

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Fizikai Szemle az Akadémia által 1862-ben elindított Matematikai és Természettudományi Értesítő és az 1891-ben Eötvös Loránd által alapított Matematikai és Physikai Lapok utóda és folytatása

LIV. évfolyam

8. szám

2004. augusztus

AZ ATOMMAGFIZIKA FEJLŐDÉSI IRÁNYAI

Fényes Tibor
MTA Atommagkutató Intézete

A magfizika az elmúlt évszázadban hatalmas belső fejlődésen ment át és számos más tudományágat is megtermékenyített. A fejlődés a napjainkban is folytatódik. Az 1. ábra áttekintést ad a főbb fejlődési irányokról.

A következőkben röviden áttekintjük az utóbbi negyedszázad magfizikai kutatásainak, valamint a középtávú (~10 éves) fejlesztési terveinek főbb irányait, különös tekintettel az európai helyzetre. Először a kísérleti berendezések fejlődését, majd a hideg magok, a stabilitási sáv-tól távol eső atommagok, nagyspinű állapotok, forró atommagok és a hipermagok vizsgálatát. A kvantumkromodinamika és az alapvető kölcsönhatások vizsgálata hagyományosan inkább a részecskefizika részei, így ezeknél csak a fejlesztések alapvető irányait tárgyaljuk röviden. A magfizika alkalmazásai közül csak a nukleáris asztrofizikával foglalkozunk. Más határterületek és a különböző alkalmazások annyira sokrétűek, hogy ezek ismertetése messze túlnő a jelen dolgozat keretein.

A magfizikai kutatások jelen helyzetével és fejlődési irányjaival kapcsolatban több átfogó tanulmány készült, ezekről áttekintés található az irodalomjegyzékben.

Kísérleti berendezések

Stabil atommagokat gyorsító berendezések

Európában számos olyan gyorsító működik, amelyik kiváló minőségű stabil izotópnyalábot szolgáltat, gyakorlatilag minden céltárgyra a Coulomb-fal feletti energiáig. A legnagyobb gyorsító, a CERN-i (Genf, Svájc) szuper protonszinkrotron (SPS) protonokat 450 GeV-ig, O-, S-, Pb-ionokat 200 GeV/u (u a tömegegység) energiáig tud gyorsítani. Ezenkívül számos más nagyberendezés van, amely könnyű és nehéz ionok igen nagy választékát, igen széles energiatartományban képes gyorsítani. A gyorsításhoz gyakran több különféle gyorsítót használnak kaszkád üzemmódban. Rendelkezésre állnak polarizált proton- és deuteronnyalábok (pl. az AGOR gyorsítóban Groningenben). Kitűnő nyalábminőséget sikerült

elérni számos helyen elektronnyalábos hűtéssel. Építettek tárológyűrűket, amelyekben a gyorsított ionok gyűjthetők és hosszabb ideig tárolhatók (pl. Jülichben, Darmstadtban, Uppsalában). A Függelék rövid áttekintést nyújt a nagyobb európai iongyorsító berendezésekről.

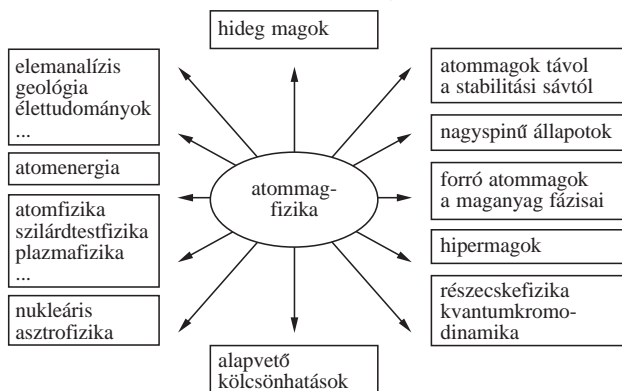
Az „Európai Tudomány Alapítvány” (*European Science Foundation*) NuPECC (*Nuclear Physics European Collaboration Committee*) kézikönyvében részletes információ található [Galés és mtsai 1998] a tagországokban működő más gyorsító laboratóriumokról is. Az információt néhány évenként felfrissítik. Számos gyorsító üzemel más földrészekeken. Általában a magfizikai laboratóriumokról részletes ismertetés található például a *Nuclear Physics News International* folyóirat folyamatosan megjelenő számaiban.

A magfizika területén jelenleg jelentős fejlesztőmunka folyik számos európai kutatóintézetben. Néhány, építés alatt álló nagyobb gyorsító a következő:

CERN, Genf, Svájc. LHC (*Large Hadron Collider*). Nyalábok: proton 14 TeV, Pb–Pb ütköztetés 5,5 TeV/u tömegközépponti energiánál. Várható beindulása 2007 körül.

GSI, Darmstadt, Németország. SIS 100/200 szupravezető szinkrotronok, CR tárológyűrű, NESR új kísérleti

1. ábra. Áttekintés a magfizika fejlődési irányairól.



tárológyűrű, szuper FRS fragmensszeparátor, HERS proton lineáris gyorsító és nagyenergiájú tárológyűrű. Nyalábok: 1,5 GeV/u $^{238}\text{U}^{28+}$, 30 GeV proton, másodlagos nyalábok: nehézionok 1,5–2 GeV/u, antiprotonok 3–30 GeV, radioaktív nyalábok, elektron–A ütköző, tárolt és hűtött antiprotonnyaláb. Beindulás: 2010 után.

GANIL, Caen, Franciaország. SPIRAL2 szupravezető lineáris gyorsító körülbelül 40 MV gyorsító potenciállal. Nyalábok: deuteron és nehézionok 14,5 MeV/u-ig. Radioaktív nyalábok utángyorsítása a CIME ciklotronban 3–10 MeV/u-ig, az $A = 100$ –150 tömegtartományban. 2008 körül készül el.

LNL, Legnaro, Olaszország. SPES (Study and Production of Exotic Nuclear Species). Szupravezető lineáris gyorsító elsődleges 100 MeV-es protonnyalábját ^9Be céltárgyra ejtve neutronokat nyernek, amivel hasadási termékeket állítanak elő. Ezeket ionizálják és 15 MeV/u energiára gyorsítják egy ALPI nevű szupravezető lineáris gyorsítóval. Továbbfejlesztés öt éven belül.

Tanulmány készült egy nagyintenzitású spallációs neutronforrás Európában történő létrehozására is. (A telepítési hely jelenleg nincs lerögzítve.)

