

Bíráli vélemény

RAJTA ISTVÁN: **„Mikromegmunkálás és ionnyaláb-analízis pásztázó ionszondákkal”**

MTA doktori cím megszerzésére beadott értekezéséről

A fizikai tudománynak és az azt segítő társtudományoknak az elmúlt évtizedekben végbement gyors fejlődése napjainkra olyan ismeretek megszerzését is lehetővé teszi, amelyek egy-egy korábbi eredmény alapján elméletileg elérhetőek voltak, de a kísérleti módszerek érdemi és kívülálló számára bámulatatos fejlődése nélkül nem lett volna lehetséges. Erre szép példa a néhány MeV-re gyorsított ionnyalábokkal végrehajtott vizsgálatok területén elért eredmények és e nyalábokkal ténylegesen végrehajtott kísérletek elemzése és rendszerezése. **Rajta István** doktori értekezésében éppen egy ilyen fontos, az egyik vezető hazai kutatóintézetben a nemzetközi élvonalba tartozó módon felfejlesztett vizsgálati területet mutat be meggyőzően.

Az, hogy felgyorsított részecskékkel elvileg nagyon sok szempontból vizsgálni lehet különböző mintákat, azt már a legelső, néhány MeV energiájú részecskenyalábokkal végrehajtott kísérletekből tudtuk. Ugyanakkor nyilvánvaló volt az is, hogy a gyorsított nyalábok tulajdonságainak komoly és igényes fejlesztése nélkül a tudományos kutatás és a gyakorlati alkalmazások fontos területévé a módszer nem válhat. Ahhoz ugyanis, hogy egy mintán mind mélységben, mind laterálisan vizsgálatokat végezhesünk olyan nyalábokra és nyalábtulajdonságokra van szükség, amelyek a vizsgálatok igényeinek megfelelnek. Ez többirányú és egymással összehangolt fejlesztéseket igényelt. A mikroszonda célfeladatban elért előbb μm -es nyalábméretet kellett a nanométeres tartomány felé javítani, meg kellett valósítani a megbízható térbeli pásztázás lehetőségét és végül az is kiderült, hogy gyorsított nyaláb energiastabilitásával, energiafelbontásával és intenzitásával is előre kellett lépni. Ez a fejlesztési munka sok időt vett igénybe, miközben az egész mérőrendszer elemeit a jelölt külön-külön, de egymással és az egész mérési környezettel összhangban fejlesztette.

A jelölt a dolgozatában mintegy két és fél évtizedes munkáját tekinti át, tudományos eredményeit e munkával összhangban, az egyes fázisoknál meglévő körülmények bemutatásával ismerteti. Kiindulási pontja a debreceni Atommag Kutató Intézet (Atomki) 5 MV-os van de Graaff generátorán doktoranduszként elkezdett mikroszonda-célfeladat volt. Ezután a pásztázó mikroszonda fejlesztése és alkalmazása következett. A következő nagy feladat a nanoszonda hazai megvalósítása volt, amely sok időt, rengeteg kísérletes ügyességet és előrelátást igényelt. Közben nemzetközi együttműködésben szerzett tapasztalatai is jelentősen segítettek. Az utóbbi években pedig áttörést hozott az, hogy az Atomkiba telepítettek egy új, kiváló paraméterekkel megépített gyorsítót, a Tandetront.

A most vázolt nagyobb munkaállomásokhoz természetesen hozzátartoztak az egy-egy állomáson alkalmazott ionnyaláb analitikai módszerek. Ilyen, széles körben is alkalmazott eljárások a Rutherford visszaszórásos spektroszkópia és a PIXE (Proton Induced X-ray Emission), amely roncsolásmentes sok-elemes analitikai vizsgálatot tesz lehetővé a legkönnyebb elemek kivételével az egész periódusos rendszerre. További a gyakorlatban megvalósított eljárásokat jelentenek a PIGE és DIGE (Proton/Deuteron Induced Gamma-ray Emission) módszerek. Más célú, az alkalmazás szempontjából lényegesen igényesebb

minőséget jelentenek a STIM (Scanning Transmission Ion Microscopy) mikronyalábos technikák. Végül hangsúlyozom, hogy a jelölt meghonosította a PBW (Proton-Beam Writing), a nanonyalábokat felhasználó írásos litográfiás módszert, amely alkalmas maszkok, vagy más mintázatok prototípusának elkészítésére és javítására.

