

**AZ MTA ATOMMAGKUTATÓ INTÉZETE**  
4026 Debrecen, Bem tér 18/c  
(4001 Debrecen, Pf. 51)  
Tel: 06-52-509200, fax: 06-52-416181  
E-mail: director@atomki.hu; honlap: http://www.atomki.hu

## **KIEMELKEDŐ EREDMÉNYEK 2007-BEN**

### **Új módszer a kvantummechanikai szórásprobléma megoldására**

A mikrofizika egyik legfontosabb kutatási eszköze a részecskékkel való bombázás, az ilyen események értelmezéséhez pedig az ütközések kvantummechanikai leírására van szükség. A kvantummechanikában az ütközést hullámjelenségnek fogjuk fel, és az elméleti leírás az ütközés által eltérített hullám alakjának kiszámítását jelenti. Ha az ütköző partnerek maguk is összetettek, és összetettségüket figyelembe akarjuk venni, az ütközés leírása nagyon nehéz.

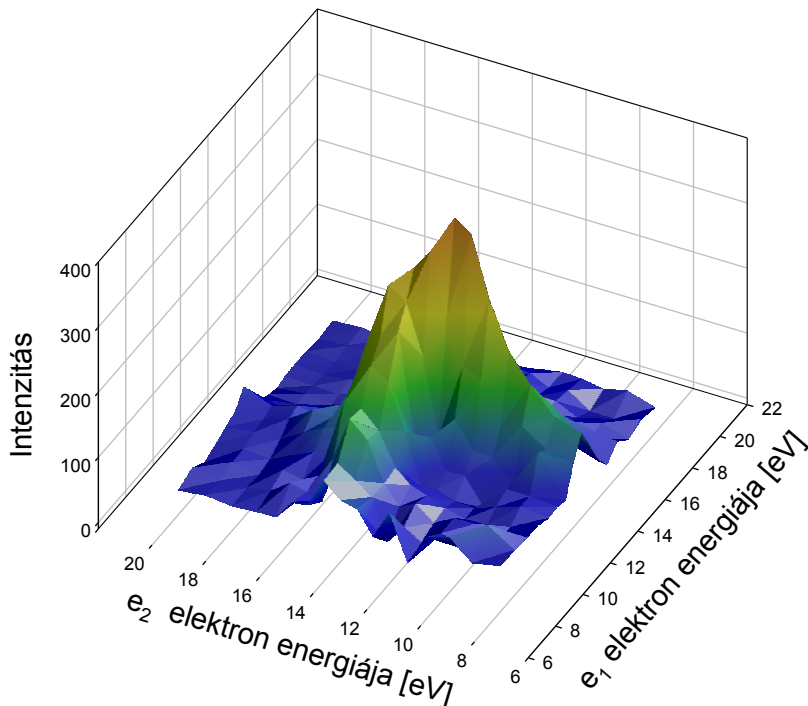
Összetett részecskék (pl. atomok, atommagok) mozgását kötött állapotaikban jóval egyszerűbb kiszámítani, mert a véges térrészre összpontosuló hullámok sokkal könnyebben közelíthetők véges sok egyszerű hullám szuperpozíciójaként. Az ütköző rendszer állapota azonban nem kötött állapot. A nem kötött állapotok számos leírásmódja megpróbálja a folyamatot mégis valahogyan a kötött állapotok esetre visszavezetni. Az Atommagkutató Intézetben született ötlet ennek az eljárásnak egy különösen ígéretes változata, s ezen ötletet japán kutatókkal együtt meg is valósították. Az ötlet azon alapszik, hogy az ütközésben keletkező kifutó hullámokat olyan transzformációnak vetik alá, amelyek véges térfogatra korlátozott, kötöttállapotszerű függvényekbe viszik át őket, és az ezekre vonatkozó egyenleteket oldják meg. Rezonanciaállapotokra, amelyek hullámfüggvénye tisztán kifutó hullám, ezt a transzformációt rutinszerűen használták. A jelen munka újdonsága az, hogy az Atomki kutatója megmutatta, hogyan lehet e transzformáció segítségével az ütközésre jellemző mérhető mennyiségeket is kiszámítani. A módszer a  ${}^3\text{H}+p\rightarrow{}^3\text{He}+n$  reakcióra kitűnően vizsgázott, és nyilvánvaló, hogy ennél jóval bonyolultabb esetek is kezelhetők lesznek. E módszer komoly előrelépést jelent a kvantummechanika gyakorlati alkalmazásaiban.