Az USA-ban jelentős a Ritkaizotóp-gyorsító (*Rare Isotope Accelerator, RIA*), Japánban a Hadrongyár (*Japan Hadron Facility, JHF*) fejlesztés, amelyek mellett új generációs, on-line izotópszeparátorok is épülnek.

Radioaktív nyalábokat szolgáltató berendezések

Az 1980-as évek végétől több, radioaktív nyalábot szolgáltató gyorsító üzembe lépett.

Az *ISOL (isotope separator on-line) berendezések* főleg stabil nyalábokat szolgáltató gyorsítók, illetve atommagreaktorok mellett működnek. A céltárgyban előállított radioaktív izotópokat elgőzölögtetik és egy elektromágneses izotóp szeparátor ionforrásába viszik. A szeparált radioaktív izotópok fel is gyorsíthatók.

Ilyen berendezések Európában a következők:

- Ciklotron plusz utángyorsító ciklotron kombinációja: CRC, Louvain-la-Neuve, Belgium. SPIRAL berendezés, GANIL, Caen, Franciaország.
- Proton szinkrotron plusz lineáris utángyorsító kombinációja: REX-ISOLDE, CERN, Genf, Svájc.
- Ciklotron plusz tandem utángyorsító: EXCYT berendezés, LNS, Catania, Olaszország.
- Reaktor plusz lineáris utángyorsító: OSIRIS berendezés, Studsvik, Svédország.

Hasonló berendezések működnek Észak-Amerikában is (Vancouver, Kanada; Oak Ridge és Argonne, USA).

Az ISOL módszerek elsősorban hosszabb felezési idejű izotópok ($>0,1$ s) esetén használhatók hatékonyan.

Igen jelentős az EURISOL fejlesztési terv (Darmstadt), a berendezés 2013 után lesz kész. Valamivel hamarabb, 2008 körül várható a nagy intenzitású és energiájú ISOLDE (HIE-ISOLDE) berendezés beindulása a CERN-ben.

Radioaktív nyalábokat lehet előállítani például nehézion-gyorsítóknál a céltárgyból kirepülő termékek „röptében való szeparálásával”.

Ilyen fragmentációs berendezések üzemelnek a következő gyorsítóknál:

- UNILAC lineáris gyorsító plusz SIS szinkrotron plusz FRS fragmensszeparátor, GSI, Darmstadt, Németország.
- Két csatolt $K = 380$ ciklotron plusz fragmensgyűjtő és -azonosító berendezés, SISSI, LISE, GANIL, Caen, Franciaország.

– U400 plusz U400M csatolt nehézion-ciklotronok plusz ACCULINNA és COMBAS fragmensszeparátorok, EAI, Dubna, Oroszország.

Hasonló berendezések működnek az USA-ban (NSCL, East Lansing), Japánban (RIKEN, Saitama) és Kínában (IMP, Lanzhou).

A szeparációs idő ezekben a berendezésekben nagyon rövid (<100 ns). A radioaktív nyalábokkal dolgozó berendezésekről és a fejlesztési irányokról részletes információ található a *Bennett és mtsai* [2000] által összeállított NuPECC-tanulmányban.

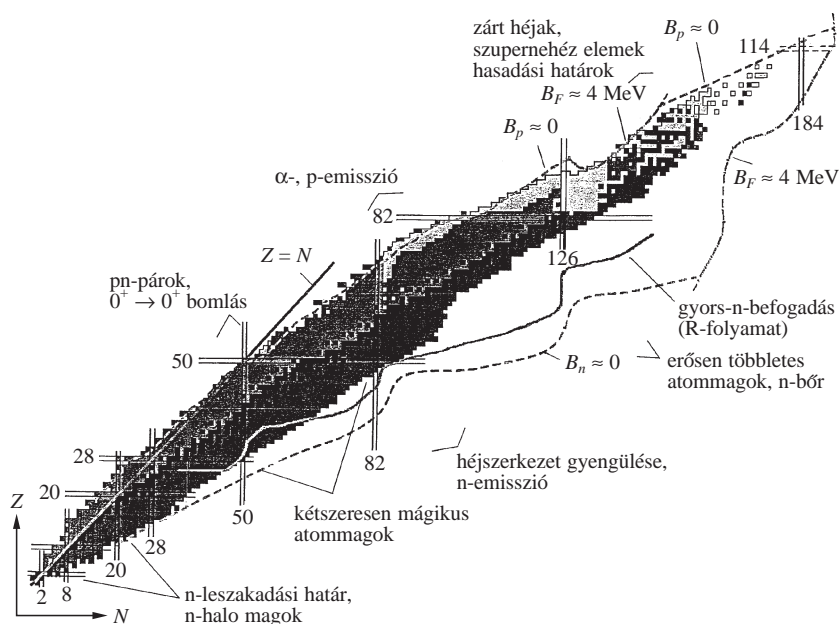
Elektrongyorsítók

Az 1980-as és 90-es években *elektrongyorsítókat* is kiterjedten használtak magszerkezet-kutatásra. A leptonok nem vesznek részt az erős kölcsönhatásban, ugyanakkor érzékenyek a nukleáris, hadron, kvark és gluon sajátságokra. Az elektromágneses és gyenge kölcsönhatások törvényei jól ismertek, és így ezen elméletek keretében könnyebb az atommagok és hadronok sajátságait tanulmányozni. Viszonylag alacsony impulzusátadás ($<0,1$ GeV/c) mellett az atommag elektromos és mágneses sajátságai tanulmányozhatók. Nagyobb átadott impulzus esetén az atommagon belül nukleonok és mezonok vizsgálhatók. Nagyenergiájú ($>0,5$ GeV) elektronok szóródásának precíziós vizsgálata lehetővé teszi a protonpályák térbeli eloszlásának vizsgálatát nehéz magokban. (e,e'p) reakciókkal vizsgálható a protonok impulzuseloszlása az egyes pályákon. Az izovektor mágneses alakfaktor mérésével információt nyerhetünk az atommagokban fellépő mezonáramokra vonatkozóan. >2 GeV/c impulzusátadásnál az elektronok közvetlenül a hadronok elemi összetevőivel lépnek kölcsönhatásba (kvarkok, gluonok).

Mindezen energiatartományokban már rendelkezésre állnak elektrongyorsítók. Ezek közül egyesek Európában vannak: DAΦNE (nagy luminozitású e^-e^+ ütközőnyalábok 1 GeV tömegközépponti energiával, Φ-gyár) Frascati, Olaszország; DESY (*Deutsches Elektronen-Synchrotron*), HERA (*Hadron-Electron Ring Accelerator*), elektronvagy pozitrongyorsítás 27,5 GeV-ig, protongyorsítás 920 GeV-ig, elektron/pozitron – proton tárológyűrű, Hamburg, Németország; MAMI (*Mainz Microtron*) elektrongyorsítás 855 MeV-ig; MAX Laboratórium, elektrongyorsítás 95 MeV, Lund, Svédország.

