

## ATOMMAGKUTATÓ INTÉZET

4026 Debrecen, Bem tér 18/c, 4001 Debrecen, Pf. 51.

Telefon: 06-52-509200, Fax: 06-52-416181

E-mail: [director@atomki.hu](mailto:director@atomki.hu); honlap: <http://www.atomki.hu>

### I. A kutatóhely fő feladatai a beszámolási évben

Az intézet fő feladatai az alapító okiratban foglaltak szerint a következők: alap- és alkalmazott kutatások folytatása az atommagfizikában, az atomfizikában és a részecskefizikában. Fizikai ismeretek és módszerek alkalmazása más tudományágakban (anyagtudomány és anyagvizsgálat, földtudományok és környezetkutatás, orvosi-biológiai kutatások) és a gyakorlatban. Az alap- és alkalmazott kutatásokhoz szükséges módszerek és eszközök fejlesztése. Közreműködés a posztgraduális képzésben és a felsőoktatás feladatainak ellátásában. Az alaptevékenységgel azonos területen kiegészítő tevékenység végzése.

### II. Az év folyamán elért kiemelkedő kutatási és más jellegű eredmények, azok gazdasági-társadalmi haszna

#### *Kvantummechanika*

Az egydimenziós Schrödinger-egyenlet egzakt megoldásait eredményező hatékony módszert kiterjesztették a helyfüggő effektív tömeggel jellemezhető problémákra. Szemben az  $e$  területen eddig született egzaktul megoldható feladatokkal a módszer garantálja, hogy az effektív tömegnek sem zérushelyei, sem szingularitásai nincsenek, továbbá speciális esetként tartalmazza a konstans tömeg esetét is. Példaként egy olyan potenciált tekintettek, amely magán viseli mind a harmonikus oszcillátor, mind pedig a Morse-potenciál jellegzetességeit, és egzakt formában megadták az energia-sajátértékeit és a megfelelő normált hullámfüggvényeket.

Ismeretes, hogy egy maximálisan összefont állapotú fizikai rendszer két távoli részén két-kimenetelű méréseket végrehajtva a rendszer bármely kvantumkorrelációja reprodukálható klasszikus modell keretein belül, ha a két távoli alrendszer között megengedünk 2 bit kommunikációt. Az intézet kutatói megmutatták, hogy ezen 2 bit szükséges is.

Bevezették a korrelációk zárt halmaza fogalmát. Információelméleti elveken alapuló, de tágabb értelemben véve bármely konzisztens fizikai elméletnek bizonyos lokális műveletekre nézve zártnak kell maradnia. Korrelációk ezen zárt halmazát vizsgálva megállapítható, hogy mely információelméleti elvek azonosak (ekvivalensek) és melyek különböznek ténylegesen egymástól. Ezen módszer segítségével leszűkíthető a szóba jöhető poszt-kvantummechanikai alternatív fizikai elméletek száma.

Végezzünk méréseket egy fizikai rendszer két, egymástól elváló részén. Tekintsük azt a halmazt, amelyet a részrendszereken végrehajtott mérések kimeneteleinek együttes valószínűségei alkotnak. Klasszikus fizikai rendszer esetén ez a halmaz egy sík lapokkal határolt konvex alakzat. A határoló lapokat az úgynevezett szoros Bell-egyenlőtlenségek

jelölik ki. A kvantumelmélet szerint a Bell-egyenlőtlenségek sérülhetnek, ily módon kvantumrendszeren történő mérésekkel kaphatunk olyan pontokat is, amelyek a klasszikus halmazon kívül esnek. Ha bármilyen kvantumrendszert megengedünk, a teljes halmaz, az úgynevezett kvantumtest szintén egy konvex alakzat, amely nagyobb, mint a klasszikus halmaz, és magában foglalja azt. Az intézet kutatói megmutatták, hogy az általános várakozásokkal szemben arra a kvantumtestre, amelyet úgy kapunk, hogy véges számú állapottal rendelkező kvantumrendszerekre korlátozzuk magunkat, ezen állítások nem igazak, azaz a halmaz nem konvex, és nem tartalmazza a teljes klasszikus halmazt.

### *Részecskefizika*

Az Atomki munkatársai a korábbi években a CMS műondetektorainak pozicionálásával kapcsolatban jelentős fejlesztést végeztek el. Az elmúlt évben is alapvető szerepet játszottak; üzemeltették a kiépített rendszert és további fejlesztésekben vettek részt.

A CERN-CMS együttműködés keretében folytatták a második kvantumszindinamikai sugárzási korrekciók számítására alkalmas általános módszer kifejlesztését. Sikerült megadni az egyszerűen feloldatlan partonsugárzást leíró közelítő mátrixelemek integráljainak analitikus alakját.

### *Magfizika*

Elsőként figyeltek meg rezonanciákat az  $^{232}\text{U}$  hasadási valószínűségében a 4.8 MeV alatti gerjesztési energiatartományban. A megfigyelt hasadási rezonanciákat olyan rotációs sávokkal írták le, melyek közös tehetetlenségi nyomatékkal rendelkeznek, és a sávok tagjainak relatív intenzitása állandó. Az illesztés során kapott rotációs paraméter értéke:  $\hbar^2 / 2\theta = (1.96 \pm 0.11)$  keV, amely a hiperdeformált magalakra jellemző rotációsparaméter-értéknek felel meg. A hasadványok szögeloszlásának mérése lehetővé tette az egyes rotációs sávokhoz tartozó K-érték meghatározását.

A neutronban gazdag szén atommagok valencianeutronjai gyengén kötöttek, és glória-szerűen veszik körül a mag törzsét. Ez az elrendezés szokatlan magfizikai jelenségek létrejöttét teszi lehetővé. A nehéz szén atommagok kvadrupólus viselkedésének tanulmányozására a  $^{20}\text{C}$  atommagot ólom és folyékony hidrogén céltárgyon szóratták a japán nemzeti laboratóriumban, a RIKEN-ben. Megállapították, hogy a Coulomb-gerjesztés hatáskeresztmetszete anomálishan kicsi a nukleáris gerjesztéséhez képest. Ezt a jelenségek csak úgy lehetett értelmezni, ha feltételezték, hogy a valencianeutronok kvadrupólus mozgása sokkal gyengébben csatolódik a törzs mozgásához, mint ahogy az a stabilitási sáv közelében megszokott.

Korábbi vizsgálataikban megmutatták, hogy a könnyű, erősen neutrongazdag atommagokban a neutronegyrészecske-energiák a protonszámmal erősen változnak, ami pl. az  $N=8$  és az  $N=20$  héjzáródások megszűnéséhez vezet. Azért, hogy információt kapjanak az egyrészecske-állapotok más magtartományokban mutatott viselkedéséről, az  $N=82$  héjzáródás erősségét vizsgálták a  $^{131}\text{In}$  hosszú élettartamú állapotainak a tanulmányozásával (GSI, Németország, RISING együttműködés). Ebben az atommagban meghatározták a  $17/2^+$  impulzuszórási állapot energiáját, aminek héjmodell-analízisével kimutatták, hogy ha 2 protont elveszünk a  $^{132}\text{Sn}$  atommagból, akkor az  $N=82$  héjzáródás erőssége 600 keV-vel

csökken. Ez az érték arra enged következtetni, hogy az  $N=82$  héjzáródás  $Z=40$ -nél, a  $^{122}\text{Zr}$  atommagban megszűnik.