Összefoglalva: a dolgozatban egy átgondolt, világos vonalvezetésű fejlesztési és gyakorlati alkalmazásokból álló munkát tekinthetünk át. A jelöltnek a legfontosabb eredménye minden egyes lépésnél az, hogy a bemutatott világszínvonalú technikát az Atomkiban megvalósította és az Intézetben lehetőség van e hatékony, nukleáris nyalábanalitikai módszerek alkalmazására mind mintaelemzések, mind a litografikus eljárások területén.

Rajta István az MTA doktori cím elnyerésére készített doktori értekezésében több, a nukleáris nyalábanalitikához tartozó fejlesztési terület kifejtésével foglalkozik. A dolgozat négy, módszertanilag és a tényleges kísérleti munka jellegét tekintve is eltérő fejezetből áll. Ezeket a fejezeteket az rendezi egységbe, hogy a munka célja mind a négy esetben hasonló, a fejlesztések és a vizsgálatok egy-egy fázisát mutatják be. A disszertáció első részében a jelölt az ion-nanoszonda nemzetközi együttműködésben végzett fejlesztését mutatja be. Így sorban leírja a Szingapúri nanoszondát, a csehországi Rezbem megvalósított nehézion mikroszondát, majd az Atomki nanoszondát és annak a Tandetronnál való telepítését. A dolgozat második része az ionnyaláb analitikával kapcsolatos eredményeket írja le, míg a harmadik a protonnyaláb írással és a rezisztanyagok kiválasztásával és alkalmazásával foglalkozik. A negyedik rész a PBW mikrooptikai és mikrofluidikai alkalmazásokat mutatja be. **Rajta István fejlesztései, vizsgálatai és kutatásai világszinten úttörők, időszerűek, célkitűzésük megfelel a kor kívánalmainak, felhasznált kísérleti módszerei az élvonalbeli tudomány mércéjével mérve korszerűek.**

Rajta István MTA doktori értekezése 113 oldalas. A „Bevezetés” általános áttekintést ad az elvégzett fejlesztések céljáról, az alkalmazott módszerekről és bemutatja a szerző szerepét a dolgozatban leírt tudományos kutatások tényleges elvégzésében. Ebben a részben a szerző hangsúlyozza, hogy a munkát a dolgok jellegénél fogva minden esetben munkacsoportban végezte, de a dolgozat téziseiben csak olyan kísérleteket és eredményeket ismertetett, amelyeket leíró cikkek esetében meghatározó vezető szerepe volt. — A következő, lényegében az első „*Mikroszondától a nanoszondáig*” fejezet abban a három laboratóriumban a mikroszondák és a nanoszondák területén elvégzett fejlesztéseinek eredményeivel foglalkozik, amelyekben alkalma volt dolgozni, a szingapúri, a csehországi rezi és debreceni intézetekben. Az „*Ionnyaláb analitika*” fejezet leírja a könnyű és nehéz elemek mikro-PIXE mérésének egyidejű megvalósítására kidolgozott módszerüket és beszámol a deuteronokkal gerjesztett magreakciókkal dolgozó DIGE módszer alkalmazásának sikereiről. Foglalkozik azzal is, hogy a nyalábok méretének meghatározásával kapcsolatban milyen eljárást dolgozott ki, valamint azzal, hogy a nanokapillárisok irányeloszlását hogyan lehet meghatározni. A harmadik „*PBW – metodika és rezisztanyagok fejlesztése*” fejezet a proton-nyalábbal való anyagmegmunkálás terén elért eredményeit foglalja össze. Külön érdekesség, hogy bebizonyosodott, hogy az Atomkiban évtizedek óta használt CR-39 nyomdetektor proton-nyaláb írás céljaira is alkalmazható. Végül az utolsó „*PBW - alkalmazások*” fejezet szép példákat mutat be a protonnyaláb írásos technológia alkalmazásaira. Így a jelölt bemutat néhány mikrooptikai alkalmazást és leír egy bravúros, kimagasló eredménynek tekinthető, elkészített mikroturbinát, amely megvalósításakor a világon az első, először mozgó alkatrészt tartalmazó szilícium mikroeszköz volt. A jelölt még ebben a fejezetben bemutat egy cirkuláló ráksejtek kiszűrésére készített új mikrofluidikai eszközt.