Mérőberendezések

Az 1970-es évek végén megjelentek a 4π *gamma-detektorrendszerek*, majd ettől kezdve hatalmas fejlődésen mentek keresztül. Szegmentált Ge-detektorok (Compton-háttér lenyomásával) forradalmi javulást hoztak a reakciócsatornaszelekcióban, a diszkrét és folytonos gammasugár-spektroszkópiában (TESSA, GAMMASPHERE, MINIBALL, EXOGAM, MARS, EUROBALL stb. berendezések Európában és az USA-ban). Az egyik legnagyobb berendezés a 4π EUROBALL, amelynek $\sim 10\%$ a teljes fotocsúcs-hatásfoka, nagyon jó feloldás és gammasugár-multiplacitás mellett. További jelentős fejlődés várható az elektronikusan szegmentált Ge-detektorok és a digitalizált elektronika alkalmazásától. A töltött részecske, neutron és elektron félvezető-detektorok és -spektrométerek is hatalmas fejlődésen mentek át.



2. ábra. Az atommagok vizsgálata távol a stabilitási sávától. Rövid áttekintés a fontosabb kutatási irányokról. Z az atommagok rendszáma, N a neutronszáma. A stabil magokat fekete négyzetek jelölik. A lépcsőzetes vonalakkal határolt és sátrózott terület az ismert izotópok tartományát mutatja. A $B_p \sim 0$ és $B_n \sim 0$ görbék a proton-, illetve neutronleszakadási határok. B_f a hasadáshoz szükséges gerjesztési energiát jelöli.

Hideg atommagok

A hideg atommagok vizsgálata precíziós berendezésekkel még most is lényeges új információt szolgáltat. Példaként a Penning-ioncsapdát említhetjük, amely lehetőséget ad *nagy pontosságú tömegmeghatározásra*. Az ionok ciklotronfrekvenciájának mérése lehetővé tette, hogy különbséget tegyünk a ^{84}Rb alap- és izomérállapotú tömege között [$T_{1/2}$ (alap) = 32,3 nap, $T_{1/2}$ (izomér) = 20 min] [Moore és mtsai 1990]. A tömegkülönbség $464 \pm 7 \text{ keV}/c^2$. E teljesítmény új korszak bekövetkezését jelenti a tömegspektrometriában. A Penning-csapdában való direkt tömegméréssel rendkívüli pontosság érhető el: stabil magoknál $\Delta m/m \approx 10^{-10}$. Az ISOLTRAP módszerek lehetővé teszik majdnem minden atommag vizsgálatát, melyek felezési ideje $> 0,1 \text{ s}$.

Elektronnyaláb hűtésével ellátott tárológyűrűk és repülésidő-spektrométerek is nagyon hatékony eszközök a magtömeg mérésére. E módszerekkel igen sok atommag tanulmányozható egész a nukleon leszakadási határokig (*drip lines*). A pontos tömegmérések nagyon fontosak, mivel a jelenlegi tömegformulák nagy eltéréseket mutatnak az erősen neutronhiányos vagy -többletes atommagok adatainak megjóslásában.

Az on-line izotópszeparátor mellé telepített komplex rendszerek (atommagok orientálása, hiperfinom optikai és lézerspektroszkópiai berendezések stb.) lehetőséget adnak az *atommag-töltéssugár*, *spin*, *elektromos kvadrupól* és *mágneses dipólnyomaték* méréseire széles magtartományokban. Nagy bombázóenergiáknál a reakciók hatáskeresztmetszetének mérésével vizsgálhatók *atommag-tömegsugarak* és *neutronbőr-effektusok*.

A radioaktív nyalábokkal létrehozott egy- és kétnukleon-átadással zajló reakciók, a rugalmas és rugalmatlan

szóródások és a Coulomb-gerjesztés igen hatékony módszerek, amelyek értékes információt szolgáltatnak az egzotikus atommagok alap- és alacsonyban fekvő gerjesztett állapotairól. Vizsgálható a bombázó részecske térbeli kiterjedése, a neutron- és protoneloszlás sugara, a neutronbőr, a kölcsönhatási potenciál, a kollektivitás fokozatos kialakulása atommagokban, az egyrészecskés nívórendszer természete, párkorrelációk, izomér állapotok, *proton- és neutronhalok* stb. Mindez igen sok atommagnál, távol a stabilitási sávától is.

Az $(e, e'p)$ és $(e, e'pp)$ reakciók lehetőséget adnak a nukleonpárok közötti rövid hatótávolságú korreláció direkt vizsgálatára. Az utóbbi reakciónál egyértelműen észlelték a két korrelált proton emisszióját [Kester és mtsai 1993].

Tárológyűrűkben vizsgálható a fordított elektronbefogás jelensége. Ez erősen ionizált atomokban lép fel, úgy

hogy az atommag β^- -részecskét bocsát ki atomi kötött állapotba. A GSI-ben (Darmstadt) sikerül teljesen ionizált ^{187}Re atom β^- -bomlását megfigyelni kötött állapotba.

A sokdetektoros γ -sugár-mérőrendszerek sikeresen alkalmazhatók hideg atommagok vizsgálatára is.

Atommagok távol a stabilitási sávától

Közéltől 6000 atommag létezik kötött állapotban a proton és neutronleszakadási (*drip*) vonalak között, de kísérleti információnk csak körülbelül 2830-ról van (beleértve a kb. 260 stabil atommagot is). Lásd a 2. ábrát.

Az *ismert elemek határát* intenzív neutronnyalábokkal és radioaktív céltárgyakon létrehozott (α, n) reakciókkal $Z = 101$, mendeleviumig, nehézionnyalábokkal $Z = 112$ -ig sikerült kiterjeszteni. Előzetes kísérleti eredmények mutatják a $Z = 114$ és 118 elemek létezését is. A vizsgálatokat folytatják még nehezebb elemek előállítására, $Z = 114$ – 118 és $N = 178$ – 184 körül. Erős zárt protonhéjffektus jósolható meg $Z = 126$ -nál.

Intenzív neutrongazdag radioaktív nyalábok, kombinálva neutrongazdag céltárgyakkal, perspektívát nyújtanak az ismert elemek határának további kiterjesztésére. Mindazonáltal a nehézségek igen nagyok, mivel a reakció-hatáskeresztmetszetek rendkívül kicsik ($n\text{ barn} \rightarrow p\text{ barn}$).

