

ATOMMAGKUTATÓ INTÉZET

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

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

E-mail: director@atomki.mta.hu, honlap: <http://www.atomki.mta.hu>

I. A kutatóhely fő feladatai a 2019. január 1. és augusztus 31. közötti időszakban

Az intézet fő feladata az atomfizikai, magfizikai, nukleáris asztrofizikai és részecskefizikai alapkutatások területén a nemzetközi kollaborációkkal összehangolt élvonalbeli kutatások végzése volt a nagy nemzetközi kutatóközpontok és a saját kutatási infrastruktúra kiegyensúlyozott használatával. A beszámolási időszak fontos feladata volt a felkészülés a 2016-ban indult GINOP pályázatok adminisztratív és technikai lezárására. Az Atomki 2019-ban is jelentős szerepet vállalt az egyetemi oktatásban, a PhD képzésben és a nemzetközi szakemberképzésben. A szokásos beszámoló elkészítése mellett az év első hónapjaiban további, a korábbi évekhez képest rendkívüli feladatot jelentett az intézet hároméves (2016-18) átvilágításához szükséges anyagok összeállítása, valamint az Tématerületi Kiválósági Program keretében benyújtandó pályázat elkészítése.

II. A 2019. január 1. és augusztus 31. közötti időszakban elért kiemelkedő kutatási és más jellegű eredmények

II. a) Kiemelkedő kutatási eredmények

Elméleti fizika

A magas Schmidt-számú, valódi sokdimenziós összefonódottság a kvantumkommunikáció egyik fontos erőforrása: valódi sokdimenziósan összefonódott rendszerek például lényegesen jobb zajtoleranciát mutatnak az alacsonydimenziósan összefonódott rendszerekhez képest. Ugyanakkor az ún. kötött összefonódottság egy nagyon gyenge formáját képviseli az összefonódott kvantumállapotoknak: ezen állapotok tetszőleges számú példányát véve sem nyerhető ki belőlük tiszta formában összefonódottság. Ezen kétfajta összefonódottság meglepte azt a kérdést veti fel, hogy vajon vannak-e olyan kvantumállapotok, amelyekre mindkét típusú összefonódottság egyszerre teljesül, vagyis léteznek-e magas Schmidt-számú kötötten összefonódott állapotok? A kutatások eredményeként sikerült példát mutatni ilyen kvantumállapotokra: bármely $d \geq 4$ dimenziós komponens térben konstruáltak olyan kétrészi kötötten összefonódott állapotokat, amelyeknek a Schmidt-száma $d/2$, vagyis a dimenzióval lineárisan növekszik.

A Coulomb-kölcsönhatás által vezérelt rendszerekben az egzakt hullámfüggvénynek eleget kell tennie az ún. Kato-féle cusp feltételnek. A cusp feltétel teljesülése fotoionizáció leírásánál alapvetően fontos. Új típusú bázisfüggvényeket adtak meg, melyek kielégítik a Kato-féle feltételeket. Az új bázisfüggvények egyszerűen meghatározhatók: a standard Hylleraas vagy Kinoshita jellegű függvények speciális lineáris kombinációjával állnak elő. Megmutatták, hogy a He és H⁻ atomokra az alapállapot jellemzők ezekkel a függvényekkel is pontosan meghatározhatók.

Az Elliott-modell keretében megmutatták, hogy az atommagok deformációja a spontán szimmetriasértés eredményeként áll elő. Feltárták azt is, hogy ez a tétel nemcsak a kvadrupólus deformációra nézve helytálló (melyet korábban már más elméletek keretében is vizsgáltak ebből a szempontból), hanem az oktapólus deformációra és a molekulyszerű konfigurációkra is. A munka módszertani érdekességét az adja, hogy spontán sértés általános mechanizmusát egy igen egyszerű példa (a forgási szimmetria és egy héjmodell) keretében elemezték, ami a megértést és bemutatást lényegesen egyszerűsíti a korábban ismert esetekhez képest.

Kifejlesztettek egy új eljárást a magok alakizomér állapotainak meghatározására. Eddig az ilyen elméleti vizsgálatokat mindig az energiafelület lokális minimumaira alapozva végezték. Az új módszer az alakizomer állapotokat az $SU(3)$ szimmetria stabilitására és önkonzisztenciájára alapozva határozza meg. Mivel e szimmetria kvantumszámjai kölcsönösen egyértelműen meghatározzák a kvadrupólus deformációt, az eljárás alak-önkonzisztencia vizsgálatnak is tekinthető. A két módszer egymással azonos, vagy nagyon hasonló eredményt szolgáltat a könnyű magokra nézve.

Leírták a véges négyszögpotenciál kiterjesztését a PT -szimmetrikus (az egyszerre történő tér- és időtükrözésre invariáns) kvantummechanika esetére. A munkát az egzaktul megoldható Rosen-Morse II típusú potenciál hasonló kiterjesztése inspirálta, mivel ez a komplex potenciál hasonló alakot mutat és ugyanakkor több szokatlan tulajdonsággal rendelkezik. Meghatározták az általános megoldásokat és zárt alakban megadták a $T(k)$ transzmissziós és $R(k)$ reflexiós amplitúdókat. A kötött állapotok azonosításához megkeresték a transzmissziós amplitúdó pólusait. Kiderült, hogy ezek kizárólag valós energia-sajátértékeknél jelentkezhetnek, hasonlóan a PT -szimmetrikus Rosen-Morse II típusú potenciálhoz. Ezt az eredményt az aszimptotikusan el nem tűnő képzetes potenciálkomponensnek tulajdonították.

Szilárdtestek törési folyamatait erősen befolyásolja az anyag belső rendezetlenségének mértéke. A rendezetlenség növelésével a törés folyamatát intenzívebb repedési zaj kíséri, ami a katasztrofális törés pontosabb előrejelzését teszi lehetővé. Megmutatták, hogy extrém nagy rendezetlenség esetén a repedési zaj statisztikus jellemzői függenek a rendszer méretétől, így előrejelzésre csak egy kritikus rendszerméret fölött van lehetőség. Kimutatták, hogy a rendezetlenség mennyiségének van egy alsó és egy felső határa, amelyen túl a repedési zaj nem ad egyértelmű információt a rendszer károsodásáról, ezért sem az erősen rideg, sem a nagy rendezetlenségű szivós anyagok törése nem jelezhető előre.

