

## EMBERI KÉPZELETÜNK PRÓBÁJA: ATOMI ÜTKÖZÉSEK NYOMÁBAN

Pálincás József

akadémikus, egyetemi tanár  
Debreceni Egyetem, Kísérleti Fizikai Tanszék

„Tetszik a relativitás- és a kvantumelmélet,  
mert számomra oly érthetetlenek.  
Bennük nyughatatlanul  
és megfoghatatlanul  
riadt hattyúként bujkal a tér;  
az atom pedig úri kedve szerint  
folyton átírja a szabályokat.”  
(D. H. Lawrence)

„Előfordult már Önnek, hogy látta az atomot?”  
– kérdezte egy hölgy újra és újra Leon Lederman egyik ismeretterjesztő előadásán, mire Lederman visszakérdezett: – Asszonyom, látta ön valaha a római pápát?

– Hát persze – jött a szokásos válasz. – Többször is láttam Őszentségét a televízióban.

– Igazán? Nem azt látta, ahogy a képcső elektronnyalábja végigpásztazza a fluoreszcens ernyőt, fénylő képpontokat villantva fel gyors egymásutánban? De Önnek jó oka volt feltételezni, hogy amit látott, az összefüggésben volt a római pápával. Úgyhogy higgye el nekem, hogy az atomok „képe” pont olyan valóságos, mint az Ön által látott pápáé. (L. Lederman and D. Teresi, 1993)

Az atomi és szubatomi fizika művelői számára, akik együtt élnek az atomok létezésének bizonyosságával, igen elgondolkoztató lehet az előbbi párbeszéd, hiszen egyrészt arra

emlékeztet, hogy hogyan is szerzünk tudomást arról, ami az atomok belsejében „történik”, másrészt rávilágít képzeletünk erejére, azaz a képzelőerő fontosságára. Amit biztosan tudunk az atomokról és részeikről, az egy csomó barátságatlan matematikai formula vagy bonyolult berendezés által szolgáltatott jel, amelyeket megpróbálunk „lefordítani” szemléletes képpé. Nem Lederman „makacs hölgye” az egyetlen, aki felfoghatatlannak érzi, hogy „komoly tudósok lelkesen és csapatmunkával láthatatlan kis objektumokat hajkurásznak”.

Alapvető emberi megnyilvánulás, ahogyan a világra a *Milyen szép!* érzésével rászóvalkozunk. Eme rácsodálkozásnak van egy másik alapvető – noha kissé más nézőpontú – kérdése is, amely a kíváncsiság, és úgyszintén egyidős az emberrel: *Miből és hogyan épül fel a világ?* Mik az alkotóelemei, mi tartja össze ezeket az alkotóelemeket?

Démokritosz érdeme az a természetismeret máig meghatározó *filozófiai* felismerés, hogy a világ tovább már nem osztható alkotóelemekből, *atomokból* épül fel. Mondhatjuk, hogy az atom több mint kétezer év után közgondolkodásunk részévé vált. Ma a természetben ismert elemek (hidrogén, szén, vas vagy éppen az arany) köznapi tulajdonságait meg-

határozó építőelemeket nevezzük atomoknak, noha jól tudjuk, hogy ezek meglehetősen bonyolult szerkezettel rendelkező építőelemek, azaz tovább oszthatók.

Új kép alakult ki az atomokról a tizenkilencedig század utolsó éveiben és a huszadik század első két évtizedében. A korábban megbecsült méretű és a hétköznapi gondolkodás számára felfoghatatlanul kicsinek ( $10^{-10}$  m) talált atomról kiderült, hogy „szerkezete van”. Ezen szerkezet első – közgondolkodásunkat máig meghatározó – modellje valójában Kopernikusz Naprendszer-modelljének *atomi képe*: Egy az atom méretéhez képest nagyon kicsi, de az atom tömegének nagy részét kitevő tömegű középpont, az atommag körül „keringenek” a kis tömegű és kiterjedés nélkülinek tűnő elektronok.

A Naprendszerrel való párhuzam azonban „fizikus szemmel” nagyon felületes. Az elektronok és az atommag közötti vonzást nem a jól ismert gravitáció, hanem az elektromos erő okozza. S ez a kisebbik különbség. A nagyon kis térrészbe „bezárt” elektronok mozgását a mi megszokott világunkétól alapvetően eltérő mozgástörvények irányítják. Képzeletünk próbája, hogy a mozgás szó hallatán a fejünkben megjelenő képnek van-e értelme az atomi elektronok esetében. Azt ugyanis nem tudjuk megmondani, hogy az elektron az atomban hol van. Tudjuk, hogy ott van, sőt azt is nagyon pontosan tudjuk, hogy „jelenléte” milyen módon oszlik el, milyen mintázatot követ. Már az is csoda, hogy ezeket a képileg nehezen megjeleníthető törvényeket az ember képes – nagyrészt a matematika segítségével – valamennyire megérteni, *elképzelni*. Ezért is mondhatjuk, hogy a kis térrészbe bezárt részecskék mozgását leíró kvantummechanika az emberiség egyik legnagyobb intellektuális alkotása.

Az „atomtörténet” következő jelentős állomása, amikor a huszadik század harmincas éveiben kiderült, hogy az atomok méreténél több mint tízezerszer kisebb méretű atommagoknak is van szerkezetük: protonokból és neutronokból épülnek fel. A huszadik század második felében azután a protonok és neutronok is elveszítették „elemi” jelzőjüket, s így jogukat a görög „*atom*” – tovább már nem osztható – megjelöléshez. Ezek építőelemei a *kvarkok*, mai tudásunk szerint a világ tovább már nem osztható részecskéi, igazi „atomjai”. A mai részecske- (vagy elemirész) fizika „atomjai” az *elektron* és öt testvére, s a jobb név híján *u(p)* „fel” és *d(own)* „le” kvarkok és az ő négy testvérük.

