

Sarkadi László

Fejlődési irányok, hazai eredmények az atomi ütközések fizikájában

Az atomi ütközések fizikája ma már igen szerteágazó tudományág. A vizsgált jelenségek köre a legegyszerűbb atomok ütközésétől az olyan nagy bonyolultságú rendszerek kölcsönhatásáig terjed, mint például a fullerének vagy az atomi klaszterek. Az ütközési energia óriási tartományt, 25 nagyságrendet ölel át. A cikkben a terület fejlődési irányait mutatjuk be, külön kitérve a terület egyik legjelentősebb hazai központjában, az MTA Atommagkutató Intézetében az elmúlt évek során elért eredményekre.

Az elmúlt néhány év legjelentősebb fejleményei a világban

Az atomi ütközések fizikájában napjainkban is tart a korábban kezdődött dinamikus fejlődés. Ezt az utóbbi években azzal magyarázhatjuk, hogy néhány technikai újdonság a jelenségek egészen újszerű kísérleti megközelítését tette lehetővé. Ezek közül elsőként talán a magasan töltött ionok különböző típusú ionforrásokban (elektron ciklotron rezonancia ionforrás — ECR, elektron-nyaláb ionforrás — EBIS) történő előállítását említhetjük. Az ezekkel az ionokkal végzett vizsgálatok igen szerteágazóak. Az atomszerkezeti kutatások számára fontosak és értékesek az ionok egzotikus állapotaira vonatkozó spektroszkópiai mérések. Az elért nagy ionáramok lehetővé teszik a hagyományos ion—atom ütközéses vizsgálatokon túlmenően ion—ion, valamint ion—elektron szórásai kísérletek elvégzését. Ma már külön tudományterületnek lehet tekinteni az alacsonyenergiájú magasan töltött ionoknak szilárdtest-felülettel való kölcsönhatását vizsgáló kutatásokat. Itt igen érdekes felismerés az, hogy a felület közelébe kerülő csupasz (elektronjaitól megfosztott) ion irányában az erős elektromos tér hatására a felületből elektronáram indul meg. Az elektronok azonban nem az ion magjához közel eső térrészt kezdik kitölteni, hanem attól távolabbi térrészekbe „folynak”, azaz ideiglenesen egy belül üres atom alakul ki. Ennek a különleges atomi képződménynek természetesen nemcsak a dinamikája, hanem a spektroszkópiája is nagyon érdekes.

A magasan töltött ionokat gyorsíthatják is. Elegendően nagy energiára történő gyorsítással és ütköztetéssel még a legnehezebb elemek ionjairól is könnyűszerrel

eltávolítható az összes elektron. A nagysebességű ionok *tárológyűrűkben* tovább gyorsíthatók és összegyűjthetők, aminek eredményeképpen kapott óriási energiájú (nukleononként akár 10^{11} eV), magas töltésű (pl. U^{92+}) és nagy intenzitású ionnyaláb áll elő. Ilyen nyalábokkal olyan atomfizikai kísérletek végezhetők el, amelyenkről néhány évvel ezelőtt csak álmodni lehetett. Példaképpen említjük a legnehezebb elemek hidrogén-, illetve héliumszerű ionjain végzett spektroszkópiai vizsgálatokat. Ezeknek célja a fizika jelenleg legpontosabb elméletének, az elektromágneses kölcsönhatáson alapuló jelenségek egzakt leírására szolgáló kvantum-elektrodinamikának a tesztelése. Azok az effektusok, amelyek megfigyelése által az elmélet tesztelhető, a legnehezebb atomokban a maghoz közeli térrészekben ható nagyon erős elektromos erők miatt markánsan jelentkeznek, és ezen atomok legegyszerűbb (egy-, illetve kételektronos) ionjaiban nagy pontossággal mérhetők.