Részecskefizika

A kvantum-szindinamika kritikus hőmérsékletének közelében egy külső mágneses térnek kétféle hatása van: egyrészt hat a valencia kvarkokra és növeli a királisszimmetria-sértés erősségét jellemző kvark kondenzátum értékét (katalízis), másrészt a sea-kvarkokon keresztül csökkenti a kvark kondenzátumot (inverz katalízis). E két ellentétes effektus együttes hatását vizsgálták a kvarktömeg függvényében és azt találták, hogy ha a kvarkok tömege egy kritikus értéknél nagyobb, akkor a katalízis dominál és a külső mágneses tér a teljes átmeneti hőmérséklet-tartományban növeli a kondenzátumot. Ez részben magyarázhatja a mágneses katalízissel kapcsolatosan az utóbbi években megjelent ellentmondó eredményeket.

A kvantum-szindinamika magas-hőmérsékletű fázisában az instantonok a hőmérséklet növelésével egyre ritkább gázt alkotnak, mely előbb-utóbb ideális gázként kell, hogy viselkedjen. Lényeges kérdés, hogy mekkora az a hőmérséklet, ahol az ideális gáztól való eltérés már praktikus szempontból elhanyagolható. Eljárást dolgoztak ki az instantonok és antiinstantonok számának és eloszlásának meghatározására. Ennek segítségével megmutatták, hogy az ú.n. quenched közelítésben az instantongáz már közvetlenül a fázisátalakulási hőmérséklet fölött ideális gáznak tekinthető.

Vizsgálták a Berezinskii-Kosterlitz-Thouless fázis szerepét csatolt XY modellekben. Két darab egymással csatolt kétdimenziós XY modell viselkedését tanulmányozták a csatolás és a hőmérséklet függvényében. Ismeretes, hogy a csatolatlan határesetben két fázis van: az egyikben exponenciálisan, a másikban hatványszerűen csengenek le az egyrészecke korrelációs függvények. Megmutatták, hogy a csatolás bekapcsolásával létrehozható egy harmadik fázis, amiben az egyrészecke korrelációk exponenciálisan, a kétrészecke korrelációk viszont csak hatványszerűen csengenek le. Numerikus szimulációkkal megmutatták, hogy ez a harmadik fázis a csatolás minden értékére jelen van, és renormcsoport módszerrel feltérképezték a modell fázisdiagramját.

A CERN CMS adatgyűjtési periódusaiban az Atomki csoport feladata a Barrel Mion Pozíció monitor rendszer működtetése és a felmerülő javítási feladatok elvégzése, továbbá a mérési adatok kiértékelése és a karma pozíciók meghatározása volt. A tárgyév során összesen 71 mérési ciklusra került sor.

Az elmúlt évben sikeresen lezárták az összesen 164 darab GE1/1 kamra readout boardjainak kalibrálásával kapcsolatos munkát. A precíziós mozcátó asztal segítségével megtörtént a board-ok teljes felületének szkennelése és a kiolvasó csíkelektrodák pozíciójának meghatározása. A CERN Survey-csoportjával együttműködve fotogrammetriai módszert dolgoztak ki, amellyel megmérték az összeépített kamrákon a referencia elemek pozícióját a kamrák külső keretéhez képest. Elindult az a szintén fotogrammetriai módszerrel végrehajtott mérés is, amelynek célja, hogy a CMS-be beépítésre kerülő két kamrából álló szuperkamrák tagjainak egymáshoz viszonyított helyzetét meghatározza.

Az Európai Spallációs Neutronforrás (ESS) egy közös európai projekt keretében épülő kutatási nagyberendezés a svédországi Lundban. Az Atomki kifejleszti és szállítja a lineáris gyorsító közepes béta és nagy béta szakaszának rádiófrekvenciás helyi védelmi rendszerét. Az Atomki 2019-ben teljesítette az ESS felé a gyors beavatkozó egység kifejlesztését, gyártását, valamint leszállította a lassú beavatkozó egység egy prototípusát. A helyszíni tesztelés során szerzett tapasztalatokat felhasználva az ESS továbbfejlesztette a lassú egységet és elkészítette a végleges terveket.

Magfizikai alap kutatás

A mágikus számú protont és/vagy neutront tartalmazó atommagok különösen stabil szerkezettel és gömbszerű alakkal rendelkeznek. A ^{78}Ni körüli, nagyon neutrongazdag atommagokat a világ vezető radioaktív ionnyaláb-laboratóriumában, RIKEN-ben (Japán) vizsgálták nemzetközi kutatócsoportban. A ^{78}Ni atommag első gerjesztett állapotára kapott energia azt mutatja, hogy a ^{78}Ni kétszeresen mágikus. A gömbszerű alakhoz tartozó első gerjesztett állapot mellett deformált alakhoz tartozó állapotot is találtak hasonló energián.

Ebből azt várják, hogy a ^{78}Ni neutrontúlsúlyosabb közvetlen szomszédjai sem érzik a mágiakusságot.

Az Atomki kutatói a RIKEN laboratóriumban nemzetközi kollaborációval radioaktív nyalábokon erősen neutrontöbbletes atommagokon végrehajtott protonkilökési reakcióban kimutatták, hogy a protonkilökés valószínűsége nagyobb, ha páros számú protont tartalmazó atommagból lökünk ki egy protont, mint ha páratlan számúból. Az eltérés arra vezethető vissza, hogy a protonkilökő reakció után kapott páratlan protonszámú reakciótermék atommagban a gerjesztett állapotok sűrűbben helyezkednek el, mint a páros számú protont tartalmazó végtermékekben.

A ^{18}F atommag Gamow-Teller (GT) átmeneteit tanulmányozták az $^{18}\text{O}(^3\text{He},t)^{18}\text{F}$ reakcióban. A megfigyelt GT erősség döntő része (76.1%-a) az alapállapotú átmenetre koncentrált. A kapott redukált átmeneti erősség értékek konzisztensek az $^{18}\text{O}(p, n)^{18}\text{F}$ reakcióból kapott korábbi értékekkel, valamint a $^{18}\text{Ne} \rightarrow ^{18}\text{F} \beta^+$ bomlásból származó adatokkal. A héjmodell és a kvázirészecske-véletlenfázis közelítéssel (QRPA) végzett számítások arra utalnak, hogy a különböző konfigurációk konstruktívan járulnak hozzá a ^{18}F alapállapotához, azt sugallva, hogy ez az állapot a kisenergiás szuper GT állapot.