A jelenlegi gyorsítókkal előállíthatók *erősen neutronhiányos atommagok* a proton leszakadási görbéje környékén, sőt még azon túl is. A $Z = N$ és szomszédos atommagok vizsgálata $A = 100$ -ig információt adhat az izospin szerepéről, a tükrömágról, a szupermegengedett béta-bomlásról, proton-neutron párkorrelációkról, egzotikus magalakokról (szuper-, hiper-, oktupól-deformált állapotokról, háromtengelyű deformációról stb.).

Lehet vizsgálni az atommagokat a protonleszakadási görbén túl is, ahol kvázistacionárius állapotban létezhetnek. Ezek alapállapotból protonemitterek, de a bomlás a potenciálfalon át alagúteffektussal történik, véges valószínűséggel.

A könnyű, erősen neutrontöbbletes atommagokban (pl. ^8He -, ^{11}Li -, és ^{14}Be -ben) vizsgálhatók a majdnem tiszta neutronanyag sajátosságai. Kiderült, hogy sok atommagban, például a ^6He -, ^{11}Li -, ^{12}Be -, ^{14}Be -, és ^{17}B -ban az utolsó két neutron rendkívül lazán kötött, és ezekben neutronhalo alakult ki. A halo átmérője sokszorosan nagyobb, mint a törzsé, lásd [Hansen és mtsai 1995]. A két haloneutron a ^{11}Li -ban lágy elektromos dipóloszcillációt végezhet. A nukleonok gyenge kötése a leszakadási görbe közelében a magfelület nagy diffúzióját eredményezi és a legkülső neutronok nagy térbeni kiterjedését.

A protonokra vagy neutronokra ható potenciál távol a stabilitási sávtól egész más lehet, mint annak közelében. A neutrongazdag atommagok szerkezetének vizsgálata egyike a jelenlegi magszerkezeti kutatások fontos témáinak. Várható például, hogy az erősen neutrontöbbletes atommagok felületén neutronbőr képződik.

Kiss és mtsai [1987] megfigyeltek diszkrét, nem kötött állapotokat a $^{165}\text{Ho}+^{14}\text{N}$ ütközésben 490 MeV nitrogénion-energiánál. A neutronspektrumot koincidenzában detektálták a nehézion-ütközés fragmenseivel. A neutronbomlás a könnyű fragmens egy jól ismert gerjesztett állapotából történik.

Távol a stabilitási sávtól kétszeresen mágiikus atommagokat is előállítottak (^{28}Ni , ^{100}Sn , ^{132}Sn). Ezek és szomszédai vizsgálata értékes információt szolgáltat az egyrészeske-energiákra és a maradék kölcsönhatásra, amelyek alapvető fontosságúak a környező atommagok héjmodellel történő leírásához. Az inverz kinematikában (egzotikus nyaláb, stabil és esetleg polarizált céltárgy) végrehajtott egyrészeskes transzferreakciók kitűnő lehetőséget nyújtanak a héjszerkezet széles tartományokban való vizsgálatához.

A radioaktív ionnyalábbal működő berendezések lehetővé teszik hosszú izotópláncok vizsgálatát. Ilyen módon a *kollektivitás kialakulására* is fény derülhet. Váratlanul erős deformációt észleltek a $Z = N = 38$ környékén levő atommagoknál (ld. [Möller és mtsai 1995]). A félmágiikus $^{32}_{12}\text{Mg}$ atommag szuperdeformáltnak bizonyult. Terasaki és mtsai [1997] által végzett Hartree-Fock-Bogoljubov-típusú számítások mutatják, hogy a héjszerkezetben lévő rés eltűnik a Mg-izotópoknál. A $^{36,38,40}_{12}\text{Mg}$ atommagokban az alapállapotok erősen deformáltak, és a deformáció különböző protonokra, illetve neutronokra. Az instabil atommagok Coulomb-gerjesztésével nívók élettartama és kollektív vibrációs állapotok vizsgálhatók. Rendkívül változatos magalakok előállítása várható. Az $N = 28$ héjlezáródás gyengülését a neutrongazdag $S \rightarrow \text{Ar}$ atommagoknál is megfigyelték [Sobler és mtsai 2000].

Távol a stabilitási sávtól számos, nem hagyományos bomlásmód is tanulmányozható: *protonkibocsátás alapállapotból, késleltetett p-, α -, n-emisszió, hasadás alap- és gerjesztett állapotokból*. Proton-radioaktivitást észleltek a $Z = 51-55$ és $69-83$ tartományokban. Nehéz atommagok,

például ^{14}C , ^{24}Ne stb. emisszióját (csomó-radioaktivitást) is sikerült kísérletileg kimutatni (a csomó-radioaktivitás elméletével kapcsolatban ld. Lovas és mtsai [1998] összefoglaló közleményét).

A radioaktív részecskenyalábokkal végzett kísérletek perspektíváit részletesen elemzi Bennett és mtsai [2000] tanulmánya.

Nagyspinű állapotok

Nehézionnyalábokkal lehetőség nyílik igen nagy ($\geq 100 \hbar$) impulzusnyomaték átadására. Noha a hasadás határt szab a nagyspinű állapotoknak, kísérletileg észleltek $\sim 70 \hbar$ impulzusnyomatékú állapotot, például ^{149}Gd -nál (ld. Nolan [1993] összefoglaló munkáját). A nagyspinű állapotok vizsgálata sok érdekes jelenség felfedezéséhez vezetett. Néhányat felsorolunk közülük.

- A *visszahajlás (back-bending) észlelése*, azaz a tehetetlenségi nyomaték hirtelen megváltozása növekvő rotációs sebesség mellett. Az effektust egy (vagy több) nukleon impulzusnyomatékának a rotációs tengely irányába való hirtelen beállása okozza.

- A *szupravezető típusú párkorreláció feltörése* növekvő rotációs frekvenciánál. Ez a változás rendszerint fokozatos. Először a nagy j -vel rendelkező állapotok orientálódnak, a többiek később. A Coriolis-kölcsönhatás Hamilton-operátora arányos az impulzusnyomatékkal (j).