A pozitív töltésű protont két *u* és egy *d* kvark építi fel, az elektromos töltés nélküli neutron pedig két *d* és egy *u* kvarkból áll, mindezek együtt alkotják a különböző elemek atommagjait. Tisztelt olvasók, próbálják meg *elképzelni* ezeket a kiterjedés nélküli elemi részecskéket, amelyek többsége ugyanakkor tömeggel, elektromos töltéssel, sőt egy olyan tulajdonsággal is rendelkezik, ami pontosan megfelel egy, a tengelye körül gyorsan forgó (kiterjedéssel rendelkező!) test perdületének, s ráadásként ez a perdület csak „fel” (jobbra forog valami) és „le” (balra forog valami) irányú és meghatározott nagyságú lehet.

Ezek az elemi részecskék meglehetősen próbára teszik képzeletünket, ugyanakkor a köznapi életben alig találunk olyan jelenséget, amely nem közvetlenül atomi folyamatokra, az atomok tulajdonságaira vezethető vissza. Az égés, a konyhasó oldódása a vízben, a víz felmelegedése a mikrohullámú sütőben, a nappali égbolt kéksége mind az atomok tulajdonságain alapulnak. Testünk is atomokból épül fel, a kémiai, biokémiai, élettani folyamatok mind az atomok különleges tulajdon-

ságainak következményei. Az iskolában tanult „erők”, mint például a súrlódási erő, két anyagdarab felületén érintkező atomok kölcsönhatásainak eredményei. A rugalmas erő eredete az atomok speciális összekapcsolódásában keresendő. A molekulákat és a szilárd testeket az atomok között fellépő, az elektromágneses kölcsönhatásra visszavezethető erő tartja egyben.

Mára az atomok tulajdonságainak olyan részleteit ismerjük, amelyek a huszadik század „paradigmaváltásának” idején még vagy fel sem merültek, vagy elérhetetlennek tűntek mind a kísérlet mind az elmélet számára.

*Hogyan képzeljük el az atomot, amelyről azt állítom, hogy nagyon sok tulajdonságát ismerjük, sőt bonyolult molekulákká, szilárd anyaggá való összekapcsolódásukat nagy pontossággal le tudjuk írni?*

Az atom saját méretéhez képest kisméretű magját képzeljük egy borsószem méretű, elektromos töltéssel rendelkező tömör gömbnek. Ekkor a hidrogénatom egyetlen elektronja egy közepes sportaréna méretű, gömb alakú térfogatban található, leginkább annak a külső egyharmad sugárnyi vastagságú részét jelentő gömbhéjban. Vagy képzeljük egy jó vastag héjú narancs héját olyannak, hogy a héjnak nincs éles határa, hanem kifelé és befelé egyre ritkább lesz. A héj sűrűsége (vagy ritkasága) mondja meg nekünk, hogy az elektron „mennyire van ott” az adott helyen. Ekkor persze az atom magja már a milliméter ezred részénél kisebb méretű, amit ugyancsak nehéz magunk elé *képzelni*. Az elektron tömege a hidrogén atommag (proton) tömegének kétezred része, a mérete pedig – az atomi méreteket tekintve is – nagyon kicsi, ha van egyáltalán „mérete”, elektromos töltése pedig *pontosan* megegyezik a proton töltésével. A hidrogénatom elektronja a fentebb emleget-

tett egyharmad atomsugárnyi vastagságú, pontos kontúrok nélküli gömbhéjban minden irányban egyenletesen van jelen. Azaz a hidrogénatom elektronjára nem tekinthetünk úgy, mint egy Nap körül keringő bolygóra. Nincs ugyanis „mozgásából származó” perdülete, sőt igazából pályája sincs.

A szén atom szerkezetét kutatva kiderült, hogy annak hat elektronjából négy két egymásban lévő gömbhéjban található gömbszimmetrikus eloszlásban. Az ötödik és hatodik elektronja esetén azonban egy új „mintázat” jelenik meg: az elektron egy újabb gömbhéjban, de csak a gömbhéj süvegében vagy a süvegek nélküli gömbhéjgyűrűben van jelen. Bonyolultabb atomok esetén ezek a mintázatok is jóval bonyolultabbak. Az úgynevezett nemesgázoknál – például a neon – a sok elektron eloszlásának bonyolult mintázatai gömbszimmetrikusra egészítik ki egymást, s ebből ered ezen „nemes”-nek nevezett atomok vegyülési képtelensége. Az elektronok egyes mintázatokhoz tartozó állapotainak energiája pontosan meghatározott érték.

Tapasztaltuk és tanultuk, hogy a szén szilárd anyag, sőt bizonyos módosulata, a gyémánt a legkeményebb anyagok egyike. Ugyanakkor azt is tudjuk, hogy a szénatomok térfogatának nagy része üres, kevesebb, mint egymilliárdod részét tölti ki az atommag, az elektronok pedig sokat „nyüzögnek” ugyan az atomban, de annak sűrűségéhez alig járulnak hozzá. Miért kemény akkor a gyémánt, miért áthatolhatatlanok a szilárd anyagok? Áthatolhatatlanok? Egy másik anyagdarab, sőt egy másik atom számára áthatolhatatlanok, de egy elektron vagy egy proton számára nagyon is átjárhatóak. Egy fémlémez köznap értelemben vett áthatolhatatlanságát, keménységét az atomjainak szűk terébe bezárt elektronok különös „nyüzgése” okozza.

Egy gyors proton azonban „nevetve” halad át egy fémlémezen!