A páratlan neutronszámú  $^{127}\text{Ce}$  és  $^{129}\text{Ce}$  atommagok forgási sávjait vizsgálták az Euroball és Eurogam  $\gamma$ -detektor-rendszerrel. Számos új forgási sávot találtak a két izotópban, a már ismerteket pedig nagyobb spinértékekig terjesztették ki. A kísérleti eredményeket forgatott Woods-Saxon-potenciált használó modellszámolásokkal összevetve az új sávokra egyrészezske-konfigurációkat határoztak meg. Azt találták, hogy a könnyű páratlan neutronszámú cérium izotópok negatív paritású forgási sávjai rendellenesen nagy szignatúra-felhasadást mutatnak, ami az atommag alakjának a tengelyszimmetriától való eltérése esetén várható. Ezen eltérés oka valószínűleg az, hogy a  $\gamma$ -puha magtörzset a  $h_{11/2}$ -alhéj közepéről származó nagy impulzusmomentumú neutronok polarizálják. Ezek az eredmények újabb bizonyítékot szolgáltatnak a statikus háromtengelyű atommagalakok létezésére.

A detektálási technika fejlesztési területére eső vizsgálataik során meghatározták egy  $2'' \times 2''$  méretű  $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$   $\gamma$ -detektor teljesenergia-hatásfokát és energiafeloldását a  $700 \text{ keV} - 17,6 \text{ MeV}$ -es  $\gamma$ -energiatartományban. A detektor abszolút hatásfokának meghatározására  $\gamma$ -forrásokat és az intézet  $5 \text{ MV}$ -os Van de Graaff gyorsítójával kiváltott  $(p,\gamma)$ -reakciókat használtak. A kristály kísérletileg meghatározott relatív energiafeloldása a más típusú szcintillációs detektoroké közül a legjobbnak bizonyult.

A könnyű töltött részecskék detektálására szolgáló, Atomkiban kifejlesztett DIAMANT segéd-detektort sikeresen alkalmazták az EXOGAM (GANIL, Franciaország) és az AFRODITE (iThemba LABS, Dél-Afrikai Köztársaság) gamma-spektrométerekkel végzett mérésekben. A detektorrendszer segítségével a protonstabilitási vonal közelébe eső egyes  $A \sim 130$  atommagokra jóslott nagy alapállapotú deformációt kívánják kimutatni.

Új módszert, tömegszeparátort alkalmazva meghatározták az ősrobbanás és a csillagok energiatermelése szempontjából fontos  $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$  reakció hatáskeresztmetszetét széles energiatarományban.

Alfa-indukált magreakciók hatáskeresztmetszetét határozták meg a  $^{113}\text{In}$  magon, és levonták az asztrofizikai konzekvenciákat.

A  $^{89}\text{Y}$  magon végzett nagy pontosságú rugalmas alfa-szórás mérésekből az alfa-mag optikai potenciálra, illetve annak neutronszám-függésére vontak le következtetéseket.

A  $^{74}\text{As}$  atommag bomlásának széles hőmérséklettartományban történő vizsgálatával cáfolták azt a jóslatot, hogy a bomlás felezési ideje függhet a hőmérséklettől.

Nagy pontossággal meghatározták a  $^{154}\text{Tb}$  mag  $m1$  izomer állapotának felezési idejét.

Megmérték a  $^{12}\text{Be}$  első gerjesztett állapotának élettartamát, és megerősítették az  $N=8$ -as mágikusság megszűnését a stabilitástól távol.

A  $^{20}\text{O}$  tükörmagjának, a  $^{20}\text{Mg}$  izotópnak a vizsgálatával megerősítették a  $^{20}\text{O}$ -nál kimutatott valencianeutron-lecsatolódás jelenségét.

Az  $^{36}\text{Ar}$  atommaggal kapcsolatos elméleti klasztermo-dell-vizsgálataik azt mutatták, hogy ebben a magban hiperdeformált sávok is kialakulhatnak, és az ezekhez tartozó állapotok legkönnyebben a  $^{24}\text{Mg} + ^{12}\text{C}$  és  $^{20}\text{Ne} + ^{16}\text{O}$  reakciók segítségével gerjeszthetők. Intézetén kívüli független kísérleti vizsgálatok a megjelölt reakciókat használva megerősítették a hiperdeformált sáv létezését az  $^{36}\text{Ar}$ -ban.

Az intézet kutatóinak meghatározó szerepük volt a komplex energiájú Gamow-állapotokat tartalmazó egyrészecske-bázis (Berggren-reprezentáció) fejlesztésében. 2009-ben a korábbi évtizedek eredményeit is összegző cikket jelentettek meg. Ez a munka összefoglalja a Berggren-reprezentációval kapcsolatos ismereteket és a héjmodellben történő alkalmazásokat, amelyek a különféle típusú óriásrezonanciáktól az egzotikus könnyű atommagok szerkezetének számolásáig sok magfizikai problémára kiterjednek.

Protonnyalábokkal Mo, Er, Tm, Hf, Zr és Cd céltárgyakon, deuteronnyalábokkal Hf, Co, Fe és Zr céltárgyakon, alfa-részecskékkel Ho és Hf céltárgyakon, míg  $^3\text{He}$ -részecskékkel Zn, Pd, Cd, Ta és Pt céltárgyakon előidézett reakciók gerjesztési függvényét mérték és számították ki elméletileg a NAÜ orvosi és ipari alkalmazások szempontjából nagy jelentőségű nukleáris adatbázisának bővítése érdekében.

### *Atomfizika*

Víz céltárgyon szóratott pozitronok energiaeloszlását vizsgálták 100 eV és 153 eV ütközési energiákon. Koincidenciavizsgálattal állapították meg, hogy egy adott pozitronszóródás során a visszamaradt rendszer  $\text{H}_2\text{O}^+$  ion-e, vagy az  $\text{OH}^+$  és  $\text{H}^+$  fragmentumok valamelyike. Az energiaeloszlás maximális értéke  $\text{OH}^+$  és  $\text{H}^+$  esetén 5-10-szer kisebb volt, mint  $\text{H}_2\text{O}^+$  esetében.

Kis molekulák ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_6\text{H}_6$ ) nagy töltésű ionokkal történő besugárzásánál az elektronbefogás és a molekula azt követő széttörésének folyamatát vizsgálták. A mérésorozat három jelentős megfigyelést eredményezett: az azonos sebességű és azonos elektronszerkezetű, de kismértékben eltérő töltésű lövedékionok ( $\text{N}^{6+}$ ,  $\text{O}^{7+}$ ) minden céltárgy esetén jelentősen eltérő domináns fragmentációs csatornákat eredményeztek; a nagyon hasonló szerkezetű  $\text{H}_2\text{O}$  és  $\text{H}_2\text{S}$  molekulák esetén az egymásnak megfeleltethető fragmentációs utak ugyancsak jelentősen eltérő valószínűséggel valósultak meg; a vízmolekula fragmentációjában olyan anomális fragmentum-szögeloszlásokat találtak, amelyeket elméletileg egyelőre nem tudtak értelmezni. Az eredmények elméleti értelmezése nemzetközi együttműködésben folyik.

Egy új mérésorozatot indítottak a többszörös befogással létrehozott, legalább kétszeresen gerjesztett semleges molekulák és molekulaionok állapotainak vizsgálatára az autoionizációs folyamatban kilépő elektronok mérésével. Az első eredmények, némi meglepetésre, nagy negatívion-hozamokat mutattak, melyek az alkalmazott mérési módszer mellett megjelennek az elektronspektrumokban. Ennek a megfigyelésnek nagy jelentősége lehet sugárkárosodási folyamatok vizsgálatában.

A DORIS III (Hamburg, Németország) szinkrotronon végzett mérések eredményei igazolták a korábban a MAX-II-n (Lund, Svédország) megfigyelt bal-jobb aszimmetria létezését a fotoelektronok szögeloszlásában. Méréseiket az előzőtől teljesen eltérő berendezéseken végezték ugyan, de a kísérleti aszimmetriaparaméterek nagyon jó egyezést mutattak egymással. Ebből arra következtettek, hogy a fotoelektronok szögeloszlásának paritássértő viselkedése magából a foton-atom kölcsönhatásból ered.

