

# KFKI HÍRADÓ

**40 éves  
a magfizika  
a KFKI-ban**

1991. október

# KFKI HÍRADÓ

**40 éves  
a magfizika  
a KFKI-ban**

1991. október

KÖSZÖNTJÜK  
A 75 ÉVES  
SIMONYI KÁROLYT





### Simonyi Károly köszöntése

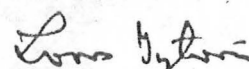
Simonyi Károlyt először életemben 1955-ben láttam Debrecenben. Előadást tartott a Kísérleti Fizikai Intézetben. Arról a konferenciáról számolt be, amelyen a nagyhatalmak képviselői Genfben először tárgyaltak az atomenergia kérdéseiről, pontosabban a békés hasznosítás lehetőségeiről. Akkor hallottam először arról, hogy hogyan lehet a  $^{14}\text{C}$  izotóp bomlásának megfigyeléséből visszakövetkeztetni több ezer éves tárgyak korára. Akkor hallottam először arról is, hogy a hidrogénbomba megszelidítésének a problémája a fúziós energiatermelés talán még a mi életünkben megvalósul, ezért érdemes lesz a kutatásba bekapcsolódni. Tőle hallottam először arról is, hogy a KFKI-ban reaktor építését határozták el. Az Ő előadását hallgatva ébredt fel bennem az a hit, hogy a KFKI bizonyára egy kiváló hely. És akkor határoztam el, hogy addig nem is nyugszom, amíg oda el nem jutok. Megtudtam, hogy a KFKI-ban már szervezik az új részleteget a KAR-t, azaz a Kísérleti Atom Reaktor elnevezésű Osztályt. Ez indított arra, hogy a könyvtárból kikölcsönözzem Glaston és Edlund könyvét, amely akkor a neutronfizika bibliája volt. Nekiláttam és nagy igyekezettel tanultam meg mindent, amit könyvből egyáltalán meg lehet tanulni a neutronok lassításáról, diffúziójáról és detektálásáról.

Közel egy esztendőbe került, mire feljutottam Csillebércre. Időnként találkoztam Simonyi professzor úrral, aki egy-egy kérdéssel vagy biztató mosollyal azt a hitet keltette bennem, hogy valamilyen oknál fogva különleges szimpátiával viseltetik irányomban. Egyszer, az egyik kollégám elejtett megjegyzéséből, arra a következtetésre jutottam, hogy ő is arról van meggyőződve, hogy Simonyi Károly valamilyen oknál fogva az ő irányában viseltetik különleges szimpátiával. Nem kezdtem módszeres "kutatásba", mert anélkül is hamar megvilágosodott előttem, hogy a fiatalok, és akkor szinte mindnyájan azok voltunk ugyanazt érzik, amit mi ketten.

Simonyi Károlynak 1956 után el kellett hagynia a KFKI-t, később az egyetemet is. Hogy miért azt sokan és sokféleképpen fogalmazták meg. Az egyik barátom tömören azt mondta "Simonyi október előtt is és október után is ugyanazt mondta, mint amit októberben". Azok az idők pedig nem kedveztek az ilyen magatartásnak.

Már több mint három évtizede, hogy Simonyi Károly nem lépte át a KFKI küszöbét. Ennek ellenére mindvégig velünk volt, ha tudtunk róla, ha nem.

Hetvenötödik születésnapján Simonyi Károlynak friss, jó egészséget kívánok és azzal a reménnyel köszöntöm a KFKI és a magam nevében, hogy a közeljövőben viszontláthatjuk itt a KFKI-ban, ahol keze munkájának és szelleme kisugárzásának hatását több generációnyi fiatal kutató élvezte és élvezi ma is.



Lovas István

## Negyven éves a hazai részecskegyorsítás

Vannak, akik személyes élményeik alapján, mások elbeszélésekből ismerik azokat a háború utáni éveket, amikor a szinte földig lerombolt országban bámulatra méltó energiával láttak hozzá a pusztítás nyomainak eltüntetéséhez és a normális életfeltételek megteremtéséhez. Az általános pezsgés alól nem volt kivétel a tudományos élet sem, sőt itt talán még erőteljesebben nyilvánult meg az újrakezdés iránti törekvés, mint más területeken.

A világ tudományához való felzárkózás igénye motiválta azokat az erőfeszítéseket is, amelyek célja a korszerű magfizikai kutatások megindítása volt. Az atommag vizsgálatának már akkor is legfontosabb eszközei voltak a nagy energiára gyorsított részecskék, ezért nyilvánvaló volt, hogy a tervezett új kutatások számára mindenek előtt egy gyorsítóberendezést kellett megépíteni. Az erre irányuló munka eredménnyel járt, és épp most van 40 esztendeje, hogy 1951 decemberében sikerült – hazánkban első alkalommal – mesterségesen gyorsított részecskékkel magreakciót létrehozni.

Egy gyorsítóberendezéssel felszerelt magfizikai laboratórium felépítése Simonyi Károlynak volt dédelgetett gondolata. Simonyi professzor, aki annak idején már a nevezetes Hold-kísérletben – a Hold megradarozásában – is kiemelkedő szerepet játszott, ebben az időben a BME-n tartotta legendás hírű előadásait, ugyanakkor a BME Sopronban székelő Bánya- és Kohómérnöki Karán az Elektrotechnikai Tanszéknek volt a vezetője. Ez a környezet ideálisnak bizonyult ahhoz, hogy megvalósítsa elképzeléseit. Az általa tervezett gyorsító, egy 1 MeV-es Van de Graaff generátor megépítése nem igényelt költséges beruházásokat, és volt egy kis létszámú csapata, amely nagy lelkesedéssel látott hozzá a feladathoz. Az ország akkori állapotában szinte a semmiből kellett dolgozni, de az ezermester műszerész, Horváth Pista bácsi kezenyomán, vagy a régi Izzós kapcsolatokból származó "kincsek", jó tanácsok révén mindig meg lehetett találni egy-egy nehéz helyzetből a kivezető utat. A munkában résztvevők számára a legnagyobb tőkét mégis a "prof" állandó figyelme, irányítása, buzdítása jelentette, ami végülis elvezetett a hazai tudományos élet egy jelentős állomásához. A "nagy eseményről", az első hazai gyorsításról álljon itt egy csaknem korabeli beszámoló, az "A KFKI 5 éve" című kiadványban 1955-ben megjelent visszaemlékezés...

Ez volt a kezdet, amit azután Csillebércen, az Atomfizikai Osztályon követett Simonyi Károly irányításával egy több éves, sikerekben gazdag korszak, amelynek máig is él iskolateremtő hatása.

## ÉLMÉNYEM AZ ELSŐ GYORSÍTÁSRÓL

1951. december 22.-e az Atomfizikai osztály életében az egyik legizgalmasabb nap volt. Az osztály ekkor még Sopronban a Műszaki Egyetem Elektrotechnikai Tanszékén működött, létszáma mindössze egy műszerészből állt. A kutatómunkát az egyetemi tanszemélyzet és műszaki személyzet félállásban levő dolgozói és az oda beosztott két aspiráns végezte. Első feladatunk az volt, hogy elektrosztatikus generátor által mesterségesen felgyorsított hidrogén ionokkal - hazánkban elsőként - atommag átalakítást hozunk létre. A generátor és a gyorsítócső minimális anyagi segítséggel, ugyyszólván hulladékanyagból épült fel, így azután az építést állandó nehézségek, üzembiztos zavarok kísérték. Az egyik legfontosabb lépésnél pl., a gyorsító rendszer vákuumpróbájánál, elszakadt a diffúziós szivattyúk hűtővizének vezetéke és a fűtőtestekre ömlő víz hatalmas gőzszólló formájában emelkedett a magasba. Mivel a generátor működéséhez tökéletesen száraz levegőre van szükség, ez a látvány elég szomorú volt.

Végre mégis csak sikerült eljutni a gyorsításig. Tervünk az volt, hogy a hidrogénionokat mintegy félmillió volt feszültséggel gyorsítjuk fel és ezután egy lítium lemezre irányítjuk őket. A lítium atommagjába ütköző nagyenergiájú ionok magreakciót hoznak létre, amelynek során erős gamma-sugárzás keletkezik. A magreakció és ezzel a gamma-sugárzás is pontosan akkor indul meg, amikor a feszültség eléri a 440.000 V-t. A lítium a gyorsítócsőnek azon a végén volt elhelyezve, amelyik a nagyfeszültségű elektródába nyult, ezért a sugárzás megfigyelésére valakinek egy hordozható számláló készülékkel a félmillió volt feszültségre töltött elektróda belsejében kellett elhelyezkedni. A sikeres gyorsítás jele tehát az volt, hogy az elektródában ülő megfigyelő sugárzást jelez, amikor a feszültségmérő 440.000 V-t mutat.

22-én délelőtt minden előkészület megtörtént a gyorsításhoz, és délután került sor a lítiumnak gyorsítóterbe való helyezésére. Fém lítium behelyezése ellen különböző szempontok merültek fel, ezért egy lemezre LiCl-t tettünk és ezt helyeztük a gyorsítócső végébe. Késő délután volt, mire a szivattyúk elindultak. Kb. másfél órai időre volt szükség, hogy a vákuum a szükséges  $10^{-5}$  Hgmm nyomást elérje. Hiába vártunk azonban, a vákuummérő mutatója három óra múlva is  $10^{-2}$  Hgmm-t mutatott. Kétségbeesve álltunk le a szivattyúval, és amikor a gyorsítócsövet kinyitottuk, kiderült a baj oka, a LiCl-ből kristályviz szabadult fel.

Mire ideáig jutottunk, este lett, Elhatároztuk azonban, hogy tovább folytatjuk a kísérletet, és még az éjszaka folyamán megpróbáljuk elérni a szükséges vákuumot fém lítium behelyezésével. Éjfél felé járt az idő, mire a szivattyúkat el lehetett indítani. Most izgalmas percek következtek. Minden szem a vákuummérőt figyelte, az pedig kb. másfél óra múlva lassan elindult, és 2 órakor a vákuum végre elérte a  $10^{-5}$  Hgmm-t. Ekkor megindítottuk az ionforrást és mindenki elfoglalta a kijelölt helyét. A hordozható számlálóval Simonyi professzor ült be az elektródákba, Schmidt Gyurka a generátor töltőáramát szabályozta, Karlovits Jóska a generátor feszültségét mérte, Linka Erzsébet pedig arra ügyelt, hogy a szalag a hengerekről le ne fusson. Én magam az ionforrást kezeltem és a generátor feszültségét szabályoztam.

A most következő percek leírására álljon itt a Jegyzőkönyv egy részlete:

- 3<sup>30</sup>-kor Prof. beül.
- 4<sup>10</sup>-kor Motor indul.
- 4<sup>15</sup>-kor Feszültség be,  
Számol! Csővoltmérő állás 0,7,  
0,7 állásnál élesen megindul a számlálás.  
Kb 1000 imp./sec.
- 4<sup>30</sup>-kor Prof. kiszáll.

Ez volt az első magreakció, amit mesterségesen gyorsított részecskékkel hazánkban létrehoztak.

Erő János



HURRÁ!!...SIKERÜLT!!



CÉLTÁRGY



## GYORSÍTÓK A MAGFIZIKAI OSZTÁLYON

Atommagok gyorsítása már a KFKI megalakulása idején az intézet egyik fontos feladatköre volt: az akkor alakult Atomfizikai Osztály a célkitűzésének, t.i. atommagfizikai vizsgálatok végzésének, gyorsítóberendezések nélkül megfelelni nem tudott volna. Világos volt, hogy magfizikai kutatások csak olyan berendezések segítségével lehetnek gyümölcsözőek, amelyekkel a részecskék energiáját széles energiahatárok között, finom lépésekben lehet változtatni, a részecskeáramot megfelelő nagy, beállítható intenzitással, lehetőleg azonos beesési iránnyal, a céltárgyra - targetre - lehet juttatni úgy, hogy az kisméretű foltra össze legyen fókuszálva, és amelyekkel nem egyféle, hanem többféle részecske állhat a kutatók rendelkezésére. Ezeket a kívánalmakat a gyorsítók teljesítik, amelyeknek jónéhány fajtája volt már ismeretes az 1950-es évek elején. Nem mintha radioaktív preparátumokkal nem lehetett volna bizonyos irányú magfizikai kutatásokat végezni, de a gyorsítók adta flexibilitás ilyen kutatásoknál nélkülözhetetlen és ez a kutatásokat rugalmassá tette.