- *Atommag szuperdeformációjának észlelése* [Twin, Nyakó és mtsai 1986]. Szuperdeformált állapotokban a kvadrupóldeformáció igen nagy, az ellipszoid tengelyarányai rendszerint 3:2:2 és 2:1:1 között vannak. Az erős centrifugális erő stabilizálhatja a szuperdeformált állapotokat még alacsony gerjesztési energiánál is. Az 1990-es évek második felében már több mint 170 szuperdeformált sáv volt ismeretes különböző tartományokban (^{16}O , $^{40,42}\text{Ca}$, $A \approx 80, 150, 190$). A *hiperdeformált állapotok* (3:1:1 tengelyarány) vizsgálata is intenzíven folytatódik. Több α -részecskéből álló láncok mutatják a rendkívül egzotikus alakok létét, ezeket magreakciókban rezonanciaként észlelték.

- Azt tapasztalták, hogy a *magalakok igen gazdag változatosságot mutatnak* a neutronsám és a spin függvényében. Például a Dy-izotópokban megnyúlt, háromtengelyű és belapult alakú állapotokat azonosítottak, amelyekben az egyes nukleonpályák orientálva vannak [Henning 1983]. Annak vizsgálata, hogy növekvő spin mellett hogyan viselkedik az atommag, a jelenlegi magszerkezet-kutatás egyik izgalmas témája. Nagy háromtengelyű deformációt észleltek, például a Lu-izotópokban.

- Bizonyos atommagokban *parallel pozitív és negatív paritású sávokat észleltek*, például a $^{218,220,222}\text{Rn}$ és $^{222,224,226,228,230}\text{Ra}$ -ban. Butler és mtsai [1998] szerint a 228-nál kisebb tömegszámú Ra-izotópoknak körte alakú deformációja van, míg a Rn-izotópok oktapól vibrátorként viselkednek.

- Bizonyos könnyű Pb és Bi atommagokban *kiemelten erős mágneses dipólátmeneteket észleltek*. Ez egy új típusú „mágneses rotáció” megnyilvánulása.

– Azonos szuperdeformált állapotok (sávok) észlelése a szomszédos atommagokban, amelyek néhány keV-en belül ugyanolyan kvantumenergiájú γ -sugarakat bocsátanak ki. Azonos sávokat észleltek például a ^{151}Tb és ^{152}Dy -ban [Byrsky és mtsai 1990]. A sávokban a dinamikus tehetlenségi nyomatók is azonosak lehetnek. Ilyen konfigurációk stabilitása az egyrészeszkés mozgás egy új csatolási formájára utal.

– Nagy K kvantumszámmal rendelkező izomér állapotok észlelése, az állapotok bomlásajátságainak vizsgálata.

– A többfononos vibráció és multifononos állapotok fragmentációjának tanulmányozása deformált atommagokban.

– Atommagok molekuláris állapotainak vizsgálata. Ezekről például a nehézion-ütközésekben tapasztalható rezonanciák adnak felvilágosítást. A $^{24}\text{Mg} + ^{24}\text{Mg}$ és hasonló rendszerek éles rezonanciákat mutatnak nagy gerjesztési energiáknál, ami jelzi az atommagok molekuláris rendszereinek létrejöttét.

A többdetektoros gamma-spektrométerek és a radioaktív bombázó nyalábok hatékonyan segíthetik a nagy-spinű állapotok vizsgálatát. Például a háromszoros, négy-szeres stb. incidenciák felhasználása a jel/zaj viszonyt lényegesen javítja.

Forró atommagok

Növekvő gerjesztési energiáknál sok érdekes jelenség vizsgálható.

– Ezek egyike a Gamow–Teller-rezonancia (p, n) reakciókban. Amikor a (p, n) folyamatban a céltárgy atommagbéli neutronját kicserélik protonra, izobáranalóg-állapotok jönnek létre. A reakció lejátszódhat spin-átbillenés nélkül és átbillenéssel. Az előbbi tisztán Fermi-átmenetnek felel meg a β -bomlásban, míg az utóbbi Gamow–Teller ($G-T$)-átmenetnek. A $G-T$ -rezonanciaerősség meghatározott állapot(ok)ra koncentrálódhat, és a rezonanciaerősség kvantitatív összefüggésben van a β -bomlás $G-T$ -erősségével. Ez egy fajtája az M1 óriásrezonanciának.

– Az atommagok M1 rezonanciájának, a neutronok és protonok egymáshoz viszonyított kisszögű, „ollo” típusú vibrációjának vizsgálata szintén érdekes témája a magszerkezet-vizsgálatoknak. Mágneses dipólrezonanciát észleltek sok ritkaföld-atommagban rugalmatlan proton-, elektron- és foton-szórásban, körülbelül 3 MeV gerjesztési energiáknál.

– Néhányszor 10 MeV gerjesztési energiánál sokféle óriásrezonancia jelenhet meg. Az izoskalár, illetve izovektor kollektív gerjesztésekben a protonok és neutronok az atommagban fázisban, illetve fázison kívül mozognak. Az izoskalár óriás monopól- és kvadrupól-, valamint az izovektor dipólrezonanciák viszonylag jól ismertek, de több kísérleti adat szükséges az izovektor monopól- és kvadrupólgerjesztések megértéséhez. A monopól óriásrezonancia információt szolgáltat a maganyag kompresszibilitására. A kompresszibilitás vizsgálata a maghőmérséklet függvényében nagyon fontos mind magfizikai, mind asztrofizikai szempontból.

– Nagy gerjesztési energiáknál az atommag kaotikus sajátságokat mutathat. Ez például úgy tanulmányozható, hogy mérjük a távolságot az azonos kvantumszámhoz tartozó, egymás után következő nívók között. Az (n, γ) reakciók és proton-rezonanciaszórás kísérletek információt szolgáltatnak a magasan fekvő nívókról. A kvantumkáosz egyik jele, hogy a nívók „taszítják” egymást (az eloszlásuk kezd egyenletes lenni). A rezonancianívók energiájára vonatkozó adatok világosan mutatják a kaotikus viselkedés megjelenését az atommagokban [Haq és mtsai 1982]. A rend \rightarrow káosz átmenet további vizsgálata aktuális téma. Különösen fontos annak az energiának meghatározása, ahol megtörténik az átmenet a rendből a káoszba. A rotációs átmenetek hosszú lánci deformált atommagokban nagyon alkalmasak ilyen vizsgálatokra. A kísérleti adatok mutatják, hogy a rotációs erősségfüggvény a magasan fekvő állapotokra fragmentálódik, az atommag pörgésénél a rotációs frekvenciának bizonyos véges eloszlása van, a rotációt a termikus fluktuáció befolyásolja.