Ezen a ponton már az atomi ütközések nyomába eredhetünk, amely fő kutatási területem. Velem is előfordult már, hogy „látam egy atomot”. A Ledermannak feltett kérdésre ma azt válaszolhatnám, hogy egy úgynevezett atomerő-mikroszkóp segítségével (Atomic Force Microscope, AFM) lényegében látjuk a szilíciumlapocska felületén elhelyezkedő nehezebb atomokat. Ám arra a kérdésre, hogy látjuk-e az atomi ütközéseket, vagy látjuk-e egy atom belsejét, ma is hasonló választ tudunk adni, mint amelyet Ledermann adott a makacsul hitetlenkedő hölgynek. Felgyorsított elektronokat vagy protonokat küldünk az atomok közelébe vagy belsejébe, és a kijövő vagy éppen az onnan kiszakított elektronokat, esetleg a visszamaradó elektronhiányos atom (szokásos nevén ion) sugárzását megfigyelve, „jó okunk van azt hinni”, hogy tudjuk, hogy mi történik az atom belsejében. Ezzel össze is foglaltam az atomi ütközések fizikájának lényegét.

S hogy miért kutatjuk mindezt? Az atomok és molekulák elektronsűrűségeinek pontos kiszámítása, és az eredmények gondos ellenőrzése bizonyára elvezet majd egy könnyebben magunk elé képzelhető atom képéhez.

Az atomi ütközések kutatása során feltárt eredmények nagymértékben hozzájárulnak életminőségünk javításához. A sugárterápia alapvető kérdéseire például az atomi ütközések kutatási eredményei segítségével válaszolhatunk. A daganatos betegségek felgyorsított részecskével való kezelése során csak annak ismeretében tudjuk pontosan megtervezni, hogy egy felgyorsított részecske milyen módon hat az élő anyagban, ha tudjuk, hogyan hat az egyes atomokra. Milyen atommagot

vagy iont és milyen sebességre felgyorsítva kell használnunk, ha optimális hatást akarunk elérni a kóros sejtek elpusztításában? S még hosszan sorolhatnánk a sugárbiológia kérdéseit, amelyek az atomi ütközések fizikájának ismeretében válaszolhatók meg.

Kutatási területem „társadalmi hasznosságának” egy másik közismert példája, hogy az emberiség egyre súlyosbodó energiaellátásának és az energielőállítás során felmerülő környezeti problémák megoldásának egyik lehetséges módja, hogy a Nap energiatermelési folyamatait földi körülmények közé szelídítsük, azaz kontrollált atommagfúzió alapuló energia-termelő reaktort alkossunk. Az atommagfúzió létrehozásához egy különleges anyagot, atommagok, ionok, elektronok forró keverékét, az anyag negyedik halmazállapotának is nevezett *plazmát* kell létrehozni nagyon speciális feltételekkel. Ezt a plazmát atomi ütközések hozzák létre és tartják fenn. Ennek tervezéséhez az atomi ütközések tulajdonságainak ismerete éppen olyan alapvető technikai adat, mint a beton szilárdságáé egy híd megtervezéséhez.

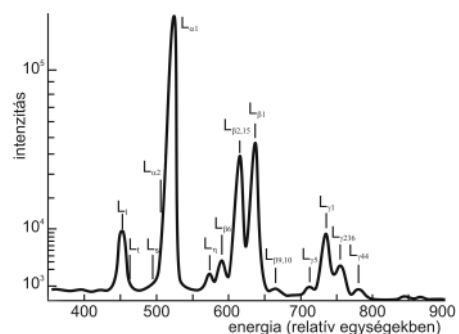
#### *Az ionizált atom elektronfelhőjének aszimmetriája*

Amikor egy nagyenergiájú elektron vagy proton összeütközik egy atommal, az ütközés az atom elektronjainak „pedáns elrendeződését” megváltoztatja. Sőt az ütközés el is távolíthatja az atom egy vagy néhány elektronját. Ezt a folyamatot nevezzük *ionizációnak*. Hogyan észlelhető az ionizáció? Például az atomból kilépő elektronok megfigyelésével, amelyek az atomból kiszabadulva már a mi világunkban megszokott, „normális” módon viselkednek: pályájuk követhető, egy fluoreszcens ernyőn (vagy egy sokkal bonyolultabb érzékelőn, detektoron) egy felvillanást (vagy

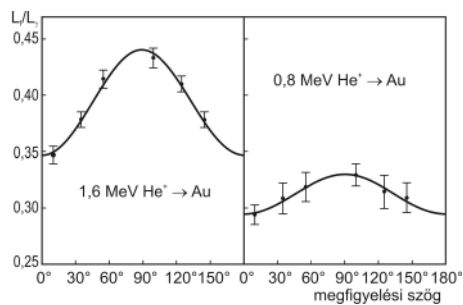
egy elektromos jelet) létrehozva jelzik, hogy hol vannak. Modern detektorainkkal energiájukat, mozgásirányukat is meghatározhatjuk.

Egy másik, közvetett módszerrel is megfigyelhető az ionizáció: a megbolygatott atomi elektronelrendeződés igyekszik felvenni a legkisebb energiájú, úgynevezett alapállapotát. Eközben vagy elektromágneses sugárzást (közönséges fényt, röntgensugárzást), vagy egy további elektront bocsát ki. Az előbbinek egy példája az 1. ábrán látható. Aranyatomokat protonokkal ütköztetve, és megmérve a kibocsátott röntgensugarak energia szerinti eloszlását, az 1. ábrán látható képet kapjuk. Az egyes csúcsok (szokásos elnevezéssel vonalak) az ionizált arany atom elektroneloszlása különböző átrendeződéseinek felelnek meg.