A menetrend tehát adódott: gyorsítót kell létesíteni, amelynek segítségével azután megindulhatnak a magfizikai, magszerkezeti kutatások. Ez a munka kezdődött az 1950-es évek elején az akkori Atomfizikai Osztályon.

Annak kiválasztása, hogy milyen gyorsító létesüljön, nem volt könnyű feladat, bár több tényező körülhatárolta a lehetőségeket. Vásárlásra, vagyis importra nem voltak meg a lehetőségek, önerőből épített gyorsítókat kellett létrehozni. Tanulmányutak sem jöttek számításba olyan intézményekhez, ahol gyorsítókat már építettek, de természetesen az anyagi és gyártási lehetőségek sem voltak korlátlanok. A választás a direkt gyorsítóokra esett: Cockroft-Walton rendszerű kaszkádgenerátorra valamint Van de Graaff rendszerű generátorra, amelyekben a részecskék egyszer haladnak át a gyorsító feszültség tartományán és ezalatt egy lépésben szerzik meg végenergiájukat. A már meglévő és

megszerezhető gyorsítóépítési ismereteket tekintve, az anyagi és országos ipari háttér figyelembevételével akkor ez látszott legjobban megvalósíthatónak.

Ez a választás természetesen alátámasztást nyert a tudományos oldalról is: az akkori publikációk igen jelentős része és benne a vizsgálatok sokfélesége a néhány száz keV - néhány MeV energiatartományra esik. A választott gyorsítófajták pedig ebbe az energiatartományba jól beleillenek.

Ennek a választásnak azonban az az eredménye is lett, hogy a gyorsítók segítségével végzett mérések, kutatások csillebérci alapkészülékei az RMKI-ban mindmáig az ilyen típusú gyorsítók, mert ezek készítésében, fejlesztésében, kezelésében és üzemeltetésében van széleskörű tapasztalat és a kutatások bizonyos része is ezek köré csoportosul.

Az első kaszkádgenerátor és gyorsító az 1952/54 években épült, bár az első gyorsítások már 1953 júliusában folytak, amikor Csillebércen is reprodukálható volt a  $\text{Li}^7(p,\gamma)\text{Be}^8$  magreakció. A gyorsító a III.épület egyik - azóta már laborhelyiségekké átépített - nagytermében volt elhelyezve, különállóan feszültségforrásként a kaszkádrész, mellette a gyorsítórész, függőleges gyorsítócsővel. Az ionokat (p,d vagy  $\text{He}^+$ ) Thonemann típusú radiofrekvenciás ionforrás állította elő a nagyfeszültségű elektródban, a target földpotenciálon volt. A feszültségforrás 0.9 és 1 MV közötti feszültségen ütött át a terem egyik mennyezeti tartógerendájához, ily módon korlátot szabva a nagyfeszültségnek.

A készülék 1966/67-ig szolgált gyors neutronok forrásaként, valamint alacsony energiás magfizikai kísérletek számára. Az 1950-es évek óta intézetszerte számos speciális rendeltetésű és felépítésű szabadtéri gyorsítóberendezés létesült, így az RMKI-ban is, ahol utolsónak a "Nehézion gyorsító" (NIK) épült.

Az 1 MeV és ennél nagyobb energiájú ionok gyorsítása szabadtéri generátorral már nem valósítható meg. A szabad levegőn fellépő szigetelési bizonytalanságok miatt a

berendezés működése instabillá válik. Ezen segít a nagynyomású gázszigetelés alkalmazása, amellyel a szigetelőképeség nagyságrendi növekedése érhető el. Az 1950-es évek elejére Herb, Van de Graaff, Trump és mások munkásságának eredményeként már kialakult a tartályba zárt Van de Graaff rendszerű generátornak az a felépítése, amely mindmáig használatos.

Az Atomfizikai Osztályon kitűzött cél egy ilyen felépítésű 4 MV-os berendezés létesítése volt (AG-4), ami akkor igen jó paraméternek számított. Bár a berendezés feszültségforrás része ezt a célt hamarosan elérte, mint gyorsítóberendezés különböző technológiai és gazdasági nehézségek miatt csak az 1960-as évek elejére, a XIII. épületbe való átköltöztetés után állt üzembe. Néhány évi üzemeltetés tapasztalatai alapján, mintegy 12.000 órás használat után 1968-70-ben a gyorsító széleskörű átépítésére került sor: létrejött az EG-2R berendezés.

Ezzel a készülékkel azóta mintegy 55.000 órán át végeztünk gyorsítást. Érthető, hogy emiatt a gyorsító egyes részei fizikailag elkoptak, más részei nincsenek már a mai műszaki színvonalnak megfelelő szinten. Egyes részeken célszerűnek látszik a tapasztalatok alapján új megoldások bevezetése. Mindezeket jelenleg egy folyamatban levő rekonstrukció keretében kívánjuk megoldani.

A Magfizikai Osztály mai készülékeinek működési elvei azonosak az első készülékekével: emiatt akár testvérei is lehetnének, gyakorlatilag azonban elválasztja őket a műszaki kivitelben, technológiai lehetőségekben, tervezési precizitásben azóta végbement fejlődés, valamint a készülékek iránti elvárások, kívánalmak változása.

Az elején az igények nem mentek túl a legkönnyebb magok gyorsításán és a kaszkádgenerátornál még az atom- és molekulaionok szétválasztása sem történt meg (bár kívánalma megvolt). A mostani NIK gyorsító leginkább implantáció céljait szolgálja, ahol az elemek széles skáláját akár izotóptisztaságban kell gyorsítani. Az első Van de Graaff-szalagok sellakkal telített vászonzól készültek, varrógépen lettek végtelenítve. Ezek élettartama már a szabadtéri Van de Graaff generátorban is 100 óra alatt volt. A jelenleg használatos, végtelenítéskor oldószere útján saját

anyagában összeolvadó műanyagheveder 12.000 üzemóra után is még üzemképes. Az ionnyaláb formálásának, ionforrástól targetre vitelének ionoptikai számításai pontos és kiterjedt computer-programok segítségével történnek. Nemcsak a kísérlet, hanem a gyorsítók ellenőrzésének és vezérlésének számítógépes végrehajtására történnek lépések.

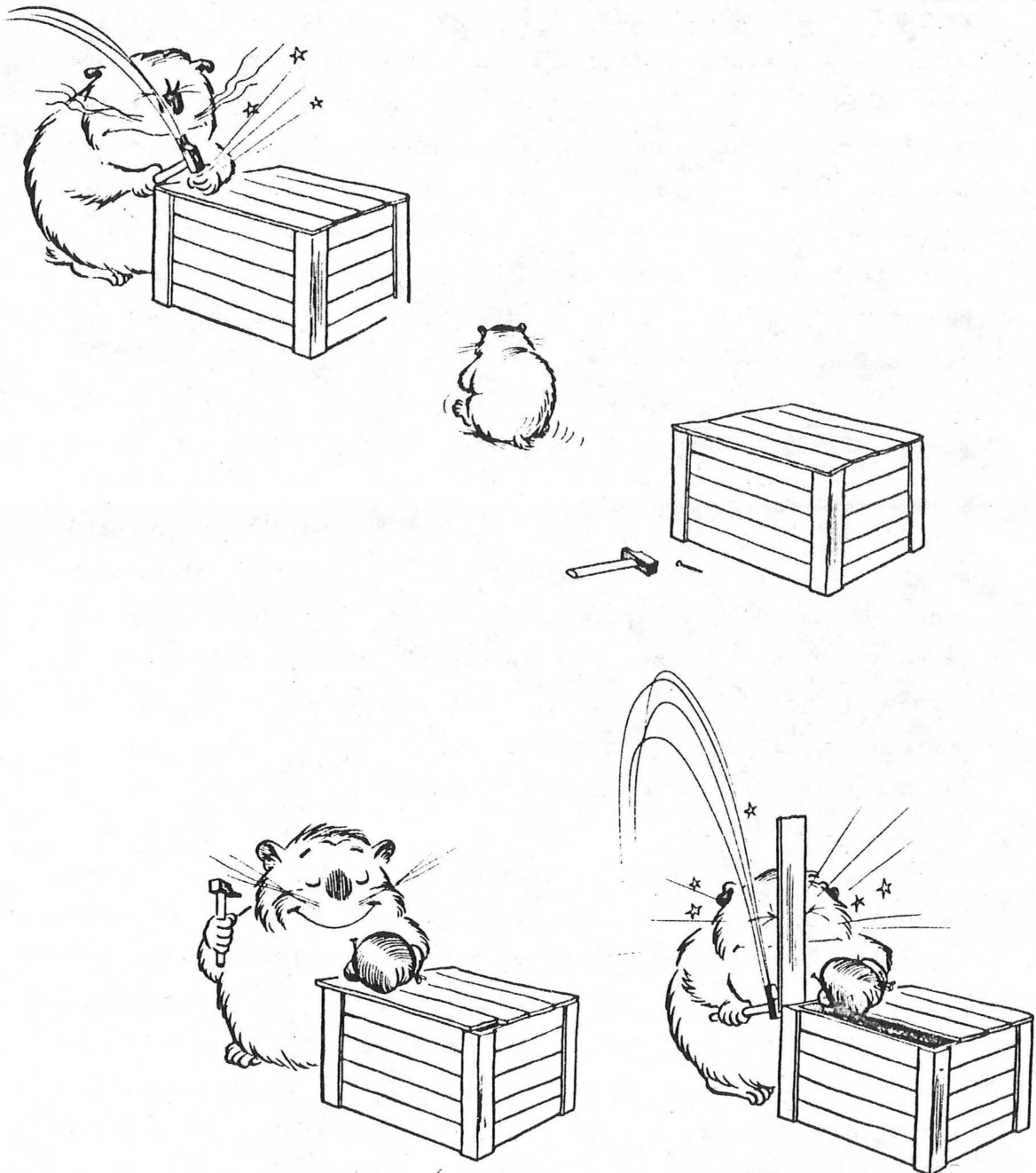
Egyre több olyan készülékkel kell a gyorsítókat kiegészíteni, amelyeket az arra szakosodott cégek gyorsítókhöz gyártanak, önerőből pedig csak olyan készülékek és szerkezetek készüljenek, amelyek a helyi specialitásuk vagy más kívánalmak miatt nem vásárolhatók. Így a Van de Graaff gyorsító jelenlegi rekonstrukciója során pl. analizáló mágnesek stabilizálására gyártott tápforrás és mérőegység kerül beépítésre, vagy az ionnyaláb helyzetének és fókuszáltságának a vezérlőteremben való ellenőrzésére szolgáló monitorokat szerelünk be. Ez a folyamat tulajdonképpen már korábban a vákuumtechnika területén kezdődött el, amikor az előszörre beépített, hazai gyártású diffúziós szivattyúk helyére turbomolekuláris szivattyúk kerültek.

Az EG-2R tankgenerátor függőleges felépítésű. Az alkalmazott legnagyobb gyorsítófeszültség 5 MV volt. Ehhez 12 bar feletti gáznyomásra van szükség a tankban. Kis gázfogyasztású radiofrekvenciás ionforrása van. A gyorsítócső különlegesen kiképzett üvegszigetelők és gyorsítóelektródok szendvics-szerűen felépített rendszere. Az ionnyalábot a targetteremben mágnessel vízszintesbe fordítjuk, majd kapcsoló mágnessel az 5 targethely valamelyikére vezetjük. Az energiastabilitás néhányszor  $10^{-4}$ , amit visszacsatolt ú.n. koronatriódás stabilizáló rendszerrel érünk el. A targetáram néhány  $\mu\text{A}$ .

