homogén mágneses térbe helyezzük a létrejövő plazma összetartásának érdekében. A felépítést komplexsége teszi az a tény, hogy a plazmát vákuumban hozzuk létre, a munkagáz bevezetését és a kisülés anódját tápláló elektródát pedig vákuumtömítéseken keresztül kell megvalósítsuk. A kisülés anódja henger alakú és az ionforrás közepén, annak szimmetriatengelyén helyezkedik el. A hengeren látható gallér az elektromos előfeszítéshez (5) szükséges geometriai feltételt biztosítja. A kisülés katódja tulajdonképpen két oldalról zárja az anód-hengert úgy, hogy az ábra bal oldalán lévő légrés 2 mm-el kisebb, mint a jobb oldalon látható légrés.

Ez azt jelenti, hogy a bal oldali légrésben jóval nagyobb elektromos térerősség alakul ki, mint a jobb oldalon ($|\vec{E}_1| > |\vec{E}_2|$), így az ívkisülés a bal oldalon már kisebb feszültségnél is létrejön. Természetesen nagyobb feszültség alkalmazásánál mindkét oldalon létrejön ívkisülés. Nagyon fontos az elektródák fent említett szerepének betartása. Mint minden plazmából, az elektromosan töltött részecskék próbálnak minél hamarabb rekombinálni, vagy a fémfelületekre felfutni, és végérvényesen elveszni a plazmából. E két folyamatot valamilyen szinten meg kell gátolni ahhoz, hogy használható plazmát tartsunk össze. Egyrészt ehhez szükséges az axiális mágneses tér. A teret permanens mágnesből készült gyűrű alakú mágnesek hozzák létre (6), amelyeket a vákuum téren kívül helyezünk el. Ez a mágneses tér a plazma elektronjait (a Lorentz-erő hatására) körpályára, haladó mozgásuk által pedig, egy hengerre felcsavarodó körpályára kényszeríti. Ha a fennemlített elrendezést használjuk, a légrésekben olyan elektromos terek jönnek létre, amelyek a plazmából az előbb leírt mozgással távozni készülő elektronokra az anódtér közepe felé irányuló erővel hatnak. A mágneses tér hatása még egy szempontból igen fontos, mégpedig azért, mert a körpálya leírásakor megnő annak a valószínűsége, hogy semleges atommal vagy már létező ionnal lépjen kölcsönhatásba az elektron és újabb ionizációt hozzon létre. A plazmából elvesző elektronok és ionok egy része hasznos is lehet. Ennek érdekében a megfelelő részekre olyan anyagokból készült elemeket kell elhelyezni, amelyek a töltéshordozókkal való ütközésekkor minél nagyobb számban bocsátanak ki másodlagos (szekunder) elektronokat. Ezek az elektronok az elektromos terek hatására a plazmába jutnak, növelve annak elektronsűrűségét. Ezt a bemutatott ionforrás esetében úgy érjük el, hogy a katódvégekre egy-egy alumíniumból készült korongot helyeztünk el (3. és 4.).

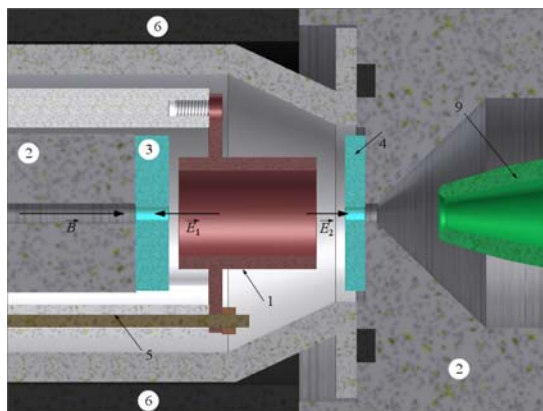


3. ábra

SaPIG – Ionforrás

1. Anód, 2. Katód, 3. és 4. Szekunder elektron emittáló Al korongok, 5. Anód-potenciál vákuum-bevezetése,
6. Axiális mágneses teret előállító permanens mágnes, 7. Elektromos szigetelés,
8. Kamrához csatlakoztató perem, 9. Kivonó elektróda.