### **Az elektron-elektron kölcsönhatás kísérleti tanulmányozása nagyenergiájú atomi ütközésekben**

Ez a kísérleti munka a fizikai kutatások egy igen általános témakörének, a küszöbjelenségek tanulmányozásának területén eredményezett jelentős felismerést. Részecskék (pl. atommagok, atomok) ütközése során egy-egy reakció meghatározott ütközési energiánál, reakcióküszöbnél lép fel. Wigner Jenő ismerte fel 1948-ban, hogy az ütközési folyamatok a küszöb környékén nagyfokú univerzalitást mutatnak: a reakció energiafüggését egyedül a résztvevők közötti kölcsönhatások típusa (vonzó vagy taszító, rövid- vagy hosszúhatótávolságú) határozza meg. Ennek az univerzalitásnak köszönhetően a küszöbjelenségek törvényszerűségeinek vizsgálata mind a mai napig az egyik legintenzívebb alaputatási terület a fizikában.

Atomi ütközésekre vonatkozóan küszöbtörvényt elsőként Gregory H. Wannier fogalmazott meg. A klasszikus mechanikán alapuló számításai azt mutatták, hogy az atomok elektronbombázással kiváltott, küszöbhez közeli egyszerűes ionizációját követően a szórt és a

szabaddá vált elektron mozgása erős korrelációt mutat a létrejött egységnyi pozitív töltésű ion terében: a két elektron egymástól távolodva, ellentétes irányban halad. Hasonló kételektronos állapot alakul ki az atomok fotonokkal kiváltott kétszeres ionizációja során is. A Wannier-féle kételektronos állapot létrejöttét számos kísérletben vizsgálták elektron- és fotonbombázással. Az Atomkiban elvégzett kísérlet újszerűsége, hogy elsőként sikerült ilyen állapotot atomi ütközésekben megfigyelni.



100 keV He + He<sup>0</sup> ütközésben megfigyelt kételektronos ún. cusp csúcs.

Küszöbjelenség tanulmányozásáról lévén szó, a kísérletben olyan folyamatot választottak, amelyben két elektron nagyon kis energiával lép ki az ütközésből. Nullához közeli energiával rendelkező elektronok megfigyelésére az ún. cusp jelenség teremt egy rendkívül jó lehetőséget. A cusp a bombázó részecske irányába kilépő elektronok energiaeloszlásában egy lándzsahegy alakú csúcs. A csúcsot létrehozó elektronok sebessége közel azonos a gerjesztő részecskéével, következésképpen hozzá viszonyítva az elektronok közel nulla sebességgel mozognak. Kézenfekvő, hogy amennyiben két ilyen elektron egyidejű emisszióját sikerül megfigyelni, az információval szolgálhat a Wannier-féle küszöbjelenségről. Ez a kételektronos cusp folyamat csak úgy képzelhető el, hogy ha a kirepülő bombázó részecske kellő erősséggel vonza az egymást taszító két elektront.

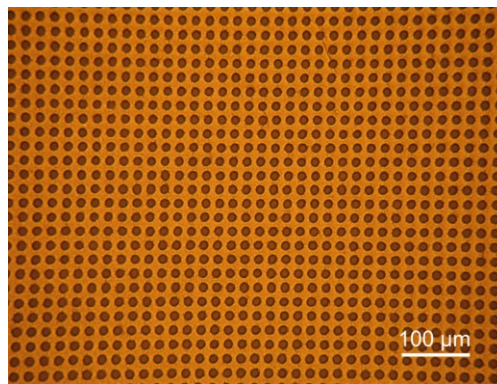
A vizsgálatokban hélium atomokat bombáztak semleges hélium atomokkal az Atomki 1 millió Voltos Van de Graaff gyorsítójánál. A kísérletben speciálisan erre a célra egy sajátfejlesztésű repülési-idő-spektrométert használtak, amely alkalmas két, a bombázó részecske irányába kirepülő elektron egyidejű detektálására és energiájuk meghatározására. Háromszoros koincidencia-feltétel alkalmazásával a szóbjöhető kételektronos folyamatok közül kiválasztották azt, amelyben a két elektron emisszióját az ütköző hélium atomok kölcsönös ionizációja eredményezi. A három egyidejűleg detektált részecske közül kettő a két kibocsátott elektron, a harmadik pedig a kirepülő héliumion volt. Fontos megjegyezni, hogy egy ilyen háromszoros koincidenciamérés technikailag igen nehéz feladat. A kísérleti adatok

egyértelműen igazolják a kételektronos cusp létezését (lásd az ábrát). Az elektronok energiái között talált erős korreláció valószínűsíti a Wannier-állapotok populációját a vizsgált ütközésben.