A NIK gyorsítóval a 100 - 500 kV-os tartományban gyorsítunk. Kaszkádegysége régebbi generátorok alkatrészeiből készült. A gyorsító rész elektródjában az ionforráson kívül egy  $45^\circ$ -os szeparáló mágnes helyezkedik el. Segítségével a Xe természetes izotópjai még szétválaszthatók. Üreges katódú ionforrás van használatban, 10 - 30  $\mu\text{A}$ -nyi áramok nyerhetők. A gyorsítócső vízszintes elhelyezésű, abban a magasságban, amelyben az EG-2 targettermi ioncsatornái fekszenek. A nyalábot a targeten separtetni lehet, maximálisan 50 x 50 mm-es minták besugárzására.

A Magfizikai Osztály jelenlegi két gyorsítója tulajdonképpen egy szoros egységet, gyorsítókomplexumot alkot, nemcsak azért, mert kiegészítik egymást feszültség tartományban, részecskefajtákban, hanem folyamatban van egy olyan targetkamra felszerelése, amelyet mindkét gyorsító egyaránt használni tud: pl. a NIK felől implantált mintát a vákuum megbontása nélkül az EG-2R nyalábjával RBS vagy más módszerrel analízisnek lehet alávetni.

Kostka Pál



## MIRE JÓK A MAGREAKCIÓK?

Az atommag szerkezete és különböző gerjesztési folyamatai megismeréséhez a leghatékonyabb út egy nukleon, vagy nukleonok egy csoportja és a magok kölcsönhatásainak tanulmányozása. Részecske-mag ütközések során a végbemenő változások a kimenő részecske fajtájában, energia és impulzus viszonyaiban tükröződnek. A magreakciók tehát a magszerkezeti dinamikai információk bőséges forrásai. Az atommagot jellemző fizikai adatokhoz azonban többnyire csak indirekt, a közvetlen mérési eredmények - a kilépő részecskék hozama, energiája, adott irányokban való kilépés valószínűsége, stb. - reakciómodellek keretei között való értelmezésével juthatunk. Éppen azok a módok, ahogy az egyes elméletek a mag szerkezetének sajátosságait megvilágítják, határozzák meg a különböző reakciómodellek arculatát.

A nukleon - mag ütközések legegyszerűbbike a rugalmas szórás, amikor is a mag szerkezetében változás nem történik. A folyamat pontos nyomonkövetése mégis rendkívül nehéz feladat, mivel a mag valamennyi nukleonja kölcsönhat egymással és a bejövő nukleonnal. Már két nukleon közötti kölcsönhatás is csak komplikált alakban adható meg, a teljes kép tehát nagyon bonyolulttá válik. Szerencsénkre azonban már rég, az 50-es években felismerték, hogy ez a nagyon összetett ütközési probléma mint két test, a mag egésze és a bejövő nukleon ütközésével helyettesíthető. A szórás kép ilyen drasztikus leegyszerűsítése az optikai modell, amely a mag egészét mint egy homályos üveggömböt tekinti és egy potenciálgödörrel reprezentálja. Ha neutronok szóródnak atommagokon, lévén a neutron semleges részecske, a mérési eredmények értelmezése leegyszerűsödik, hiszen ekkor "csak" a magerők hatásával kell számolni, a mag elektromos terének nincs szerepe, közvetlenül e magpotenciál határozható meg. Neutron szórás kísérletekben forrásként a  $T(d,n)$  reakció, bombázó részecskéként a gyorsító deuteron nyálábja szolgál. A rugalmasan

szórt neutronok energiájuk, illetve repülési idejük mérésével választhatók ki és szóródási irány szerinti eloszlásukat mérve a magok optikai potenciálja származtatható. Ismeretük előfeltétele valamennyi bonyolultabb magreakcióban történő magszerkezeti vizsgálatnak. Ilyen kísérletekhez épült az Atomfizikai Osztályon a K200 kaszkádgenerátor pulzált nyalábjára alapozott gyors neutron repülési idő spektrométer (jelenleg az ELTE Atomfizikai Tanszékén üzemel).

A könnyű és közepes magok egy neutronjának protonra cserélésével érdekes tulajdonságú bomló állapotokhoz jutunk: ezek az u. n. izobár analóg állapotok, illetve rezonanciák. Felfedezésük után a Van de Graaffnál rendelkezésre álló kísérleti feltételek lehetővé tették hogy tanulmányozásukba azonnal bekapcsolódjunk a  $(p, \gamma)$  és  $(p, p' \gamma)$  reakciók mérésével. Több magban sikerült őket azonosítani, bomlásukra jellemző adataikat meghatározni. Majd felismerve, hogy tulajdonságaik nem mindig koncentráltan jelennek meg, azonosításuk finomabb kísérleti feltételeket - kisebb energiaszórású protonnyalábot és jobb felbontású  $\gamma$ -detektorokat - igényelt, ezek megteremtésére helyeződött asúly. A gyorsító kritikus energiastabilizálásának megvalósítása, félvezető Ge(Li) detektorok alkalmazása tette lehetővé a kérdéses rezonanciák több állapotra való felhasadásának, fregmentálódásának kimutatását, ezen fregmentek azonosítását, precíz, nagy számítógép igényű analízisükben fizikai jellemzőik kvantitatív megadását.

A magok viszonylag egyszerű szerkezetű állapotainak vizsgálatában a direkt reakciók játszanak fontos szerepet, amelyekben a bombázó részecske csak a mag egyetlen nukleonjával, vagy nukleoncsoportjával hat kölcsön. Rugalmatlan szórással a magok azon állapotai gerjeszthetők, amelyekben egyetlen nukleon mozgása tér el az alapállapotitól - egy-részecske gerjesztések - vagy a nukleonok korrelált mozgást végeznek - rotációk, vibrációk - s e "kollektív" mozgás során a mag belső szerkezete nem változik. A nukleonok mozgása korrelációjának "hosszú távú" jellegéből kiindulva hosszú időn át úgy gondolták, hogy e kollektív állapotok csak hosszú hatótávolságú kölcsönhatásban, azaz elektromágnesesen, töltött részecskékkel gerjeszthetők. Nagy

meglepetést váltott ki a magfizikusok körében amikor gyors neutronok szórásában is találtak ilyen gerjesztéseket. A neutron repülési idő spektrométerrel végzett rugalmatlan szórás kísérleteinkben, nevezetesen a  $^{12}\text{C}(n,n')$  folyamatban, az elsők között mi is mutattunk ki ilyen gerjesztéseket. A gömbszimmetrikustól eltérő (diszkosz vagy szivar) alakú deformált magok állapotai erős kollektív tulajdonságokkal rendelkeznek - s az atommagok többsége, bármilyen furcsának is tűnik, nem gömbszimmetrikus - kollektivitásuk tanulmányozására a rugalmatlan részecskeszórások érzékeny eszköznek bizonyultak.

Az egy részecske átadásával járó reakciók az egy-részecske jellegű állapotokhoz vezetnek. Azon ütközésekben, amelyekben a mag a nukleonok egy csoportját veszi át a bombázó részecskétől, vagy adja le a részecskének, a mag nukleonjainak - két nukleon, négy nukleon, stb. - korrelációja, magbeli "csomósodása" vizsgálható, s így a magok u.n. klaszter (d,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ , stb.) szerkezete deríthető fel. A direkt reakciók a lehetséges magfolyamatoknak csak egy csekély hányadát képezik, de jelentőségük, mint spektroszkópiail, magszerkezet vizsgálati "eszközök", messze túlhaladja előfordulási hányadukat.

A magadatok a direkt reakció modellek keretei között származtathatók a kísérletiekből. Az egyetlen lépésben lezajló reakciók modellje általában jól szolgáltatja a magspektroszkópiail adatokat. Ha azonban a gerjesztések valószínűsége nagy, az egyes reakciólépések nem kezelhetők egymástól függetlenül, két- vagy több lépéses folyamatok zajlanak. Így van ez deformált magok esetében, amelyeknél mint rámutattunk, a rugalmatlan szórással történő gerjesztések nagyon valószínűek, együtt járhatnak részecske átadással, megelőzve azt a target magban, vagy\és követve azt a végmagban.

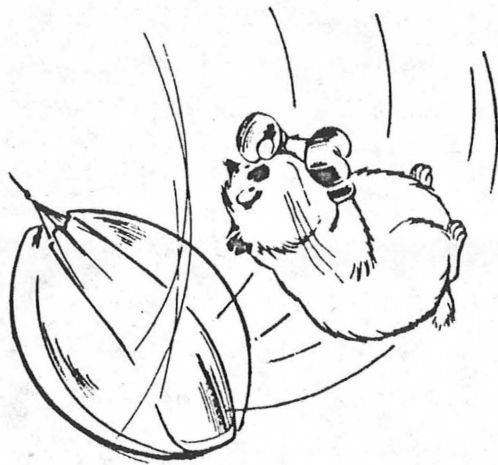
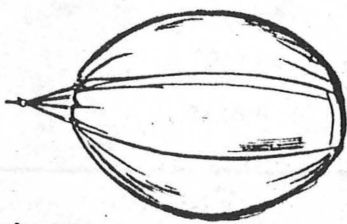
Az évek során egyre nyilvánvalóbbá vált, hogy a magok kollektív tulajdonságainak fontos a szerepe a reakciók mechanizmusában. A magszerkezeti kutatások problematikája tehát egu kettősség jegyeit viseli magán. Ugyanis a magreakció mint "mérőeszköz" milyenségét ismerni kell a magadatoknak a mérési



adatokból való származtatásánál. Ugyanakkor a reakció mechanizmusa a benne résztvevő magok szerkezeti tulajdonságaitól függ. Ezért a számításokra vonatkozó csak egyetlen - de nem elégséges - kritériumot, a "mérési adatokkal való egyezést" szem előtt tartva a reakcióanalízisek utvesztőjében könnyű a kísérleti adatok interpretációja helyett azok fizikai tartalom nélküli "szimulációjához" tévedni. Így a 60-70-es években a reakcióanalízisek végtelen hosszú sora potenciál és magszerkezeti adatok paraméter-dzsungelét eredményezte, a fizikai jelenségek megértését azonban nem szolgálta méretei arányában. Így nem kimerítette, mint felületes szemlélőnek tűnhet, ellenkezőleg, éppen növelte az alacsonyenergiájú magfizika megoldatlan problémáinak halmazát.

A viszonylag egyszerűen kezelhető két- és négy-nukleon átadás esetén kimutattuk a kölcsönös függést. A magok kollektivitása következtében fellépő több lépcsős folyamatokat is beépítve eljárásunkba, amely komplikált matematikai apparátust, nagy számítógépet igényel, sikerült méréseinkből konzisztens spektroszkópiai adatokat leszámaztatva a tapasztalt ellentmondásokat feloldani. Az egyszerűbbnek tűnő, de valójában bonyolultabb egy-nukleon átadási mechanizmus, s ennek kapcsán a deformált magok szerkezeti vizsgálata problémáinak tisztázásához a teljes szögterományt felölelő, a bombázó részecskével indukált valamennyi reakcióra kiterjedő mérések szükségesek, a mi lehetséges gyorsító energiáinkat meghaladó energiánál. Ezért a debreceni ATOMKI MGC típusú ciklotronja  ${}^3\text{He}$  nyalábjához telepített nagy ( $\varnothing$ : 100cm) szórókamrában, korszerű, a félvezető  $\Delta E$ -E detektor - teleszkóp technikán alapuló mérőrendszerünkkel egyidejűleg több szögben, és a különböző reakciókból kilépő részecskék energiáját mérjük. A mérőberendezés nagy érzékenysége lehetővé teszi, hogy a vázolt problémára egyértelmű megoldást találjunk, s így az egy-nukleont átadó reakciók is gazdagíthatják a magszerkezeti vizsgálatok megbízható eszköztárát.