Az Atomki kutatói részt vettek a krakkói Center Bronowice (CCB) ciklotronjával végzett első kísérletben. Az IBA Proteus C-235 ciklotronnal felhasználható protonnyalábok a 70–230 MeV energiatartományba esnek. A kísérletben 85 MeV energiájú protonokat alkalmaztak a ^{208}Pb gerjesztett állapotainak előállítására a $^{208}\text{Pb}(p,p'\gamma)$ reakcióból. A mérések során az óriás dipólus (GDR), és az óriás kvadrupólus (GQR) rezonanciák, valamint a pigmy dipólus rezonancia gerjesztéseit figyelték meg.

A ^4He atommag 21.01 MeV-es, $0^- \rightarrow 0^+$ elektromágnesesen tiltott átmenetének legerjesztődése során e^+e^- párokat figyeltek meg az Atomkiban, amelyek szögkorrelációjában 115° -nál egy szignifikáns (7.2σ) csúcsot találtak. A csúcs leírható úgy, hogy feltételezzük egy könnyű részecske létrejöttét és azt követő bomlását, amelynek tömege $m_{xc^2}=16,8$ MeV. A kapott tömegérték nagyon jól megegyezik az előző ^8Be kísérletekből feltételezett X17-bozonra kapott értékkel.

Kimutatták a háromtengelyűen deformált magalakhoz kapcsolódó, eddig kevésbé ismert imbolygó forgást a ^{105}Pd atommagban, ami analóg a merev testek precessziós forgásával. Az atommagban ezen mozgást a gerjesztett állapotok speciális rendszere és a bomlásuk során kibocsátott gamma-kvantumok speciális tulajdonságai jellemzik. Ezeket mérték nemzetközi együttműködésben az EUROBALL és a DIAMANT detektorrendszerekkel. Ez a munka az imbolygó forgás első kimutatása az $A \sim 100$ magtartományban.

A ^{130}Ba atommag forgását vizsgálták nemzetközi együttműködésben a GALILEO detektorrendszerrel. Azt találták, hogy a közepes impulzusmomentumú állapotokban, ahol egy nukleonpár feltört állapotban van, az atommag könnyen deformálható, puha. Különböző alakot vehet fel és különböző módon foroghat attól függően, hogy melyik nukleonpár tört fel és a nukleonok impulzusmomentumai milyen irányban állnak a szimmetria- és a forgástengelyhez képest. Ebben a tartományban először mutattak ki egy olyan elrendezést, amikor a feltört neutronpár szivar alakot hoz létre és a forgástengely nem a deformáció főtengelye.

A LUNA nemzetközi együttműködés által mélyen a föld alatt, Gran Sassoban (Olaszország) működtetett részecskegyorsító berendezés segítségével, a zavaró háttérsugárzás extrém alacsony szintje mellett vizsgálták az $^{18}\text{O}(p,\gamma)$, az $^{18}\text{O}(p,\alpha)$ és a $^{23}\text{Na}(p,\gamma)$ magreakciókat. A földalatti laboratórium különleges adottságainak köszönhetően mindhárom esetben alacsony energián sikerült méréseket végezni. A korábbi adatoknál sokkal pontosabban sikerült meghatározni a 90 keV energiájú rezonancia erősségét a $^{18}\text{O}(p,\gamma)$ és $^{18}\text{O}(p,\alpha)$ reakciók, illetve a 140 keV energiájú rezonancia erősségét a $^{23}\text{Na}(p,\gamma)$ reakció esetén. Ezek az eredmények az elemszintézis számolások bizonytalanságát jelentősen csökkentik. Az European Physical Journal felkérésére összefoglaló tanulmányt készítettek az aktivációs módszer alkalmazásáról a nukleáris asztrofizika területén.

Magfizikai alkalmazások

Középkori üvegleletek elemösszetételét határozták meg az IPERION CH projekt keretében érkezett vendégkutatókkal együttműködésben. Megállapították, hogy a tárgyak nem mutatják az üveg újrafelhasználásának jeleit, illetve csoportosítani is tudták a tárgyakat elemösszetételük alapján. Az eredmények hozzájárulnak a középkori Toszkána üvegművességének jobb megismeréséhez. Szintén az Iperion Trans-National Access projekt keretében kerámiák anyagában lévő zárványok nyomelem-szintű összetételét határozták meg, nukleáris mikroszonda segítségével.

Kvázi-monoenergiás d+D gyorsneutronokat és 1”x1” méretű henger alakú detektort használva megmérték az EJ-299-34 típusú plasztikszcintillátor fényhozamát $E_n = 5.9$ MeV, 9.4 MeV és 12.4 MeV neutronenergiáknál. Az eredmények lehetővé teszik az ún. Pulse Height Response Spectrometry (PHRS) módszer alkalmazását akár a széles energiatartományt lefedő neutronspektrumok meghatározására is, amikor a plasztik detektort használják spektrométerként.

Olyan új módszert dolgoztak ki és demonstrálták azt bizonyos anyagtudományi jellemzők meghatározására, melynek segítségével jelentősen növelhetővé válik az atomerő mikroszkóp (AFM) erőgörbék kiértékelésének megbízhatósága. A módszer kidolgozásához elsőként módosították igen tág tartományban a PDMS (poly dimetil-sziloxán) polimer elasztikus modulusát proton besugárzással, gumyszerű állapottól egészen az üvegszerű állapotig.

A csak ^3He bombázó nyalábbal aktiválható szén alapanyagú mintából ^7Be izotóp előállítására rendszeresítettek egy módszert, és sikeresen alkalmazták azt többféle mintán. A besugárzott anyagok esetleges felületi károsodásának meghatározására különböző dózissal besugárzott mintákat vizsgáltak különböző felületfizikai módszerekkel annak megállapítására, hogy a besugárzás milyen természetű és mértékű változásokat hoz létre a besugárzott térfogatban.