Kr 4p fotoelektronok szögeloszlásának a DORIS III (Hamburg, Németország) szinkrotronon végzett méréséből kimutatták, hogy a Kr 3d-héj rezonáns gerjesztése jelentősen módosítja a 4p fotoelektronok szögeloszlását. A dipólkölcsönhatás mellett jelentős járulék származik a magasabb multipólusokból is (elektromos kvadrupól, mágneses dipól). Továbbá, a kísérleti és

az általuk kidolgozott elméleti modell adatainak összehasonlítása egyértelműen mutatja, hogy a függetlenrészecske-modell nem alkalmas a direkt és a nem direkt ionizációs folyamatok leírására.

Félklasszikus leírásban kiszámították azon legerjesztődés és annihiláció hatáskeresztmetszeteit, melyek a kezdetben nagy pályaimpulzusnyomatékú antiprotonnak egy nehéz részecskével történő ütközésekor következnek be. Kimutatták a dipol és sudden ütközési mechanizmusok jelentőségét kis és nagy bombázó energiáknál, és főkvantumszám szerinti skálázási szabályokat állapítottak meg.

Igen kis energiájú antiprotonok és He-atomok ütközésében elsőként határozták meg kísérletileg a kétszeres ionizációs hatáskeresztmetszeteket. Az antiproton energiája 3-tól 25 keV-es energiatarományba esett.

Pozitronium ionizációját vizsgálták klasszikus, lineárisan polarizált lézertérben klasszikus és kvantummechanikai közelítéseket alkalmazva. Számításaikat az időfüggő Schrödinger egyenlet egzakt megoldásával kapott eredményekkel is összevetették.

A 100 keV  $\text{He}^{2+}$  - He ütközésében vizsgálták a két elektron emisszióját. A folytonosan torzított hullámú közelítésben elvégzett számításaik azt mutatták, hogy a kilökődött elektronok energia- és szögeloszlása alakjának kialakításában a végállapoti elektronkorreláció játssza a meghatározó szerepet. Részletesen vizsgálták a lövedékion folytonos energiájú állapotaiba történő elektronbefogódás folyamatát is. Ez az ún. kételektronos cusp, amelyet korábban kísérletileg mutattak ki az intézetben a  $\text{He}^0$  - He ütközésben. A számítási eredményeik összhangban vannak a megfigyelések főbb adataival.

Kifejlesztették a helyzetérzékeny MCP detektorral történő kétdimenziós szögeloszlás-mérések módszerét a nanométeres kapillárisokból kilépő ultraibolya fotonokra és néhány keV energiájú ionokra és atomokra. A részecskék azonosítását is lehetővé tevő módszerben a töltésállapotok szétválasztására elektrosztatikus eltérítést alkalmaztak, a semleges részecskék detektálásában és azonosításában pedig az amplitúdó-eloszlások különbözőségét használták ki.

### *Szilárdtest- és felületfizika, anyagtudomány és statisztikus fizika*

Polietilén tereftalát és polikarbonát anyagú szigetelő kapillárismintákban vizsgálták az ionterelődés mechanizmusát nemzetközi együttműködésben: Debrecenben az Atomki elektron-ciklotronrezonanciás ionforrásánál és a hollandiai Groningenben a KVI Zernike LEIF laboratóriumában,. Részleteiben tanulmányozták a kapilláris belsejében kialakuló töltésszigetek egymást követő felépülését, valamint az azt kísérő, az ionok egy részénél bekövetkező semlegesítődés folyamatát. Az utóbbi vizsgálatokat Debrecenben végezték 3 keV energiájú  $\text{Ar}^{7+}$  nyalábbal. A kapillárisminták 10-50  $\mu\text{m}$  vastagságú fóliákból készültek ionnyom-maratásos technikával 50, 200 és 400 nm kapillárisátmérővel. A különböző töltésállapotú ionokat elektromos térrel szétválasztották, majd intenzitásukat helyzetérzékeny MCP detektorral mérve azt tapasztalták, hogy a kapillárisokból kilépő ionok többsége megőrizte eredeti töltésállapotát, de néhány százalékban teljesen semlegesítődtek. Az alacsonyabb töltésállapotú ionok száma az észlelési küszöb alatt volt. A különböző dőlésszögekben elhelyezett kapillárismintákon való áthaladás után a helyzetérzékeny detektorral megmérték az ionok és az azokból keletkezett atomok szögszórását is az idő függvényében. Az ionok átlagos eltérülési szöge, a korábbi kísérleteknek megfelelően, erősen

oszcilláló viselkedést mutat, míg az atomokra ez alig volt jellemző. Az atomok intenzitása viszont erősen dinamikus viselkedést mutatott: kis értékről indulva az ionok intenzitásánál lényegesen gyorsabban növekedett. Ezek a megfigyelések a szigetelő kapillárisokban történő semlegesítődés folyamatának új modelljéhez vezettek, mely az ionterelődés alapjelenségének megértését is nagyban előmozdíthatja.

Monte Carlo szimuláció segítségével elsőként mutatták meg, hogy az elektronok szigetelő nano-kapillárison történő átvezetése teljes mértékben eltér a nagy töltésű ionok esetéhez képest. Míg ionok esetében a kapilláris belső felületének feltöltődése miatt az ionok a felülettel történő közvetlen ütközés nélkül jutnak át, az elektronok átvezetésében jelentős szerepet kap a kapillárisfelülettel történő közvetlen kölcsönhatás, mely rugalmas és rugalmatlan ütközések sorozatában jelenik meg.

Szilárd Si-mintáról visszaszóródott elektronok energiaveszteségi spektrumainak szimulációja során az interferenciaeffektusok elhanyagolásából, illetve a rugalmas szórási folyamatok pontatlan figyelembevételéből adódó hiba nagyságára adtak becslést. A különböző primer energiájú (800 eV és 2000 eV) elektronok és szórási geometriai konfigurációk esetében az elektronok energiaveszteségi folyamatainak leírására különböző elméleti modelleket alkalmaztak. A számított adatokat összehasonlítva a meglévő kísérleti eredményekkel megmutatták, hogy az interferenciaeffektusok elhanyagolásából származó hiba jelentősen kisebb, mint a rugalmas szórás hatásának pontatlan figyelembevételéből adódó hiba, még viszonylag kis (800 eV) primer elektron energiánál is. A minta dielektromos függvényének és a rugalmas elektronszórási hatáskeresztmetszeteknek mint bemenő paramétereknek a felhasználásával számított eredmények sokkal jobban egyeznek a kísérleti adatokkal, mint a korábbi munkák eredményei.

Rugalmascsúcs-elektronspektroszkópia és az elektronszórás Monte Carlo szimulációja segítségével a 4–8 keV primer elektronenergia-tartományban meghatározták a rugalmatlan elektronszórás közepes szabad úthosszát (IMFP) 3d átmeneti fémekre (Mn, Cr, Co és Fe) és különböző összetételű NiFe ötvözetekre. A Co kivételével a 3d átmeneti fémekre meghatározott IMFP értékek jól egyeznek a közelítő formulákból kapott, illetve az optikai adatokból számított értékekkel. Ezek az elektrontranszport-paraméterek szükségesek a kemény röntgensugárással keltett fotoelektron- és Auger-spektrumok rugalmatlan elektronszórási hátterének pontos figyelembevételéhez.

Különböző összetételű NiFe ötvözetekre meghatározták a kemény röntgensugárással keltett elektronok spektrumaiból az ötvözet-fém Auger-paraméter-eltolódásokat, és sűrűségfüggéselmélet segítségével (a Wien 2K programcsomagot használva) kiszámították a komponensek közötti töltésátadást. A Fe komponensre vonatkozóan az átadott töltések és a megfelelő ötvözet-fém Auger-paraméter eltolódások között lineáris összefüggést találtak, amely lehetővé teszi ismert összetételű ötvözetek esetében az ötvözetek stabilitását meghatározó átadott töltések nagyságának becslését az Auger-paraméterek analíziséből.