A létrehozott ionokat a plazmából ki kell vonni ahhoz, hogy felhasználhatóvá váljanak. A kivonást elektrosztatikus úton végezzük. Az ionforrást elektromos szempontból szigetelve (7) a kamrához csatlakoztatjuk (8). A megfelelő elektromos térszerkezet kialakításának érdekében az ionforrás katódjával szemben egy kúp alakú elektródát (a továbbiakban kivonó elektróda, 9) helyezünk el. A kivonó elektróda a kamra elektromos potenciálján található. A kamra és a kisülés katódja elektromos szempontból olyan viszonyban vannak, hogy a köztük létrejövő elektromos tér a kilépő ionokat a kamra belseje felé vezesse. Ennek megfelelően a kamra a kisülés katódjához viszonyítva elektromos szempontból negatívabb. Ezen felül természetesen a kamra biztonsági okokból le van földelve.



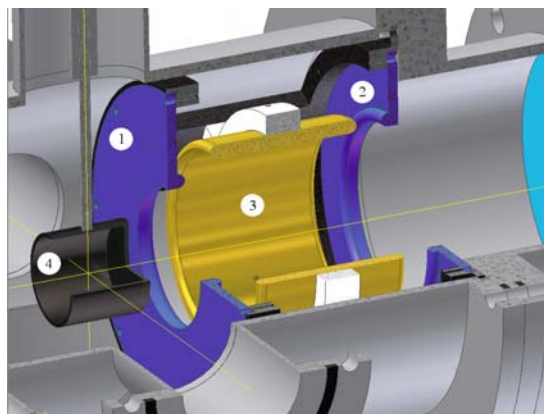
4. ábra

SaPIG – Ionforrás:

2. Katód, 3. és 4. Szekunder elektron emittáló Al korongok,
6. Axiális mágneses teret előállító permamens mágnes, 9. Kivonó elektróda.

3. Ionoptika

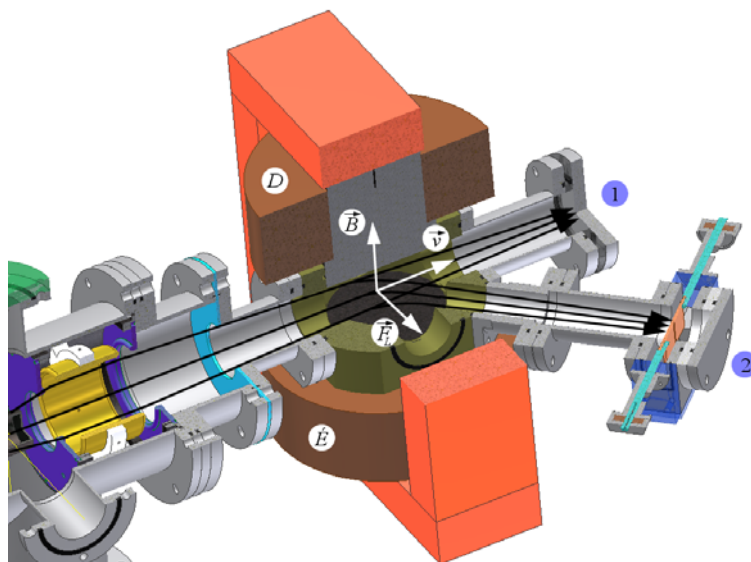
A berendezésben az ionoptikai rendszer egy Einzel-típusú elektrosztatikus lencséből áll (5. ábra). Az itt alkalmazott Einzel-lencse három elektródából áll, a két szélső elektróda (1) és (2) azonos potenciálon található, amely egyben a kamra potenciálja is, míg a középső, henger alakú elektróda (3) ezekhez képest pozitív potenciálon található. Mivel a középső elektróda és a két szélső elektróda között ugyanaz a feszültség, belépéskor az első elektródapár gyorsítja, majd a második elektródapár ugyanolyan mértékben lassítja az ionokat, így áthaladásuk során az Einzel-lencse nem gyorsítja és nem is fékezi az ionokat (nem változtatja meg az energiáját). Az 5. ábrán közelebbről szemügyre vehető a teljes ionáram mérésére alkalmas Faraday-csésze (4), amely szükség esetén betolható az ionnyaláb útjába, mérés után pedig eltávolítható az ionnyaláb útjából. A 6. ábra az Einzel-lencse fókuszáló hatását szemlélteti.