Kimérték az analitikai szempontból fontos $^{23}\text{Na}(p,p'\gamma)^{23}\text{Na}$ ($E_\gamma = 441$, illetve 1636 keV) és $^{23}\text{Na}(p,\alpha'\gamma)^{20}\text{Ne}$ ($E_\gamma = 1634$ keV) részecskeindukált gamma-emissziós (PIGE) reakciók hatáskeresztmetszetét az 1.77 – 3.02 MeV protonenergia-tartományban. A hatáskeresztmetszet-adatok pontosságát vastag céltárgyon ellenőrizték. A munka a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség által koordinált együttműködés keretében zajlott. Az eredmények hozzájárulnak régészeti tárgyak, műkincsek, környezeti minták nátriumtartalmának pontosabb, roncsolásmentes meghatározásához. Az adatok bekerültek az IBANDL adatbázisba.

A növénynevelés új, gyors módszerének kidolgozását segítették ^{52}Mn radioaktív PET izotóp felhasználásával, amivel a Debreceni Egyetemen együttműködve kukoricafajták stressztűrő képességét vizsgálták PET kamerával. Antitestek receptor-aktív részeinek mesterséges előállításával készítettek úgynevezett affibody-kat, amiket orvoskutatók alkalmaztak tumoros sejtek diagnosztizálására sejtenyészetekben bifunkciós komplexképző molekulával kötött PET radioizotópok segítségével.

Vizsgálatokat végeztek töltött részecske-indukált magreakciók hatáskeresztmetszeteinek meghatározására Al, Ti, Hf, Ni, Ca, Ho, Tm, Y, Yb és Zr céltárgyakon különböző energiatarományokban. Új kísérleti aktivációs hatáskeresztmetszet-adatok határoztak meg, japán, belga és dél-afrikai együttműködések keretében. A kapott hatáskeresztmetszet-adatok különböző referencia adatbázisok létrehozását támogatják, továbbá segítik a megfelelő elméleti modellek kidolgozását, illetve az adatok gyakorlati alkalmazását is.

Atom- és molekulafizika

Kísérletileg vizsgálták vízmolekulák 6,6 keV-os O^+ ionbesugárzást követő felbomlásából származó pozitív és negatív töltésű ionok energia- és szögeloszlását. Az ellentétes töltésű ionok eloszlása meglepően nagy hasonlóságot mutatott, a H^- és H^+ ionok aránya 1:100 körülnek adódott energiától és szögtől függetlenül. A kapott eredményeket különböző szintű elméleti modellekkel értelmezték, amelyek rámutattak a gerjesztésekből származó energiafelszabadulás jelentőségére a molekulák felbomlásában. A jelen megfigyelések megerősítik azt a korábbi tapasztalatot, hogy egyszerűen töltött ionokkal történő ütközések esetén a molekulatöredékek töltésállapota egyszerű statisztikai törvényszerűségeket mutat.

Nagyon jó szögfeloldású elektronnyalábbal mérték a víz teljes (rugalmas és rugalmatlan) hatáskeresztmetszetét a 3-100 eV energiatarományban. Igen kis előreszórási szögeknél ($\approx 1^\circ$) átlagos (rotációs és vibrációs) differenciális rugalmas hatáskeresztmetszeteket határoztak meg. Ez utóbbi, kísérletileg eddig még felderítetlen tartományban elvégzett mérések az elméletek egyedülálló próbáját jelentik. A kapott adatok nagyon jó egyezésben vannak ab initio R-mátrix számítások eredményeivel.

A lövedékion koherenciája az egyik legvitatottabb kérdés napjainkban az atomi és molekuláris ütközések területén. Egy kísérletben a szétrepülő részecskék nem minden paraméterét mérik meg: a hiányzókat megmaradási tételek rögzítik. Ez a tény jelentősen befolyásolhatja a vizsgálandó koherencia szerepét is. Elméleti munkájukban erre mutattak rá 75 keV-es protonok és hélium atomok ütközését vizsgálva. Arra a következtetésre jutottak, hogy a kísérleti adatok csak részben írhatók le a lövedékion koherenciátulajdonságainak figyelembevételével, lényegesebb szerep tulajdonítható a különböző kölcsönhatás típusok interferenciájának és a céltárgyion polarizációjának.

Jelentős innovációs fejlesztést hajtottak végre a Gyorsítóközpont egyik nagyberendezésén. A több mint 20 éve üzemelő saját fejlesztésű ECR ionforrás mágnescsapdáját áttervezték és átalakították, ami két területen is azonnal jelentős előrelépést eredményezett. 1) Átlagosan 50-100 %-kal megnőtt az ionforrásból kivonható nagytöltésű ionok intenzitása. 2) A módosított mágneses csapda és annak finomhangolása lehetőséget nyújt az anyag plazmaállapotának létrehozására stabil és instabil üzemmódban, valamint a kettő határán. Ezáltal egy olyan berendezés jött létre, mely – kategóriájában a világon egyedülálló módon – alkalmas plazma

instabilitások vizsgálatára. Ilyen vizsgálatok alapvető fontosságúak például a fúziós kutatások számára.

A hamburgi DESY PETRA III szinkrotronjának foton-nyalábjával vizsgálták $\text{Sc}_3\text{N}@C_{80}^+$ és $\text{Sc}_3\text{N}@C_{80}^-$ endohedrális fullerének fotoindukált folyamatait a 30-50 eV, valamint a 280-420 eV fotonenergia tartományon. A mérések során nagy figyelmet fordítottak arra, hogy miként befolyásolja a fullerénbe helyezett fém-nitrid klaszter a megfigyelhető folyamatokat. A molekula egyszeres vagy kétszeres ionizációja mellett C_2 dimerek megjelenése is megfigyelhető volt. Ezek az eredmények asztrofizikai és élettudományi szempontból is jelentősek.

Kétatomos szénhidrogén kation (CH^+) alacsony energiájú elektronok által indukált disszociatív rekombinációjára vonatkozó hatáskeresztmetszetet és reakciósebességet számoltak, a rotációs kölcsönhatások figyelembevételével. Eredményeiket egy olyan tanulmányosorozat lezáró cikkében közölték, amely lefedi az CH^+ elektronindukált reaktív folyamatait a 10 – 10000 K-es hőmérséklet tartományban.