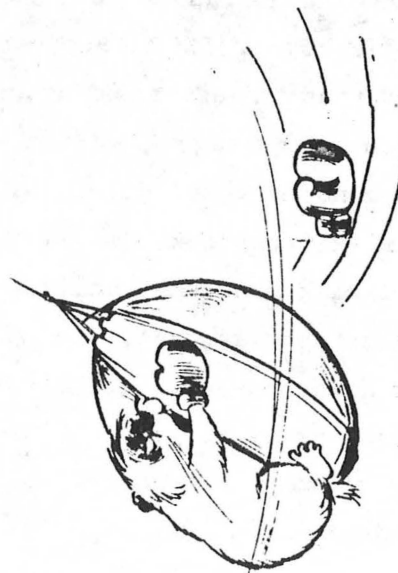
Pálla Gabriella



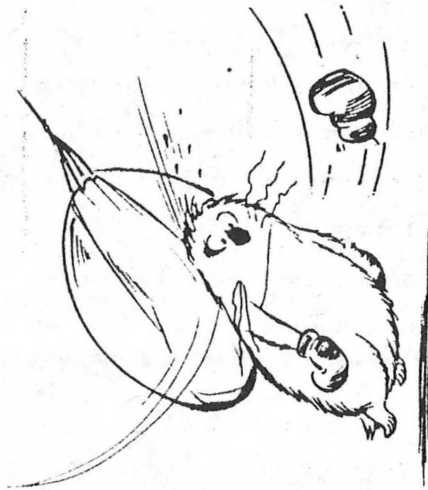
RUGALMAS SZÓRÁS



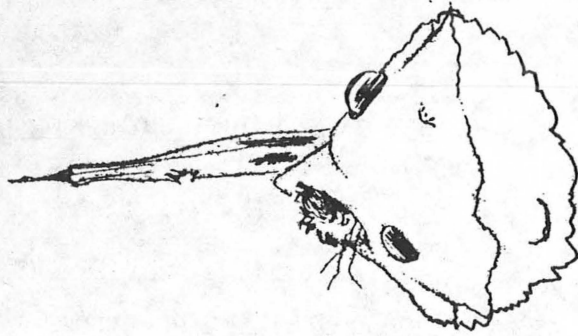
RUGALMATLAN SZÓRÁS



RÉSZECSKE ÁTADÁS



KÖZBENSŐ RENDSZER



## ÁGYÚVAL VERÉBRE?

## MEV ENERGIAJÚ IONNYALÁBOK NÉHÁNY BIOLÓGIAI ALKALMAZÁSA

A magfizikai kutatások zöme idővel a korábbi néhány MeV-es energiatartományból a száz, sőt ezer MeV-es régiók felé tolódott el. De a "hátramaradt", most már kisenergiájúnak minősített, többnyire Van de Graaf típusú 2-5 MV-os gyorsítók, így az EG-2R gyorsító sem maradtak munka nélkül. Szinte a magfizikai felismerésekkel egyidőben ugyanis természetszerűleg adódott, hogy a már részleteiben is ismert nukleáris, vagy atomi folyamatok keltése felhasználható a bombázott céltárgy összetételének vizsgálatára. A bombázó részecske és a céltárgy atomjai között végbemenő ütközési folyamat eredményeként megfigyelhető sugárzás jellemzően függhet a céltárgy atom kémiai rendszámától, az atommag tömegétől, illetve izotópjától. A sugárzás megfelelő mérésével ezért vissza lehet következtetni a céltárgy összetételére mind minőségi, mind mennyiségi értelemben is.

A néhány MeV energiájú részecskék nagy hatékonysággal ionizálják a céltárgy atomok legbelső elektronhéjait. Az elektronszerkezet visszarendeződése során olyan röntgensugárzás is keletkezik, melynek energiája szigorúan jellemző az öt kibocsájtó atom kémiai rendszámára, míg a sugárzás intenzitása szoros kapcsolatban van a szóbanforgó elem mennyiségével (PIXE módszer). Ha a bombázó részecske elegendően közel jut a céltárgy atommagjaihoz, magreakciók is bekövetkezhetnek, (a gyorsító fő "feladata" korábban éppen a reakciók keltése volt), melyek az előző esethez képest összehasonlíthatatlanul változatosabb kimenetelűek lehetnek. Az azonban mindenképpen közös bennük, hogy a magreakció során keletkezett sugárzás milyensége és energiája feltétlenül függ a célmag összetételétől, intenzitása pedig ezen magok számától, azaz magreakciók keltése is alkalmas lehet

analitikai vizsgálatokra (ANR módszer). A PIXE eljárás egyik legfontosabb sajátága az, hogy igen kis anyagmennyiség pontos analízisére is alkalmas úgy, hogy az alumíniumnál nehezebb elemek egyidejűleg, egy méréssel meghatározhatók. A gyorsítókkal könnyen előidézhető magreakciók pedig éppen a PIXE által nem mérhető könnyű elemek (B, C, N, O stb) kimutatására használhatók leginkább. Az anyagok kémiai összetételének meghatározása természetesen döntően az analitikai kémia hatáskörébe tartozik, de vannak olyan esetek, különösen akkor, ha a PIXE és ANR technika egyidejű használatára van szükség, amikor az analitikai kémiában meglehetősen szokatlan, "misztikus" gyorsító módszerek az analitikai probléma legkedvezőbb, esetleg az egyetlen megoldását szolgáltatják. Igen gyakran áll elő ez a helyzet biológiai, biokémiai, orvosi eredetű mintáknál, amikor legtöbbször csak nagyon kevés izolált anyag áll rendelkezésre, és a létfontosságú nyomelemek (Mn, Fe, Cu, Zn, ...) mellett a könnyű, fő összetevők, különösen a fehérjék mennyiségére jellemző nitrogén mérése is kívánatos. A továbbiakban néhány olyan mérést foglalunk össze röviden, melyet a Biofizikai csoport munkatársai végeztek a KFKI gyorsítóján az elmúlt tizenöt évben.

Világszerte többé-kevésbé általánosan elfogadott az a nézet, hogy az emberi hajszálak nyomelem összetételének ismeretéből nagyon fontos következtetések vonhatók le a szervezet nyomelem háztartására, illetve a környezet szennyező hatására vonatkozóan. A PIXE módszert különösen vonzóvá teszi az a körülmény, hogy megfelelően érzékenynek bizonyult egyedi hajszálak hossza mentén végzett analízisekre is. Egy ilyen mérés lehetővé teszi a nyomelem háztartás időbeli változásának nyomonkövetését, tekintettel arra, hogy a hajszálba egyszer már beépült nyomelem véglegesen kikerül a szervezet anyagcsere folyamatából. A haj átlagos növekedési sebességének ismeretében pedig a haj hossza mentén mért adatok időbeli változássá számíthatók át. Bár maga a mérés rendkívül egyszerű amiatt, hogy a hajszálak minden

előkészítés nélkül, közvetlenül mérhetők, komoly nehézséget okoz, hogy egy hajszál vastagsága, sűrűsége a hossza mentén nagyon különböző lehet, nehéz tehát a ténylegesen bombázott hajmennyiséget meghatározni. Miután a PIXE és ANR módszerek kombinálásával sikerült kimutatnunk, hogy a haj keratinjában szerkezetileg kötött kén mérésével ez a probléma megoldható, a szegedi Orvostudományi Egyetem orvosaival együtt módszerünket sikerült alkalmazni is. Gyógykezelés alatt álló lisztérzékeny gyermekektől rendszeresen vett egyedi hajszálak K, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn, Br és esetenként As és Pb ionok koncentrációit mérve és azokat egyrészt ugyanannak a betegnek korábban mért adataival, másrészt egészséges kontroll hajakban mért adatokkal összevetve elősegítettük olyan, a betegek nyomelem háztartásra vonatkozó összefüggések megállapítását, melyek mind diagnosztikai, mind pedig terápiás célokra felhasználhatók.

A fogorvosok körében több évtizede dúl a váltakozó kimenetelű csata a fluórnak a fogszúvasodás folyamatában betöltött szerepéről. A fluór a gyorsítón dolgozó magfizikusok "régis ismerőse", hiszen állandó gondot okozott a gyorsítóknak technikai okokból használt fluórtól származó zavaró  $\gamma$ -sugárzás kiküszöbölése. Ez a nem kívánt magreakció ugyanakkor kiválóan alkalmas akár a fogzománcban, akár a fog belsőbb régióiban a fluór mennyiségének, eloszlásának mérésére. A bombázó nyaláb felesleges fékeződésének, szóródásának elkerülésére a mérni kívánt céltárgyat rendszerint a gyorsító gondosan leszívott vákuumterébe helyezik, de ez a kényszer gyakran nehézkessé, esetleg lehetetlenné teszi tetszőleges minta vizsgálatát, a bombázási pont finom beállítását. A szegedi Fogklinikán gondosan elhasított (de előbb természetesen kihúzott) változó alakú és méretű fogak mérésekor ezért az igazán különleges, úgynevezett "külső nyalábos" elrendezést használtuk. Ennek az eljárásnak az a lényege, hogy a néhány MeV energiájú protonnyaláb pl. egy néhány  $\mu\text{m}$  vastag Ta fólián keresztül számottevő energiavesztés nélkül "kijön" a levegőre és ott

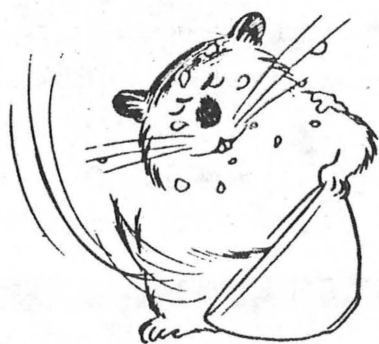
kellemes ózonillatot keltve még néhány cm utat képes megtenni. Sötétben ráadásul nemcsak szagolni, de látni is lehet a nyalábot, így sokkal könnyebb volt a fogorvosok által kijelölt pontokat eltalálni és a  $^{19}\text{F}(p,p'\gamma)^{19}\text{F}$  magreakcióban keletkezett jó öreg 110 és 197 keV energiájú  $\gamma$  sugarakat detektálva megmérni a fluór mennyiségét. Az persze már a fogorvosok dolga, hogy eldöntsék, adatainkkal hatására inkább reklámozható vagy éppen tiltandó a fluórozott só vagy fogkrém használata.

Tevékenységünk azért nem korlátozódott csak a fenti látványos alkalmazásokra. Legutóbb, úgy hisszük, a biokémikusok egyik leggyakrabban használt eljárásának, az úgynevezett elektroforézisnek teljesítőképességét sikerült jelentősen megnövelnünk. Az elektroforézis lényege az, hogy az elektromosan nem teljesen semleges biológiai óriásmolekulák elektromos térbe helyezve a tér hatására az őket tartalmazó közegben (poliakriamid gélek vagy cellulózacetát membránok) elmozdulnak és a különböző molekulák (többnyire fehérjék, enzimek) tömegüktől, formájuktól és eredő elektromos töltésük nagyságától függően keskeny sávokba különülnek el és ott rögződnek is. Ezekből az úgynevezett elektroforetogramokból többnyire csak a molekulasúlyokat és az egyes sávokban lévő fehérje mennyiségét lehet viszonylag egyszerűen meghatározni. Olyan fontos kérdések megválaszolására, hogy melyik sáv tartalmaz fémtartalmú metallofehérjét és abban milyen fém található, az MTA SZBK Biofizikai Intézetének kutatóival együtt a PIXE módszer közvetlen alkalmazásával próbálkoztunk. Elgondolásunk lényege az volt, hogy a megszilárdult géldarabot minden további kezelés nélkül 2-3 MeV-es protonnyalábbal "tapogassuk le". Ha a gél károsodás nélkül elviseli a bombázást és a módszer elég érzékeny, akkor a fémtartalmú enzim sávjánál a röntgenspektrumban a meg kell jelennie a megfelelő fém karakterisztikus vonalának. Kísérleteinket siker koronázta, a módszer kvalitatív használhatóságán túl sikerült azt is kimutatni, hogy a mérés mennyiségi analízisre is alkalmas: a

vastartalmú fehérje sávra összegzett Fe röntgen-intenzitások a gél elektroforézishez felhasznált fehérje mennyiséggel arányosnak adódtak. De igazán annak örültünk, hogy a módszer kifejlesztésével párhuzamosan már konkrét enzimológiai eredményeink is születtek. Sikerült megmutatni, hogy a *Thiocapsa roseopersicina* baktériumból izolált hidrogenáz enzim vasat és nikkelt is tartalmaz, és a Fe, illetve Ni ionok az enzim más-más alegységéhez kapcsolódnak.