5. ábra

Einzel-lencse

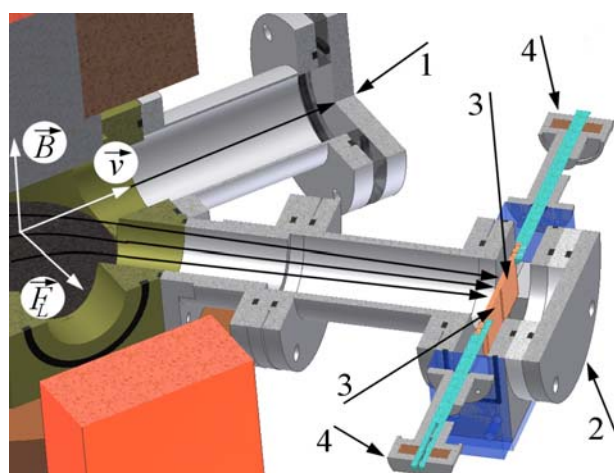
1. és 2. a lencse földelt elektródái, 3. a lencse pozitív elektródája, 4. Faraday-csésze



6. ábra

Az Einzel-lencse fókuszáló hatása.

Az ionok között fellépő taszító elektromos kölcsönhatások folytán, természetesen az ionforrás plazma-teréből kivont ionok széttartó nyalábot hoznak létre. Amennyiben nem használunk elektromos lencsét vagy lencserendszert, a nyaláb a kamra falára jut (amennyiben a kamra elektromosan szigetelve van a föltől, a kamra pozitív töltésre tesz szert, melyet lebegő potenciálnak nevezünk; ha a kamra le van földelve, a föld felől érkező elektronáram semlegesíti a pozitívan töltött ionokat, a kamra semleges marad). Ezt természetesen meg kell akadályozni ahhoz, hogy az ionnyalábot a felhasználás helyére juttassuk. Az elektromos lencsék átvitele nem 100%-os, mindenképpen fellépnek veszteségek. A veszteségek megfelelő mérőáramkörrel kimérhetők. Adott lencse geometria esetében a lencsére kapcsolt feszültség függvényében változtathatjuk a lencse fókusz-távolságát, így befolyásolva a lencse átvitelét. Esetünkben az ionnyaláb a lencsén való leképezés után két helyre juthat. Az egyik a 6. ábra 1-el jelzett egyenes nyalábvégén található mérőpont, ahol a teljes ionáramot mérhetjük meg. Amennyiben a lencse előtt is mértünk már ionáramot, összehasonlíthatjuk (5. ábra 4-es Faraday-csésze) ezt a nyalábvégén mért értékkel, így meghatározhatjuk a lencse százalékos átvitelét különböző lencsefeszültségek esetében. A másik mérőpontra (6. ábra 2) a nyaláb az eltérítő mágnes használatakor jut. Ekkor a 6. ábrának megfelelően a nyalábot alkotó ionok a Lorentz-erő hatására körpályára kényszerülnek, majd elhagyva a mágneses teret, a 2-es mérőpont irányába haladnak. A mágneses térben való eltérítés az ionnyaláb szétválasztódásához vezet. Ezt a hatást analizálásnak nevezzük. Az analizált ionnyalábból kiválaszthatjuk az alkalmazáshoz megfelelő atomtípust és a kívánt töltésállapotot. Az alábbiakban összefüggésekkel is leírjuk a mágneses térben való nyalábszétválasztást.



7. ábra

Nyalábszétválasztó

1. mérőpont – egyenes nyalábvég, 2. mérőpont – analizált nyalábvég, 3. állítható rész határoló lemezei,
4. a lemezek mozgató mechanizmusai

4. Az ionnyaláb szétválasztása (nyalábanalizálás).

Mágneses térben az elektromosan töltött részecskékre hat a Lorentz-erő, melynek hatására körpályára kényszerülnek. Mivel a körpályán való mozgás gyorsuló, megjelenik a centrifugális tehetetlenségi erő is, a Lorentz-erő pedig a centripetális erő szerepét játssza. A körpálya e két erő egyensúlyának megfelelően alakul ki (1).

$$\vec{F}_L = -\vec{F}_{cf} \quad (1)$$

Skalárisan

$$qvB = \frac{mv^2}{r} \quad (2)$$

ahol, q az ion töltése, m a tömege és v a sebessége, B a mágneses tér indukciója és r a pálya sugara. A kialakuló pályát és a fenti adatokat a 8. ábrán szemléltetjük.