Az elektronbefogás jelenségét tanulmányozták elméleti úton a $p + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}(1s) + \text{H}_2(1s\sigma)$ folyamatban. A Born–Oppenheimer közelítés keretében kiterjesztették a torzított hullámú Born-modellt a vibrációs folyamatok leírására is. A 20-300 keV-es ütközési energiákon meghatározott disszociatív és nem-disszociatív elektronbefogási hatáskeresztmetszet értékek kvalitatív egyezést mutatnak a kísérleti adatokkal. Megállapították, hogy alacsony ütközési energiákon a H_2^+ ionok rezgési móduszai jól értelmezhetőek az ún. Franck-Condon faktoral, ami a kezdeti és végállapot vibrációs állapotok átfedésével arányos.

A Nemzeti Kiválósági Program keretében meghirdetett és elnyert pályázat tudományos programjához kapcsolódóan egy nagyfelbontású elektronspektrométer fejlesztési és tesztelési munkáit végezték.

Egy könyvfejezet keretében összefoglalták és kibővítették a légköri (földi, marsi, ...) plazmákban lejátszódó elemi elektron-molekula (H_2 , N_2 , O_2 , NO , CO) ütközési folyamatok hatáskeresztmetszetéről és reakciósebességéről szóló ismereteket.

Felületfizika

Lengyel együttműködés keretében Hummer-féle eljárással készített grafén-oxidok (GO) redukciójával redukált GO-kat (rGO) állítottak elő. Az rGO lemezekben néhány grafén réteg mutatkozott, amelyek átlagos számát Röntgen-diffrakciós és reflexiós elektron-energia veszteségi spektroszkópia (REELS) mérésekkel határozták meg.

Fe_3O_4 mágneses nanorészecskék funkcionálizálását végezték biokompatibilis adszorbeált molekulákkal, REELS mérésekből határozva meg a tiltott sáv energiáját. Azt találták, hogy a részecske méretének növekedésével csökkent a tiltott sáv energiája. A funkció rétegvastagság kb. 0.7-1.3 nm volt.

REELS mérésekben nagy plazmonhozammal rendelkező metalloid félvezetők (Si és Ge) optikai állandóit - törésmutatót, extinkciós együtthatót, komplex dielektromos függvényt – számolták ki az energiavesztéségi függvényből a Kramers-Kronig analitikus formula

alkalmazásával. Az alkalmazott elektronenergia-tartomány néhány keV, emiatt a nyert információ a szilárd minták legfelső atomi rétegeire vonatkozik.

Néhány nanométeres vastagságú vékonyrétegek felületi elemösszetétel-változását tanulmányozták kisenergiás ionszórásos technikával. A felületi elemösszetétel-változás termikusan indukált atomi mozgási folyamatok eredménye. Réz/szilícium rendszerben meghatározták az alacsony hőmérsékletű nanodiffúziós folyamatok aktivációs energiáit, továbbá kimutatták, hogy a szemcsehatár és a felületi diffúziós folyamatok eredményeként a nanoszerkezet mélységéből a felületre termikus aktivációval kijutott atomok Volmer-Weber típusú réteg-építési mechanizmussal rendeződnek.

Ta/TaV₂/V vékonyréteg szerkezetben vizsgálták a TaV₂ vékonyréteg vanádium koncentrációjának változását hőkezelés hatására. Megállapították, hogy a kémiai összetétel időben változik és a TaV₂ réteg „visszaoldódik” a szomszédos rétegekbe.

Electrospray technikával erős felületi kötődésű CaSi réteget hoztak létre orvosi implantátumokon, ami a beépülés szempontjából jelentősen javítja az implantátumok felületét.

Kétkomponensű PbTe ötvözetekben tanulmányozták a kisenergiás ionporlasztás ionizációs hatásokra gyakorolt módosító hatását. A kísérletek elősegítették az ionporlasztáskor fellépő preferenciális porlasztási jelenség pontosabb megértését, ami fontos szerepet játszik a porlasztáson alapuló mélységprofil analízisben.

Környezettudomány

Földtani kormeghatározás témában leírták a Telkibányai lávadómmező vulkanosztratigráfiájáról és fejlődéstörténetéről. A terület vulkanológiai térképezése a rétegtan korábban nem azonosított egységeit definiálta, a lávadómok két generációjával és az őket elválasztó Abaujvár-Telkibánya Ignimbrittel. A K/Ar laboratórium két újabb koradattal szűkítette a vulkáni működés intervallumát a 11,47 ±0,19 és 11,56±0,15 millió év közötti időszakra.

Cirkon U-Th és (U-Th)/He korok segítségével pontosították a Csomád vulkáni komplexum kitörési kronológiáját, amely a Kárpát-Pannon térség legfiatalabb tűzhányója. A vulkán fő tömegét képző központi lávadómkomplexum felépülése 160-90 ezer évvel ezelőtt történt, míg a robbanásos kitörések, amelyek kialakították a vulkán ma is látható képét, két fő szakaszban, kb. 50 ezer és 30 ezer évvel ezelőtt zajlottak. A teljes lávadómmező aktivitása két fő szakaszra bontható: 1-0,3 millió év között épültek fel a kis térfogatú lávadómok, majd az utolsó 200 ezer évre megváltozott a vulkáni működés intenzitása, ekkor kezdődött a központi lávadómegyüttes felépülése.

Összehasonlító tanulmányban számoltak be a hamvasztott csontok gyorsító tömegspektrométeres (AMS) radiokarbon korlási technikájának fejlesztéséről, összevetve azokat más, konvencionálisan jobban datálható szerves maradványokkal (normál csontok, szenült növényi maradványok). A kifejlesztett új mintaelőkészítési eljárás és a kémiai tisztítás megbízhatónak mutatkozott az infravörös spektroszkópiai módszerrel nyert spektrumok és a

kapott összehasonlító ^{14}C korok alapján. Igen jó reprodukálhatósággal kapták vissza a várt ^{14}C korokat a 0,2-0,3 mm-es szemcsefrakció mérése esetén.

Az Északnyugat-Bulgáriában fekvő Lom-vidék izotóphidrológiai vizsgálatát végezték el, melyhez környezeti izotópokat alkalmaztak ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{13}\text{C}$, ^3H , ^{14}C). A vízminták elemzésével kapott átlagos tartózkodási idők alapján megállapították, hogy a víztartóban lévő víz az utóbbi 12 ezer évben szivárgott a felszín alá. Ezen belül a vizek egy része a holocén elején, míg némely részük a késő-pleisztocén átmeneti idején szivárgott be. Ez utóbbi vizek beszivárgási hőmérsékletei hűvösebb klímára utalnak.