3d átmeneti fémek (Cu, Ni, Mn, Co, Cr, Fe) elektronállapotainak sűrűségeit határozták meg a sűrűségfüggéselmélet és a Wien 2K programcsomag segítségével, alapállapotban és 1s héj vakancia jelenlétében. A betöltött és a be nem töltött állapotok sűrűségeiből meghatározták az együttes állapotsűrűségeket, valamint a fémek kísérleti REELS spektrumaiból a Werner által javasolt modell és algoritmus alkalmazásával a fémek elektronenergiaveszteségi függvényeit származtatták. A meghatározott eloszlások szükségesek az adott fémek törzs-fotoelektron spektrumvonalainak alakjában tükröződő elektronszerkezeti hatások pontos leírásához.

Wolfram felület környezetében egyidejű XUV és NIR sugárzás hatására indukált elektron-gerjesztéseket és transzportfolyamatokat vizsgáltak. Először az XUV foton hatására a szilárd mintában keltett elektronok sebességeloszlását írták le, majd az elektronok bolyongását a szilárdtestben (figyelembe véve mind a rugalmas, mind pedig a rugalmatlan szórásokat), amíg azok kilépnek a mintából. Meghatározták az emittált elektronok energia- és keletkezési helye szerinti eloszlásait. Attoszekundumos időskálán azt kapták, hogy a törzselektronok a vezetési elektronokhoz képest késleltetve lépnek ki a felületből.

Megmutatták, hogy a H és D csúcsok könnyen azonosíthatók a jég felületéről visszaszórt elektronok spektrumaiban. Kísérleti megfigyeléseik jó egyezésben vannak a Monte Carlo számításaikkal.

Különböző hordozókba beágyazott szuperionikus kristály nanoporkompozitok és kerámiák fizikai tulajdonságainak szemcseméretfüggését határozták meg az Ungvári Egyetemmel együttműködésben.

Anomális röntgendiffrakciós mérések értelmezéséhez modellezéssel meghatározták a rétegszerkezetek paramétereinek (a rendszámkontrasztnak, a rétegvastagság-aránynak, a határfelületek alakjának, a rétegek keveredésének) és a szórési energiának a hatását a diffrakciós intenzitáseloszlásra.

Az elektron-ciklotronrezonanciás ionforrásnál (ECR) a plazma szisztematikus megfigyelése és tanulmányozása céljából nagyszámú nagyfelbontású plazmafotót és -filmet készítettek a látható fény tartományában. Vizsgálták a fő külső beállító paraméterek (gáznyomás, gázösszetétel, mágneses tér, mikrohullámú teljesítmény és frekvencia) hatását a plazma alakjára, színére és szerkezetére. Megvalósították a kétfrekvenciás üzemmódot (9+14 GHz), és fotókat készítettek e speciális, "csillag a csillagban" plazmáról. Részletes tanulmány készült az ECR-plazmák színének elemzésére és megértésére. A fotósorozatok analízisa összességében rengeteg kvalitatív és számos értékes fizikai információt adott az ECR-plazmák természetéről. A kutatók tudomása szerint a látható fény tartományában ez az első ilyen részletes, szisztematikus vizsgálat.

A kétdimenziós sine-Gordon kvantumtérelméleti modellen végzett vizsgálatokkal megmutatták, hogy a vékonyréteg-szupravezetők, ezen belül a magas átmeneti hőmérsékletű réteges szupravezetők áramvezetési tulajdonságainak értelmezésében kulcsfontosságú Kosterlitz-Thouless-Berezinskii-fázisátalakulás a fázisdiagram két vonzó tartománya között fellépő átmenetként fogható fel. Megvizsgálták továbbá a kétdimenziós sine-Gordon modellek renormálásának a sémafüggését, vagyis azt, hogy az eredmények milyen mértékben függenek a különböző renormálásicsoport-módszerektől.

Szekunder semleges részecskéket felhasználó tömegspektrométerrel (SNMS-sel) vizsgáltak elektrokémiai módszerrel előállított nanométeres vastagságú mágneses vékonyfilmszerkezeteket. FeCoNi-ötvetek mélységprofil-analíziséből megállapították, hogy a jól ismert preferenciális leválás hogyan módosítja a film hordozóhoz közeli 150 nm-es rétegvastagságban az elemösszetételt. Az SNMS alkalmazása ezen a területen teljesen újnak számít. Az így nyert információk jelen pillanatban úttörő jellegűeknek tekinthetők.

Az Elektronikai Anyagok és Mágnesség Intézetével (Parma) folytatott együttműködésben kémiai rétegpárolgatással előállított Ge és GaAs félvezető rétegszerkezetek határfelületeinek mélységprofil-vizsgálatát végezték el. A termikus stabilitásra kapott eredményeknek a félvezető szerkezetek előállításában van jelentősége.

A hidrogénezett amorf Si/Ge rétegszerek termikus stabilitásának SNMS-vizsgálata során alacsonyszögű röntgendiffrakció és transzmissziós mikroszkópia segítségével követték nyomon a különböző ideig tartó hőkezelések hatására fellépő szerkezeti változásokat. E jelenségek vizsgálata a napelemek egyik fejlesztési irányvonalában játszik fontos szerepet.

Egy új izotópkigyűjtő-kamra üzembehelyezésének és első tesztméréseinek kivitelezését követően szelén izotópokból vékonyfilm-mintákat készítettek. Ezt követte a minta további kémiai eljárásokban való feldolgozása. Ezáltal lehetőség nyílt az izotópicusan jelölt nanorészecskék előállítására bioszintetikus módszerekkel stabil-izotópos nyomjelzésen alapuló kutatások számára.

### *Detektálási és jelfeldolgozási technika*

Si, Ge, gyémánt és CdTe félvezető, valamint GSO, LSO, LYSO, BaF<sub>2</sub> és CsI szcintillátorok esetében vizsgálták az elektronok karakterisztikus energiavesztési folyamatait visszaszórt elektronok energiavesztési spektroszkópiájával (REELS). Megállapították, hogy a különböző energiavesztési folyamatok (plazmonok, sávközi átmenetek, óriásrezonanciák keltése stb.) valószínűségeinek megoszlása detektoronként különböző. Általában létezik egy domináns folyamat (pl. a plazmonkeltés Si és Ge esetén, az óriásrezonancia keltése több szcintillátorban), amely a primer energiapartíció révén behatárolja az elvileg elérhető energiafelbontást. Ez alapvető felismerés a jelenlegi detektorok teljesítőképességének magyarázata és az új detektoranyagok kutatása szempontjából.

Az elektron-energiavesztési folyamatok valószínűség-sűrűségfüggvényének kísérleti REELS-spektrumokból történő meghatározására kidolgozott legfejlettebb modellek és algoritmusok alkalmazására és az eredmények összehasonlítására eljárást és felhasználóbarát programcsomagot fejlesztettek ki. A felületi és tömbi elektronregerjesztések differenciális valószínűségeinek az ismerete rendkívül fontos mind a felület közelében zajló elektrontranszport folyamatok jobb megértése, mind pedig a kísérleti elektronspektrumok pontos kiértékelése, illetve az anyag komplex dielektromos függvényének meghatározása szempontjából.

CdTe félvezető (gamma) detektorral kapcsolatban tanulmányozták a spektrális csúcsok kiszélesedéseért felelős két tényezőt, a sugárzás által keltett, majd az elektródokon begyűjtött töltések szórását, valamint az elektromos zajokat. Mindkettőt tényezőt a hőmérséklet, a feszültség és a formáló erősítő időállandójának függvényében vizsgálták. Megállapították, hogy létezik a fenti paramétereknek olyan, az adott rendszerre jellemző kombinációja, amely a legjobb energiafelbontást biztosítja.

Három dimenzióban érzékeny monolit szcintillációs detektor detektálási mechanizmusának elméletét dolgozták ki. A térkoordináták standard deviációját több különböző fotodetektor–szcintillátor elrendezésre kiszámították. Külön-külön megvizsgálták az elektronikus zaj és a szcintilláció során keletkező fotonszám statisztikus ingadozásának a hatását a pozíciófelbontásra.