Az eloszlás jól mutatja ezen egyszerű atomi folyamat részletgazdagságát. Ragadjunk ki a rengeteg részletből egyet és tegyünk fel egy „kutatói kérdést”: Tükröződik-e az egyes elektronállapotok (mintázatok) térbeli aszimmetriája az ütközésben létrehozott ionok sugárzásában? A 2. ábrán látható, hogy van a röntgensugárzásnak olyan része, amely különböző irányokban különböző intenzitású. A sugárzás térbeli eloszlását leírhatjuk egy nem

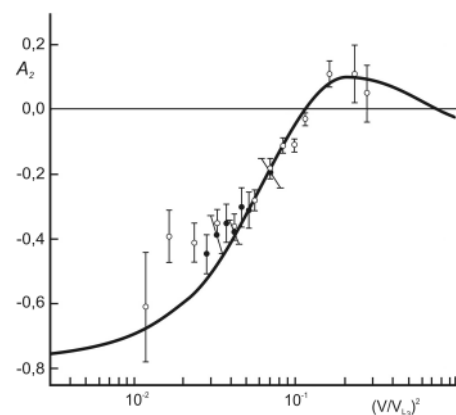


1. ábra • Gyors protonokkal a második (L) elektronhéján ionizált aranyatomok röntgensugárzásának energia szerinti eloszlása.

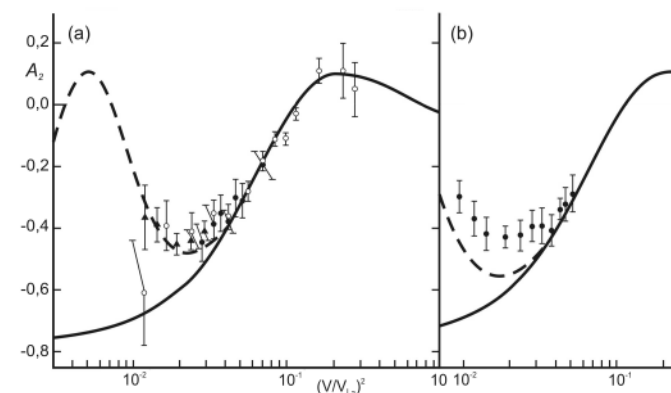


2. ábra • Az elektronállapotok (mintázatok) térbeli aszimmetriájának megjelenése az ütközésben létrehozott ionok sugárzásában.

túl bonyolult formulával, amelyben egy mennyiséggel (nevezzük aszimmetria-paraméternek) jellemezhető, hogy az eloszlás milyen mértékben tér el a minden irányban egyenletestől. Egyik korai vizsgálatunkban arra jutottunk, hogy ennek a paraméternek a protonok energiájától való függését az elmélet nem írja le pontosan. Kísérletünk elmentmondásban volt korábbi vizsgálatokkal (W. Jitschin és mts, 1979), amelyek egyezni látszottak egy elfogadott elméleti leírással,



3. ábra • Az L elektronállapotok aszimmetria-paraméternek függése a gyors protonok sebességétől. A folytonos vonal egy elméleti modell eredménye.



4. ábra • Az L elektronállapotok aszimmetria-paraméternek függése a gyors protonok és alfa részecskék sebességétől. A folytonos vonal a korábbi elméleti modell eredménye, a szaggatott vonal a részecskék eltérülését figyelembe vevő modellünk eredménye.

ahogyan azt a 3. ábra mutatja. Az ábrán kis sötét körök jelzik a mi eredményeinket. Pontosabb kísérletekkel és alfa részecskékkel (hélium atommagok) is elvégzett mérésekkel kimutattuk, hogy az elmélettől való eltérés valóban jelentős (J. Pálinkás és mts, 1980). Sőt, megtaláltuk az eltérés okát is, amelyet egyszerűen és szemléletesen úgy lehet összefoglalni, hogy az atom elektronjait ionizáló proton vagy alfa részecske az atom magjának terében hiperbolapályán halad, amely irányváltást éppen az atomi elektronok különös térbeli eloszlása miatt kell figyelembe venni. Ezek a kísérleti eredmények és a kétféle elméleti számítás a 4. ábrán látható. Az ábrán kis sötét körök és háromszögek jelölik saját kísérleti eredményeinket, és szaggatott vonal a saját modellünk alapján végzett számítások eredményét. Eredményeinket később más kutatócsoportok is megerősítették, mi is végeztünk további vizsgálatokat sokféle gyors nehézionnal (J. Pálinkás és mts, 1983). A kísérleti eredmények általában jól egyeztek elméleti számításaink eredményeivel.

Ennek a kísérletnek sem a technikája sem az elméleti leírása nem tartozott a legbonyo-

lultabb feladatok közé. Számomra mégis fontos „kutatói tanulsággal” bír: a precíz kísérleti eredmények még az egyszerűnek tűnő problémák esetén is hozhatnak váratlan eredményt, amelyek igazi továbblépési lehetőséget jelentenek a már elfogadottnak tekintett elméleti leírás pontosításában.