– A hadronok sajátságainak vizsgálata választ adhat arra a sarkalatos kérdésre, hogy *hogyan lehet megérteni a nukleon–nukleon kölcsönhatást kvark–gluon alapon.*

– A maganyag különböző fázisállapotainak vizsgálata egyike korunk magfizikájának legfontosabb problémáinak. A nehézion-ütközések lehetőséget adnak az atommag erőteljes felmelegítésére és összenyomására.

A Fermi-energia közelében ($\sim 100 A \cdot \text{MeV}$) vizsgálható a maganyag fázisátmenete, amely analógiát mutat a klasszikus folyadék \rightarrow gáz átmenettel.

Relativisztikus ($\sim 1 A \cdot \text{GeV}$) nehézion-energiáknál vizsgálható a nagyon forró és sűrű maganyag állapot-egyenlete, ami megadhatja a kulcsot például a nóva-, illetve szupernóva-robbanások megértéséhez is. Alapvetően fontos a maganyag kompresszibilitásának ismerete. Ez a mennyiség szabja meg a maganyag ellenálló-képességét a gravitációs nyomással szemben, és hatással van arra, hogy mikor omlik össze a neutroncsillag fekete lyukká. A monopól óriásrezonanciából – az alapállapot közelében – meghatározott kompresszibilitás azonban más lehet, mint a nagyon forró és nagyon sűrű maganyag kompresszibilitása. Extrém feltételek mellett a barionok és mezonok sajátságai módosulhatnak, ezért új kísérleti adatokra van szükség. Relativisztikus nehézion-energiáknál vizsgálható a multifragmentáció jelensége is.

Ultrarelativisztikus energiáknál ($\sim A \cdot \text{TeV}$) tanulmányozható, hogy az elemi részecskék mikroszkopikus sajátságai alapján hogyan lehet megérteni kollektív jelenségeket és a makroszkopikus maganyag sajátságait. A kvantumszindinamikai (QCD) elmélet $T_C \approx 170 \text{ MeV}$ kritikus hőmérsékletnél ($\sim 1 \text{ GeV/fm}^3$ energiasűrűségnél) átmenetet jósol meg kvark–gluon plazmába.

Ultrarelativisztikus nehézion-ütközések vizsgálhatók Európában a CERN-SPS gyorsítónál. 2007 körül várható a CERN új gyorsítójának, az LHC-nek beindulása, ami lehetőséget ad például Pb–Pb atommagok ütközésének vizsgálatára 5,5 TeV/nukleon tömegközépponti energiánál. Ez körülbelül 30-szoros ugrást jelent az elérhető relativisztikus nehézion-ütközési energiában. Az USA-ban, a Brookhaveni Nemzeti Laboratóriumban működik relativisztikus nehézion-ütközési gyorsító.

Hipermagok

A magszerkezet-kutatás egyik igen perspektivikus iránya a hipermagok vizsgálata. (K^-, π^-) , $(e, e'K)$ és más reakciókkal lehetőség nyílik hipermagok előállítására, amelyekben egy neutron ($m_n = 940 \text{ MeV}/c^2$) egy kicsivel nehezebb Λ ($m_\Lambda = 1116 \text{ MeV}/c^2$) vagy Σ^0 ($m_{\Sigma^0} = 1193 \text{ MeV}/c^2$) hiperonnal van helyettesítve. A hiperon egy belső maghéjon is mozoghat, ezt nem tiltja a Pauli-elv. Ilyen módon a belső héjak és a nukleon–hiperon kölcsönhatás tanulmányozható.

E vizsgálatok még kezdeti stádiumban vannak, de már van néhány sokat ígérő eredmény. Például a mélyen kötött Λ -pályák energianívóit lemérték több magnál egészen a ^{208}Pb -ig [Hasegawa és mtsai 1996], és észlelték a ^4He Σ -hipermag kötött állapotait is [Hayano és mtsai 1989]. Néhány eredményről a 3. ábra ad tájékoztatást.

Európában a FINUDA kísérlet a DAΦNE gyorsító mellett (Frascati, Olaszország), a HESR program a GSI-ben (Darmstadt, Németország), valamint a COSY (Jülich, Németország) gyorsító melletti programok lényeges előrelépést ígérnek a közeljövőben a hipermagok spektroszkópiájában. Az USA-ban a Brookhaveni Nemzeti Laboratóriumban és a Jefferson Laboratóriumban (Virginia), Japánban a Japán Hadrongyárban szintén jelentős programok futnak a hipermagok vizsgálatával kapcsolatban.

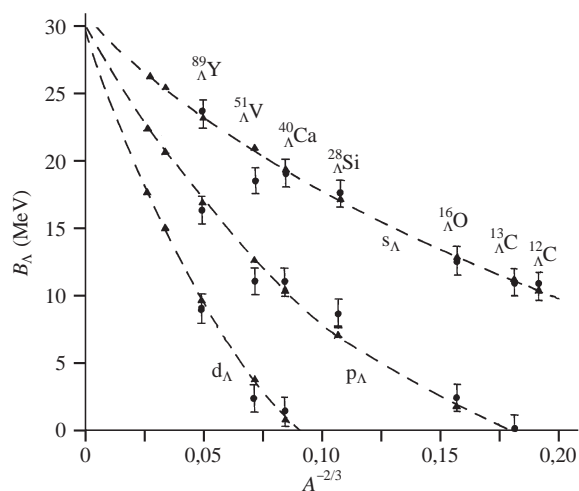
Nukleáris asztrofizika

A magfizikai ismereteink fejlődése nagyban elősegíti az asztrofizika számos kulcsfontosságú problémájának megoldását. A következőkben a teljesség igénye nélkül felsorolunk néhány témakört, ahol a közeljövőben jelentős előrelépés várható.

A hidrosztatikus égési folyamatok pontosabb megértéséhez alapvetően fontos számos magreakció hatáskeresztmetszetének meghatározása a Gamow-csúcsnak megfelelő energianál. A Gran Sassóban lévő LUNA föld alatti laboratóriumban például sikerült különlegesen alacsony háttér mellett meghatározni a $^3\text{He}(^3\text{He}, 2p)^4\text{He}$ és $^2\text{H}(p, \gamma)^3\text{He}$ reakciók hozamát (asztrofizikai S -faktorát) olyan energianál, amely a Nap belsejében uralkodik. A föld alá telepített 400 kV-os gyorsítóval vizsgálják a $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$ reakció hozamát is, ami fontos a CNO ciklusban termelt neutrínófluxus meghatározásához.

Nagyenergiájú nehézionnyalábokkal új adatokkal gazdagíthatók a maganyag állapotegyenletével kapcsolatos ismereteink. Ezek viszont lényegesek a *super-nóva-robbanások*, a *neutroncsillagok* fizikájának megértéséhez.