LaBr<sub>3</sub> szcintillációs detektor energia- és időfelbontó, továbbá részecskediszkriminációs képességét vizsgálták kombinált, részecske–gamma magfizikai detektorrendszer kifejlesztése céljából.

LYSO szcintillátor és gyors fotoelektronsokszorozó felhasználásával felépítendő repülési-idő



pozitronemissziós tomográf (TOF PET) kifejlesztése kapcsán vizsgálták az elérhető időfelbontást, különös tekintettel a elektronsokszorozók példányonként eltérő átlagos futási időire és az egyetlen csövön belül tapasztalható, az elektrópályák szórásából származó futásiidő-szórásra.

A Stockholmi Királyi Műszaki Egyetem számára modernizálták - korszerű elektronikát és új adatgyűjtő, képrekonstrukciós és megjelenítő szoftvert alkalmazva - a meglévő Cardiotom Mark1 mobil tomográfias gamma kamerát, amelyet jelenleg egyetemi oktatási célokra használnak. A hardver és szoftver komponensek az oktatási céloknak megfelelően átláthatóak és egymástól jól szeparáltak a működés jobb megértése érdekében.

Az Atomki ECR-laboratóriumában alkalmazott helyzetérzékeny detektorhoz korszerű nagy teljesítményű adatgyűjtő és OpenGL alapú képmegjelenítő szoftvert készítettek, amely a nagysebességű FPGA alapú adatgyűjtő elektronikával együtt Ethernet hálózaton keresztül képes a mérési adatok tárolására és megjelenítésére.

Az korábban kifejlesztett PalmtopMCA sokcsatornás analízátor adatgyűjtő és kiértékelő szoftverét továbbfejlesztették oly módon, hogy egy PC nemcsak egy, hanem több analízátort is képes egyidejűleg egymástól függetlenül kezelni.

Sikerrel alkalmazták a PET-detektorok jeleinek feldolgozására kifejlesztett digitális jelfeldolgozót LaBr<sub>3</sub> szcintillációs detektorok jeleinek a feldolgozására.

### *Ionnyaláb-analitika*

Tovább bővítették a régió légköri aeroszolterhelését jelző, 15 évre visszatekintő adatbázist. Feltérképezték a debreceni aeroszol forrásait órás feloldást adó mintavételi technika, nukleáris analitika és statisztikai módszerek alkalmazásával. Nukleáris mikroszondán végzett egyedi szemcseanalízis segítségével meghatározták számos, a keletkezés (szaharai homok) vagy egészség (nehézfémekkel szennyezett munkahelyi aeroszol) szempontjából érdekes aeroszolrészecske kémiai összetételét és eredetét.

A Barringer meteor kráternél gyűjtött impakt anyagokat vizsgáltak szinkrotronra, pásztázó nukleáris mikroszondára és elektronmikroszondára alapozott mikroanalitikai eljárásokkal (micro-XANES, micro-PIXE és ED-SEM). A vizsgálat eredményeiből információt kaptak a kozmikus ütközés okozta geológiai metamorfózisról.

Nagy laterális feloldású RBS-vizsgálatokat végeztek a nukleáris asztrofizikai csoport számára az asztrofizikai p-folyamat vizsgálatához előállított céltárgyak összetételére, vastagságára és homogenitására vonatkozóan.

Si/Cr multirétegekben vizsgálták az ionbeam-milling hatására létrejövő strukturális változásokat. Nagy laterális feloldással meghatározták az elemösszetételt, felületi topográfiát és a rétegek közötti diffúziót. Összehasonlító elemzéseket végeztek a mikro-RBS, Spektroszkópiai Ellipszometria és AES mélységi profilozás módszerek között.

Kidolgoztak egy új kiértékelési módszert a Si pin fotodióda spektrális tulajdonságainak területszelektív implantációval történő módosításával nyert adathalmaz feldolgozására.

Nagy laterális feloldással a hidrogéntartalom meghatározását végezték el biológiai mintákon, polimer fóliákon és H-nel telített Si/Ge multirétegek termikus diffúziója során.

Szilícium mikroturbinát készítettek MTA-ATOMKI – MTA-MFA együttműködésben. Ez az

első mozgó alkatrészt tartalmazó eszköz, amely protonnyalábos mikromegmunkálással (PBW) és szelektív porózus szilícium (PorSi) maratással készült. A munka nemzetközi visszhangját jelzi, hogy a PBW témában vezető szerepet betöltő szingapúri csoport által üzemeltetett pbeam.com weboldalon már hivatkoznak rá.

Poly-(dimethylsiloxane) (PDMS) polimerben – melyet mások eddig öntőanyagként (replicating material) használtak – direkt írásos mikromegmunkálással elsőként hoztak létre optikai struktúrákat (pl. optikai rácsok, Fresnel-lencsék stb.) A munka érdekességét jelzi, hogy a 2009-ben megjelent cikkekre már két esetben érkezett külföldi érdeklődés.

A PBW-módszer alkalmazásaként egy működőképes mikroreaktort készítettek, és a működését demonstrálták.

### *Környezetanalitika és kormeghatározás*

Továbbfejlesztették és ipari raktárépületek esetében a gyakorlatban is alkalmazták az építési területek radonveszélyességének meghatározására szolgáló mérési eljárást.

Gázföldtani modellszámításokat végeztek a mofettagázok felszínközeli transzportjának a leírására. Eredményeiket alkalmazták a parádfürdői Erzsébet Park Hotel száraz szén-dioxid-fürdőjének gyógygázellátását szolgáló gáznyerő hely kialakítási koncepciójának kidolgozására.

They have improved the method to determine the radon potential of building sites and applied the method in case of industrial storage buildings construction.

They have developed a gasgeological numerical model to describe the transport of mofette gases in near surface soils. The results of model calculations were used in the development of a conceptual design of a gas-collecting construction aimed at supplying a dry carbon dioxide spa with medicinal gas.

A Meteorológiai Világszervezet háttérlevegő-szennyezettséget mérő hálózatában az alapállomások kötelező feladatává tették a légköri CO<sub>2</sub>-koncentráció folyamatos mérését. A mérésekből kiderült, hogy a légköri CO<sub>2</sub>-szint növekedési üteme széles sávban ingadozik, lényegesen nagyobb mértékben, mint az antropogén kibocsátás. Az okokról a vegetációval borított kontinentális területeken végzett mérések, valamint a CO<sub>2</sub> izotópösszetételének (<sup>14</sup>C, <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C, <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O) mérése mondhat többet. Az izotópanalitikai vizsgálatokhoz az Atomki munkatársai két folyamatosan üzemelő <sup>14</sup>CO<sub>2</sub>-mintavevőt telepítettek a Hegyhátsálon üzemelő meteorológiai állomás mérőtornyára 10 m és 115 m magasságban, és az OMSz munkatársaival közösen OTKA-támogatással (CK77550) bekapcsolódtak a kontinentális szintű háttérértékek havi mérésébe. Európában ez az első állomás, ahol egyidejűleg két magassági szinten mérik a légköri szén-dioxid biogén és fosszilis összetevőinek arányát. Kimutatták, hogy a kontinens belsejében a fűtési szezonban a nagyvárosokban tapasztalt kb. 20 ppm fosszilis CO<sub>2</sub>-hozzájárulással szemben vidéki környezetben, téli időszakban mindössze kb. 5 ppm fosszilis szén-dioxid-többlet jelentkezik a kb. 380 ppm háttér értékhez képest. Magyarország ICOS projekthez való csatlakozása esetén az állomás, ezzel együtt az Atomki a program fontos szereplőjévé válhat, hozzájárulhat a kontinentális szén-dioxid-háttér eredetének tisztázásához.