#### Két egzotikus elektronbefogás

Az atomi elektronok elrendeződését sokféleképpen megzavarhatja az atommal ütköző gyors proton vagy ion. A fentebb már említett ionizáció során a gyors ion magával is ragadhatja (befoghatja) az atom egy vagy több elektronját, méghozzá többféleképpen. Az egyik lehetőség, hogy az atom egyik kötött elektronját (a bevezetésben leírt héjszerű elrendezésében lévők közül az egyiket) úgy ragadja magával, hogy azt egyik saját kötött állapotában (saját elektronhéjában) viszi magával. Ezt nevezhetjük kötött állapoti elektronbefogásnak. Egy másik esetben a gyors ion úgy ragad magával egy elektront, hogy azt nem valamilyen kötött állapotába (a gyors ion saját lehetséges elektron-mintázataiba) fogja be, hanem magával sodorja. Ilyenkor azt mondjuk, hogy

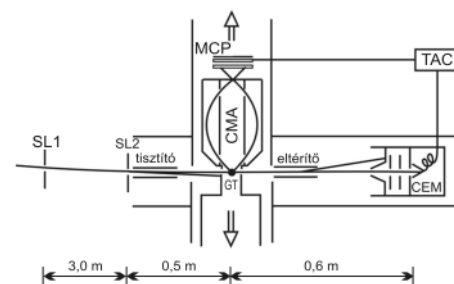
az elektron a gyors ion egyik ionizált állapotába kerül. Ezt a folyamatot folytonos állapotokba történő befogásnak nevezzük, és szemléletesen úgy képzelhetjük el, hogy az elektron, amely eredetileg az atom valamelyik héján tartózkodott, az ütközés után „együtt utazik” a gyors ionnal. Látni fogjuk, hogy a fenti folyamatok kombinációja is előfordulhat, amelyet transzferionizációnak nevezünk majd.

*Hogyan képzelhetjük el az elektronbefogást?* Az elméleti leírást, a technikailag meglehetősen bonyolult kvantummechanikai számításokat is csak akkor tudjuk elvégezni, ha van valamilyen elképzelésünk az elektronbefogás folyamatának végbemeneteléről. Többféle mechanizmus is lehetséges. Az egyikben – egyszerűen fogalmazva – csak a befogott elektron játszik lényeges szerepet. Az atomi elektront a bevezetésben említett „nyüzgése” miatt úgy képzelhetjük el, hogy az atom belsejében gyorsan mozog. Nem egy meghatározott sebességgel vagy „pályán”, hanem sebessége is „eloszlik”, azaz bizonyos valószínűséggel vesz különböző értékeket. Minél kisebb helyre van bezárva az elektron (azaz minél erősebben az atomhoz van kötve), a felvett sebességek értékei annál nagyobb tartományban lehetségesek. (A Heisenberg-féle bizonytalansági reláció egyik megjelenése!) Az atomi elektronnak lehetséges például, hogy pontosan olyan a sebessége is, mint a gyors ioné. Ekkor az elektron az egymás közelébe kerülő atom és a gyors ion közül inkább a gyors ionhoz tartozónak tekinthető (annak kvantummechanikai valószínűsége, hogy a gyors ionhoz tartozik nagyobb, mint annak, hogy az eredeti atomhoz), és nem valamilyen pontosan leírható mozgás következtében, de „átkerül” a gyorsan mozgó ionra. Könnyű belátni, hogy ez csak akkor következhet be, ha az ion sebessége nem sokkal nagyobb, mint az atomi

elektron sebességeloszlásában viszonylag nagy valószínűségekkel előforduló sebességek.

Thomas 1927-ben vetette fel annak a lehetőségét (L. H. Thomas, 1927), hogy amikor egy többelektronos atom, például a hélium, nagyon nagy sebességű ionnal, például egy protonnal ütközik, az elektronbefogásnak egy másik – talán a fenténél szemléletesebb – módja is megvalósulhat, amelyben a hélium mindkét elektronja részt vesz. Az ütközés úgy zajlik le, hogy a gyors proton ütközik a hélium egyik elektronjával, amely az ütközés következtében éppen akkora sebességre tesz szert, hogy amikor ez az elektron ütközik ugyanezen atom másik elektronjával, akkor az első elektron a gyors protonnal azonos sebességre tesz szert, a másik pedig a gyors proton irányára éppen merőlegesen adott sebességgel repül ki azt atomból, amely így mindkét elektronját elveszíti. Ezt a szórási folyamatot Thomas-szórásnak nevezzük, és kimutatása meglehetősen nehéz feladat elé állította a kísérleti fizikusokat. Valójában egy tűt kell keresni a szalmakazalban: Azt kell megfigyelni, hogy a héliummal ütköző gyors proton befog egy elektront (semleges hidrogénatomná válik) és ezzel egyidejűleg a közben hidrogénatomná vált gyors proton haladási irányára merőlegesen egy meghatározott energián megjelenik egy elektron.

A kísérleti berendezés, amellyel sikerült a folyamatot meggyőzően kimutatni, legfontosabb elemei az 5. ábrán láthatók. Egy, a megfigyelni kívánt energiájú elektronokat átengedő speciális elektron-spektrométerrel (CMA) az elektronok szög szerinti eloszlását mértük gyors (egymillió volt feszültséggel felgyorsított) protonok és héliumatomok ütközésében. Egy másik detektorral (CEM) pedig az ütközésből származó gyors hidrogénatomokat regisztráltuk. A berendezés „lelke” egy



5. ábra • A Thomas-szórás kimutatására szolgáló kísérleti berendezés vázlatos bemutatása

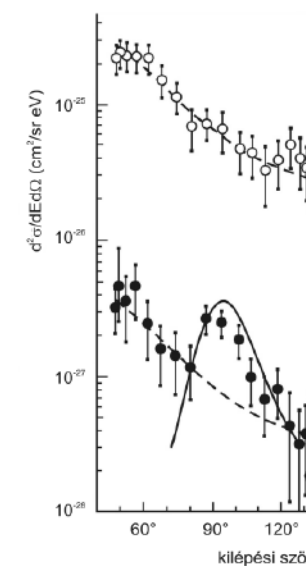
elektronikai egység (TAC), amely az elektronok és a hidrogénatomok egyidejű beérkezését (koincidenciáját) regisztrálja. Ennek időfeloldását – azt a pontosságot, amellyel az egyidejűséget mérni tudjuk – kellően megjavítva ezt a sokáig kimutathatatlan „egzotikus” elektronbefogást 1989-ben – majd egyéves kísérleti munkával – kimutattuk (J. Pálincás és mts, 1989).