Eljárásunk még teljesebb lehetne akkor, ha egyidejűleg a sávok fehérjetartalmát is mérni tudnánk. Erre lehetőséget az együttes PIXE és  $^{14}\text{N}(p,p',\gamma)^{14}\text{N}$  magreakció mérése adhat, az első mérések biztatóak. Cellulózacetát hozdozóban a sávokat már sikerült a nitrogén mérésével azonosítani. Az ehhez a magreakcióhoz szükséges 4 MeV körüli protonenergiát a húsz év alatt megfáradt gyorsítónk már nem tudta szolgáltatni, így egyelőre a Helsinkii Egyetem tandemje sietett segítségünkre. Nagyon reméljük, hogy a sikeres rekonstrukciót követően az itthoni gondolatot itthon meg is tudjuk valósítani.

Szőkefalvi-Nagy Zoltán





A KFKI 5 MeV-ES GYORSÍTÓJÁN FOLYÓ ANALITIKAI MÉRÉSEK  
ÉS IMPLANTÁCIÓS KÍSÉRLETEK

Az első  $\alpha$ -szórás kísérletet Geiger és Marsden hajtotta végre 1911-ben. Céljuk Rutherford atommodelljének igazolása volt. Az  $\alpha$  szórás első publikált analitikai célú felhasználására a Surveyor V program keretében a Holdon került sor 1967-ben. Itt egy  $\alpha$ -forrás szolgáltatta a vizsgáló részecskéket. A módszer elve a következő. Az adott energiával a mintának ütköző és onnan adott irányba szóródó  $\alpha$ -részecskék energiája csak a szóró atom magjának tömegétől és a mintában haladva elszenvedett energiaveszteségétől függ. A szórás intenzitása a minta atomi összetételétől és a szórás hatáskeresztmetszetétől függ. Ez utóbbi néhány MeV energia esetén a Rutherford által levezetett képletnek pontosan megfelel. Ezek alapján a szórt részecskék energiaspektrumát felvéve abból a minta összetétele és annak mélységbeli változása kalibrációs mérések nélkül is pontosan meghatározható. A hatáskeresztmetszet alapján a módszert Rutherford Visszaszórásos Spektroszkópiának (Rutherford Backscattering Spectrometry - RBS) szokás nevezni.

Az RBS módszert hamarosan csatornahatással is kombinálták. Ennek lényege az, hogy a kristálytani tengelyek, síkok mentén szemlélve az egykristályok atomsorok és közöttük található üres térségek - csatornák - szabályos hálózatának tűnnek. A pozitív töltésű ionok e csatornák mentén haladva nem hatnak kölcsön a kristály atommagjaival, így azokról pl. nem is szóródnak vissza. A jelenség alkalmas a kristályok állapotának és a bennük található szennyező atomok elhelyezkedésének vizsgálatára is. (Például az ionok aszerint lépnek kölcsönhatásba egy atommal, hogy az egy adott irányból szemlélve a csatorna belsejében helyezkedik-e el vagy sem).

A KFKI 5 MeV-es gyorsítójának üzembe állítása után néhány évvel (1970 körül) felmerült az a gondolat, hogy az a magfizikai indíttatású kísérleteken kívül kiválóan alkalmazható lenne RBS analitikára illetve

annak csatornahatással kombinált változatára is. Az idea megvalósításából hamarosan egy egész kutatási irányzat nőtt ki: a gyorsító anyagtudományi célú felhasználása.

E módszerek főként a félvezető technológia terén nyertek alkalmazást: Ge, Si, majd újabban vegyület félvezetők adalékolásának nyomonkövetése, az ionimplantációval végzett adalékolás során kialakuló rácshibák hőkezeléssel való eltüntetésének vizsgálata, az adalékatomok rácsbeli elhelyezkedésének megállapítása vagy egyes szilárdtest kémiai reakciók tanulmányozása ma már rutinszerűen folyik. Egyes kísérletekben a csatornahatás méréseket különböző ion-energiákon megismételve a rácshibák típusát is meghatároztuk.

1978-tól kezdődően megindultak a jövő fúziós reaktorai aktív zónájának és e berendezések szerkezeti elemeinek kölcsönhatásával az úgynevezett plazma-fal kölcsönhatással kapcsolatos kísérletek is. Ezek egyrészt az aktív zónát képező fuzionáló deutérium - trícium plazma és az első-fal közötti átmeneti tartományban lezajló anyagtranszportot, másrészt pedig a fúziós reakció során keletkezett nagyenergiás alfa-részecskéknek az első falra gyakorolt hatását vizsgálták. Az előbbi a fúziós reaktort modellező tokamak berendezésekben elhelyezett próbatestekkel, az utóbbit pedig a gyorsítóban előállított  $^4\text{He}^+$  ionokkal végzett nagydózisú ionimplantációs modellkísérletekkel közelítettük meg.

A H és He izotópok kimutatása az egyszerű RBS analitikával nem lehetséges (nincs visszaszórt ion), és a módszer a többi könnyű szennyezőre is meglehetősen érzéketlen. A megoldást a rugalmas szórás során a mintából kilökött atommagok detektálásán alapuló ERD (Elastic Recoil Detection) illetve a protonok visszaszóráson alapuló PES (Proton Elastic Scattering) bevezetése jelentette (H, D, T izotópok illetve He-Si atomok vizsgálhatók velük). A nehéz szennyezők nagyérzékenységű kimutatására a közepes rendszámú ionokkal végzett RBS analitikát is bevezettük. A fenti módszerek alkalmazásával a tokamakok szennyezőtranszportját kellő érzékenységgel vizsgálhattuk. A PES különösen a He implantációs modellkísérleteink során volt hasznos, amikor a beimplantált He atomok mélységbeli eloszlásának nyomonkövetése alapvető volt.

He implantációs kísérleteink során elsősorban a nagymennyiségű nemesgáz felhalmozódás hatására kialakuló felületi deformációkat tanulmányoztuk (hólyagosodás, rétegleválás, hámlás). E modell-kísérleteket Ne és Ar implantáció alkalmazásával továbbfejlesztettük. Egyenletes mélységbeli eloszlás létrehozására egy speciális módszert is kidolgoztunk és azt sikerrel alkalmaztuk. A gyorsító implantációs alkalmazásait az eltemetett  $\text{Si}_3\text{N}_4$  létrehozására irányuló N implantáció tovább bővítette.

A gyorsító analitikai célú felhasználásának lehetőségeit fentiekben már ismertetett kísérleteinkkel még távolról sem merítettük ki. Amennyiben a rugalmas szóródás hatáskeresztmetszetében fellépő rezonanciákat kiaknázzuk, az RBS ill. PES módszer érzékenysége jelentősen megjavítható. Oxigén kimutatására ezt már a hetvenes évektől rutinszerűen alkalmazzuk, s az utóbbi években nitrogén ily módon való kimutatására is sor került.

Az érzékenység növelésének egy másik módja az, amikor a rugalmas szórás helyett a beeső ionok által kiváltott magreakciók termékeit figyeljük meg. Ha a reakciótermékek ionok, a módszer az eddiglektől csak abban különbözik, hogy a magreakció során felszabaduló energiát is figyelembe kell venni. Ez irányú első lépéseinket a tokamakokba injektált Li szennyező próbatestes nyomónkövetésére irányuló kísérleteink során tettük meg. Itt  $(p, \alpha)$  magreakciót használtunk. A közeljövőben  $p$ ,  $^3\text{He}$  és  $d$  által kiváltott további magreakciók analitikai célú felhasználását is tervezzük.

A magreakciók egy speciális esete a  $(p, \gamma)$  reakció. Ekkor a magreakció termékei közül csak a jól meghatározott energiájú  $\gamma$ -részecskéket vizsgáljuk. Ezek energiája az anyagon áthaladva nem változik meg, így itt a mélységbeli eloszlások meghatározása csak egy speciális trükk alkalmazásával lehetséges. A hatáskeresztben éles rezonanciák találhatók, vagyis az illető  $\gamma$ -részecskék kiváltásához az ionnak egy jól meghatározott energiával kell rendelkeznie. A beeső ion energiájának fokozatos növelésével a rezonancia feltétele a fékeződésnek megfelelően egyre nagyobb mélységekben teljesül, s így a vizsgált

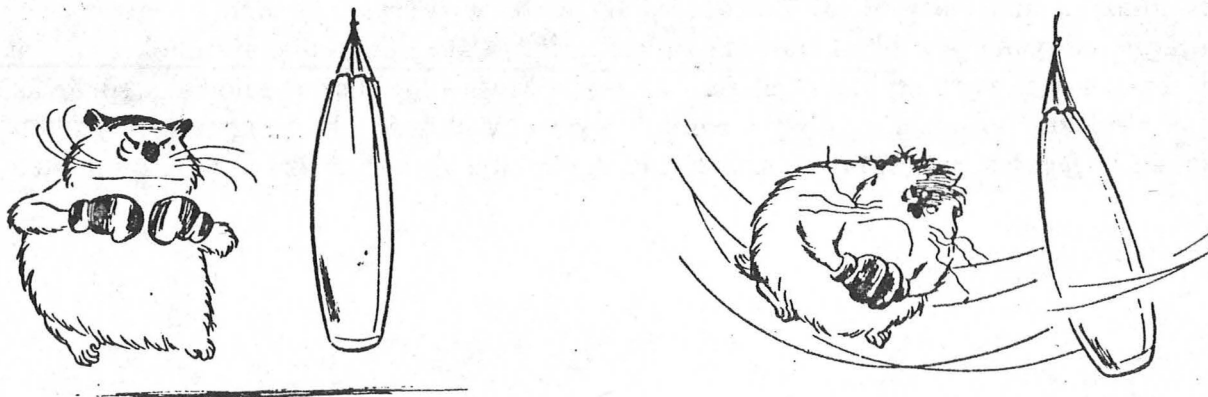
szennyező mélységbeli eloszlásának jó felbontású letapogatása lehetővé válik.

A beeső ionok (elsősorban protonok) kiváltotta karakterisztikus röntgensugarak analitikai célú felhasználásával egy különösen szelektív, egyszersmind jó érzékenységű módszert nyerünk (PIXE). E módszer biofizikai célú felhasználásáról e számban egy másik cikk számol be, ezért erre nem térünk ki. Csupán azt kívánjuk megjegyezni, hogy a PIXE és  $(p, \gamma)$  módszerek csatornahatással kombinált változatait hamarosan meg fogjuk valósítani.

Eszköztárunk fejlődése töretlen. Ma már két üzemképes nagyvákuumú szórókamrával is rendelkezünk. A Nehézion Kaszkádgenerátorral közös szórókamra küszöbönálló üzembelépése után a közepes energiájú ion-implantáció hatásait in-situ tanulmányozhatjuk. Épülőben levő ultravákuum szórókamránk segítségével az analíziseket és implantációkat tisztább körülmények között végezhetjük el, illetve a minta tervszerű helybeni módosításával (hőkezelés, implantáció, reaktív atmoszférával való kölcsönhatás stb.) az in-situ módon elvégezhető vizsgálatok köre jelentősen kibővíthető lesz. Az adatgyűjtést illetve a kapott eredmények értelmezését állandóan fejlődő számítógépes programrendszerünk teszi lehetővé.

A gyorsító anyagtudományi célú felhasználásának eredményességét a témában közölt majd kétszáz rangos publikáción kívül a számos meghívott előadás illetve nemzetközi együttműködés is tanúsítja.

Pászti Ferenc



## A FÚZIÓS KUTATÁSOK KEZDETEI A KFKI-BAN

Közismert, hogy a 70-es évek közepén az RMKI-ban felépítettünk egy kis tokamakot és megkezdődtek a próbálkozások a világszerte folyó fúziós kutatásokba való bekapcsolódásra. Arra azonban talán csak a legidősebbek emlékeznek, hogy jóval régebben volt egy időszak, amikor már eredményesen foglalkoztak KFKI-beli kutatók ezekkel a témákkal. A történetet azonban egy kicsit régebből kell kezdeni.