A (2) összefüggésben szereplő sebességre az ionok a kivonó feszültség gyorsító hatása révén tesznek szert. Az ionok sebességét a (3) energiaegyenletből határozhatjuk meg.

$$qU_{kiv.} = \frac{mv^2}{2} \quad (3)$$

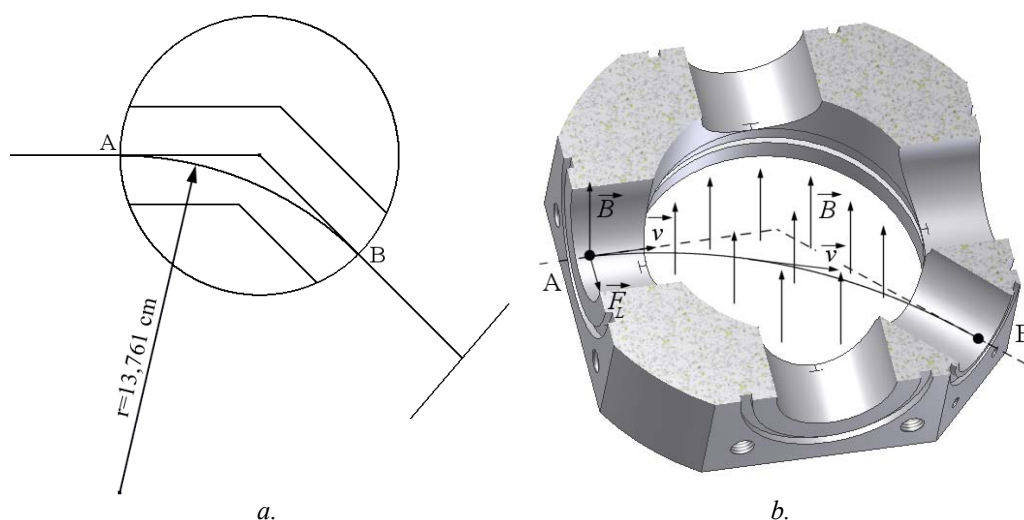
Kifejezzük a (3) összefüggésből az ionok sebességét, majd behelyettesítjük a (2) egyenletbe.

Figyelembe véve, hogy az ionok fajlagos töltése (q_i^f) a (4) összefüggéssel definiált,

$$q_i^f = \frac{q}{m} \quad (4)$$

a pályasugár az (5) formában adható meg.

$$r = \frac{\sqrt{2U_{kiv.}}}{B\sqrt{q_i^f}} \quad (5)$$

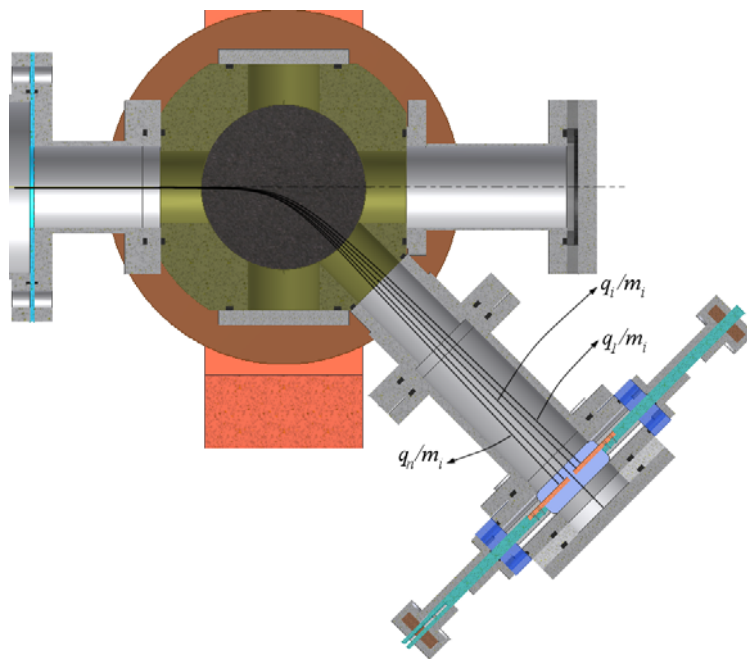


8. ábra
Ionpálya

A 8.a és b ábrákon látható az eltérítő mágnes felső és alsó tekercseinek vasmagja közötti légrést kialakító darab metszete. Ezen a légrésten keresztül közel homogén mágneses térben halad át az ionnyaláb. Az ábrákon látható A pont az ionforrás felőli oldal, a B pont pedig az árammérő felőli oldal. A mágnes geometriája úgy van kialakítva, hogy az eltérített ionok $r = 13,761 \text{ cm}$ sugarú köríven kell haladjanak ahhoz, hogy a 7. ábra 2-es nyalábvégén található árammérő ponthoz jussanak. Mivel az ionforrásból származó ionnyaláb több atomtípus különböző lefosztású ionjait tartalmazza, belátható, hogy az eltérítő mágnes áramát megfelelőképpen kell beállítani ahhoz, hogy egy adott fajlagos töltéssel rendelkező iont juttathassunk el a

felhasználási ponthoz. Ezt a feladatot végezhetjük a tekercs áramforrásának manuális kezelésével, vagy pedig számítógép segítségével egy előírt módon.