A dolgozatot „*Az eredmények hasznosítása*” rövid fejezet, majd a 3 oldalas „*Összefoglalás és kitekintés*”, végül „*Köszönetnyilvánítás*” és „*Irodalom*” zárja. A pályázó a dolgozat

legvégén, tézispontjaihoz külön-külön részletezve közli a dolgozathoz kapcsolódó saját közleményeit. – Feltűnő és a szokásokkal ellentétes, hogy a dolgozat nem tartalmaz angol nyelvű összefoglalást.

Rajta István doktori értekezése formai szempontból megfelel az elvárható követelményeknek. A dolgozat szövege érthető, a szaknyelv használata megfelelő, nyelvhelyességi szempontból komolyan kifogásolható részt nem tartalmaz. A disszertáció gondos kivitelű, az abban szereplő ábrák minősége színvonalas.

Rajta István doktori értekezésében a következő, véleményem szerint új, eredeti tudományos eredményeiről, fejlesztéseiről számol be:

1. A szerző módszert dolgozott ki és eredményes munkát végzett a gyorsított nyalábok méretének tervszerű csökkentésére. Mind a Szingapúri Egyetem, mind a csehországi Rez-ben lévő laboratóriumokban már figyelemre méltó eredményeket ért el ezen a téren. Az Atomkiban a jelölt irányításával telepített új 2 MV Medium-Current Plus Tandetron részecskegyorsítójánál megtervezte és telepítette a gyorsító paramétereit optimálisan kihasználó és új generációs kvadрупólus mágneses lencsét alkalmazó nanoszondát, amellyel mintegy 200 nm nyalábméretet ért el.
2. Az ionnyaláb-analitika területén végrehajtott tovább-fejlesztések és alkalmazások több területen is új eredménynek számítanak. Így két detektor egyidejű alkalmazásával kifejlesztett egy új mérési módszert arra, hogy a minták analitikai vizsgálata egyetlen besugárzással elvégezhető legyen a szénnél nagyobb rendszámú összes elemre. Néhány mikron méretű deuteronnyalábbal a kiváltott gammák mérésével megnövelte az analitikai eljárás érzékenységét. Eredményeket ért el az ionnyalábok méretének meghatározására és a rutinfókuszálás végrehajtására alkalmazott módszerek tovább-fejlesztésében, valamint alumínium-oxid mintákban kialakult nanokapillárisok irányeloszlásának meghatározása területén.
3. A jelölt új eredményeinek zömét az protonnyaláb írás (PBW) technika fejlesztése területén érte el. Itt fontos hangsúlyozni, hogy minden eredménye úttörőnek tekinthető a szakterületen és saját laboratóriumának lehetőségeit gyarapítja. Így módszert dolgozott ki kis töltésmennyiségek mérésére, elsőként készített fém mikrobélyegzőket PBW módszerrel létrehozott polimer mikrostruktúrákból, új, javított tesztmintát készített a protonnyaláb méretének meghatározására. Jelentősnek tartom, hogy megmutatta, hogy a CR-39 jelű radondetektálásra rutinszerűen használt anyagot alkalmazhatjuk PBW célokra és meghatározta a felhasználás mellékkörülményeit.
4. A PBW módszert nemzetközi figyelmet keltő sikerrel alkalmazta mikrooptikai és mikrofluidikai célokra. Így passzív optikai hullámvezetőt hozott létre PBW módszerrel. Másrésztől megtervezett és elkészített egy mikroturbinát, ami világelső volt abban, hogy mozgó alkatrészt tartalmazó szilícium eszköz volt. Új mikrofluidikai eszközt tervezett meg és készített el, amely cirkuláló ráksejtek kiszűrésére alkalmas.

Az új eredményeknél a véleményt író igen nagyra értékelte azt, hogy eredményeit Rajta István legtöbbször az Atomki laboratóriumának világszínvonalra való fejlesztése érdekében, úttörő módon érte el.

Rajta István doktori értekezésében tudományosan fontos, korszerű témájú és a gyorsított részecskenyalábokat gyakorlatilag alkalmazó közösség érdeklődésre számot tartó, magas színvonalú és komoly kísérleti felkészültségről bizonyosságot tevő vizsgálatait foglalja össze. A kutatásokat néhányszor nemzetközi együttműködésben, többször azonban hazai munkahelyén,

az Atomkiban végezte. A 23, többségében az alkalmazott fizika vezető nemzetközi szakfolyóirataiban a dolgozatban leírt témából megjelent közlemények közül nyolcnak ő a főszerzője. Ez a mai tudományos együttműködések belső rendszerét, felépítését közvetlenül ismerve Rajta István kiemelkedő, meghatározó szerepének egyértelmű bizonyítéka. **Így megállapítom, hogy Rajta István doktori értekezésében ismertetett új tudományos eredmények hitelesek és bizonyossággal olyan eredményeket tartalmaz, amelyek elérésében a szerzőnek döntő szerepe volt.**

A következőkben előbb bíráló megjegyzéseimet, majd kérdéseimet foglalom össze.