A 30-as évek óta tudjuk, hogy a Nap energiáját termonukleáris folyamat, a Nap több millió fokos középpontjában végbemenő hidrogén  $\rightarrow$  hélium átalakulás szolgáltatja. Amikor 1952 november 1-jén az amerikaiak felrobbantották az első hidrogénbombát, feltehetően első ízben szabadult fel fúziós energia a Földön. A fizikusokat és mindenkit, aki érdekelt volt az energia-termelésben, izgatta, hogy hogyan lehetne a Napban végbemenő *lassú* energia-felszabadítást is megvalósítani a Földön.

Az akkori nagyhatalmak nagy laboratóriumaiban titokban hozzáláttak ennek a problémának a megoldásához. A titkolódzás oka az volt, hogy sem technikailag, sem személyileg nem vált szét a hidrogén-bomba továbbfejlesztését célzó katonai kutatás a békés célútól. 1955-ben kezdtek megjelenni az első cikkek fúziós kutatásokról, de a *részleteket* sehol sem közölték. Úgyszólván csak a kutatások tényéről tudtunk. Megjelent azonban néhány cikk olyanoktól, akik nem vettek részt a titkos munkákban, nem is tudhatták pontosan, mi zajlik ott, de voltak — támogató vagy ellenző — ötleteik.

És itt kezdődik a hazai történet. Ezeket a cikkeket mi is láttuk. A KFKI Atomfizikai Osztályán és a Műegyetem Elméleti Villamosság-tanszékén — mindkettőnek Simonyi Károly professzor volt a vezetője — néhány ember (Kálmán Gábor, Klopfer Ervin, Pócs Lajos, Schmidt György, Temes Gábor, Uzonyi Miklós) az ő kezdeményezésére elkezdett ezeken a kérdéseken gondolkodni. Az már az első megbeszéléseken kiderült, hogy kísérleti munkába nem tudunk belefogni, olyan horribilisek lennének a költségek. Lehetőség volt viszont elvi, elméleti megfontolásokra.

Az első probléma, amivel foglalkoztunk, az volt, hogy egyáltalán van-e értelme az egésznek. Megjelent ugyanis egy cikk egy ismert elméleti fizikus, H. Thirring tollából, amelyben ő, elemi sugárzási törvényekre hivatkozva, cáfolta, hogy plazmát lassan fel lehetne hevíteni a szükséges sok millió fokos hőmérsékletre.

Alaposan végiggondolva a dolgot, kimutattuk, hogy Thirringnek *ebben az esetben* nincs igaza. Ő a plazma sugárzásának és a — magfizikai módszerekkel könnyen számítható — energia-termelési sebességnek az összevetésével, a Stefan-Boltzmann formulára támaszkodva, azt kapta, hogy túl nagy a kisugárzott energia. Simonyi és Schmidt György arra a felismerésre jutottak, hogy *téves* a Stefan-Boltzmann formula alkalmazása, mert a plazma — a szereplő méretek és sűrűség mellett — *nem fekete sugárzó*. Ugyanis a több millió fokos plazma főleg lágy röntgen-kvantumokat bocsát ki, és ezekre nézve majdnem teljesen átlátszó. Mivel alig abszorbeálódik a sugárzás, kijut a plazmából anélkül, hogy termikus egyensúly alakulna ki. Vagyis nem *felületi*, hanem *térfogati* sugárzásról van szó. Ennek egyensúlyi viszonyait kiszámoltuk különféle

méretekre és sűrűségekre. Az eredmény az volt, hogy ha ezeket a paramétereket megfelelően választjuk meg, a plazma igenis felmelegíthető a "gyulladásí hőmérsékletre". Ez azért volt megnyugtató, mert a mi számunkra bizonyította, hogy a nagy laboratóriumokban (Oak Ridge, Harwell, ...) folyó munkákról szóló hírek nem alaptalanok. Feltételeztük ugyanis, hogy az említett eredményekre ők is rájöttek, (hiszen nem foglalkoznának reménytelen dolgokkal), csak a kutatások szigorúan "classified" volta miatt még csak nem is reagálhatnak Thirring cikkére. Később bebizonyosodott, hogy helyesen következtettünk.

Ha mármost a természet törvényei nem teszik lehetetlenné a megvalósítást, "csak" azt kell kitalálni, *hogyan* kell csinálni.

Megjelent egy utalás arra, hogy "mágneses falat" alkalmaznak a forró plazmának az edénytől való távoltartására. Próbáltunk — elméletben — ilyen mágneses falakat konstruálni. Ma már iskolában tanítják, hogy milyen egy tokamak vagy egy mágneses tükör. De ezek a fogalmak akkor még — nyilvánosan — nem léteztek.

Többféle elgondolásunk volt. Megvizsgáltuk hogyan viselkedne az olyan plazma, amelyet két, egymásban levő toroidális tekercs belsejébe helyezünk. A mágneses falat a két tekercs közti, majdnem-homogén tér alkotná. Azt az ennél egyszerűbb, csak egy toroidális tekercsből álló konfigurációt, amelyen ma a tokamak típusu berendezések alapulnak, nem vizsgáltuk, mert túl bonyolultnak találtuk az olyan elrendezést, ahol maga a plazma is mágneses térben van. De már ez a — mechanikailag ugyan bonyolultabb, de fogalmilag egyszerűbb — modell is jól mutatta a fellépő problémák lényegét. Azt tudniillik, hogy a plazmát a mágneses tér nem 100 %-ban tartja vissza, hanem egy része behatol a "falba". Emiatt a falban áram folyik, annak visszahatása egyrészt a mechanikus konstrukcióval szemben támaszt igen kemény követelményeket, másrészt megváltoztatja magát a bezáró mágneses teret. Ennek kapcsán rámutattunk, hogy csak a magnetohidrodinamika segítségével hívásával lehet az ilyen kérdéseket eredményesen megoldani.

E "falra" alapozva született egy fúziós reaktor modell is, amelyen tanulmányozni lehetett a berendezés megalkotása érdekében megoldandó problémákat. Az adódott ki, hogy 0.1 T erősségű mágneses teret alkalmazva falként, egy, mintegy 1 m kis sugarú, 2 m nagy sugarú tóruszban  $5 \times 10^{-8} \text{ g/cm}^3$  sűrűségű plazma tárolható  $10^7$  K hőmérsékleten, és óránként 100 g D-T keveréket betáplálva 1500 MW teljesítményű reaktort kapunk. Ezeket az adatokat pl. az INTOR, ITER vagy más demonstrációs fúziós reaktor terveivel összehasonlítva láthatjuk, hogy ezek az értékek ma is helytállóak!

Egy másik megvizsgált fal-lehetőség az *elektrosztatikus tér felhasználása* volt. Azt vizsgáltuk, hogy egy (egyszerűség kedvéért egydimenziósnak feltételezett) potenciálgödörbe mennyi töltést lehet beletenni, anélkül, hogy tere lerontaná a külső teret. Váltakozva egymás mellé helyezett pozitív és negatív potenciálgödöröket is megvizsgáltunk, abban a reményben, hogy a kétféle töltés egymást semlegesítve megnöveli a bezárható ionok mennyiségét. Hiába. Ez esetben csak a módszer használhatatlanságát sikerült bizonyítani. Több nagyságrenddel kisebb a bezárható plazma sűrűsége a szűkségesnél.

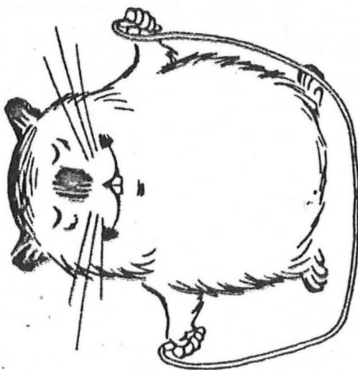
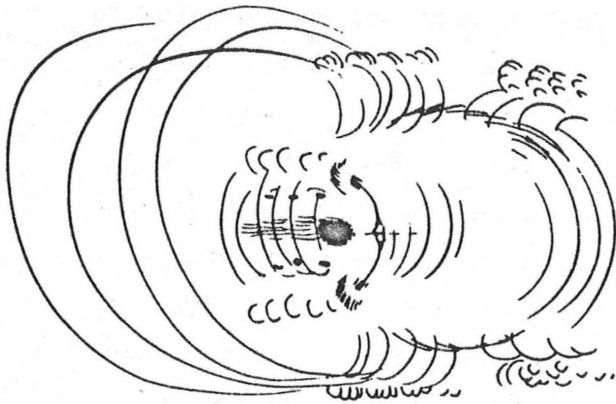
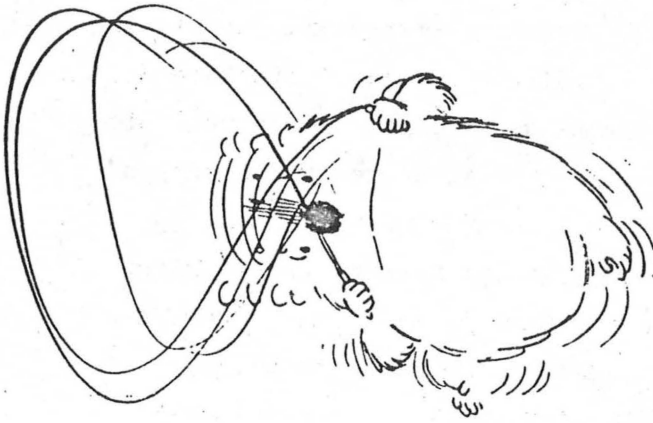
Viszont sikerült megmutatnunk, hogy *inhomogén mágneses tér* alkalmazása reményt keltő. Azt vizsgáltuk meg, hogy egy olyan tekercsben, ahol a végéhez közeledve a térerősség nő, a részecskék hány százaléka jut túl egy adott térerősségű helyen. Megmutattuk hogy a tekercs középpontjából egy, a tengelyhez képest adott szögnél *kisebb* szög alatt induló részecskék *kijutnak* a tekercsből, a többi *visszaverődik*. A szög függ a részecske energiájától. A tekercs-végi térerősség elég nagyvá tételével a centrális térerősséghez képest, tetszés szerinti kicsivé tehető a megszökő részek száma. Aki ismeri a mai modern mágneses tükrök elméletét, az látja, hogy itt tulajdonképpen a *mirror ratio* és a *pitch angle* fogalmát vezettük be, amely két fogalom ma az alapja e berendezések elméleti leírásának. Újra hangsúlyozzuk, hogy e fogalmakat akkor már használták a "classified" laboratóriumokban, lényegében az az elméleti leírás is megvolt, amit mi megadtunk, de *nem publikálták*, csak jóval később.

Még röviden megemlíjtük a további témákat. Felvetődött a kérdés, hogy mi történik, ha olyan plazmának ad át energiát egy bejövő részecske, amelyet már megzavart egy előzőleg érkezett ion. Azt vizsgáltuk, hogyan változik ennek a hatására az effektív ütközési hatáskeresztmetszet, illetve a szabad úthossz. Ezzel, mint az jóval később kiderült, a fúziós plazma-kutatások egyik legrázósabb problémájába, a plazmában történő diffúzió, vagy általánosabban transzport-folyamatok kérdésébe botlottunk bele. Csak emlékeztetni szeretnék arra, hogy ez a forró plazma fizikájának az a fejezete, amely még ma sincs elméletileg megnyugtatóan rendezve. Ehhez kapcsolódott az a munka is, amely az ekvipartíció elv érvényesülését vizsgálta extrém körülmények között.

A KFKI-ban ez időben született eredmények nem ismeretesek a nemzetközi irodalomban. Ennek több oka van. Az egyik az, hogy az akkori körülmények között — 1957 legeleje volt — szóba sem jöhetett nyugati publikálás. A világon szinte teljesen ismeretlen és olvasatlan Periodica Politechnikában, a budapesti Műegyetem akkor induló lapjának első számában jelent csak meg idegen nyelvű cikk ezekről. A másik ok, hogy Kurcsatov 1956-os Harwell-i látogatása, majd az 1958-as genfi atomenergia-konferencia után a fúziós kutatások egy része — a "mágneses fúziós kísérletek" — lekerültek a "szigorúan titkos" listáról és hirtelen óriási mennyiségben megjelentek az addig vizsztatartott publikációk. Ezekben benne volt minden, amit mi 57 elején publikáltunk, legfeljebb kissé más fogalmazásban. És azt tudták világszerte, hogy ezek régebben született eredmények voltak.