Az (5) összefüggés segítségével könnyedén lehet szemléltetni, hogy milyen módon választódik szét a mágneses térben a beérkező komplex összetételű ionnyaláb. Az alábbiakban egy kicsit egyszerűsítünk és feltételezni fogjuk, hogy a mágneses tér teljesen homogén és az ionnyaláb pontosan a rendszer szimmetriatengelyén mozog. Itt főleg a második feltételezés jelent komolyabb eltérést a valósághoz képest, mert amint azt a 6. és 7. ábrákon bemutattuk, az ionnyaláb divergens (széttartó). A következtetéseink viszont érvényesek azokra az ionokra is, amelyek más, az optikai tengellyel valamilyen szöget bezáró irány mentén érkeznek az eltérítő mágneses térbe. Az egyszerűsített feltételeknek megfelelő esetet a 9. ábra szemlélteti.



9. ábra
Nyalábeltérítés

Az (5) összefüggésből állandó mágneses tér esetében az következik, hogy a nagyobb fajlagos töltéssel rendelkező ionok kisebb sugarú pályán térülnek el, mint a kisebb fajlagos töltésű ionok. Ezt az esetet szemlélteti a 9. ábra, ahol m_i az ionnyalábban található egyik atomtípusra vonatkozik (lehet az H, C, N vagy egyéb), melynek n elektronja lehet, és így töltésállapotai is 1-től n -ig fordulhatnak elő az ionnyalábban. Ha tekintetbe vesszük az ionnyaláb komplex összetételét is, ugyancsak ebből az összefüggésből következik az is, hogy az analizáló mágnes áramának, vagyis az eltérítő mágneses tér indukciójának növelésekor, a geometriából adódó r sugarú pályán először a kisebb tömegű de azonos töltésű ionok jelennek meg, majd utána a nagyobb tömegűek.

5. Az analizáló mágnes indukciójának meghatározása

Az analizáló mágnes keresztmetszeti rajzát a 10. ábra mutatja be. Az Ampère-gerjesztési törvényből kiindulva (6),

$$\int_{\Gamma} \vec{H} d\vec{l} = NI \quad (6)$$

ahol I a tekercs meneteiben folyó áram, és felhasználva, hogy a különböző anyagi minőségű közegek elválasztási felületén (A és B) a mágneses indukció normális komponense folytonosan megy át (7),

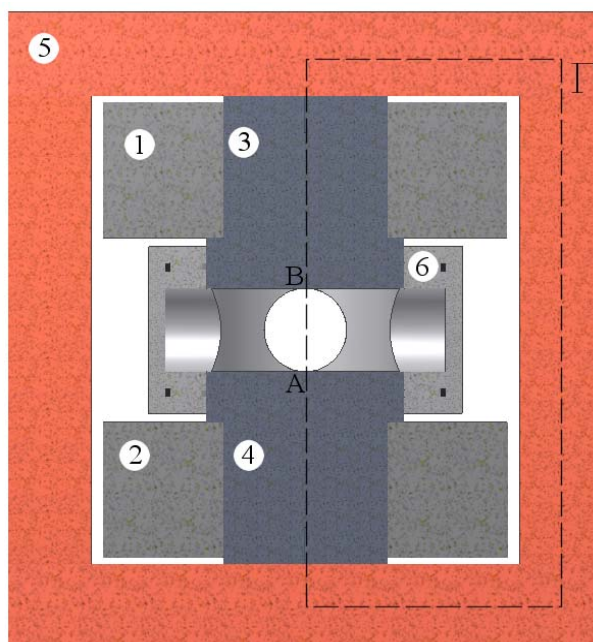
$$\mu_{Fe} H_{Fe} = \mu_0 H_{\delta} \quad (7)$$

az adott geometriájú tekercs esetében a mágneses indukció a tekercs szimmetriatengelyén a (8) összefüggéssel adható meg.

$$B = \frac{\mu_0 N}{\delta} I \quad (8)$$

Az (5) összefüggéssel kombinálva a (8) összefüggést, meghatározhatjuk azt, hogy különböző tekercs-áramok mellett, milyen fajlagos töltésű ion fog az adott r sugarú pályán eltérülni. Amennyiben a 9. ábrán látható rést elég kicsire választjuk meg, az árammérő csak ezt a bizonyos iont gyűjti össze.