Az NSF arizonai  $^{14}\text{C}$  AMS-laboratóriumával együttműködve radiokarbonmérésekkel kimutatták, hogy az eddigi feltételezésekkel ellentétben a romániai Csomád vulkán az utolsó 50 ezer évben nem egy, hanem két alkalommal is aktív volt: a korábbi mintegy 40 ezer évvel, az utolsó kitörés kb. 27 ezer évvel ezelőtt következett be.

A romániai Porcika barlangból származó 2m mélységű jég fúrómagban a tríciumtartalom alapján meghatározták a jégképződés sebességének változását az utolsó 60 évben. Míg 1958 és 1963 között mintegy 6,74 cm vastag jégréteg képződött évente, ennek üteme folyamatosan lassult, az utolsó évtizedben évente mindössze 0,54 cm jég rakódott le a barlangban. Ezt valószínűleg a felmelegedés és a csapadék időbeli eloszlásának megváltozása okozza. A jelenség felhívja a figyelmet mind a klíma gyors változására, mind annak drasztikus következményeire. A munkában az Atomki, az ELTE Természetföldrajzi Tanszék, az MTA GKL és a román Emil Racovita Institute of Speleology munkatársai vettek részt.

Rutinszerűen használható mérés technikává fejlesztették a 2005-ben az intézet Hertelendi Ede Környezetanalitikai Laboratóriumában kifejlesztett Carbo-Sorb reagens alapú direkt abszorpciós elven működő LSC  $^{14}\text{C}$  mérés technikai újítást. Az új módszer akár évi 500-600 alternatív  $^{14}\text{C}$  analízisre adhat lehetőséget, mely jelentős mérési kapacitásbővülést jelent az Atomki laboratóriuma számára, és rendkívül költséghatékony megoldás lehet más laboratóriumok számára is.

A nemesgáz-tömegspektrométerek érzékenysége általában függ az ionforrásban uralkodó nyomástól. Környezeti vízminták tríciumtartalmának meghatározását a trícium bomlása során keletkező  $^3\text{He}$ -tömegspektrométeres mérésre vezetjük vissza. Az ionforrásban tríciummintából eredő  $^3\text{He}$  és a beeresztő rendszer háttérében lévő hélium nyomása nagyságrendekkel kisebb, mint a kalibráció során alkalmazható legkisebb mennyiségű levegőből elválasztott hélium nyomása. Ez szisztematikus hibát okoz, amit korábban standardminták mérésével korrigáltunk. Ezen szisztematikus eltérés kiküszöbölése céljából bevezettünk egy új izotóphígítási eljárást: ismert mennyiségű tiszta  $^4\text{He}$ -et adunk a beeresztendő mintához, ezáltal a tömegspektrométerben lévő összhélium parciális nyomása hasonló lesz a kalibráló hélium nyomásához. A 2009-ben mért több, mint 50 ismert tríciumkoncentrációjú vízminta mérése megmutatta, hogy a korábbi szisztematikus hiba teljesen eltűnt, továbbá az 1 TU fölötti tríciumtartalmak esetén a mérési pontosság 2,3 %. Ezen izotóphígítási eljárás természetesen alkalmazható más tudományterületen előforduló héliumminták mérésekor is, ahol a mintagáz nyomása és izotóp-összetétele jelentősen eltér a kalibráló mintagáz paramétereitől.

Elfogadott tény, hogy az atomerőművek tríciumkibocsátása befolyásolja a csapadék tríciumkoncentrációját. Azt vizsgáltuk, hogy a 3 TBq/év tríciumkibocsátású paksi atomerőmű környékén mennyire változik meg a csapadék tríciumtartalma. 56 csapadékmintázót telepítettünk az erőmű kéményeinek környékére, majd egy alkalmas esőesemény után összegyűjtöttük azon vízmintákat, amelyek a kéményekből kiáramló, tríciumot tartalmazó csóván hullottak át. A csóvától távolabb hullott esővízmintát is gyűjtöttünk. Méréseinkkel és modellszámításokkal kimutattuk, hogy a lehulló csapadék tríciumtartalma csak az erőmű szűkebb környezetében növekszik meg a kimosódás hatására. Az erőműtől 5 km-nél messzebb hulló csapadék tríciumtartalmát az erőmű kibocsátása már nem befolyásolja.

A fákból végbemenő nedváramlás vizsgálatára két újabb, az intézetben kifejlesztett 4-csatornás termometriás nedváramlásmérő berendezést telepítettek a Debreceni Egyetem Síkfőkút Project területén. Ezáltal már összesen 20 fa nedváramlását tudták monitorozni a teljes tenyészidőszakban 1–5 perces időfeloldásokkal a meteorológiai és talajtani

mennyiségek, valamint a törzsek radiális növekedési sebességének mérése mellett. Néhány hetes időközönként levélfiziológiai paraméterek mérése is történt. Újabb egyedülálló idősorokat kaptak a kocsánytalan (*Quercus petraea*) és cser (*Quercus cerris*) tölgyek, valamint különböző hibrideik egyedeinek vízforgalmára vonatkozóan. Az eredmények sokparaméteres analízisei a tölgyfajok és hibrideik klímaváltozásra adott válaszainak jobb megértését teszik lehetővé.

Agyagásványok kormeghatározásából megállapították, hogy a Tisia déli részén (Papuk-hg., Szlavónia) a kistökű és nagyon kistökű metamorfózis a kréta korban játszódott le, az ausztriai és/vagy szubherciniai fázisokban. Az Aggtelek-Rudabányai hg.-ben a Telekesoldal kőzeteit érintő nagyon kistökű metamorfózis idősebb volt, a belső-Nyugati-Kárpátok több akkréciós jellegű sorozatához hasonlóan az alsó-krétában (140-120 Ma) játszódott le.

Bazaltok vizsgálatával kimutatták, hogy a Hegyestű leucitja az alacsony hőmérsékletű előmelegítés során megváltoztatja szerkezetét, és emiatt adja le radiogén argontartalmának jelentős részét.

Elkülönítették a Cseh-Szász Érchegység Ti-tartalmú bazaltjai kitörésének fázisait .

Nemzetközi antarktisi expedíció keretében 2009. január-február hónapokban King George Island vulkáni területén analitikai munkákhoz szükséges mintagyűjtést végeztek.

Elvégezték a Nyugati-Kárpátok neogén riolitos vulkanizmusának részletes kronológiai vizsgálatát. Adatbázis összeállítása és a fontos eredmények publikálása folyamatban van.

### *Radiokémia*

Dél-afrikai együttműködésben sikerült a  $^{103}\text{Pd}$  elválasztását ródium céltárgyból termokromatográfiásan megoldani. Ugyancsak az együttműködés keretében, valamint a dubnai EAI munkatársaival sikerült módszert kidolgozni nagy fajlagos aktivitású  $^{117\text{m}}\text{Sn}$  előállítására dúsított  $^{116}\text{Cd}$  céltárgyból. Mindkét radioizotóp ígéretes a radionuklidos tumorterápia számára.

A paksi atomerőmű radioaktív hulladékaiban előforduló, nehezen mérhető béta- és gamma-sugárzó radioizotópok (mint az  $^{108}\text{Ag}$ ,  $^{79}\text{Se}$  és  $^{107}\text{Pd}$ ) radiokémiai elválasztására és mérésére dolgoztak ki új módszereket.

A  $^{11}\text{C}$ -radioizotóppal jelzett gázok szilárd katalizátoron végbemenő adszorpciójának tanulmányozására az Atomkiban kifejlesztett mini PET kamerát használták. Az előkísérletek eredményei igazolták, hogy a mini PET képalkotó módszer a heterogén katalízis vizsgálata során kiválóan alkalmas a katalitikus aktív helyek feltérképezésében.