1. Rajta István dolgozatában a részecskegyorsítók nyalábjai tudományos célokra történő alkalmazásai fejlődése szempontjából fontos, több különböző mintán, különböző laboratóriumban, eltérő időpontokban végrehajtott kísérletei eredményeit és azok értékelését mutatja be. Egy ilyen komplex, valószínűleg számos kényszer miatt is alakuló, a metodikai különbségekre is tekintettel nehezen összefogható kutatási program eredményei bemutatásánál fontos az, hogy az olvasó már a dolgozat elején megismerhesse a világosan megfogalmazott célkitűzéseket és szerkesztési szempontokat. A szerző ugyan a dolgozat első, „Bevezetés” fejezetét ennek a szolgálatába állítja, de a fejezet igen rövid, mindössze két oldal és így az olvasó számára nem rajzolódik ki a fejlesztések hasznát egységes keretbe rendező vezérlő szempontok ismertetése. Bár az ilyen jellegű fejlesztő munkának az egyik fő szempontja az, hogy mit értek el a versenyző laboratóriumok és a sorrend időben is változik. Mégis a dolgozat javulását jelentette volna, ha a jelölt a rövid bevezető után külön fejezetben összefoglalta volna kutatásai eredményeit hasznosítani tudó szakterület fő jellemzőit, bemutatási és rendszerezési szempontjait.
2. A disszertációban leírt fejlesztések érdemi eredményét jelenti az, hogy milyen mértékben tágulnak az egyes eredmények elérése után az elvégezhető vizsgálatok. Ez különösen az Atomkiban éppen a jelölt felügyeletével, irányításával és aktív közreműködésével telepített Tandetron körül kialakított valóban élvonalbeli kísérleti környezetre igaz. Értékes a szigetelőgáz és a lefosztógáz hatásának elemzése. Az elért 200 nm-es nyalábméret impresszív eredmény, de vajon volna-e lehetőség még ezt is szűkíteni? Van-e olyan meghatározó környezete a kísérleti vizsgálati elrendezésnek, ahol elvileg még jelentős javulás érhető esetleg el?
3. A jelölt a disszertációjában bravúros technikai fejlesztésekről és érdemben elért figyelemre méltó eredményekről számol be. Ugyanakkor kevés szó esik a módszerek jövőjéről. Kérem, hogy a védésen a jelölt mondja el gondolatait az általa alkalmazott és fejlesztett gyorsított részecskenyalábbal történő analitika, anyagmegmunkálás és a protonnyalábos írás alkalmazásának jövőjéről. Fejtse ki, hogy hogyan látja a kifejlesztett alkalmazások sorsát a jövőben, milyen irányban lát komoly kiterjesztési lehetőséget vagy új felhasználási alkalmazást, azért, hogy (ahogyan a szerző írja) „a következő évtizedekben kutató generációkat kiszolgálja”. Tekintve, hogy az alacsonyenergiájú, néhány MV típusú gyorsítók hosszú távú alkalmazását sokan az ilyen felhasználások körében látják, kiválthatja-e egy jövőbeni igény akár maguknak a gyorsítóknak, vagy ionforrásaiknak, nyalábvezető elemeinek jelentős fejlesztését?

Részletes megjegyzéseim, kérdéseim a következők.

- A dolgozatban többször emlékeztet a Szingapúri Egyetem, illetve a cseh rezi intézetekben végzett munkájára és ott elért eredményeire. Az azonban a disszertációból nem derül ki, hogy hogyan, hányszor, mennyi ideig és milyen minőségben dolgozott az említett intézetekben. Kérem, a védésen fejtse ezt ki!