### **Protonnyalábbal készített mikropillárisok orvosi alkalmazásokra**

A protonnyalábos mikromegmunkálás egy direkt írásos háromdimenziós litográfiás eljárás, amelynek lényege, hogy néhány MeV energiájú és mikroméretűre fókuszált protonnyalábot egy alkalmas anyagon pásztáznak, majd az ionok által létrehozott primer roncsolási képet kémiai eljárással előhívják.

Az Atommagkutató Intézetben protonnyalábos mikromegmunkálással 10  $\mu\text{m}$  átmérőjű pórusokat tartalmazó szűrőlemezt készítettek 50  $\mu\text{m}$  vastag műanyagfóliákból. A kész lemezek minőségét optikai és elektronmikroszkóppal ellenőrizték. Megállapították, hogy a lyukak a vártak megfelelően kör alakúak, és a hibahelyek száma minden minta esetében kisebb, mint 2%. A szűrők áteresztőképessége (lyukterület / összterület) 20%.



Orvosi alkalmazások céljára készített polimer mikropilláris szűrőlemez optikai mikroszkópos fényképe. A lyukak átmérője 10  $\mu\text{m}$ , a lemez vastagsága (a kapillárisok hossza) 50  $\mu\text{m}$ .

Az elkészített mikropilláris szűrőlemezekkel kialakítható egy modern, új ötleten alapuló diagnosztikai eszköz. Ennek a kidolgozására a Debreceni Egyetem immunológusai ígéretes kísérletekbe kezdtek. Lehetőség látszik egy védhető nemzetközi szabadalom kidolgozására, illetve egy termék kifejlesztésére is.

A protonnyalábos mikromegmunkálás módszerével olyan mikrostruktúrák állíthatók elő, amelyek más módszerekkel nem vagy nehezebben valósíthatók meg. Ennek oka a különböző megmunkálási, litográfiás módszerek közti fizikai különbség. A fenti alkalmazáson kívül különféle ipari hasznosítások is elképzelhetők.

## A p+p szórási reakció vizsgálata a trójai faló elnevezésű módszerrel

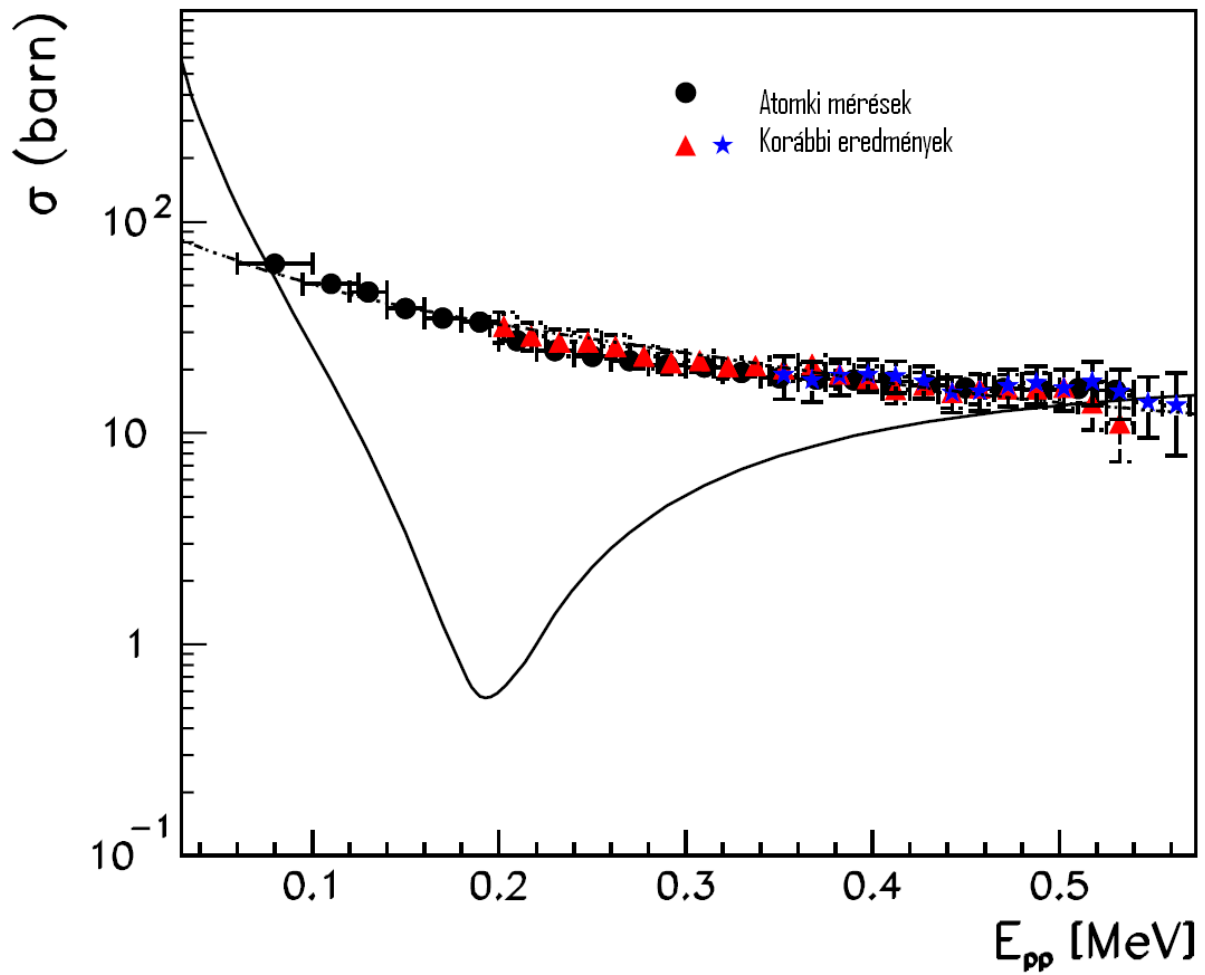
A „Trójai Faló” módszer (Trojan Horse Method, THM) olyan indirekt kísérleti módszer, ami rendkívül sikeresnek bizonyult az utóbbi évek során. A módszer lényege leegyszerűsítve az, hogy töltött részecskék **kéttest**-magreakciójának hatáskeresztmetszete egy alkalmasan kiválasztott **háromtest**-folyamat segítségével határozható meg.