A  $^{75}\text{Br}$  ( $T_{1/2}=1,6$  h, PET),  $^{76}\text{Br}$  ( $T_{1/2}=16,2$  h, PET), radioizotópok előállítási körülményeit vizsgálták természetes és dúsított ( $^{77,78,80}\text{Se}$ ) izotóp összetételű szelénen protonok által keltett magreakciók segítségével. A radioizotópokat előállító magreakciók hatáskeresztmetszet-adatainak mérését az  $E_p < 66$  MeV energiatartományban nemzetközi együttműködés keretében végezték (iThemba LABS, Dél-Afrika, NIRS, Japán). Kompilálták és evaluálták az elérhető irodalmi gerjesztésfüggvény-adatokat. Az illesztett adatokkal hozamszámolásokat végeztek a fenti izotópokra. Meghatározták a különböző céltárgyakra vonatkozó optimális termelési paramétereket és az elérhető hozamokat is.

### III. Hazai és nemzetközi kapcsolatok bemutatása

#### *Hazai kutatási kapcsolatok*

Az intézet kutatómunkájának minden területén széleskörűek a hazai együttműködések. Ezek közül különösen jelentősek az alábbi intézményekkel való kapcsolatok:

- a részecske- és magfizika és alkalmazásai területén: az MTA RMKI, a Debreceni Egyetem (DE) Kísérleti Fizikai Tanszéke és Elméleti Fizikai Tanszéke, Növénytan Tanszéke, az MTA AEKI, a BME Nukleáris Technikai Intézete, a Szegedi TE, a DE Nukleáris Medicina Központja, NUKENRG Konzorcium;
- az atomfizika és alkalmazásai területén: a DE Kísérleti Fizikai Tanszéke, Szilárdtestfizikai Tanszéke, Alkalmazott Kémiai Tanszéke, Fizikai Kémia Tanszéke és Fogpótlástani Tanszéke, a BME Kísérleti Fizikai Tanszéke, a Miskolci Egyetem Fizikai Tanszéke, a Veszprémi Egyetem Radiokémiai Tanszéke, Alkaloida Kutató és Fejlesztő Kft., az MTA MFA és RMKI;
- a kondenzált rendszerek fizikájának területén: az MTA MFA, az MTA SZFKI, az MTA RMKI, az MTA SZTE Lézerfizikai Kutatócsoportja, a DE Szilárdtestfizikai Tanszéke és Fizikai Kémia Tanszéke, a Veszprémi Egyetem Radiokémiai Tanszéke, az ELTE Magkémiai Intézete, TKI Ferrit Kft, Kémiai Kutatóközpont, a Kraft Projekt Zrt., a Szegedi TE, a Paksi Atomerőmű Zrt.;
- a detektálási és jelfeldolgozási technika területén: a DE Nukleáris Medicina Központja, a Mediso Kft. (Budapest), a DE Kísérleti Fizikai Tanszéke;
- ionnyaláb-analitika területén: a DE több tanszéke és klinikája, az MTA MFA, az MTA SZFKI, az MTA RMKI, az MTA AEKI, az MTA Pannon Egyetemi Levegőkémiai Kutatócsoportja, a Szegedi TE Régészeti Tanszéke, az Országos Környezetegészségügyi Intézet, az Országos Meteorológiai Szolgálat, DEOEC Bőrgyógyászati Klinika;
- környezetanalitika és kormeghatározás területén: az ISOTOPTECH ZRt., a DE, az ELTE, a Szegedi Tudományegyetem, a Pécsi Tudományegyetem és a Miskolci Egyetem több tanszéke, az MTA GKI, a MÁFI, az ELGI, az OKK-OSSKI, a VITUKI, a Paksi Atomerőmű Zrt., a püspökszilágyi RHKT Kht., a MECSEKÉRC Környezetvédelmi ZRt., MecsekÖKO Környezetvédelmi ZRt., MTA Régészeti Intézete, Magyar Nemzeti Múzeum, Budapesti Történeti Múzeum, Természettudományi Múzeum, Fácies Bt., Envicom 2000 Kft., Hydrosys Kft., Smaragd GSH Kft., Enviroinvest Kft., VIZITERV Environ Kft, Nyíregyháza, BME Nukleáris Technikai Intézete, ISOTOPTECH ZRt., Országos Meteorológiai Szolgálat, Scopia Bt., AktAnal Bt., RadAnal Bt.;
- a régészeti kutatások területén: az MTA Régészeti Intézete, a Budapesti Történeti Múzeum, a Magyar Nemzeti Múzeum és a hazai múzeumi hálózat több más intézménye;
- radiokémia területén: a DE Nukleáris Medicina Központja.

#### *Részvétel a felsőoktatásban*

Az intézet 2009-ban megtartotta korábban is betöltött szerepét a felsőoktatásban, a Debreceni Egyetemen fenntartott hagyományos kapcsolatait. Az Atomki kutatói a beszámolási időszakban meghirdetett 44 kurzus keretében 756 tantervi óra megtartásával járultak hozzá a Debreceni Egyetemen (DE) folyó oktatáshoz. Két kutató a Szegedi Tudományegyetemen tartott egy 28 órás kurzust. A gyakorlati órák száma a DE-n 2009-ben 509 volt 18 kurzus keretében. Az oktatásban összesen 39 kutató vett részt. A pregraduális képzésben elsősorban fizikus, fizika tanári, informatikus, programtervező matematikus, környezettan,

környezettudományi, valamint környezetgazdálkodási agrármérnök szakos hallgatóknak oktattak (előadások, speciális laboratóriumi gyakorlatok, diplomamunkák). A beszámolási időszak folyamán 9 PhD-, 12 diplomamunkás és 4 TDK-hallgató dolgozott az intézetben, a témavezetésre fordított órák száma összesen 1822 volt.

A Nukleáris képalkotás című tárgyat az intézet a DE Fizikai Intézetével és Informatikai Karával közösen hirdette meg. A kurzus célja, hogy áttekintést adjon a nukleáris fizika számos gyakorlati alkalmazásában fontos szerephez jutó különböző képalkotó eljárásokról

A DE TTK kihelyezett Környezetfizikai Tanszéke helyileg az Atomki területén működik. A tanszék a csökkenő létszámú fizika szakos hallgatók mellett jelentős számú környezettan tanári, valamint környezettudomány szakos hallgató képzésében vesz részt.

#### *Nemzetközi kapcsolatok*

A több intézményre kiterjedő nemzetközi programokban való részvétel, valamint az államközi és a MTA által kötött egyezményekre alapozott együttműködés (l. IV. fejezet) mellett az intézet nemzetközi kapcsolataiban lényeges szerepet tölt be az intézetközi megállapodásokon alapuló, valamint az alkalmi, informális együttműködés is. Ilyen együttműködések voltak:

- a magfizika és alkalmazásai körében 22 ország kutatóhelyeivel 36 témában;
- az atomfizika és alkalmazásai területén 21 ország kutatóhelyeivel 39 témában;
- a detektálási és jelfeldolgozási technika területén 5 ország kutatóhelyeivel 6 témában;
- ionnyaláb-analitika területén 6 ország kutatóhelyeivel 7 témában;
- környezetanalitika és kormeghatározás területén 11 ország kutatóhelyeivel 13 témában.

#### **IV. Fontosabb elnyert hazai és nemzetközi pályázatok rövid értékelése**

Az Atomkiban a 2009 folyamán művelt OTKA-pályázati témák száma 12, az NKTH-pályázatiaké 3 volt. Az intézet 13 EU-projektumban, valamint nemzetközi összehasonlító programokban és gyakorlatokban (ESIR, VIRI, EURATOM, TRI-TOFFY, TRIC2008) vett részt. Fontos szerepe van az intézet működésében annak, hogy egy kutatója révén elnyerte az Európai Kutatási Tanács egyik (2008-2013 évekre vonatkozó) Starting Grant pályázatát.

Államközi (TÉT) egyezményeken alapuló, pályázati rendszerben támogatott együttműködési kapcsolatok voltak 14 témában argentin, cseh, dél-afrikai, francia, horvát, indiai, osztrák, szlovák kutatóhelyekkel.