A kísérlet eredménye a 6. ábrán látható, ahol a héliumatomból egy elektront befogott protonokkal egyidejűleg kilépő, a Thomas-szórás kinematikai feltételeit teljesítő energiájú (1 MeV-os protonok esetén 600 eV-os) elektronok irány szerinti eloszlása látható sötét körökkel jelölve. Az ábrán – a kísérlet ellenpróbája – az elektronok eloszlása Ne atomok esetén is látható, világos körökkel jelölve. Ez utóbbi esetben – ahogyan az várható – a Thomas-szórás hatása elhanyagolható.

Amint fentebb említettem, az elektronbefogásnak lehetséges egy olyan speciális esete is, amikor az atom elektronját a gyors ion „magával sodorja”, kissé pontosabban nem kötött állapotába fogja be. Ezt a jelenséget az angol *electron capture to the continuum* rövidítéseként ECC-nek nevezzük az atomfizikai szlengben. Ezek a gyors ionnal együtt utazó elektronok a kísérletben úgy jelennek

meg, hogy az ütközésből kilépő elektronok kinetikus energiájának (sebességének) eloszlásában az ütközésből kilépő gyors ionok irányában egy nagyon éles csúcs („cusp”) jelenik meg a gyors ionok sebességének megfelelő elektronsebességnél. Ha a gyors ion maga is rendelkezik elektronnal, ilyen például a héliumion, amelynek van egy elektronja, akkor az ion az ütközésben ezt az elektronját el is veszítheti. Ezt a folyamatot az angol *electron loss to the continuum* rövidítéseként ELC-nek nevezzük. Ezek az elektronok az ütközésből kilépő elektronok eloszlásában pontosan úgy jelennek meg, mint folytonos állapotba befogott (ECC) elektronok.

A két folyamat kísérleti elkülönítése technikailag hasonlóan történhet, mint az előző esetben: megmérjük a gyors ionok irányába



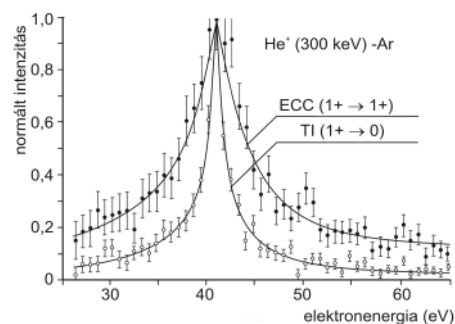
6. ábra • A Thomas-szórás kinematikai feltételeit teljesítő, 600 eV-os elektronok irány szerinti eloszlása 1 MeV energiájú protonoknak hélium- és neonatomokkal való ütközése esetén. A héliumatomok esetén látható csúcs jelzi a Thomas-szórás létrejöttét.

kilépő azon elektronok energia szerinti eloszlását, amelyek egyidejűleg lépnek ki az elektronjukat el nem veszített héliumionokkal (egyszeresen ionizált héliumionok) és azokét, amelyek egyidejűleg lépnek ki az elektronját elvesztett héliumionokkal (kétszeresen ionizált héliumionok). Ezek arányát kívántuk megmérni egy kísérletben, amikor azt tapasztaltuk, hogy ha egyszeresen ionizált héliumionok argonatomokkal ütköznek, akkor az ütközésből kilépő ionizálatlan hélium, amely tehát egy elektront már befogott valamelyik kötött állapotába, szintén „magával sodor” elektronokat! E meglepő kísérleti eredmény a 7. ábrán látható TI megjelöléssel, amely a transzferionizáció elnevezésére utal.

A kísérlet alapján úgy tűnt, hogy egy gyors (semleges) héliumatom is képes elektronokat befogni. A kísérletet tisztább körülmények között elvégezve, azaz héliumatom-nyalábot előállítva, ezt a feltételezést sikerült is bizonyítani (L. Sarkadi és mts, 1989). Az eredmények a 8. ábrán láthatók. Az eredmények egyszerű szemléletes magyarázata, hogy a héliumatomhoz kapcsolódó elektron a hélium másik két elektronjával egy rövid ideig fennmaradó különleges elektronelrendeződést (rezonanciát), hoz létre. Később a folyamat számos további részletét sikerült felderítenünk (P. A. Závodszy és mts, 1994).

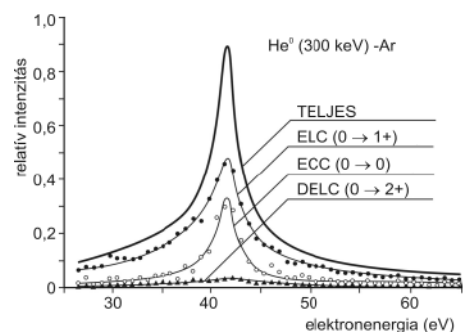
#### A plazma állapotáról árulkodó röntgensugárzás

A bevezetésben már röviden érintettem az anyag egy különleges állapotát, az elektronok, ionok, atommagok forró keveréke alkotta plazmát. Egy ilyen „anyagban” még a legegyszerűbb méréseket is csak az onnan kilépő sugárzás segítségével lehet elvégezni. A Magyar Tudományos Akadémia Atommagkutató Intézetében megépített úgynevezett



7. ábra • 300 keV energiájú héliumionok és argonatomok ütközése esetén részecskenyaláb irányába a héliumionokkal (ECC) és a héliumatomokkal (TI) egyidejűleg kilépő elektronok energia szerinti eloszlása.