- A 1. és 2. ábrákon látható a Szingapúri Egyetem Gyorsítólaboratóriumának (CIBA) alaprajza 2001-ben és 2017-ben. Az összehasonlítás természetesen mutatja a fejlesztéseket.
 - Mi volt a szerző szerepe a szingapúri fejlesztések átgondolásában, és/vagy megvalósításában?
 - Mit jelent „a 2. generációs PBW nyalábvég” és mit a „biológiai minták mikroszkópiájára” alkalmas nyalábvég?
 - A szingapúri laboratóriumra vonatkozik az 1. és 2. táblázat. Mekkora az ott megadott ionoptikai paraméterek hibái? Mekkora a megadott nyalábméret-paraméterek hibái?
- Megítélésem szerint nem lett volna nehéz a 9. ábra szerinti 2,8 MeV alatti spektrumrészt kiértékelni. Mit jelent az, hogy a 2,14 – 2,8 MeV közötti energiatartományban a „laborhátér *interferenciát* okoz”??
- A 24-ik és következő oldalakon a kétdetektoros PIXE rendszert mutatja be a szerző. A 19. ábrán egy példát mutat be arra, hogy milyenek az ultra vékony ablak melletti PIXE detektorban és a másik Be ablakú, alumínium szűrővel ellátott detektorral ugyanabban a mérésben felvett spektrumok. Az ábrából világosan látszik, hogy a Ca és a Fe közötti energiatartományban mind a két detektor működött. Azonban a tényleges elrendezés és a mátrixhatások különböznek a két detektorra. Milyen azonosságokat és különbségeket tapasztalt a jelölt a két tartomány külön-külön történt kiértékelése után? Mekkora volt a különbség az egyes elemek kiértékelésekor kapott eredményekben a két detektorban?
- A 3.2 fejezetben a jelölt a hatékony töltés-monitorozásról ír. Végkövetkeztetésében eljut oda, hogy a szekunder elektronemisszió mérése hatékony módszer a megfigyelésekre. A 36. ábrán kísérleti eredményeket mutat be négy különböző mintára. Mit mutatnak pontosan az ábrán látható, a mérési pontokat összekötő vonalak? Ezek illesztések eredményei? A 37. ábra már más képet mutat. – Összegezve: melyek azok a körülmények, amelyek mellett a szerző által kidolgozott módszer megbízhatóan alkalmas hatékony töltésmonitorozásra? Hol vannak az alkalmazhatóság határai?
- A jelölt tézispontjai között szerepel a CR-39 néven ismert poliallildiglikol-karbonát, az Atomki munkatársai által régóta radondetektálásra használt anyag elsőként való alkalmazása PBW célokra. Kérem, hogy hasonlítsa össze ennek az anyagnak a jellegzetes tulajdonságait a PMMA polimer és a Foturan üveg hasonló, protonnyaláb írási célokra történő felhasználásával kapcsolatban! Mennyiben jelent előnyt a CR-39 anyag alkalmazása PBW célokra és fejtse ki, hogy mikor érdemes ezt az anyagot használni!
- Bravúros eredménynek tartom, hogy sikerült megvalósítani a világon az első mozgó alkatrészt tartalmazó mikroturbinát. Mi volt az élettartama az elkészített eszköznek? Volt-e rá lehetőség, hogy más hasonló eszközt is megtervezzenek? Lehetett-e elméletileg követni a rendszerben kialakuló áramlástani viszonyokat hidrodinamikai modellek segítségével?

Összefoglalva:

Az előbbi bíráló megjegyzéseim, kérdéseim nem befolyásolják azt a megállapítást, hogy RAJTA ISTVÁN az élvonalbeli alkalmazott magfizika időszakos témájában, legtöbbször figyelemre méltó kísérletes ügyességről tanúbizonyságot téve saját maga által kifejlesztett, korszerű kísérleti módszerekkel jelentős, eredeti új tudományos

eredményeket ért el. A tudományos sikerben a jelölt vezető szerepét bizonyítottnak látom. A dolgozatban leírt eredmények hitelesek, azok nemzetközi fórumokon való nyilvánosságra hozatala 23, vezető folyóiratokban megjelent publikációkban megtörtént. A jelölt eredményei alkalmasak arra, hogy az azokat összefoglaló disszertáció megvédése után a szerző megkapja az MTA doktora címet.

Mindezek alapján az elvégzett alkalmazott fizikai kísérleti munka iránti elismerésemet is kifejező szakmai meggyőződéssel javaslom

RAJTA ISTVÁN

doktori értekezésének elfogadását és a nyilvános vita kitűzését.

Budapest, 2021. június 29.

Kiss Ádám
a fizikai tudomány doktora