A nukleoszintézis s -folyamatának pontos megértéséhez nagyszámú, új (n, γ) , (n, p) és (n, α) hatáskeresztmetszet-adatra van szükség, széles tömegszám-tartományban, $10 < kT < 50 \text{ keV}$ tipikus neutronenergiáknál. Ehhez nagy neutronfluxusok és fejlett neutron-repülésiidőt mérő berendezések szükségesek, amelyek például a CERN-ben rendelkezésre állnak.



3. ábra. A Λ hiperon kötési energiája (B_Λ) különböző maghéjakon a tömegszám (A) függvényében. A szaggatott vonalakkal összekötött háromszögek elméleti eredmények. [Chrien, Dover 1989] alapján.

A nukleáris asztrofizikának különösen sokat adhat a stabilitási sávtól távol eső atommagok előállítása és vizsgálata intenzív radioaktív nyalábokkal (pl. a REX-ISOLDE, HIE-ISOLDE (CERN), EURISOL (GSI), SPIRAL2 (GANIL), SPES (LNL, Legnaro) stb. programok). Az *r-folyamatban* történő nukleoszintézis teljesebb megértéséhez alapvetően fontos az erősen neutrontöbbletes atommagok β -bomlási felezési idejének, tömegének és neutronbefogási hatáskeresztmetszetének ismerete. Nagyenergiájú nehézionnyalábokkal létrehozott hasadási és fragmentációs reakciókkal új neutrontöbbletes atommagok százai állíthatók elő. Tömegük lemérhető például tárológyűrűkben vagy más módszerekkel. A neutronbefogási hatáskeresztmetszetekre is nyerhetünk információt közvetve, radioaktív nyalábokkal létrehozott (d, p) reakciók segítségével. Számos laboratóriumban elérhető lesz pár MeV/nukleon energiára gyorsított radioaktív nyaláb a reakciók létrehozására.

E néhány kiragadott példán kívül sok más területen is várható lényeges előrelépés. Ezekkel kapcsolatban utalunk Corvisiero és mtsai tanulmányára, amely a *Harakeb* és mtsai [2004] által szerkesztett NuPECC-közleményben található.

Kvantumkromodinamika

A Standard Modell lehetővé teszi, hogy az elektromágneses és gyenge, valamint az erős kölcsönhatás bizonyos sajátosságait egységes keretben lehessen tárgyalni. A magfizikai kutatások alapvető célja, hogy a Standard Modelltől kiindulva, azt meghaladva teljesebben meg lehessen érteni a magerőket és az alacsonyenergiájú magfizika, a mag szerkezet jelenségeit is. Ez egy hosszú távú program, amely mind kísérleti, mind elméleti téren jelentős erőfeszítést igényel. A programhoz lényeges hozzájárulást ad az egzotikus, gyorsított nyalábok megjelenése és a detektálási, mérési módszerek folyamatban lévő fejlesztése. A számítógép-kapacitás növekedése ma már lehetővé teszi, hogy $A \sim 12$ tömegszámig két-, illetve háromtest-erőkből kiinduló mikroszkopikus számításokat lehessen végezni.

Távolabbi cél olyan modell megtalálása, amely lehetőséget ad minden fizikai folyamat leírására (beleértve a gravitációs kölcsönhatást is), fogalmilag kielégítő, egységes keretben.

Alapvető kölcsönhatások

Az alapvető kölcsönhatások és szimmetriák vizsgálata is sokat profitálhat a magfizikai gyorsítási és mérési módszerek fejlődéséből. Folyamatban vannak a következő kutatások:

- A neutrínó sajátosságainak vizsgálata (tömeg, oszcilláció stb.).
- Az invarianciaelvek érvényességének (sérülésének) vizsgálata (időinverzió, CP (egyesített töltés és paritás)-invariancia sérülése, molekulák, atomok és nukleonok elektromos dipólnyomatékának mérése, elektron–neutrínó korreláció vizsgálata β -bomlásban stb.). A CP-sértés fizikai alapjainak megértése különösen fontos, mivel közvetlen kapcsolatban van az Univerzum észlelt anyag–antianyag aszimmetriájával.
- A fizika alapvető állandóinak pontosabb meghatározása.
- A gravitációs kölcsönhatás kvantumos leírása.

Függelék

Rövid áttekintés a nagyobb európai iongyorsító berendezésekről (intézmény neve, hely, gyorsító, gyorsított ionok, főbb magfizikai kutatási témák).

CERN, Genf, Svájc. Szuper Proton Szinkrotron (SPS), proton 450 GeV-ig; O-, S-, Pb-ionok 200 GeV/u ($u = \text{tömegegység}$); REX-ISOLDE-hoz PS belövő gyorsító, 1,4 GeV proton. Részecskefizika, atommagok távol a stabilitási görbétől.

GSI, Darmstadt, Németország. Lineáris gyorsító UNILAC, $H \rightarrow U$ ionok 20 MeV/u-ig; nehézion-szinkrotron SIS, $H \rightarrow U$ ionok 2 GeV/u-ig; nehézion-tárológyűrű ESR, $H \rightarrow U$ ionok 0,8 GeV/u-ig; pionnyalábok. Témák: magreakciók, maganyag állapotegyenlete, hadronanyag, szupernehéz elemek, egzotikus magok távol a stabilitási sávától, mag–atomháj kölcsönhatások.

GANIL, Caen, Franciaország. Két belövő és két szeparált szektorú ciklotron kaskád üzemben plusz egy nagy akceptanciájú CIME ciklotron radioaktív ionok gyorsítására. Stabil C-ionok (95 MeV/u-ig) $\rightarrow U$ -ionok (24 MeV/u-ig); radioaktív nyalábok 20–80 MeV/u energiatartományban, röptében való szeparálással (SISSI berendezés), gyorsított radioaktív nyalábok <25 MeV/u-ig (SPIRAL berendezés). Témák: atommag-dinamika, forró atommagok, óriásrezonancia, egzotikus magok, ütközések másodlagos nyalábokkal.

LNL, Legnaro, Olaszország. Tandem–ALPI gyorsítókomplexum, 16 MV-os elektrosztatikus tandem gyorsítóval és szupravezető lineáris utángyorsítóval. Nehéz ionok $A < 100$, ekvivalens feszültség 25 MeV/q. Témák: magszerkezet nagy spineknél, szuperdeformáció, egzotikus magok, nehézion-ütközések, reakciók, óriásrezonanciák, magreakciók könnyű ionokkal és neutronokkal.