Megvizsgálták a Kárpát-Pannon Térség legfiatalabb vulkánjának, Csomádnak és környezetének a gázömléseit a nemesgáz és szénizotóp összetétel szempontjából. A területet intenzív gázömlések jellemzik, amelyek főként szén-dioxid dús mofettagázként jelennek meg. A területen a szén-dioxid teljes évi kibocsátása elérheti a 8000 tonnát is. Rávilágítottak arra, hogy a kiáramló gázok magmás komponenst tartalmaznak, 60-80%-ban. A csomádi dácit nyomelemtartalma és a gázok izotóppozitívumai alapján arra a következtetésre jutottak, hogy a Csomád alatti litoszféra köpeny erős metasomatózist szenvedhetett, és az eredeti hélium izotóppozitívumot a fluidumok módosíthatták.

Kritikai tanulmányban arra hívták fel a figyelmet, hogy a hiányos növényanatómiai ismeretek helytelen következtetésekhez vezetnek a komplex környezeti kutatásokban. A Kárpátok térségére hiánypótló fitolit referencia kollekció összegyűjtését kezdték meg. Néhány fontos, indikátor faj fitolitikészletét elsőként jellemezték, illetve először került leírásra egy karakterisztikus fitolit típus, amely nagy mennyiségben képződik a lucfenyő túlevelében. A fitolitikák elemtartalma taxonómiai releváns információ. Akár több ezer éves üledékekben is, a fosszilis fitolitikészletet elemezve a nyitvatermő és a virágos fajok azonosíthatók segítségével.

Meghatározták a szállóporszennyezés mértékét, összetételét és lehetséges forrásait Debrecen belvárosában közlekedő villamosokon fűtési és nem fűtési időszakokban. A villamosokon 3-9-szer magasabb koncentrációkat mértek, mint a külső levegőben. A legmagasabb koncentrációt fűtési időszakban a régi típusú villamoson detektálták. Megállapították, hogy a járműveken a szennyezés forrása elsősorban a külső levegő és az utasok által felvert por, a sínek és a felső vezetékek kopása, valamint a tisztítószeres. A villamosokon mért szálló por mennyiségét jelentősen befolyásolták a közeli útfelújítások is.

Radiokarbon vizsgálatokat végeztek egy japán cédrusfa évgyűrűiből (Koriyama, Fukushima, Japán). A vizsgálat fő célja a Fukushima Dai-ichi atomerőmű 2011. március 11-ei balesete során esetlegesen kibocsátott ^{14}C detektálása volt. Ehhez elemezték a faévgyűrűből mért elérhető ^{14}C adatokat a 1990-2014-es időszakra. A levegő erőmű környezetében, a baleset előtt és után történő mozgásának tanulmányozására légtömegáramlási modellt hoztak létre a mintavételi területre. A modellszámítások eredményei alapján a fő légtömegáramlási irányok a baleset idején, illetve a növények vegetációs időszakában is az erőműtől a Csendes-Óceán irányába mutattak. A vizsgált 1990-2014-es időszakban nem volt kimutatható ^{14}C többlet egyetlen faévgyűrű mintában sem, viszont szinte minden esetben szignifikáns fosszilis-szén terhelést (Suess-effektus) figyeltek meg.

Kihulló radioizotópok ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, ^{137}Cs és ^{241}Am) mérésén alapuló kormeghatározást végeztek a romániai Bolăteu-Feredeu tó felszínközeli üledékeiben. A kutatás motivációja az volt, hogy javítsák a legfiatalabb rétegek kronológiáját az üledék felhalmozódási sebességében

megfigyelt számottevő ingadozások kapcsán. Jelentős változásokat figyeltek meg a részecskeméret-eloszlás és az üledékekord elemi/izotóp összetételének mélységeloszlásában, amely a vízgyűjtő területen a csapadék intenzitásában és mennyiségében megfigyelhető változásokhoz kapcsolódhat. A kapott nagyfelbontású eredmények regionális referenciaértékként szolgálhatnak hasonló vizsgálatokhoz.

II. b) Tudomány és társadalom

Az Atomki által a nagyközönség számára szervezett legjelentősebb programok (pl. *Fizikusnapok*) hagyományosan az őszi hónapokra esnek, ezért a beszámolási időszakban nem került sor kiemelt jelentőségű disszeminációs jellegű programra.

Egyedi szervezésben a beszámolási időszak során 7 csoportban 112 fő érkezett az intézetbe (általános és középiskolások, egyetemisták, felnőtt érdeklődők) és összesen 225 látogatóórát töltöttek el. A programok a csoportok ismeretszintjéhez és érdeklődéséhez igazodnak és kísérletekkel tarkított előadásokat, valamint az intézet laborjaiban történő látogatásokat tartalmaznak. A látogatóközpontban a radioaktív sugárzás tulajdonságaival és kimutatásával, a hidegfizikai bemutató alkalmával pedig az alacsony hőmérsékleten lejátszódó jelenségekkel ismerkednek az érdeklődők.

Az Atomki weblapján keresztül megtekinthetők az intézet kutatói által írt ismeretterjesztő cikkek, amelyekből 2019-ben összesen kettő jelent meg, a Fizikai Szemle, illetve a Természet Világa oldalain.

A korábbi években lezajlott *Kutatók Éjszakája* és a *Fizikusnapok* ismeretterjesztő előadásairól készült felvételek elérhetők a legnépszerűbb fájlmegosztó portálon. Az eddig feltöltött videókat a beszámolási időszak folyamán mintegy 21 ezer alkalommal tekintették meg.

A beszámolási időszak során az Atomki és munkatársai 159 hazai médiamegjelenésben szerepeltek.