Töltött részecskék azon kéttest-reakcióinak hatáskeresztmetszetei, melyek a csillagok energiáját termelik, és az elemek teljes skáláját előállítják, a csillaghőmérsékletnek megfelelő alacsony (Coulomb-gát alatti) energiáknál közvetlenül nem mérhetők, mert a Coulomb-taszítás miatt nagyon kicsik, ráadásul fellép még a kölcsönható atomok elektronjainak zavaró árnyékoló hatása, az elektronárnyékolás is. A THM módszer éppen ezen hatások kiküszöbölését teszi lehetővé.

Az utóbbi években a THM módszer alkalmazása a mag-asztrofizikában nagyon sikeresnek bizonyult, ezért kézenfekvőnek látszott a módszer magfizikai alkalmazhatóságának ellenőrzése, pl. a rugalmas szórási folyamatban. A proton-proton rugalmas szórást korábban számos, a magerők természetére irányuló kísérletben vizsgálták. Annak ellenére, hogy elvben a p-p rendszer nagyon egyszerű, kis bombázóenergiák esetén komoly gondot okoz a mag-szórás mellett fellépő Coulomb-szórás, elsősorban ezek interferenciája. A 191 keV-nél jelentkező jól ismert destruktív interferenciát mutatja az ábra kihúzott görbéje.

A p-p rugalmas szórás THM vizsgálata a D(p,pp)n háromtest-folyamat mérésével történt olasz–magyar együttműködésben az Atomki ciklotron gyorsítója felhasználásával. Mivel a bombázó protonenergia nagyobb, mint a Coulomb-gát, a reakció hatáskeresztmetszete nagy. A felhasadó deutérium protonja és neutronja közötti kötési energia együtt a kirepülő neutron által elvitt energiával levonódik a bombázó nyaláb energiájából, ami azt eredményezi, hogy maga a kéttest p-p szórás viszont nagyon alacsony (Coulomb-gát alatti) energián, az ún. kváziszabad kéttest-energián mehet végbe. Másik lényeges következmény, hogy a kölcsönhatás a gáton való áthaladás után megy végbe, más szóval, a p-p szórásban a Coulomb-szórási amplitudó elhanyagolható. Természetesen az elektronárnyékolás hatását is kiküszöböli a THM.

A kísérleti eredményeket bemutató ábra egyértelműen bizonyítja a THM módszer egyedülálló képességét, nevezetesen, hogy alkalmazásával a Coulomb-szórás járuléka elhanyagolhatóan kicsivé válik, esetünkben a Coulomb-szórás jelenléte okozta destruktív interferencia eltűnt. A THM másik nagyon fontos előnye, a Coulomb-gát hatásának kiküszöbölésén túl, hogy kísérleti hatáskeresztmetszet-adatokat képes szolgáltatni abban az alacsony energia-tartományban, ahol direkt mérésekkel ez nem lehetséges.



A p-p szórás mért THM hatáskeresztmetszete az energia függvényében. A kihúzott görbe a számított direkt (2-test), a szaggatott görbe a THM (3-test) formulával számolt hatáskeresztmetszet.