A tárológyűrűkben az ionok csak úgy tárolhatók hosszú ideig, ha sebesség-eloszlásuk éles. Ezt elterjedten az ún. elektronhűtés módszerével érik el. Ennek magyarázatára itt nem térünk ki, viszont feltétlenül említésre méltó az itt alkalmazott technika egy atomfizikai alkalmazása. Az elektronhűtés folyamán az ionnyalábot ugyanolyan sebességű elektronok nagyintenzitású nyalábjába merítik. Az ionok és az elektronok relatív sebessége tehát közel nulla, a *rekombináció* valószínűsége nagy. A rekombináció ismert és kevésbé érdekes módja az, amikor a folyamatban felszabaduló energia elektromágneses sugárzás (foton) formájában jelenik meg. Amennyiben az ion nem csupasz atommag, bizonyos esetekben az ún. *kételektronos* rekombináció a sugárzásos rekombinációnál sokkal nagyobb valószínűséggel megy végbe. Ennek során az elektron befogódásakor felszabaduló energia az ion elektronjának (elektronjainak) adódik át, azaz az ion gerjesztődik. Mivel gerjesztés csak az ion diszkrét energiájú állapotaiba lehetséges, a folyamat rezonanciaszerűen, meghatározott relatív ütközési energiákon megy végbe. Az elektronhűtésben a relatív energia finoman hangolható tipikusan 0 eV és néhány száz eV között, és a rezonanciaállapotok a különböző ionokra nagy pontossággal feltérképezhetők. Nemcsak atomok ionjai, hanem molekula-ionok is vizsgálhatók ilyen módon. Az ezen a területen elért legszebb eredmények egyikét éppen molekulákra kapták. A rekombináció során a molekulák disszociálódhatnak, és kiderült, hogy ez a *disszociatív rekombinációnak* nevezett folyamat a csillagközi térben talált egyszerű kémiai gyökök legalószínűbb keletkezési mechanizmusa.

Az ún. Bose—Einstein-kondenzáció ugyan csak interdiszciplináris vonatkozásaiban atomi ütközési jelenség, de az a technikai áttörés (Nobel-díj, 1997), amelynek révén a jelenség megfigyelhetővé vált, nagy hatást váltott ki az atomi ütközések fizikájára is. A mágneses csapdázással összetartott és lézerrel lehűtött semleges atomfelhők hőmérséklete olyan alacsony, hogy bennük az atomok ütközési energiája 10^{-12} eV nagyságrendű. A Bose—Einstein-kondenzáció megértéséhez elengedhetetlenül szükséges a kondenzált felhő atomjai közötti kölcsönhatások, az atomok szórási hatáskeresztmetszeteinek ismerete a fenti igen alacsony ütközési energián. Ugyanakkor éppen a kondenzált atomfelhő viselkedésének tanulmányozása révén információkat nyerhetünk ezekre az extrém alacsony energiájú ütközésekre. Visszagondolva a nagyenergiájú vizsgálatok fent említett energiáhatárára, elmondhatjuk, hogy az atomi ütközések jelenleg 25 nagyságrendet átfogó óriási energiaskálája egyedülálló a fizikában!

Az atomi ütközések területén alkalmazott mérés technikát az elmúlt években forradalmasította az ún. COLTRIMS (COLd-Target Recoil-Ion Mass Spectroscopy) mérési módszer megjelenése. A módszer segítségével ionok és szabad atomok (gázatomok) közötti ütközésekre vonatkozó kinematikailag teljes kísérletek végezhetők el. Az új eljárás lényege, hogy a céltárgyként szolgáló gáznyalábot szuperszonikus expanzióval nagyon alacsony hőmérsékletűre (mK fokos tartomány) lehűtik, valamint

terben nagyon jól lokalizálják. Ezzel elérik azt, hogy az ütközés *kezdeti paraméterei* nagyon nagy pontossággal ismertek lesznek, ami által az ütközés során emittált részecskék (ionok, elektronok) impulzuskoordinátái meghatározhatóvá válnak. Ehhez a részecskék repülési idejét, valamint becsapódási helyét mérik nagyon jó hatásokkal és helyfeldolrással. A módszer egyik fontos alkalmazási területe az *elektronkorreláció* vizsgálata. Ez utóbbi az atomi ütközések fizikájának egyik legintenzívebben kutatott problémaköre az elmúlt évtizedben. Az erre vonatkozó kutatások arra a kérdésre próbálnak választ adni, hogy az elektronok közötti kölcsönhatás figyelembevétele mennyire fontos a különböző ütközési folyamatokban, és melyek azok a jelenségek, ahol ez a kölcsönhatás erősen megmutatkozik. A COLTRIMS-szel közvetlen módon megközelíthető a probléma, például úgy, hogy kétszeres (többszörös) elektrone-misszióban *egyenként* megméri mindegyik elektron impulzusát, így az elektronok közötti korreláció nyomon követhető.