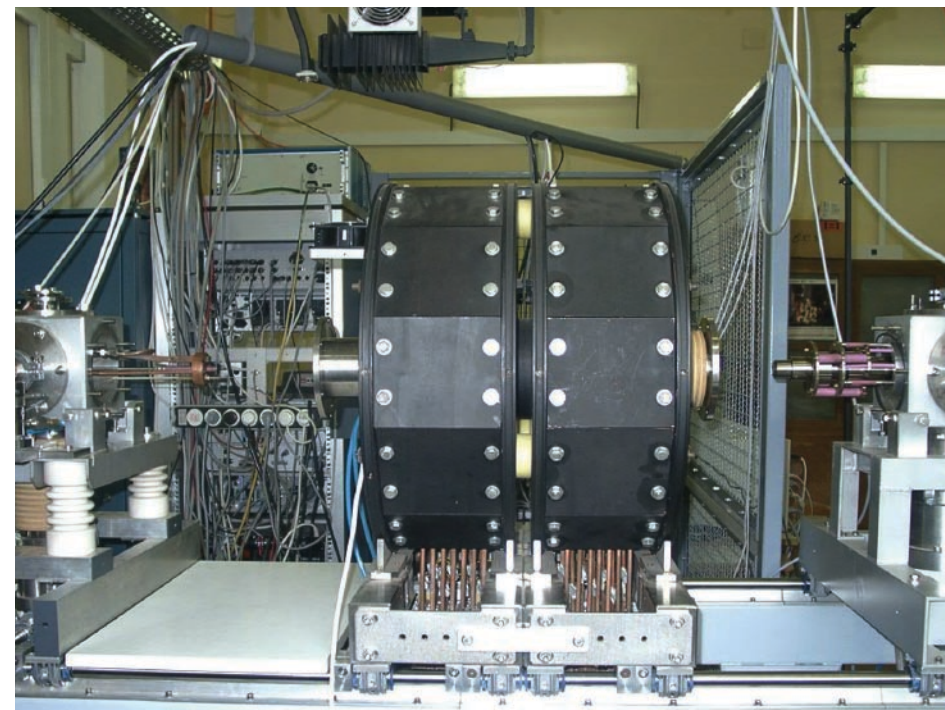
elektron-ciklotron rezonancián alapuló (az angol *Electron Cyclotron Resonance* rövidítéseként ECR-nak nevezett) ionforrás belsejében ilyen különleges anyagot állítunk elő (S. Biri és mts, 1997). Részből azért, hogy az elektronjai egy részétől megfosztott ionokat az ionforrásból kivezelve azokkal kísérleteket végezzünk, részből azért, hogy az anyag e különleges állapotát vizsgálhassuk.



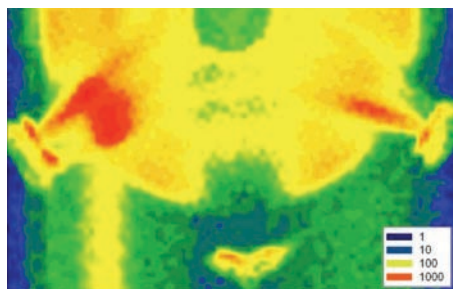
8. ábra • 300 keV energiájú héliumatomok és argonatomok ütközése esetén részecskenyaláb irányába a héliumatomokkal (ECC), a héliumionokkal (ELC) és a kétszeresen ionizált héliumionokkal egyidejűleg kilépő elektronok energia szerinti eloszlása.

Az ECR ionforrás fényképe a 9. ábrán látható. Működését legegyszerűbb úgy elképzelni, mint egy nagyon nagyteljesítményű mikrohullámú sütőt, amelyben az anyagot (az atomokat) annyira felmelegítjük, hogy megszűnik közönséges formájú anyag lenni, plazmává alakul, amelyet egy trükkösen felépített mágneses térrel tartunk a berendezés belsejében. Másképp nem is lehet, mert a plazma közönséges anyaggal érintkezve vagy lehűl (ha kevés plazmáról van szó), vagy az anyagot átégeti a tárolóedény falát. A mikrohullámú sütő hasonlóan annyiban is helytálló, hogy az atomok felfűtését itt is a plazmatérbe bevezetett mikrohullámú elektromágneses sugárzással végezzük, igaz, a háztartási mikrohullámú sütők szokásos 2,2 GHz (milliárd hertz) frekvenciája helyett 14,4 GHz frekvencián.

A felhevített plazmában a kisebb rendszámú atomokat (nagyjából a neonig) valamilyeni elektronjától megfoszthatjuk. A nagyobb rendszámú atomok (például argon) esetén csupán néhány elektron marad. Az így létrehozott ionok sugárzása jellemzi a plazma állapotát. Különösen érdekes képet kapunk, ha a plazmáról egy nagyon kis átmérőjű lyukon átjutó sugárzást egy olyan érzékelőre vezetjük, amelynél azt is meg tudjuk mondani, hogy az érzékelő mely pontját érte a sugárzás, sőt a sugárzást ezen a ponton még az energiája szerint is analizálhatjuk. Ezen a módon lényegében lefényképezünk a plazmát. Lencseként a kis átmérőjű lyukat használjuk, mint a *camera obscura* esetében! Sőt, egy különleges színes képet készítenek, mert meg tudjuk mondani, hogy az érzékelő különböző pontjaira érkező sugárzásnak milyen az energia-



9. ábra • Az ATOMKI-ban működő ECR ionforrás fényképe

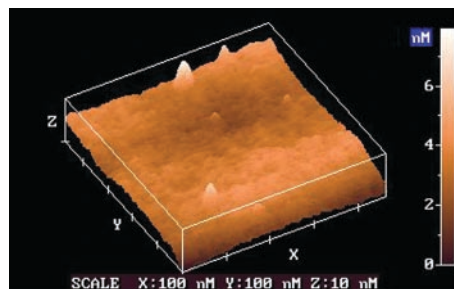


10. ábra • Az ECR ionforrásban előállított plazma röntgenfényképe

eloszlása. Az ECR argonplazmájáról készített ilyen kép a 10. ábrán látható, ahol a színek a sugárzás erősségét jelzik a szokásos módon, azaz a kék a kisebb, a piros a nagyobb intenzitást (S. Biri és mts, 2004).