Van egy harmadik ok is, az, hogy Simonyi Károlyt hamarosan "eltanácsolták" a KFKI-ból, Kálmán Gábor, Schmidt György, Temes Gábor Nyugatra távozott, a vezető nélkül maradt csoport megmaradt tagjai más munkát kaptak. A szépen indult kutatás abbamaradt. Nem következtek további cikkek, amelyek felhívták volna a figyelmet a kezdetekre. E kis írásnak nem siránkozás a célja az észre nem vétel miatt. De Simonyi Károly születésnapján legalább a magunk számára tanulságos annak a megmutatása, hogy mi minden történt a KFKI-ban az ő ittléte alatt s irányításával.

Pócs Lajos





A "NAGY ÁLOM",  
a kvark anyag előállítása \*

Az ötvenes - hatvanas években már és még távol állt egymástól a magfizika és a részecskefizika. Alacsony energiákon, a millió elektronvoltok tartományában vizsgáltuk a mag szerkezetét, próbáltuk leírni az alacsony bombázó energiával létrehozott magreakciókat. Később egyre érdekesebb kérdéssé vált, hogyan viselkedik az atommag, ha egyre nagyobb energiákra, egyre erősebben gerjesztjük. Kialakult a nehézion fizika, felgyorsított atommagokkal atommagokat bombáztunk. Az új kérdések megválaszolásába a fizika majd minden ága bekapcsolódott, a kvantummechanika mellett hidrodinamikai, termodinamikai, statisztikus fizikai és más ismereteket is fel kellett használnunk. Egyre magasabbra tolódott az a határ, ahol az atommag szinte átlátszóvá válna a bombázó részecske számára. Időközben ismertté vált, hogy az atommagok alkotórészei, a protonok és a neutronok kvarkokból épülnek fel, a kvarkok közti kölcsönhatást gluonok közvetítik. Ezt is figyelembe kellett venni az atommag leírásánál. Egyre nagyobb energiákon ütköztették a részecskéket, de a nukleonokat nem sikerült részekre bontani, a kvarkokat nem sikerült mindeddig kiszabadítani börtönükből. A részecskék ütközésénél sokféle folyamat mehet végbe. Munkatársammal olyan számításokat végeztem, amelyek megadják, hogy az atommag - atommag reakciókban fellépett hadron-hadron ütközésekben milyen részecskék keletkeznek, milyen arányban és milyen ezeknek a folyamatoknak az időbeli lefolyása.

- \*Részletek:

Jéki László: Beszélgetés Zimányi József akadémikussal  
Természet Világa 122, 8, 356

Az univerzum történetének ma általánosan elfogadott modellje szerint, az ősrobbanás (big bang) óta az univerzum tágul és hűl. A világegyetem történetének egy nagyon korai pillanatában még olyanok voltak a sűrűségi és energetikai viszonyok, hogy kvark anyag is létezett (létezhett), a kvarkok még nem kötődtek kettesével, hármasával nehezebb részecskékké. Ez a kvark anyag teljesen más volt, mint a mai, atommagokból, atomokból felépülő anyagunk. Ezt az anyagot szeretnénk előállítani most laboratóriumban úgy, hogy igen nagy energiára felgyorsított atommagot ütköztetünk egy másik atommaggal. Korábban említettem hadron kémiai számításainkat, ugyanazt a feladatot a kvark anyagra is megkíséreltük megoldani. Modelleztük a nehézion reakciókban keletkező kvark anyag időbeli változását és arra a megállapításra jutottunk, hogy sok un. ritka kvarknak kellett keletkeznie. (A ritka szó itt köznapi jelentésétől eltérően egy kvark típust jelöl, neve az angol eredetiben: strange. ) Egy "gáz" halmazállapotú kvark anyagban kizárási elv tiltja, hogy azonos típusú részecskék azonos energiaállapotban legyenek. Egy bizonyos energiánál már kedvezőbb lehet, ha egy magas energiájú könnyű kvark nehezebb, de alacsonyabb energia állapotban levő kvarkká alakul át.

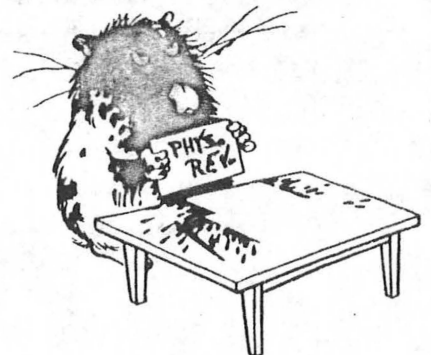
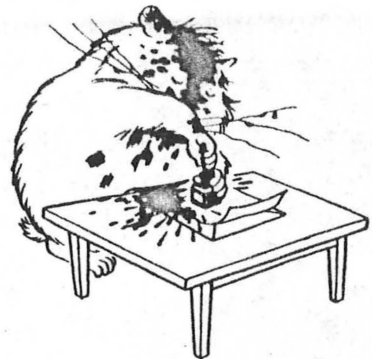
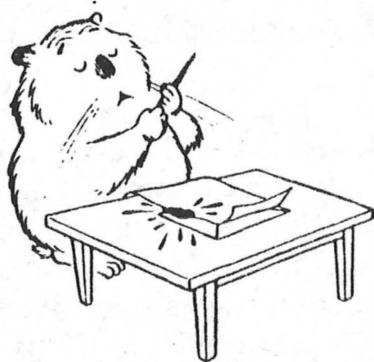
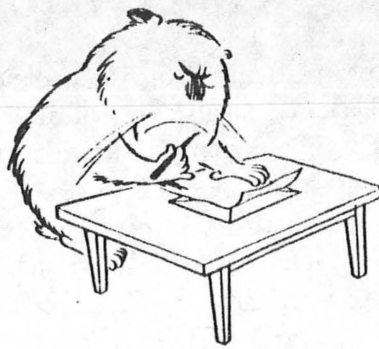
Számításaink szerint a kvark plazma bomlását a hadronikus folyamatokkal, pl. proton proton ütközésekkel összehasonlítva a keletkezett K és  $\pi$  mezonok aránya alapján dönthető el, sikerült-e kvark anyagot előállítani. A K mezon többlet a kvark fázis jele, szignatúrája lehet.

A CERN-ben most nemzetközi eszmecsere sorozatán azon törjük a fejünket, jó lenne a tervezett LHC gyorsítóban nem csak proton - proton ütközéseket vizsgálni, hanem nehéz ionok közt lezajló folyamatokat is. Technikailag megoldható az ólom atommagok gyorsítása is, talán ólom - ólom ütközésekben sikerülne kvark anyagot előállítani. Az elméleti fizikusok kiszámolják a várható folyamatokat, a kísérletiek pedig megvizsgálják, hogyan lesznek

ezek megfigyelhetőek. Ez az előkészítés elengedhetetlen ahhoz, hogy majd dönteni lehessen a gyorsító nehézionfizikai célú felhasználásáról.

*Ne vedd rossz néven, ha szavaid Victor Weisskopf egy gyakran idézett mondását juttatják eszembe. Weisskopf a kutatómunkát Kolumbusz utazásához hasonlította. A részecske gyorsítókkal foglalkozó fizikusok és mérnökök építik a hajókat. A kísérleti fizikusok feszítik ki a vitorlákat és ők fedezik fel Amerikát. Az elméleti fizikusok azok, akik Madridban tartózkodva megjósolják, hogy a hajó Indiában fog partot érni! S azt már én teszem hozzá, hogy manapság már annyi elméleti fizikus ül Madridban és annyi félet jósolnak, hogy szinte biztosra vehető, egyikük előrejelzése beválik majd. Csak azt nem tudjuk ma, ki lesz a szerencsés.*

Éppen attól szép és izgalmas a kutatómunka, hogy néha váratlan jelenségekre bukkanunk, ezeket meg kell érteni, be kell illeszteni eddigi ismereteink rendszerébe. Néha egy felfedezés szétfeszíti az egész addigi ismeret rendszert, de ilyen pillanatok csak ritkán adódnak a tudomány történetében.



JOZSÓ CIKKET ÍR...

## A MAGFIZIKA JÖVŐJE

A lassan magunk mögött hagyott XX. század természettudományának a magfizika az egyik legjelentősebb, nem egyszer legizgalmasabb területe volt. Ezek a kutatások, amelyek átíveltek úgyszólván az egész századon, hosszú ideig a természettudományos ismeretszerzés frontvonalát jelentették — az atomenergia felszabadítása kapcsán különös reflektorfénybe is kerültek —, de később fokozatosan elvesztették vezető helyüket és átadták azt az elemi részek kutatásának. Ez persze nem jelentette a magfizikai kutatások leállítását, hiszen az atommagok tulajdonságainak vizsgálata, nívórendszerük feltérképezése, értelmezése olyan feladat, amelynek elvégzése nem csak magfizikai ismereteink bővítése, hanem különböző alkalmazási feladatok szempontjából is alapvető jelentőséggel bír.

Mégis, nem ezek a kutatások voltak azok, amelyek az utóbbi években az érdeklődést ismét a magfizika felé fordították. Kiderült ugyanis, hogy az úgynevezett elemi részek legtöbbször, — így az atommagokat alkotó nukleonok is —, egyáltalán nem elemi, hanem belső struktúrával, kvark szerkezettel rendelkezik, ami rögtön felvetette a kérdést, hogy mindez mennyiben befolyásolja az atommagok felépítését, vagy viselkedésüket kölcsönhatásaik során. Ennek az alapvető problémának a tisztázása mind elméleti, mind kísérleti téren komoly erőfeszítést igényel és a magkutatás számára új utakat jelöl ki, most már a relativisztikus energiák tartományában. Újabb izgalmasabb kérdések tanulmányozása válik lehetővé, ha ezeken a nagy energiákon egész atommagok ütköznek egymásba, hiszen ilyenkor olyan magsűrűségek lépnek fel, amelyek csak egyes csillagokban, vagy az ősrobbanás pillanatában valósultak meg. Ezek az ütközések a maganyag eddig ismeretlen állapotának kialakulásához, kvark-gluon plazma létrejöttéhez vezethetnek. A modern magfizikai kutatásoknak ezek az új irányzatai napjainkban a legdinamikusabban fejlődő területek közé tartoznak, és a jelek szerint az ezredforduló táján ezek fogják képezni a magfizikai kutatások gerincét.

Ami a hazai és ezen belül a KFKI-ban folyó magfizikai kutatásokat illeti, azok fejlődése sok tekintetben követte a világban megfigyelhető tendenciákat. Az ötvenes évek látványos felfutása után a tényleges magfizikai kutatások terén bekövetkezett egy visszaesés, a hangsúlyt inkább az alkalmazott kutatások kapták. Ugyanakkor szerény méretekben már a hetvenes években megindultak nagyenergiájú magfizikai kutatások, amelyek ma már egyre határozottabban mozdulnak el a relativisztikus nehézion fizika irányába. Napjainkban mind sürgetőbben merül fel a "hogyan tovább" kérdése és az igény az elkövetkező évek koncepciójának kidolgozására. Ezt a kérdést tűzte napirendre az

RMKI tudományos tanácsa egyik legutolsó ülésén, az alábbiakban ennek vitaindító előadását ismertetjük.