Az atomi ütközések fizikájában páratlan az a lehetőség, hogy a lövedék töltésének változtatásával a kölcsönhatás erőssége változtatható, és ilyen módon a különböző leírasi módszerek teljesítőképessége hatékonyan tesztelhető. A magasan töltött ionok megjelenése új távlatokat nyitott ebben az irányban. Ugyanakkor a kölcsönhatás erősségének változtatása csak az egyik dimenziót jelenti az elméletek tesztelésében. Egy másik dimenzió a kölcsönhatás *előjelének* a változtatása, ami úgy valósítható meg, hogy egy adott bombázó részecske helyett annak antirészecskéjét használjuk az ütközési kísérletben. Például proton helyett antiproton, elektron helyett pozitron stb. Ezen a területen szintén jelentős fejlődés következett be az elmúlt években annak köszönhetően, hogy egyre nagyobb intenzitású és jobb minőségű antirészecske-nyalábok állnak a kísérletezők rendelkezésére. Példaképpen itt azokat a világszerte nagy érdeklődést kiváltó vizsgálatokat említjük, amelyek során a héliumatom kétszeres ionizációjának valószínűségét határozták meg antiproton lövedék esetén, és hasonlították össze a kapott adatokat a protonokkal nyert adatokkal. Ezek a mérési eredmények jelentősen hozzájárultak a fentiekben említett elektronkorreláció törvényyszerűségeinek megismeréséhez. Szintén atomi ütközések útján (xenon atomokat antiprotonokkal bombázva) sikerült az elmúlt években előállítani a fizika történetében először *antihidrogént*, azaz olyan atomot, amelynek minden alkotóeleme antirészecskéből áll. Az antihidrogén spektroszkópiái vizsgálatai révén a világmindenség legalapvetőbb szimmetriatörvényeinek ellenőrzésére nyílik lehetőség. Itt említjük meg azt az igen érdekes atomi képződményt, amelyet antiprotonoknak héliumatomokkal történő ütközésével állítottak elő (magyar közreműködéssel). Ebben az ún. „atomkulában” a hélium egy elektronját egy antiproton helyettesíti. Az atomkula spektroszkópiája igen értékes információkhoz juttatta a terület kutatóit.

Végül a felsorolásból nem szabad kihagynunk a *szinkrotron-sugárforrások* megjelenésének, illetve alkalmazásának hatását az atomfizikában. Ezek a korábbi forrásoknál sok nagyságrenddel nagyobb intenzitású fotonnyalábokat szolgáltató berendezések egyre elterjedtebb eszközei mind az alap-, mind pedig az alkalmazott jellegű atomfizikai kutatásoknak. A nagy fotonintenzitás, a jó energiafeloldás és a fotonenergia széles tartományban való hangolhatósága lehetővé teszi viszonylag kis valószínűségi folyamatok megfigyelését, a foton—atom kölcsönhatás (pl. fotogerjesztés, fotoionizáció) árnyaltabb megismerését.

Hazai eredmények (ATOMKI)

Az atomi ütközések fizikájának legjelentősebb hazai bázisa az MTA Atommagkutató Intézetében (ATOMKI), Debrecenben van. A továbbiakban az itteni kutatásokról adunk rövid helyzetképet.