LNS, Catania, Olaszország. Elektrosztatikus 16 MV maximális terminál-feszültségű tandem, $Li \rightarrow U$ -ionok; $K = 800$ szupravezető ciklotron, nehéz és könnyű ionok, 10–70 MeV/u energia. Témák: a könnyű magok szerkezete, reakciómechanizmus, nagyspinű állapotok, hasadás, óriásrezonanciák, fragmentáció, állapotegyenlet, fázisátalakulás a maganyagban.

KVI, Groningen, Hollandia. $K = 600$ szupravezető ciklotron AGOR, polarizált proton 190 MeV-ig, deuteron 180 MeV-ig; nehézionok $6 \rightarrow 90$ MeV/u-ig. Témák: magszerkezet, óriásrezonancia, magok egzotikus körülmények között, nehézion-reakciók dinamikája, maganyag, nukleon–nukleon fékezési sugárzás.

FZJ, Jülich, Németország. Cooler Synchrotron (COSY) belövő ciklotronnal. p- és d-nyalábok 3,65 GeV-ig, tárológyűrű, a nyaláb hűtése elektronnyalábbal. Témák: közepes energiájú atommag- és hadronfizika.

JYFL, Jyväskylä, Finnország. AVF $K = 130$ ciklotron ECR-ionforrással. Könnyű és nehézionok. Témák: atommagok és bomlásaik vizsgálata extrém spin, izospin és gerjesztési energiáknál. Nehézion-reakciók dinamikája.

CRC, Louvain-la-Neuve, Belgium. Három CYCLONE ciklotron. $H \rightarrow Xe$ -ionok, például ^{12}C -ionok 25 MeV/u-ig, ^{40}Ar -ionok 10 MeV/u-ig. Utángyorsított radioaktív ionok 10 MeV/u-ig. Témák: magfizika és nukleáris asztrofizika radioaktív nyalábokkal. Atommagok távol a stabilitási sávától. Nehézion-reakciók mechanizmusa. Gyors neutronok kölcsönhatásai.

ISL, Uppsala, Svédország. Gustaf Werner-ciklotron és CELSIUS tárológyűrű elektronokkal való nyalábhűtéssel. p 1,36 GeV-ig, könnyű ionok $A < 20$, 470 MeV/u-ig. Témák: közepes energiájú magreakciók, neutronreakciók, mezonkeltés, mezonok ritka bomlása, nehézion-reakciók.

Egyesített Atommagkutató Intézet (EAD), Dubna, Oroszország. U-400 és U-400M nehézion-ciklotronok, $K = 450$, $K = 630$. Témák: nehézion-reakciók, maghasadás, szupernehéz elemek, erősen neutron-többletes könnyű izotópok.

Nehézion Laboratórium, Varsó, Lengyelország. $K = 160$ izokrónciklotron, ECR-ionforrás, $He \rightarrow Ar$ -ionok. Témák: magszerkezet, in-beam spektroszkópia, óriásrezonanciák, Coulomb-gerjesztés, atommagok távol a stabilitási sávától.

Irodalom

Összefoglaló munkák

- BALDO M. et al., 2000: *Computational nuclear physics*, NuPECC Report (CERN-ISOLDE, Genéve)
- BENNETT R. et al., 2000: *Radioactive nuclear beam facilities*, NuPECC Report (CERN-ISOLDE, Genéve)
- FÁI GY., LÉVAI P., 2003: *Az Egyesült Államok magfizikusainak tízéves kutatási terve*, Fiz. Szemle 53/3 117
- GALÉS S. et al., 1998: *International access to nuclear facilities in Europe*, NuPECC Handbook, 4th ed. (ESN, NuPECC, Strasbourg)
- HARAKEH M. et al., eds., 2004: *Nuclear physics in Europe: Highlights and opportunities*, NuPECC Report
- LUNNEY D., PEARSON J.M., THIBAUT C., 2003: *Recent trends in the determination of nuclear masses*, Rev. Mod. Phys. 75 1021
- SCHIFFER J.P. et al., 1999: *Nuclear physics: the core of matter, the fuel of stars*, Nucl. Phys. International 9 No. 3, 4
- VERVIER J. et al., 1997: *Nuclear physics in Europe: highlights and opportunities*, NuPECC report (ESF, NuPECC, Orsay)

Hivatkozások

- BUTLER P.A., COCKS J.F.C., GREENLEES P.T., 1998: Heavy Ion Physics 71
- BYRSKI T. et al., 1990: Phys. Rev. Lett. 64 1650
- CHRIEN R.E., DOVER C.B., 1989: Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 39 113
- HANSEN P.G., JENSEN A.S., JONSON B., 1995: Ann. Rev. Nucl. Part. Phys. 45
- HAQ R.U., PANDEY A., BOHIGAS O., 1982: Phys. Rev. Lett. 48 1086
- HASEGAWA T. et al., 1996: Phys. Rev. C 53 1210
- HAYANO R.S., ISHIKAWA T., IWASAKI M., OUTA H., TAKADA E., TAMURA H., SAKAGUCHI A., AOKI M., YAMAZAKI T., 1989: Phys. Lett. B 231 355
- HENNING W., 1983: Nucl. Phys. A 400 295c
- KESTER L.J.H. et al., 1993: Nucl. Phys. A 553 709c
- KISS Á., DEÁK F., SERES Z., CASKEY G., GALONSKI A., HEILBRONN L., REMINGTON B.A., KASAGI J., 1987: Phys. Lett. B 184 149
- LOVAS R.G., LIOTTA R.J., INSOLIA A., VARGA K., DELION D.S., 1998: Phys. Rep. 294 265
- MOORE R.B., ROULEAU G. (Mainz–CERN Coll.), 1990: Progr. Rep. Foster R. Lab., Dept. Phys., McGill Univ.; MOORE R.B., GULICK S., 1988: Physica Scripta T 22 28
- MÖLLER P., NIX J.R., MYERS W.D., SWIATECKI W.J., 1995: Atomic Data and Nuclear Data Tables 59 185
- NOLAN P.J., 1993: Nucl. Phys. A 553 107c
- SOHLER D. et al., 2000: Int. symp. on exotic nuclear structures, Debrecen, Hungary, Book of abstracts (ATOMKI, Debrecen) p. 40
- TERASAKI J., FLOKARD H., HEENEN P.-H., BONCHE P., 1997: Heavy Ion Physics 6 201
- TWIN P.J., NYAKÓ B. et al., 1986: Phys. Rev. Lett. 57 811