Az Europhysics News egyik múlt évi számában megjelent egy cikk, amelyben I.Sick, a baseli egyetem professzora több ország (Franciaország, NSzK, Nagybritannia, Hollandia, Olaszország) tervei alapján összefoglalja az Európában folyó magfizikai kutatások fejlődésének tendenciáit az elkövetkező évekre. E szerint a kutatások várhatóan négy fő irány köré fognak csoportosulni:

a) Magszerkezeti kutatások. Ez a klasszikus kutatási terület középtávon (5-10 év) még jelentős érdeklődésre tarthat számot. Érdekes eredmények várhatók különösen az extrém nagy impulzusnyomatékú (60 h) szuperdeformált magok, vagy a stabilitási vonaltól távoli izotópok vizsgálata terén.

b) A maganyag makroszkopikus tulajdonságai. Fokozódik az érdeklődés a mag-mag ütközések dinamikája, a fragmentáció, a maganyag állapotegyenletének vizsgálata iránt. A néhányszor 10 MeV/u energiatartományban végzett vizsgálatok rövid távon tarthatnak számot érdeklődésre, hosszabb távon a kutatások súlypontja a nagyobb energiák (1 GeV/u) felé tőlódik el.

c) A maganyag extrém körülmények között. Várhatóan ez lesz a jövő egyik fő kutatási iránya, ami az extrém nagy magsűrűségek és hőmérsékletek tartományában a kvark-gluon fázisátmenet tanulmányozására irányul. A kutatási program várhatóan az új évszázad első évtizedébe is mélyen bele fog nyúlni.

d) Az atommag nukleon alatti szabadságfokai. Ebbe a témakörbe tartozik a kvarkok impulzuseloszlásának (EMC effektus), a nukleon-rezonanciáknak, vagy a mezonáramoknak a vizsgálata az atommagok belsejében. Ez a kutatási irány közepes, esetleg hosszú távú fejlődésre számíthat.

A felsorolt kutatási programok megvalósításához jelentős technikai bázisra, elsősorban nagyteljesítményű gyorsítóberendezésekre van szükség. Valójában ezek kifejlesztése és a létrehozásukhoz, fenntartásukhoz szükséges anyagi eszközök biztosítása képezi egy-egy program sikeres elvégzésének legfontosabb előfeltételét.

A magszerkezeti kutatások esetében a kísérleti felszerelés nem haladja meg egy nemzeti laboratórium kereteit, így a vizsgált országok

mindegyikében található egy-egy e célra orientált kutatóhely. Franciaországban az 50 MeV/u energiájú nehézion nyalábot előállító GANIL gyorsító, az NSzK-ban a GSI nehézion szinkrotronja és tárológyűrűje (UNILAC/SIS/ESR), Nagybritanniában az ISIS spallációs neutronforrás és az EUROBALL multidetektoros gamma-spektrométer, Hollandiában az AGOR nehézion- és az AMPS elektrongyorsító áll a mag szerkezeti kutatások rendelkezésére. Olaszországban ezeket a kutatásokat nehézion gyorsítók mellett kívánják végezni.

A maganyag makroszkopikus tulajdonságainak vizsgálatához jelenleg az SIS nehézion szinkrotron biztosítja a legkorszerűbb technikai lehetőségeket. Ez az 1 GeV/u energiatarományban működő berendezés a GSI-ben található magas technikai színvonalú eszközökkel együtt regionális centrumként szerepel és több európai ország számára is fontos kutatási bázisként szolgálnak. Így a németen kívül a francia, holland és olasz középtávú kutatási tervekben is komoly súlyt képviselnek az SIS-ben végzendő maganyag kutatások.

Az extrém körülmények között lévő maganyag kutatása relativisztikus nehézionokkal már napjainkban is folyik, 200 GeV/u körüli energiákon a CERN SPS szinkrotronjánál. Az elkövetkező években itt a nagy tömeggel bíró ólomionok gyorsítása a fő célkitűzés. Európán kívül az RHIC ütközőnyalábos gyorsító (collider) épül meg néhány éven belül Brookhavenben, hasonló célból. A CERN gyorsítója által kínált lehetőségeket a felsorolt országok közül a franciák, a németek és a hollandok építették be hosszútávú terveikbe, de a franciák a RHIC iránt is komoly érdeklődést mutatnak. A CERN-ben végzendő kutatások számára új perspektívákat kínál a tervezett LHC hadron collider, ami az évszázad végén a TeV/u energiatarományt fogja megnyitni a relativisztikus nehézion fizika számára.

A mag nukleon alatti szabadságfokainak tanulmányozására több lehetőség is kínálkozik, mint például a Vancouverben tervezett nagy intenzitású szinkrotron, a KAON, a Jülichben épülő COSY, vagy a CERN antiproton gyorsítója, a LEAR. A jövő szempontjából legígéretesebbnek a nagyenergiájú elektronyalábok alkalmazása látszik. Az ehhez szükséges 10 GeV-es, nagy intenzitású gyorsító megépítése széleskörű európai összefogást igényel, amire vonatkozóan a franciák, a németek, az olaszok és a hollandok is kifejezték érdeklődésüket. Addig is, amíg ez elkészül, a Virginiában épülő 5 GeV-es CEBAF-nál lehet végezni kutatásokat. Ezzel a lehetőséggel elsősorban a németek és az olaszok kívánnak élni.

A felsorolt témák és kutatási tervek alapján a magfizika területén néhány jól kitapintható tendenciát érzékelhetünk. Az egyik szembevetendő tény, hogy a mag szerkezeti kutatások mellett egyre határozot-

tabban kerül az érdeklődés középpontjába az atommagnak mint hadronanyagának a viselkedése, ami a következő években a relativisztikus nehezion kutatásokat helyezi előtérbe .

Ezzel kapcsolatos a magfizika várható fejlődésének egy másik jellegzetessége, nevezetesen az a konvergencia, ami a magfizika és a részecskefizika között egyre erőteljesebben alakul ki. Ez megnyílvánul a tudományos tematika közeledésében is, de még inkább a két területen alkalmazott kísérleti metodika hasonlóságában, nem egyszer azonosságában, ami különösen a nagyenergiájú kísérletek esetében szembetűnő.

Végül harmadik tendenciaként említhetjük meg a nemzetközi együttműködések egyre erősödő szerepét. Ez a nagy berendezések mellett végzett kutatások jellegéből természetesen is adódik, hiszen ezek volumenüknél fogva is túlnőnek a nemzeti kereteken, ugyanakkor tanúi vagyunk az EPS magfizikai divíziója, vagy az EK kertében működő NuPECC (Nuclear Physics European Coordination Committee) munkájában egyaránt megnyílvánuló tudatos szervezésnek is.

Mindebből arra lehet következtetni, hogy az ezredforduló idején a magfizikára a szoros nemzetközi együttműködésben, súllyal a hadronanyag tulajdonságainak tanulmányozására irányuló kutatások lesznek jellemzők, amelyeket a részecskefizikához hasonló módszerekkel, nem egyszer azokkal szoros kapcsolatban fognak művelni.

Nyilvánvaló, hogy az RMKI-ban végzendő magfizikai kutatások távlati terveinek kidolgozásánál messzemenően figyelembe kell venni a világban jelentkező tendenciákat, de nem szabad elszakadni az itthon rendelkezésre álló kutatási bázistól sem. Jelenleg az RMKI-ban három kutatócsoport folytat kísérleti magfizikai kutatást és ehhez járul még egy igen magas színvonalon végzett elméleti munka. A kísérleti csoportok tevékenységét, távlati elképzeléseiket az alábbiakban foglalhatjuk össze:

- Magreakciók vizsgálata. A háromtagú csoport az ATOMKI ciklotronjával, velük együttműködésben tanulmányozza jelenleg az alacsony energiájú direkt reakciók törvényszerűségeit, elsősorban He-3 ionok kölcsönhatásainak vizsgálatával. Ezt a kutatási témát egy-két éven belül befejezik és a CERN-ben folyó nehézion kutatásokban fognak részt venni, amelyek célja a kvark-gluon állapot létrehozása illetve tanulmányozása.

- Nagyenergiájú magfizika. A kutatócsoport hat főből áll. Jelenleg kvázi-szabad  $d+p$  kölcsönhatások vizsgálatával foglalkoznak 2 GeV energián (Saclay), valamint közepes energiájú nehézionok reakcióit



tanulmányozzák (Michigan). E mellett metodikai fejlesztésként az SIS-nél (Darmstadt) felállítandó driftkamra építésében vesznek részt, így kapcsolódnak be az ott folyó nehézion kutatásokba, amelyek célja a maganyag állapotegyenletének vizsgálata. Távolatilag ez a csoport is a CERN nehézion programjához kíván csatlakozni.

- Antiproton kísérletek. Az antiproton gravitációs tulajdonságainak tanulmányozására több éves kutatási program indult meg a CERN-ben működő antiproton gyorsítónál (LEAR). Ebben a kiterjedt nemzetközi együttműködés keretében végzett munkában vesz részt az RMKI két kutatója.

Fontos megemlíteni, hogy mindhárom csoport számára az elkövetkező néhány évben biztosítottak az anyagi feltételek. Rendelkeznek a legszükségesebb műszerekkel és számítástechnikai bázissal, működési költségeik fedezésére pedig OTKA támogatás áll rendelkezésükre. Kutatási terveikből jól kirajzolódik a távlati fejlődés képe is: a 90-es évek második felében a kutatásoknak súlyponttal egy szűkebb témakörre, a relativisztikus nehézion kutatásokra való koncentrálása lesz a jellemző, mindenek előtt a CERN-nel való együttműködésre alapozva. Ez a koncepció a jelenleginél sokkal ütőképesebb kutatási bázist ígér, amely az egyre jelentősebbé váló nemzetközi munkamegosztásba egyenrangú félként tud bekapcsolódni. E célkitűzés megvalósítása érdekében néhány lépés megtételére már rövid távon is szükség van.

A leglényegesebb feltétel, egy képzett, kooperatív kutatógárda már ma is létezik, ennek némi bővítése látszik célszerűnek, főleg vendégkutatók, doktorandusok fogadásával;

rendkívül fontos a nemzetközi együttműködések szerepe. Ezeket tovább kell erősíteni, mindenek előtt a nehézion kutatások területén a GSI-vel és a CERN-nel;

tovább kell bővíteni a már meglevő szerény kísérleti bázist, hogy az alkalmas legyen komolyabb fejlesztési feladatok elvégzésére, valamint hatékony adatfeldolgozásra;

szoros kapcsolatot kell kialakítani az egyetemi oktatással, elsősorban olyan hallgatói laboratóriumok létrehozásával, ahol a különböző nukleáris méréstechnikai módszerek magas szintű elsajátítására nyílik lehetőség.

\*

Láttuk, hogy az RMKI-ban a tervezett magfizikai kutatóbázis a

már meglevő alapok fokozatos továbbfejlesztésével hozható létre, de a jelennel való szoros kapcsolat ellenére azért a jövőben mindenképpen számítani kell bizonyos szemléletbeli változásokra is. Ilyen például annak a köztudatban elterjedt felfogásnak a revíziója, ami magfizika címszó alatt összemosná a tényleges magfizikai kutatásokat és a magfizikai módszerek alkalmazását. Ez hosszú időn át a magfizika "népgazdasági hasznosságát" volt hivatva bizonyítani, de a jövő fejlődése szempontjából célszerűbbnek látszik, ha a kutatási irányokat fogalmilag egyértelműen határozzuk meg.

Egy másik szemléletbeli változás a magfizikus kutatókat érinti. Az a tény ugyanis, hogy a tervezett kutatások bonyolult felépítésű, nagy mérőberendezésekkel folynak, a kollektív munka jelentőségét húzza alá, ez a körülmény viszont a kutatók kooperatív készségét értékeli fel, ugyanakkor a megszokottnál magasabb mércét állít a kiugró egyéni teljesítményekkel szemben. Végül számítani lehet arra, hogy a CERN-el való kapcsolatok kialakulásával párhuzamosan egyre szorosabbá fog válni az együttműködés az RMKI-ban folyó magfizikai és részecskefizikai kutatások között.

Erő János

TOVÁBBI SIKEREKET!



35. évf. 9. szám 1991.

Kiadja a Központi Fizikai Kutató Intézet

Felelős kiadó: Schiller Róbert

Felelős szerkesztő: Erő János

Képszerkesztő: Palla Gabriella

Példányszám: 650      törzsszám: 91-173

Készült a KFKI Nyomdaüzemében

Budapest, 1991. október