Az iménti összefoglalóból látható, hogy az atomi ütközések fizikájában az elmúlt évek jelentős eredményei nagyberendezésekhez kapcsolódóan vagy nagyon költséges technika alkalmazásával születtek. A '70-es évek elején, amikor az ATOMKI-ban atomi ütközésekkel kezdtek foglalkozni, még nem ez volt a helyzet. Abban az időben még világszerte az alapvető ütközési folyamatok legfontosabb tulajdonságainak megismerése volt a cél, és erre megfelelő volt az ATOMKI korszerűnek már akkor sem nevezhető gyorsítóparkja, a rendelkezésre álló mérés-technika. Ennek köszönhetően az ATOMKI ezen területen tevékenykedő kutatócsoportja hamarosan nemzetközi szintű eredményeket ért el, pl. a belső atomi héjak nagyenergiájú részecskebombázással kiváltott ionizációjának kutatásában, az ütközési folyamatok elektron-spektroszkópiai vizsgálatában stb. Az évek folyamán világszerte fokozatosan eltolódott a hangsúly az ütközési folyamatok árnyaltabb megismerése, bonyolultabb folyamatok, valamint összetettebb rendszerek vizsgálata felé. Ma már az ezekhez szükséges költséges kísérleti technika, a nagyenergiájú gyorsítók többnyire csak külföldi együttműködések révén válnak elérhetővé az ATOMKI kutatói részére. Ugyanakkor megfelelő kutatási témák keresésével, valamint az ATOMKI műszerépítési, -fejlesztési hagyományaira támaszkodva sikerült itthon is megvalósítani egy jó színvonalú kutatási programot és megőrizni a korábbi szintet. A külföldi együttműködések során az intézet atomfizikusai számos, az előző fejezetben említett világ-élvonalbeli kutatásban vettek, illetve vesznek részt, pl.: magasan töltött ionokkal végzett vizsgálatok ECR és EBIS ionforrásoknál, kvantum-elektrodinamikai effektusok mérése, részvétel COLTRIMS kísérletekben, antirészecskékkel (pozitron, antiproton) végzett ütközési folyamatok tanulmányozása, az elektronkorreláció vizsgálata nagyenergiájú nehézion-ütközésekben, fotoionizációs kísérletek szinkrotron-sugárforrás felhasználásával stb.

Az itthoni kutatási témákat természetesen behatárolják a rendelkezésre álló gyorsítók, ezért ezek nem mindig sorolhatók a „divatos” kutatási irányzatokba. Ugyanakkor a kísérletekben használt, számos paraméterében világszínvonalú mérési technika, az eredmények értelmezésére végzett igényes elméleti analízis emeli a hazai vizsgálatok értékét, aminek köszönhetően az ATOMKI az atomi ütközések fizikájának egyik legjelentősebb centrumaként ismert a világban. Ehhez nagyban hozzájárult az ATOMKI-ban 1981 óta háromévenként megrendezett nemzetközi műhely a gyors atomi ütközések témakörében. Az utóbbi évek legnagyobb visszhangot keltő eredményeit az ATOMKI kutatói a következő területeken érték el. Egyik legfontosabb kutatási területük az egyszerű ütközési rendszerek vizsgálata. Ilyen ütközésekben érdekesek azok a szituációk, ahol a három- (több)test effektusok erősen jelentkeznek, és kísérleti vizsgálatuk nagyban hozzájárulhat a néhánytest-probléma nyitott elméleti kérdéseinek megoldásához. Ez a probléma távolról sem megoldott a Coulomb-kölcsönhatás esetén, az erő hosszú hatótávolsága miatt itt óriási nehézségek lépnek fel. Ebben a témakörben az ATOMKI kutatói többek között vizsgálták az ionizációs folyamatokban fellépő *végállapot*i kölcsönhatási jelenségeket mind a prompt módon emittált folytonos energiaeloszlású elektronok, mind pedig az ütközés során gerjesztődött állapotok bomlásából származó diszkrét energiájú elektronok (Auger-elektronok) tulajdonságainak meghatározásával. Az *elektronkorrelációt* olyan ütközésekben tanulmányozták, amelyekben egy elektron szabaddá válása (ionizációja) mellett töltésátadási folyamatok is lejátszódnak az ütközési partnerek között. Elektron- és röntgenspektroszkópiai módszerrel vizsgálták a többszörös ionizáció jelenségét, amely fontos mind az atomszerkezeti kutatások, mind pedig az ionizációs elméletek szempontjából. Az ütközési folyamatok árnyaltabb megértését célozzák azok a mostanában elvégzett kísérletek, amelyekben az elektronoknak az ütköző atomokon történő többszörös szórásai figyelhetők meg. Ez utóbbi vizsgálatok érdekessége, hogy nem sokkal a magyar megfigyelés előtt ugyanazt a jelenséget a világ egyik legnagyobb gyorsítóján nagyságrendekkel nagyobb energián és sokkal nehezebb lő-