*Tájkép csata után:  
ionkráterek szilárd anyagok felületén*

Az ECR ionforrás nagy töltéssel rendelkező ionjai a plazmából kiszabadulva felgyorsíthatók, és ezekkel az ionokkal különleges kísérletek végezhetők. A II. ábrán egy ilyen különleges kísérlet eredménye látható. Az ionforrásból elektronjai egy részétől (hús, illetve huszonnégy) megfosztott xenonionokat egy szelénfólia felületére vezetve az ionok becsapódnak a felületbe (S. Kökenyesi és mts, 2007). A felületet egy atomerő-mikroszkóppal megvizsgálva azt látjuk, hogy a becsapódó nagy-töltésű xenonionok a várt kráterek helyett kiemelkedéseket, 1-5 nm magas csúcsokat hoznak létre a szilárd test felületén. A jelenség pontos magyarázatát nem ismerjük. Sejtésünk szerint a sok elektronjától megfosztott ion a felület gyengébben kötött atomjaiból hozza létre ezeket a struktúrákat. További vizsgálatokat igényel, hogy a jelenség hogyan függ a becsapódó ionok kinetikus és poten-



II. ábra • A szelén felületére becsapódó, huszonnégyesen ionizált xenonionok keltette kiemelkedése atomerő-mikroszkópos képe.

ciális energiájának arányától. Leegyszerűsítve: a lassú, de nagy töltésű ionok vagy a kisebb töltésű, de gyorsabb ionok hozzák-e létre hatékonyabban ezeket a struktúrákat.

*Elősegíti-e az élő szövetek fémeken való megtapadását egy különleges szénréteggel való bevonás?*

Az ECR ionforrás plazmájában egy különleges anyag a szén hatvan atomot tartalmazó molekulája is bevezethető, és ezekből a különleges szénmolekulákból is előállíthatók ionok (S. Biri és mts, 2006). Ezeket a különleges ionokat az ionforrásból kivezetve és felgyorsítva felvihetjük különböző anyagok felületére. Különösen érdekesnek látszik olyan titán implantátumok ilyen anyaggal való bevonása, amelyeket élő szervezetbe beültetve, a különleges szénmolekulák elősegíthetik az élő szövetek megtapadását, vagy az implantátumon való szövetnövekedést. Az első kísérletek biztató eredményei után jelenleg nagyobb számban állítunk elő ilyen különleges szénrel bevont titántűket, amelyek a csontszövetbe helyezve – reményeink szerint – az élő szövetek erősebb és gyorsabb tapadását és növekedését eredményezik.

## IRODALOM

- S. Biri, É. Fekete, A. Kitagawa, M. Muramatsu, A. Jánošy, J. Pálinkás, „Fullerenes in ECR Ion Sources”, *Review of Scientific Instruments* 77 03A314. (2006)
- S. Biri, A. Valek, T. Suta, E. Takács, Cs. Szabó, L. T. Hudson, B. Radics, J. Imrek, B. Juhász and J. Pálinkás, „Imaging of ECR plasmas with a pinhole x-ray camera” *Review of Scientific Instruments* 75 1420-1422. (2004)
- S. Biri, J. Vámosi, A. Valek, Z. Kormány, E. Takács and J. Pálinkás, „The new ECR ion source of the ATOM-KI: A tool to generate highly charged heavy ion plasma and beam”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 124 427-430. (1997)
- W. Jitschin, H. Kleinpoppen, R. Hippler and H. O. Lutz, *J. Phys. B: Atom. Molec. Phys.* 12, 4077 (1979)
- S. Kökenyesi, I. Iván, V. Takács, J. Pálinkás, S. Biri, I. Szabó, „Formation of surface structures on amorphous chalcogenide films”, *Journal of Non-cryst. Sol.* 353 (13-15): 1470-1473 (2007)
- L. Lederman and D. Teresi, „The God Particle – If the Universe is the Answer, What is the Question”, Houghton Mifflin Company, Boston, New York 1993.
- J. Pálinkás, L. Sarkadi, and B. Schlenk, „L<sub>3</sub>-subshell alignment in gold following low-velocity proton and He<sup>+</sup> impact ionisation”, *J. Phys. B: Atom. Molec. Phys.* 13, 3829-3834 (1980)
- J. Pálinkás, L. Sarkadi, B. Schlenk, I. Török, Gy. Kálmán, C. Bauer, K. Brankoff, D. Grambole, C. Heiser, W. Rudolph, and H. J. Thomas, „Study of the L-shell ionisation of gold by 3.0 - 18.2 MeV nitrogen bombardment”, *J. Phys. B: Atom. and Molec. Phys.* 17, 131 (1983)
- J. Pálinkás, R. Schuch, H. Cederquist, and O. Gustafsson, „Observation of electron-electron scattering in electron capture from He by fast protons”, *Phys. Rev. Lett.* 63 2464 (1989)
- L. Sarkadi, J. Pálinkás, Á. Kövér, D. Berényi, and T. Vajnai, „Observation of the electron capture into the continuum states of neutral projectiles”, *Phys. Rev. Lett.* 62 527 (1989)
- L. H. Thomas, *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A* 114, 561 (1927)
- P. A. Závodszy, L. Sarkadi, L. Viktor and J. Pálinkás, „Observation of collisionally induced (1s2p<sup>2</sup>) ‘Pe shape resonance of He’”, *Phys. Rev. A* 50, R899 (1994)