III. A kutatóhely új hazai és nemzetközi K+F kapcsolatai a 2019. január 1. és augusztus 31. közötti időszakban

Az intézet együttműködésben folytatott kutatásai hagyományosan egyrészt a nagy nemzetközi kollaborációk (pl. CERN-CMS, LUNA, RIKEN stb.) keretében valósulnak meg, másrészt pedig különféle szintű kétoldalú kapcsolatokon alapszanak. Az Atomki munkatársai két új projekthez csatlakoztak a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (IAEA) szervezésében. A kormányközi szintű kétoldalú kapcsolatok köre francia és marokkói együttműködésekkel bővült, míg új intézményközi együttműködések elsősorban a környező országok egyetemeivel (Babes-Bolyai Egyetem, Belgrádi Egyetem, Károlyi Egyetem (Prága), Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem), illetve szakosított szervezeteivel (Szlovák Geológiai Szolgálat, Szlovén Geológiai Szolgálat) köttettek.

Az együttműködések külön kategóriáját képviselik az Isotopech Zrt-vel kötött kooperációs megállapodás keretében végzett radiokarbonos (^{14}C) mérések, amelyek régészeti és környezetregészeti kormeghatározási, valamint nukleáris környezetvédelmi kutatási témákhoz

kapcsolódnak. Ezek során az év első nyolc hónapjában több mint ezer egyedi minta vizsgálatát végezték számos külföldi, illetve hazai egyetem, múzeum és iparvállalat számára.

Az Atomki alapító tagként vett részt a Magyar Magfúziós Technológiai Platform alakuló ülésén.

A vállalati szférából továbbra is az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. az Atomki legjelentősebb együttműködő partnere.

A felsőoktatásban való részvétel 2019-ben is fontos szerepet töltött be az intézet kutatóinak tevékenységében. Az Atomki kutatói főképpen a Debreceni Egyetemen, azon belül pedig főleg a Természettudományi és Technológiai Karon végeztek oktatómunkát. A tavaszi félévben összesen 17 elméleti és 7 gyakorlati kurzust hirdettek meg. A beszámolási időszak folyamán 27 PhD, 12 MSc, 3 BSc és 8 TDK-hallgató témavezetését végezték. Doktori képzésben 51 Atomkis kutató volt érdekelt, köztük heten doktori iskolai törzstagként. Közülük öten a Debreceni Egyetem fizikai, ketten pedig az informatikai doktori iskolájának törzstagjai. Az intézetben folytatódott a kutatóhallgatói ösztöndíjas program, amelynek keretében egyetemisták vállalnak részt a kutatómunkában. A tavaszi félévben három ösztöndíjas vett rész ebben a programban.

IV. A 2019. január 1. és augusztus 31. közötti időszakban elnyert fontosabb hazai és nemzetközi pályázatok rövid bemutatása

- *Kvantumkorrelációk*, MTA Lendület Kutatócsoport, 2019-24
- *Supplying Accurate Nuclear Data for energy and non-energy Applications – SANDA*, konzorciumi tagság a H2020-Euratom-1.1, 847552 sz. projektben, 48 hónap, 20 kEUR
- *Research And Development with Ion Beams - Advancing Technology in Europe – RADIATE*, konzorciumi tagság a H2020-EU.1.4.1.2, 824096 sz. projektben, 48 hónap, 180 kEUR
- *Molecular Dynamics in the GAS phase*, EU COST Akció: OC-2018-2-23261, 2019-22, multilaterális együttműködés

V. A 2019. január 1. és augusztus 31. közötti időszakban megjelent jelentősebb tudományos publikációk

Best A ; Pantaleo FR ; Elekes Z; Fülöp Zs; Gyürky Gy; Szücs T; et al. (48)
Cross section of the reaction $^{18}\text{O}(p,\gamma)^{19}\text{F}$ at astrophysical energies: The 90 keV resonance and the direct capture component.
PHYSICS LETTERS B, 797: 134900. (2019)
<https://doi.org/10.1016/j.physletb.2019.134900>

Bíró B ; David G ; Fenyvesi A ; Haggerty JS ; Molnár J ; Nagy F ; et al. (11)
A comparison of the effects of neutron and gamma radiation in silicon photomultipliers.

IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, 66: 1833-1839. (2019)
<https://arxiv.org/abs/1809.04594>

Boeltzig A; Best A ; Elekes Z; Fülöp Zs; Gyürky Gy; Szücs T; et al. (49)
Direct measurements of low-energy resonance strengths of the $^{23}\text{Na}(p,\gamma)^{24}\text{Mg}$ reaction for astrophysics.
PHYSICS LETTERS B, 795: 122-128. (2019)
<https://doi.org/10.1016/j.physletb.2019.05.044>

Bruno CG ; Aliotta M ; Elekes Z; Fülöp Zs; Gyürky Gy; Szücs T; et al. (38)
Improved astrophysical rate for the $^{18}\text{O}(p,\alpha)^{15}\text{N}$ reaction by underground measurements.
PHYSICS LETTERS B, 790: 237-242. (2019)
<https://doi.org/10.1016/j.physletb.2019.01.017>

Buga Cs; Hunyadi M ; Gácsi Z ; Hegedűs Cs ; Hakl J ; Csík A et al. (8)
Calcium silicate layer on titanium fabricated by electrospray deposition.
MATERIALS SCIENCE & ENGINEERING C-MATERIALS FOR BIOLOGICAL APPLICATIONS, 98: 401-408. (2019)
<http://hdl.handle.net/2437/264202>

Cseh, J.
Spontaneous symmetry-breaking in Elliott-type models and the nuclear deformation.
PHYSICS LETTERS B, 793: 59-64 (2019)
<https://doi.org/10.1016/j.physletb.2019.04.033>

Cseh J ; Riczu G; Darai J.
Shape isomers of light nuclei from the stability and consistency of the $SU(3)$ symmetry.
PHYSICS LETTERS B, 795: 160-164 (2019)
<https://doi.org/10.1016/j.physletb.2019.06.016>

Csík A; Zayachuk DM ; Slynko VE; Schmidt U; Buga Cs ; Vad K:
Amorphisation effect in binary tellurides under low energy Ar^+ ion bombardment.
MATERIALS LETTERS, 236: 5-8. (2019)
<http://hdl.handle.net/2437/259070>

Csík A ; Shenouda SS ; Erdélyi Z ; Beke D
Dissolution of thin TaV_2 during annealing of $\text{Ta}/\text{TaV}_2/\text{V}$ tri-layer below the order-disorder temperature.
APPLIED SURFACE SCIENCE, 466: 381-384. (2019)
<http://hdl.handle.net/2437/257699>

Endrődi G ; Giordano M ; Katz SD ; Kovács TG ; Pittler F
Magnetic catalysis and inverse catalysis for heavy pions.
JOURNAL OF HIGH ENERGY PHYSICS, 2019: 007. (2019)
[https://doi.org/10.1007/JHEP07\(2019\)007](https://doi.org/10.1007/JHEP07(2019)007)

Gulyás L; Egri S ; Igarashi A
Theoretical investigation of the fully differential cross sections for single ionization of He in collisions with 75-keV protons.