vedék ionokkal mutatták ki. Igen jelentősek a belső atomi állapotok nívószélességére, különböző átmeneti valószínűségekre kapott pontos mérési eredmények, amelyek meghatározására egy újszerű elektronspektroszkópiai módszert vezettek be. Ezeket az adatokat alapkutatási jelentőségük mellett különböző alkalmazásokban is felhasználják. A kísérleti vizsgálatok mellett említésre méltóak azok az *elméleti fejlesztő* munkák, amelyek egynémelyike komoly nemzetközi visszhangot váltott ki. Az ATOMKI-ban például kifejlesztettek egy olyan számítógépprogramot, amelyet a világ számos laboratóriumában rutinszerűen használnak ütközési folyamatok valószínűségeinek meghatározására, illetve mérési eredmények elméleti értelmezéséhez. A legutóbbi fejleményekhez tartozik az ATOMKI kísérleti lehetőségeit nagymértékben megnövelő *elektron ciklotron rezonancia* (ECR) *ionforrás* megépítése. Ez a magas töltésű ionok előállítására alkalmas ionforrás paramétereit tekintve világszínvonalú berendezés.

Végül szólnunk kell arról, hogy milyenek az eddig igen sikeresen művelt kutatások perspektívái. Az elmúlt évtizedek tendenciája az, hogy a kísérleti lehetőségeket tekintve Magyarország egyre inkább lemarad a kutatás élvonalába tartozó országoktól. Javuló finanszírozási feltételek mellett a lemaradás lassítható, bizonyos területeken a hátrány akár be is hozható. Például amennyiben az elkészült ECR ionforrás mellé sikerülne néhány éven belül korszerű mérőrendszereket építeni, akkor olyan jellegű vizsgálatok, mint a magasan töltött ionoknak szilárdtest-felülettel való kölcsönhatása, világszínvonalon folytathatók lennének.

Egy másik példa a pozitronokkal végzett alapvető ütközési folyamatok fizikájának itthoni megteremtése. A fentiekben már utaltunk az antirészecskékkel végzett vizsgálatok jelentőségére. Az ilyen jellegű kísérletekhez rendelkezésre áll a szaktudás és a technikai háttér (pl. a pozitronforrás a debreceni ciklotronnal előállítható lenne), minimális pénzbefektetéssel el lehetne indítani a programot.

Új kutatási irányként felvethető a hazai lézerfizikai tapasztalatok felhasználásával ion-és atomcsapdák építése, és ezekben extrém alacsony energiájú atomi kölcsönhatások vizsgálata.

Amennyiben a kutatásfinanszírozás a mostani szinten marad, a meglévő eszközökkel minimális fejlesztéssel a hagyományosnak számító témákban még egy-két évtizedig lehet „eladható” eredményeket elérni. Az atomi ütközések területén az eszközök elavulása nem olyan gyors, mint pl. a magfizika vagy részecskefizika területén. A számítástechnika fejlődésével sokféle kísérlet, amelyekre korábban az adatgyűjtési, -tárolási és -feldolgozási nehézségek miatt gondolni se lehetett, ma már könnyűszerrel elvégezhető (pl. sokparaméteres koincidencia-mérések). Továbbá az atomfizikában több olyan „örökzöld” kutatási téma van (pl. a néhánytest-probléma), amelyek egyszerű ütközési rendszerek (alacsony ütközési energia, könnyű ionok) esetén is hatékonyan művelhetők magasabb szintű mérési technika alkalmazásával. A nehezebb időszakok túlélésének egy másik módja a fokozottabb részvétel nemzetközi együttműködésekben. Ez utóbbival kapcsolatban azonban látni kell, hogy *hazai fejlesztések nélkül a magyar résztvevők ezekben nem játszhatnak kezdeményező szerepet.*

Üttörő minőségi változást a jelenlegi helyzetben csak egy nagyberendezés megépítése hozhatna. Több éves távlatban, az ország dinamikus gazdasági fejlődése esetén elképzelhető lenne egy ilyen beruházás. Arról, hogy egy ilyen projekt megvalósítása esetén milyen nagyberendezést építsünk vagy vásároljunk, jelenleg még viták folynak. A választott nagyberendezésnek nemcsak egy szűk, speciális felhasználói (pl. atomfizika és magfizika) réteg igényeit kellene kielégítenie, hanem interdiszciplináris, más tudományok (pl. biológia, kémia) számára is hasznos, sőt élvonalbeli ipari-technológiai kutatásokat is lehetővé tevő eszköznek kellene lennie.