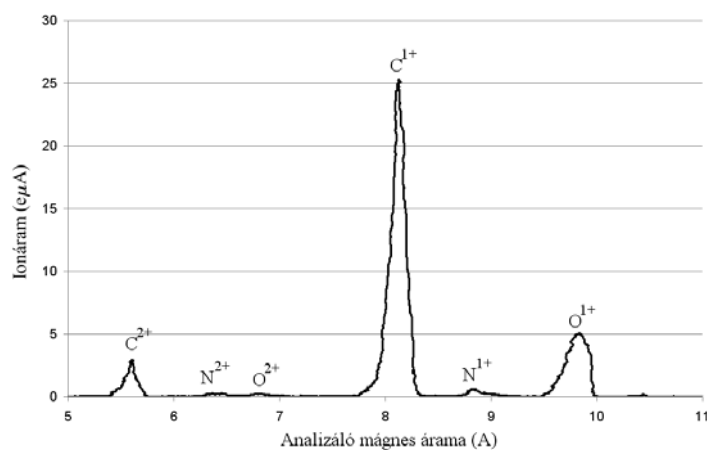
$$I = \frac{\sqrt{2U_{kiv.}}}{\left(\frac{\mu_0 Nr}{\delta}\right) \cdot \sqrt{q_i^f}} = \frac{konst.}{\sqrt{q_i^f}} \quad (9)$$



10. ábra

1-2. Tekercsek, 3-4. Vasmagok, 5. A mágneses kör vas elemei,
6. A vákuumrendszer analizáló mágnes eleme

Mivel a mágneses tér és az eltérítési feltételek meghatározásánál közelítéseket végeztünk, az általunk meghatározott értékek és a mért értékek 10%-os eltérést mutattak. Viszont a korrekciós faktor bevezetésével a fentiekben bemutatott modellel azonosíthattuk az analizált ionnyalámban megjelenő csúcsokat. Egy ilyen spektrumot mutat be a 11. ábra.



11. ábra

Nyalábspektrum

A továbbiakban számos fizikai kísérlet elvégzésére nyílik lehetőségünk. Azonban ezek mellett nagyon sok feladat vár mérnök kollégákra és végzős diákokra, akik az analizált ionnyaláb mérésének számítógépes megvalósításán, az ionspektrumban megtalálható ioncsúcsok automatikus azonosításán, vagy az ionforrásnak mérésekből származó vagy előírt feltételeken alapuló szabályozásán dolgozhatnak.

6. Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet mondanak Toshiyuki Hattori professzornak és ing. Osváth Jenőnek az „International Physics House – „Hattori” Research Laboratory for Scientific and Technological Cooperation” laboratóriumának létrejöttéért tett fáradozásaiért.

7. Hivatkozások

- [1] High-Current Pulsed Vacuum-Arc Evaporator for Surface-Alloying Technologies, Popov SA, Proskurovsky DI, Pryadko EL, et al., IEEE Transactions On Plasma Science Volume: 37 Issue: 8 Special Issue: Part 1 Sp. Iss. SI Pages: 1504-1510 Part: Part 1 Sp. Iss. SI Published: AUG 2009
- [2] Development of compact size penning ion source for compact neutron generator, Das BK, Shyam A, Review of Scientific Instruments Volume: 79 Issue: 12 Article Number: 123305 Published: DEC 2008
- [3] Design parameter investigation of a cold-cathode Penning ion source for general laboratory applications, Rovey JL, Plasma Sources Science & Technology Volume: 17 Issue: 3 Article Number: 035009 Published: AUG 2008
- [4] Effect of Resonant Microwave-Power on a Penning Ionization Gauge Ion-Source, Brown Ig, Galvin Je, Gavin Bf, Et Al., Review Of Scientific Instruments Volume: 56 Issue: 10 Pages: 1894-1896 Published: 1985
- [5] B. Wolf, Handbook of Ion Sources, CRC Press, Inc. 1995