PHYSICAL REVIEW A, 99: 032704 (2019)
<http://real.mtak.hu/103527/>

Juhász Z ; Sulik B ; Lattouf E ; Bene E ; Herczku P ; Kovács STS ; et al. (13)
Anion and cation emission from water molecules after collisions with 6.6-keV 16 O⁺ ions.
PHYSICAL REVIEW A, 100: 032713. (2019)
<https://arxiv.org/abs/1910.00657>

Kadokura R ; Loreti A ; Kövér Á ; Faure A ; Tennyson J ; Laricchia G
Angle-Resolved Electron Scattering from H₂O near 0°.
PHYSICAL REVIEW LETTERS, 123: 033401 (2019)
<http://real.mtak.hu/103528/>

Kis BM ; Caracausi A ; Palcsu L ; Baciuc C ; Ionescu A ; Futó I ; et al. (8)
Noble gas and carbon isotope systematics at the seemingly inactive Ciomadul volcano
(Eastern- Central Europe, Romania): evidence for volcanic degassing.
GEOCHEMISTRY GEOPHYSICS GEOSYSTEMS: AN AGU JOURNAL, 20: 3019-3043.
(2019)
<http://real.mtak.hu/103538/>

Lampé I, Beke DL, Biri S; Csík A; Hajdu P; Rácz R; et al. (11) :
Investigation of silver nanoparticles on titanium surface created by ion implantation
technology.
INTERNATIONAL JOURNAL OF NANOMEDICINE, 2019: 4709-4721. (2019)
<https://doi.org/10.2147/IJN.S197782>

Lévai G; Kovács J:
The finite PT-symmetric square well potential.
JOURNAL OF PHYSICS A-MATHEMATICAL AND GENERAL, 52: 025302. (2019)
<http://real.mtak.hu/103522/>

Lisztes-Szabó Zs:
Complex environmental research: Do we need exact knowledge of plant anatomy? A critical
discussion of Rashid et al. (2019).
EARTH-SCIENCE REVIEWS, 198: 102920. (2019)
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102920>

Lisztes-Szabó Zs; Braun M; Csík A; Pető Á:
Phytoliths of six woody species important in the Carpathians: characteristic phytoliths in
Norway spruce needles.
VEGETATION HISTORY AND ARCHAEOBOTANY, 28: 649-662. (2019)
<https://doi.org/10.1007/s00334-019-00720-x>

Molnár K; Lukács R; Dunkl I; Schmitt AK; Kiss B; Szepesi J et al. (8)
Episodes of dormancy and eruption of the Late Pleistocene Ciomadul volcanic complex
(Eastern Carpathians, Romania) constrained by zircon geochronology.
JOURNAL OF VOLCANOLOGY AND GEOTHERMAL RESEARCH, 373: 133-147.
(2019)
<http://real.mtak.hu/91737/>

Naselli E ; Mascali D; Biri S ; Rácz R ; Pálinkás J ; Perduk Z et al (12)
Impact of two-close-frequency heating on ECR ion source plasma radio emission and stability.

PLASMA SOURCES SCIENCE & TECHNOLOGY, 28: 085021. (2019)

<http://real.mtak.hu/103529/>

Pál KF ; Vértesi T:

Class of genuinely high-dimensionally-entangled states with a positive partial transpose.

PHYSICAL REVIEW A, 100: 012310 (2019)

<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.100.012310>

Paul N ; Obertelli A ; Bertulani CA ; Dombrádi Zs; Korkolu Z; Vajta Zs; et al. (92)

Prominence of Pairing in Inclusive (p , 2 p) and (p , p n) Cross Sections from Neutron-Rich Nuclei.

PHYSICAL REVIEW LETTERS, 122: 162503. (2019)

<http://real.mtak.hu/103525/>

Petrache CM ; Walker PM ; Guo S ; Kuti I; Sohler D; Timár J; et al. (41)

Diversity of shapes and rotations in the γ -soft ^{130}Ba nucleus: First observation of a t-band in the $A = 130$ mass region.

PHYSICS LETTERS B, 795: 241-247. (2019)

<https://doi.org/10.1016/j.physletb.2019.06.040>

Posedi I ; Kertész Z ; Barrulas P ; Fronza V ; Schiavon N ; Mirão J

Medieval Tuscan glasses from Miranduolo, Italy: A multi-disciplinary study.

JOURNAL OF ARCHAEOLOGICAL SCIENCE: REPORTS, 26: 101878. (2019)

<http://real.mtak.hu/103526/>

Sánchez de la Torre M ; Angyal A ; Kertész Z ; Papp E ; Szoboszlai Z ; Török Z ; Csepregi Á ; Szikszai Z et al. (10)

Micro-PIXE studies on prehistoric chert tools: elemental mapping to determine Palaeolithic lithic procurement.

ARCHAEOLOGICAL AND ANTHROPOLOGICAL SCIENCES, 11: 2375-2383. (2019)

<http://real.mtak.hu/90888/>

Taniuchi R; Santamaria C; Doornenbal P ; Dombrádi Zs; Korkulu Z; Vajta Zs. et al. (71)

^{78}Ni revealed as a doubly magic stronghold against nuclear deformation.

NATURE 569 : 7754 pp. 53-58. , 6 p. (2019)

<http://real.mtak.hu/103524/>

Tímár, J. ; Kruzsic, B. ; Sohler, D. ; Kuti, I. ; Algora A; Dombrádi Zs; Krasznahorkay A; Molnár J; Nyakó B; Zolnai L et al. (28)

Experimental Evidence for Transverse Wobbling in Pd-105.

PHYSICAL REVIEW LETTERS, 122: 062501. (2019)

<http://arxiv.org/abs/1901.05891>