A MTA által kötött egyezményeken alapuló kétoldalú együttműködési kapcsolatok 20 témában belga, bolgár, cseh, finn, lengyel, mexikói, német, portugál, román, spanyol, valamint szerbiai kutatóintézetekkel és egyetemi kutatóhelyekkel folytatott együttműködésekre terjedtek ki.

#### **V. Az év folyamán megjelent jelentősebb publikációk, szabadalmak**

1. Csige L., Csatlós M., Faestermann T., Gácsi Z., Gulyás J., Habs D., et al. (12), Krasznahorkay A.: *Hyperdeformed sub-barrier fission resonances observed in  $^{232}\text{U}$* . Physical Review C **80** (2009)1:R1301(5)
2. Elekes Z., Dombrádi Zs., Aiba T., Aoi N., Baba H., Bemmerer D., et al. (26), Fülöp Zs., Sohler D.: *Persistent decoupling of valence neutrons toward the dripline: Study of  $^{20}\text{C}$  by gamma spectroscopy*. Physical Review C **79** (2009)1302(5)

3. Górska M., Caceres L., Grawe H., Pfützner M., Jungclaus A., Pietri S., et al. (51), Podolyák Zs., Dombrádi Zs., Sohler D.: *Evolution of the  $N=82$  shell gap below  $^{132}\text{Sn}$  inferred from core excited states in  $^{131}\text{In}$* . Physics Letters B **672** (2009)4:313-316
4. Paul E. S., Revill J. P., Mustafa M., Rigby S. V., Boston A. J., Foin C., et al. (20), Nyakó B. M., Timár J., Zolnai L.: *High-spin states in  $^{127}\text{Ce}$  and  $^{129}\text{Ce}$ : Further evidence for triaxial nuclear shapes*. Physical Review C **80** (2009)5:4312(13)
5. Di Leva A., Gialanella L., Kunz R., Rogalla D., Schürmann D., Strieder F., et al. (19), Fülöp Zs., Gyürky Gy., Somorjai E.: *Stellar and primordial nucleosynthesis of  $^7\text{Be}$ : Measurement of  $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$* . Physical Review Letters **102** (2009)23:2502(4)
6. Yalcin C., Güray R. T., Özkan N., Kutlu S., Gyürky Gy., Farkas J., et al. (11), Kiss G. Gy., Fülöp Zs., Simon A., Somorjai E.: *Odd  $p$  isotope  $^{113}\text{In}$ : Measurement of alpha-induced reactions*. Physical Review C **79** (2009)5801(9)
7. Kiss G. Gy., Mohr P., Fülöp Zs., Galavíz D., Gyürky Gy., Elekes Z., et al. (11), Somorjai E.: *High precision  $^{89}\text{Y}(\alpha, \alpha)^{89}\text{Y}$  scattering at low energies*. Physical Review C **80** (2009)4:5807(15)
8. Farkas J., Gyürky Gy., Yalcin C., Elekes Z., Kiss G. Gy., Fülöp Zs., Somorjai E., Vad K., Hakl J., Mészáros S.: *Measurement of embedded  $^{74}\text{As}$  decay branching ratio at low temperatures*. Journal of Physics G Nuclear and Particle Physics **36** (2009)10:5101(8)
9. Imai N., Aoi N., Ong H. J., Sakurai H., Demichi K., Kawasaki H., et al. (39), Dombrádi Zs., Elekes Z., Fülöp Zs.: *First lifetime measurement of  $2+1$  state in  $^{12}\text{Be}$* . Physics Letters B **673** (2009)3:179-182
10. Cseh J., Darai J., Sciani W., Otani Y., Lépine-Szily A., Benjamim E. A., et al. (8): *Elongated shape isomers in the  $^{36}\text{Ar}$  nucleus*. Physical Review C **80** (2009)3:4320(5)
11. Pál K. F., Vértesi T.: *Concavity of the set of quantum probabilities for any given dimension*. Physical Review A **80** (2009)4:2114(5)
12. Lévai G., Magyari E.: *The  $PT$ -symmetric Rosen-Morse II potential: effects of the asymptotically non-vanishing imaginary potential component*. Journal of Physics A **42** (2009)19:5302(12)
13. Tárkányi F., Hermanne A., Takács S., Ditrói F., Király B., Yamazaki H., et al. (9): *Activation cross sections of the  $\text{natYb}(p, xn)^{169}\text{Lu}$  reaction for indirect production of the therapeutic radionuclide  $^{169}\text{Yb}$* . Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms **267** (2009)17
14. Szelecsényi F., Steyn G. F., Dolley S. G., Kovács Z., Vermeulen Ch., van der Walt T. N.: *Investigation of the  $^{68}\text{Zn}(p, 2p)^{67}\text{Cu}$  nuclear reaction: New measurements up to 40 MeV and compilation up to 100 MeV*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B **267**(2009)1877-1881
15. Juhász Z., Sulik B., Frémont F., Hajaji A., Chesnel J.-Y.: *Anisotropic ion emission in the fragmentation of small molecules by highly charged ion impact*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B **267** (2009) 326–329.
16. Stolterfoht N., Hellhammer R., Fink D., Sulik B., Juhász Z., Bodewits E., et al. (8): *Dynamic properties of ion guiding through nanocapillaries in an insulating polymer*. Phys. Rev. A **79** (2009) 022901
17. Igarashi A. and Gulyás L.: *Annihilation cross section of protonium by electron impact*. Journal of Physics B **42** (2009) 033501
18. Schiessl K., Tökési K., Solleder B., Lemell C. and J. Burgdörfer, *Electron Guiding through Insulating Nanocapillaries*, Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 163201

19. Novák M.: *Local versus nonlocal description of the energy loss of electrons via plasmon excitation backscattering from solid surfaces*, Phys. Rev. **B80** (2009)045406.
20. Lemell C., Solleder B., Tökési K. and J. Burgdörfer, *Simulation of attosecond streaking of electrons emitted from a tungsten surface*, Phys. Rev. **A79**(2009) 06290-1
21. Hunyadi M., Hashimoto H., Li T., Akimune H., Fujimura H., Fujiwara M., Gácsi Z., et al. (20): *Proton decay from the isoscalar giant dipole resonance in  $^{58}\text{Ni}$* . Physical Review C **80** (2009)4:4317(7)
22. Kertész Zs., Szikszai Z., Szoboszlai Z., Simon A., Huszánk R., Uzonyi I.: *Study of individual atmospheric aerosol particles at the Debrecen ion microprobe*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms **267** (2009) 2236-2240
23. Szikszai Z., Uzonyi I., Kiss Á. Z., Szíki G. Á., Vantelon D., Rózsa P.: *Investigation of impact materials from the Barringer Meteor Crater by micro-XANES and micro-PIXE techniques*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms **267** (2009) 2229-2232
24. Rajta I., Szilasi S. Z., Fürjes P., Fekete Z., Dücső Cs.: *Si micro-turbine by proton beam writing and porous silicon micromachining*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms **267** (2009) 2292-2295.
25. Nagy S., Nándori I., Polonyi J., Sailer K.: *Functional renormalization group approach to the sine-Gordon model*. Physical Review Letters **102** (2009)24:1603(4)
26. Vodila G., Molnár M., Veres M., Svingor É., Futó I., Barnabás I., Kapitány S.: *Mapping of tritium emissions using absorption vapour samplers*. Journal of Environmental Radioactivity **100** (2009)120-124
27. Gál J., Kalinka G., Nyakó B. M.: *Theoretical study of three-dimensionally position-sensitive scintillation detector based on continuous crystal*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **607** (2009)3:607-615
28. Anticic T., Gál J., Molnár J., et al. (90 - NA49 collaboration) : *Energy dependnence of transverse momentum fluctuations in Pb+Pb collisions at the CERN Super Proton Synchrotron (SPS) at 20A to 158A GeV*. Physical Review C **79** (2009)4:4904(18)